



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

Fundada en 1867

Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil  
Av.12 de Abril s/n Cuenca

## **HORMIGONES CON ESCORIA DE ACERO DE HORNO ELÉCTRICO: PRESTACIONES MECÁNICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS**

Director: Ing. Juan Fernando Zalamea León.

Proyecto de graduación previo  
a la obtención del grado de  
Ingeniero Civil.

Autor:

**Alexis Santiago Vélez Guayasamín.**

Cuenca – Ecuador

2013



## Resumen de la tesis

**Palabras claves:** hormigón, escoria de acero de horno eléctrico.

La tesis “**Hormigones con escoria de acero de horno eléctrico: prestaciones mecánicas, físicas y químicas**”, tiene como objetivo incorporar la escoria de acero en la elaboración de mezclas de hormigón, para evaluar sus prestaciones mecánicas, físicas y químicas, con el afán de reducir, reciclar y reutilizar los desechos industriales provenientes de empresas siderúrgicas. De manera que en un futuro cercano, este inadvertido producto, pueda ser utilizado en el sector de la construcción del Ecuador para obras puntuales las cuales cumplan con las normas y especificaciones técnicas requeridas.

Para llegar a los objetivos propuestos, se ha procedido a dividir la presente tesis en cinco capítulos:

- 1.- Introducción de la tesis.
- 2.- Caracterización de la escoria de acero: mineralógica, química y física.
- 3.- Elaboración de hormigones: diseño y confección de probetas cilíndricas y elementos estructurales.
- 4.- Características del hormigón endurecido: parámetros de resistencias.
- 5.- Conclusiones: fundamentadas en los resultados y diagramas conseguidos a través de los diferentes procesos de ensayo.

Empezando por la introducción, se explicará los antecedentes que ha tenido el uso de restos industriales en los diferentes campos de la construcción; en este caso la escoria siderúrgica que ya en algunos países se utiliza como adición al cemento en la conformación de distintos tipos de hormigones.

Es importante señalar que el alcance y experimentación de la presente tesis permitirá conocer el comportamiento de la escoria de acero como agregado grueso en hormigones, para diferentes diseños de mezcla con la finalidad de obtener el mayor beneficio en cuanto a la resistencia y costo.



Asimismo, el uso de la escoria siderúrgica en hormigones contribuirá a la preservación del medioambiente, debido a que se reducirá el vertido en rellenos sanitarios y también se disminuirá, en parte, la explotación de agregados procedentes de cauces de ríos y/o canteras para la elaboración de hormigones, hechos que justificarían el desarrollo de la presente tesis.

Seguidamente, en el estudio, se ha realizado una breve descripción de la empresa productora ANDEC S.A. y se explica, además, el proceso de producción de la escoria siderúrgica de horno eléctrico.

Posteriormente se realiza una caracterización mineralógica, química y física de la escoria tras un muestreo aleatorio de la misma.

El estudio continúa con la fabricación de hormigones convencionales diseñados para obtener altas resistencias a edades tempranas, los cuales se utilizan para el primer concurso nacional Hormigones de Alta Resistencia organizada por el Instituto Ecuatoriano del Cemento y del hormigón (INECYC). Posteriormente se diseña y construye una viga especial de hormigón de alta resistencia, reforzada con varillas FRP, para la competencia internacional denominada FRP Composites Competition organizada por el American Concrete Institute (ACI), en Minneapolis – EE.UU.

Cumplida la fase anterior, se toman como patrones las dosificaciones de mezclas y la estructura viga-arco mencionados en el párrafo anterior, para elaborar y ensayar los mismos con Hormigones de Escoria de Acero (HEA).

Finalmente se sacan las conclusiones de cada uno de los capítulos estudiados, seguidas de los posibles usos de este inadvertido hormigón, los beneficios del uso de la escoria, los méritos académicos alcanzados y la proposición de futuras investigaciones.



## Abstract

**Keywords:** concrete, steel slag electric furnace.

The project "**Concrete with steel slag of electric furnace: features mechanical, physical and chemical**", aims to incorporate the steel slag in the mix of concrete, in order to evaluate the performance mechanical, physical and chemical ; in an effort to reduce, recycle and reuse industrial waste from steel companies. So in the near future, this inadvertent product can be used in the construction of Ecuador to specific works which meet the required technical standards and specifications.

To reach the objectives, I have divided this thesis into five chapters:

1. Introduction of the thesis.
2. Characterization of Steel Slag: mineralogy, chemistry and physics.
3. Concrete manufacturing: design and confection of cylindrical specimens and structural element.
4. Hardened Concrete Features: resistance parameters.
5. Conclusions based on the results and diagrams, achieved through various test procedures.

Introduction, will explain background that has had use of industrial residues in various fields of construction, in this case, steel slag that in some countries it's being used as an addition for cement in conformation of different types of concrete.

Furthermore, the scope of the study and this thesis allows us to know the behavior of the steel slag as coarse aggregate for different concrete mixtures in order to obtain the highest rate resistance /cost,

In return, use of steel slag in concrete will help to preserve the environment, by reducing the discharge of steel slag in landfills and also will decrease the exploitation



of aggregates from stream side rivers and or quarries, used in the confection of concretes, this justify the present thesis.

Subsequently there has been a brief description by the manufacturing company, ANDEC; that explains the production process of a steel slag on an electric furnace.

Furthermore mineralogy, chemical and physical characterization of the slag was accomplished after a random sampling of the slag a physical and mineralogical evaluation of the same was accomplished.

The study continues with the making of conventional concrete designed to obtain high resistance at early stages, which have been used on the first national contest of high resistance concretes, organized by Instituto Ecuatoriano del Cemento y del hormigón (INECYC). Later designs and builds a special beam of high-strength concrete reinforced with FRP rods for international competition called FRP Composites Competition organized by the American Concrete Institute (ACI) in Minneapolis – USA.

Accomplished previous phase are taken as mixtures dosages patterns and beam-arch structure mentioned in the previous paragraph, to develop and test them with steel slag concrete (HEA).

Finally conclusions are drawn from each of the chapters studied, followed by the possible uses of this inadvertent concrete, the benefits of using slag, made academic merit and proposing future research.



# “HORMIGONES CON ESCORIA DE ACERO DE HORNO ELÉCTRICO: PRESTACIONES MECÁNICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS”

## ÍNDICE GENERAL

Resumen de la tesis .....	2
Abstract .....	4
Índice de tablas .....	9
Agradecimientos.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Antecedentes .....	13
1.2 Alcance .....	14
1.3 Justificación .....	15
1.4 Objetivos.....	15
1.4.1 Objetivo general.....	15
1.4.2 Objetivos específicos .....	15
1.5 Metodología.....	16
2. CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA DE ACERO .....	19
2.1 Descripción de la empresa productora .....	19
2.2 Proceso de producción de la escoria siderúrgica .....	21
2.3 Caracterización mineralógica.....	29
2.4 Caracterización química .....	34
2.5 Caracterización física.....	43
2.5.1 Pesos específicos y absorción .....	44
2.5.2 Resistencia a la abrasión .....	47
2.5.3 Granulometría .....	49
2.5.4 Forma.....	51
2.5.5 Color.....	53
2.5.6 Textura superficial .....	54



3. ELABORACIÓN DE HORMIGONES .....	56
3.1 Caracterización de los materiales .....	56
3.2 Diseño de mezclas .....	62
3.3 Confección de hormigones.....	88
4. CARACTERÍSTICAS DE LOS HORMIGONES ENDURECIDOS HEA Y HAR .....	96
4.1 Resistencia a compresión .....	96
4.1.1 Hormigones convencionales de Alta Resistencia (HAR).....	98
4.1.2 Hormigones con Escoria de Acero (HEA).....	109
4.2 Resistencia a tracción Indirecta.....	114
4.2.1 Hormigones con Escoria de Acero (HEA).....	116
4.3 Módulo de elasticidad.....	118
4.3.1 Hormigones con escoria de acero (HEA).....	119
4.4 Relación de Poisson.....	124
4.4.1 Hormigones con escoria de acero (HEA).....	126
4.4 Elemento estructural.....	126
4.5.1 Viga-Arco realizada con HAR reforzada con FRP .....	128
4.5.2 Viga-Arco realizada con HEA reforzada con FRP .....	139
4.6 Comentarios de Hormigones convencionales de Alta Resistencia (HAR). .....	140
4.7 Comentarios de Hormigones con Escoria de Acero (HEA) .....	142
5. CONCLUSIONES .....	149
5.1 Prestaciones físicas .....	149
5.2 Prestaciones químicas.....	150
5.3 Prestaciones mecánicas.....	152
5.4 Elaboración de HEA.....	154
5.5 Posibles usos del hormigón con escoria de acero.....	154
5.6 Beneficios del uso de la escoria .....	155
5.7 Méritos académicos alcanzados .....	156
5.8 Investigaciones futuras .....	157
BIBLIOGRAFÍA.....	158
ANEXOS .....	162



## Índice de figuras

Figura 1: Horno de arco eléctrico.....	21
Figura 2: Escoriado.....	23
Figura 3: Transporte de escoria.....	25
Figura 4: Descarga de escoria.....	26
Figura 5: Trituración primaria.....	27
Figura 6: Tamizado.....	27
Figura 7: Limpieza del material.....	28
Figura 8: Reciclaje del material.....	29
Figura 9: Estudio mineralógico.....	29
Figura 10: Análisis mineralógico.....	31
Figura 11: Muestras para análisis químico.....	34
Figura 12: Peso de la canasta.....	44
Figura 13: Máquina de los ángeles.....	47
Figura 14: Serie de tamices.....	49
Figura 15: Curva granulométrica escoria.....	51
Figura 16: Color de la escoria.....	53
Figura 17: Textura mixta de la escoria.....	55
Figura 18: Textura áspera de la escoria.....	55
Figura 19: Textura áspera y cavernosa de la escoria.....	55
Figura 20: Curva granulométrica del ripio.....	59
Figura 21: Curva granulométrica de la arena gruesa.....	60
Figura 22: Curva granulométrica arena fina.....	61
Figura 23: Curvas granulométricas de McIntosh y Erntroy 3/8”.....	67
Figura 24: Curvas granulométricas No 4 de Road Note 3/4”.....	68
Figura 25: Curvas granulométricas No 4 de Road Note 1 1/2”.....	68
Figura 26: Ensayo de compresión simple.....	96
Figura 27: Ensayo de tracción indirecta.....	114
Figura 28: Medición de deformaciones.....	118
Figura 29: Elemento viga-arco.....	126
Figura 30: Curvas fuerza-deformación de vigas HAR.....	136
Figura 31: Rotura de vigas 1.....	137
Figura 32: Rotura de vigas 2.....	137
Figura 33: Rotura de vigas 3.....	137



## Índice de tablas

Tabla 1: Análisis mineralógico.....	32
Tabla 2: Requisitos químicos de la palanquilla .....	35
Tabla 3: Análisis químicos de la escoria.....	38
Tabla 4: Composición química de los elementos de la escoria.....	41
Tabla 5: Composición química de los óxidos de la escoria.....	41
Tabla 6: Pesos específicos.....	46
Tabla 7: Ensayo de abrasión.....	48
Tabla 8: Granulometría de la escoria .....	50
Tabla 9: Coeficiente de forma de la escoria .....	52
Tabla 10: Requisitos del cemento.....	57
Tabla 11: Granulometría del ripio .....	58
Tabla 12: Granulometría arena gruesa .....	60
Tabla 13: Granulometría de la arena fina .....	61
Tabla 14: Relación resistencia media y mínima .....	64
Tabla 15: Relación agua/cemento .....	65
Tabla 16: Grados de docilidad .....	66
Tabla 17: Relación de árido / cemento de Road Research Laboratory. Road Note No 4. ..	71



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, VÉLEZ GUAYASAMÍN ALEXIS SANTIAGO, autor de la tesis HORMIGONES CON ESCORIA DE ACERO DE HORNO ELÉCTRICO: PRESTACIONES MECÁNICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 2 de Octubre del 2013

VÉLEZ GUAYASAMÍN ALEXIS SANTIAGO.  
1715820542



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, VÉLEZ GUAYASAMÍN ALEXIS SANTIAGO, autor de la tesis HORMIGONES CON ESCORIA DE ACERO DE HORNO ELÉCTRICO PRESTACIONES MECÁNICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de INGENIERO CIVIL. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 2 de Octubre del 2013

VÉLEZ GUAYASAMÍN ALEXIS SANTIAGO  
1715820542



## Agradecimientos

Al culminar una etapa importante en mi transitar humano, agradezco de manera especial a Dios, a mi Virgen Dolorosa, a mi amada familia Guillermo, Miriam, Sebastián y Mayte; a mi novia Mabel, primo Alexis y a mis amigos que de una otra manera, me dieron la energía y fuerza necesaria para la realización de esta tarea académica.

Es de justicia reconocer la injerencia del Ingeniero Fernando Zalamea, tutor y amigo, en esta labor por su apoyo absoluto, consejos, sugerencias y correcciones durante la ejecución de la tesis.

Asimismo, deseo expresar mi sincero agradecimiento al Ingeniero Nelson Perugachi, Gerente General de la empresa siderúrgica ANDEC S.A. por la confianza, apoyo y facilidades brindadas para el desarrollo del presente estudio.

De igual modo quiero reconocer a los distintos departamentos de la empresa ANDEC S.A. por su asistencia en el desarrollo de los múltiples ensayos, de manera especial al Ingeniero Patricio Espinoza quien no dudó nunca de mi esfuerzo y siempre estuvo apoyándome antes, durante y después de este estudio.

A la Universidad de Cuenca, a la Facultad de Ingeniería y al Laboratorio de Suelos y Materiales de Construcción por la formación académica brindada y las facilidades que me dieron en el uso del laboratorio.

Mi agradecimiento para los catedráticos Ingenieros Iván Cañizares, Adrián Tola, a mis compañeros de Facultad, obreros, laboratoristas Stalin, Marco y Vinicio, por haberme ayudado incansablemente, en los trabajos intelectuales y experimentales.

Dejo constancia, además, de mi gratitud a los empleados de las empresas RASTER y SV CONSTRUCTIONS, por el importante apoyo brindado en la elaboración de la presente tesis de pregrado.

Santiago Vélez Guayasamín



# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

En el Ecuador existe una producción promedio anual de 68.750 toneladas de escoria provenientes de las diversas empresas siderúrgicas, las cuales por un lado son transportadas y enterradas en rellenos sanitarios y en otros casos son aprovechadas como material de relleno en zonas costeras [*Departamento de Gestión Ambiental ANDEC S.A. ACERÍAS NACIONALES DEL ECUADOR*]. Sin embargo, el porcentaje de reciclaje y reutilización de productos, en el ámbito nacional, es de tan solo el 24.41% cifra alarmante que motiva a emplear pequeños cambios para lograr grandes resultados. [*Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo ENEMDU Diciembre2010- INEC*].

Es este concepto por el cual la presente tesis versa en la incorporación de restos industriales, en este caso la escoria siderúrgica, como agregado en la confección de hormigones, con la intención de sacar provecho y reducir notablemente el impacto ambiental que puede generar el vertido de residuos en zonas de relleno, así como también disminuir la explotación de áridos naturales, usados para la fabricación de concretos.

La utilización de este hormigón dependerá de qué tan competitivo sea el producto en balance a las resistencias y costos que brindan los hormigones convencionales.

En resumen este capítulo presenta los antecedentes del proyecto, seguido del alcance, justificación, objetivos y metodología de la tesis.

### 1.1 Antecedentes

En países como Estados Unidos, Japón, Suiza, Francia, España y Chile se utiliza la escoria de acero como base o sub-base para la construcción de carreteras y autopistas. [*U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration 2011*].



*“Por su parte, Brasil ha implementado la escoria de acero en el desarrollado de un ladrillo que actúa como aislante térmico en inmuebles; es decir, no absorbe frío ni calor en el interior del mismo” [AMARAL 1999].*

Investigaciones recientes han permitido incorporar residuos industriales tales como las escorias de alto horno, la microsíllica y las cenizas volantes, como material de construcción de una forma segura y razonable. Por ejemplo, el hormigón reforzado con escorias de acero de alto horno permite una mayor resistencia a los cloruros y sulfatos, lo que implica una reducción en la acción corrosiva y el deterioro de la estructura especialmente en la construcción de puentes y en zonas costeras. [*Mega Structures -Ultimate Skyscraper, Narr. Tom Goodman- Hill, 60 Minutos, National Geographic Channel, New York, Agosto 2009.*]

Actualmente, en el Ecuador, existen tres grandes empresas siderúrgicas: ANDEC S.A., Adelca y Novacero, las mismas que sumadas producen grandes volúmenes de escoria.

En el caso de ANDEC S.A., la escoria siderúrgica es transportada y manejada por el Consorcio Puerto Limpio de Guayaquil y gran parte de ella es depositada en el relleno sanitario “Las Iguanas” a 20 km de la fábrica, mientras que otra parte está siendo utilizada como material de relleno en la parte suburbana de la ciudad de Guayaquil.

## **1.2 Alcance**

En base a lo anterior, este estudio tiene como alcance desarrollar un hormigón alternativo, el cual pueda ser empleado en el sector de la construcción ecuatoriana con el afán de brindar a la sociedad un concreto con mejor comportamiento en estado fresco y endurecido que el hormigón convencional.

Además esta investigación pretende conocer con claridad el comportamiento del hormigón con escoria de acero ante diferentes esfuerzos aplicados tales como compresión, tensión y corte.



Permitirá también, profundizar el estudio de hormigones de altas prestaciones al incorporar nuevos materiales ecológicos en la confección de la mezcla.

### 1.3 Justificación

El estudio sobre este tipo de hormigón permitirá que microempresarios que trabajen en el sector de la construcción utilicen un concreto alternativo, estableciendo un depósito seguro y productivo para este tipo de desechos siderúrgicos.

Además, la falta de materiales sostenibles, en el sector de la construcción ecuatoriana, justifica e incentiva aprovechar los residuos industriales como materia prima, en la construcción de proyectos específicos. Permitirá también, que profesionales o personas dedicadas a la construcción puedan utilizar este producto para obtener certificaciones ambientales nacionales e internacionales como "Punto Verde" y LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) respectivamente, debido a que se reduciría en parte el impacto ambiental en canteras y lechos de ríos que puede generar la explotación de áridos para la elaboración de concretos.

### 1.4 Objetivos

#### 1.4.1 Objetivo general

Estudiar y determinar las bondades del hormigón con escoria de acero, con la finalidad de establecer usos posibles de dicho hormigón. De esta manera se pretende, reducir, reciclar y reutilizar desechos industriales provenientes de empresas siderúrgicas.

#### 1.4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los aspectos físicos, químicos y mineralógicos de la escoria de horno eléctrico que produce la empresa siderúrgica ANDEC S.A.



- Diseñar y confeccionar mezclas de hormigones de altas prestaciones con agregado natural de tamaño máximo nominal de 3/8".
- Diseñar y confeccionar mezclas de hormigones con escoria de acero utilizando como agregado grueso escoria de acería de tamaño máximo nominal de 3/8".
- Conocer el desempeño de los hormigones con agregados naturales y con escoria de acero mediante la elaboración de probetas cilíndricas y de un elemento estructural que está sujeto a esfuerzos de compresión, tracción y corte.
- Evaluar la adherencia entre los hormigones con agregado natural y con escoria de acero y su refuerzo longitudinal respectivamente; en este caso los refuerzos a considerar son varillas denominadas *Fiber Reinforced Polymer* (FRP).

## 1.5 Metodología

Para llegar a los objetivos propuestos, se procederá a realizar una caracterización de la escoria por medio de procesos de obtención y muestreo, de los cuales se conocerán las diferentes propiedades físicas, químicas y mineralógicas del residuo.

Se diseñarán diferentes mezclas para conseguir hormigones convencionales de altas resistencias y a la postre se utilizarán los mismos como patrones, para diseñar hormigones con escoria de acero.

Los materiales a usar en las mezclas de hormigones convencionales y con escoria de acero son:

- **Conglomerante:** Cemento Portland, marca Holcim tipo GU, norma ASTM C150.
- **Materia prima y curado:** Agua de consumo doméstico de la ciudad de Cuenca.
- **Agregado grueso:** Grava andesita triturada de tamaño máximo nominal 3/8", procedentes de la Cantera Rocazul, situada en el sector de la Josefina-Azuay y escoria de acero de horno eléctrico de tamaño máximo



nominal 3/8", procedente de la empresa siderúrgica ANDEC S.A situada en Guayaquil.

- **Agregado fino:** Arena gruesa del rio Santa Isabel - Azuay y arena fina silíceas distribuida por la marca comercial Sika.
- **Aditivos:** Súper-plastificante y acelerante Viscocrete 20 HE y 2100 marca Sika.

Luego del diseño de mezclas se confeccionarán nueve probetas cilíndricas de 10 por 20 cm (diámetro por altura) por cada mezcla del hormigón tradicional de alta resistencia: dos se ensayarán a los siete días de edad, dos a los veintiocho días y las cinco sobrantes se ensayarán a los treinta y un días de edad.

Para el hormigón con escoria de acero, se fabricarán un total de diez probetas cilíndricas por cada mezcla, nueve de ellas en cilindros de 10 por 20 cm y una en el cilindro de 15 por 30 cm (diámetro por altura): se ensayarán dos probetas a los siete, catorce, veintiocho y cincuenta y seis días respectivamente, las dos restantes se experimentarán para evaluar la resistencia a flexo tracción, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson del hormigón a los veintiocho días de su elaboración.

Posteriormente, se procede a ensayar los hormigones con escoria de acero por medio de los siguientes ensayos:

Resistencia a la compresión	Norma: ASTM C 29
Tracción indirecta	Norma: ASTM C 78
Módulo elástico	Norma: ASTM C 469

Realizados los ensayos indicados se procederá a elegir las mezclas que tengan mayor resistencia a compresión y menor costo.



Seguidamente se utiliza el hormigón tradicional de alta resistencia para construir un elemento estructural estándar viga-arco, cuya geometría cumple con las condiciones impuestas por el ACI para la competencia internacional denominada FRP Composites Competition. La estructura se refuerza con varillas FRP. Posteriormente se ensayará la viga fabricada aplicando una carga puntual en el centro de su luz con la finalidad de verificar el desempeño del hormigón con este tipo de refuerzo. El mismo proceso descrito se lo hace para el hormigón con escoria de acero con el propósito de comparar los resultados entre los cilindros y las vigas-arco confeccionadas.

Para finalizar la investigación, se obtienen las conclusiones generales y específicas de cada uno de los ensayos realizados en hormigones con escoria de acero, seguidas de los posibles usos y beneficios de este hormigón.



## CAPÍTULO II

### 2. CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA DE ACERO

Las características mineralógicas, químicas y físicas de cualquier producto es fundamental para examinar, comprender y predecir el comportamiento que pueda presentar este ante cualquier uso o requerimiento que se le pretenda dar, particularmente en esta tesis la escoria de acero como árido grueso en la confección de hormigones.

*“Se conoce que el árido grueso constituye entre el 45 - 55% en peso, y entre el 30 - 50% en volumen del total de la mezcla”* (Kosmatka, et al, 1992, pág. 113) formando así el esqueleto propio del hormigón. Es este soporte mineral el que resiste, en gran medida, los esfuerzos que se generan al aplicar solicitaciones al concreto.

Por lo indicado previamente, el presente capítulo ha sido desarrollado para explicar en primer lugar la descripción de la empresa productora, seguido del proceso de obtención del material requerido para la elaboración de hormigones: origen, transporte, descarga, trituración, tamizado, limpieza; y finaliza con el estudio mineralógico, químico y físico de la escoria.

#### 2.1 Descripción de la empresa productora

La escoria de acero empleada en la presente tesis, proviene del horno eléctrico de la primera empresa siderúrgica del país ANDEC S.A (ACERÍAS NACIONALES DEL ECUADOR S.A.), la misma que inició sus actividades en Guayaquil, el 19 de octubre de 1969, debido a la gran demanda de hierro que se requería en el campo de la construcción nacional.

ANDEC S.A. cuenta con una planta de chatarrización, en la cual toda la chatarra es clasificada y procesada, previa a su fundición. La planta siderúrgica cuenta con dos



hornos eléctricos de fusión denominados EAF (*Electric Arc Furnace*), uno en funcionamiento y el otro de repuesto, los cuales están revestidos con ladrillos refractarios recubiertos de dolomita para evitar la erosión de las paredes del horno; asimismo, la empresa posee dos hornos cuchara para el afino de la colada continua. Cabe indicar que la colada es utilizada para formar palanquillas de 130 x 130 x 4000mm. La empresa cuenta también con una planta de laminación, la cual produce el calentamiento y estiramiento de la palanquilla de la cual se obtienen los diferentes productos de acero, tales como varillas, alambrados, pasadores, mallas, entre otros. Por su lado el horno de fusión de la empresa tiene forma casi circular de 4300 mm de diámetro, dispone de dos bóvedas, una de ella por donde penetra la lanza (herramienta usada para inyectar fundentes) y la segunda en donde ingresan tres electrodos para generar el arco eléctrico que produce la fundición. El horno tiene una capacidad de 40 ton de acero líquido, pero trabaja con menos de 23 ton debido a que el volumen de carga del horno cuchara es menor al horno de fusión.

La temperatura para la producción de escoria es de 1500-1600 °C y por otro lado la potencia requerida y aplicada al horno es de 18.2 mega watts.

Según datos facilitados por la empresa ANDEC S.A. la producción del año 2012 fue de 92.405 toneladas de acero, las mismas que generaron alrededor de 9.240 toneladas de escoria siderúrgica (10% en peso del acero). Considerando que la empresa trabaja los 365 días del año, se obtuvo alrededor de 25.31 toneladas de escoria por día.

Con la implementación del nuevo horno de fusión, que se instaló a inicios de enero del 2013, en la mencionada planta, se estima tener una producción anual de 125.000 toneladas de acero, lo que originaría alrededor de 34,25 toneladas diarias de escoria.

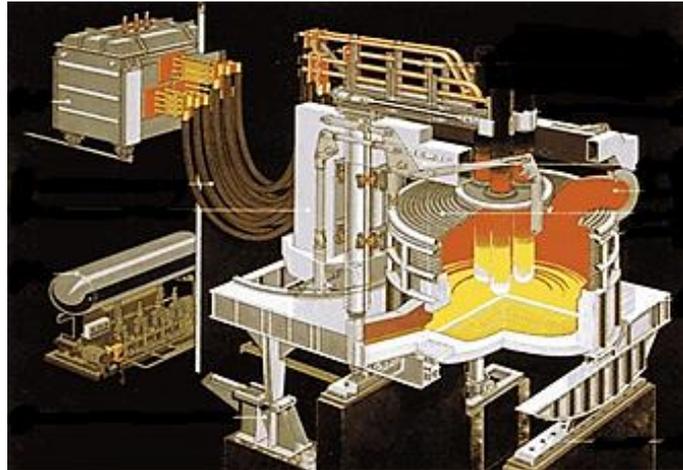


Figura 1: Horno de arco eléctrico

## 2.2 Proceso de producción de la escoria siderúrgica

El proceso de la obtención de la escoria siderúrgica empieza con la clasificación de la chatarra de acero y ferroaleaciones, las cuales se consideran como materia prima de la escoria.

Una vez clasificada la materia prima, el proceso de producción de la escoria tiene dos fases: la de fusión y de afino, las cuales se explican a continuación:

- **Fase de fusión**

Empieza con el llenado de chatarra en el horno eléctrico. A continuación tres electrodos de grafito se ponen en marcha y entran en el horno para producir un salto de arco eléctrico con la chatarra (semejante al proceso de soldadura), provocando de esta manera una elevada temperatura que genera un cambio de estado sólido a líquido en la chatarra, denominado fusión.

Posteriormente se da el proceso de doble escoriado, el cual se divide en dos etapas. En la primera se inyecta de manera simultánea carbón y oxígeno al horno lo que genera una escoria espumosa del carbono y fósforo, al mismo tiempo que se



produce la oxidación de metales principales tales como silicio, manganeso, hierro, azufre, entre otros.

Esta escoria se la conoce como escoria básica oxidante, y puede alcanzar temperaturas alrededor de los 1550°C.

- **Fase de afino**

Finalizado la fase de fusión, se introduce en el horno cal cálcica y cal dolomita, las mismas que reaccionan con el líquido fundente para obtener un metal de bajo contenido de oxígeno (desoxidación) y eliminar la mayor parte de azufre. La desoxidación completa se termina al momento de añadir ferroaleaciones, primero el manganeso y luego el silicio, para conseguir óxido de manganeso y óxido de silicio que tienden a formar partículas livianas que ascienden formando la segunda escoria; dicha escoria se la denomina escoria reductora y puede alcanzar temperaturas alrededor de los 1600°C.

Luego las escorias básicas oxidantes y reductora en estado líquido se mezclan y se vierten en un silo. Finalmente la escoria cristalizada se retira del silo a pocos metros de la acería donde se enfría durante dos días al aire libre.

Según información tomada en ANDEC S.A., por cada tonelada de acero se generan de 110 a 150 Kg de escoria oxidante y de 20 a 30 kg de escoria reductora, es decir, un estimado total de 150 kg de escoria combinada.

### PROCESO DOBLE ESCORIA

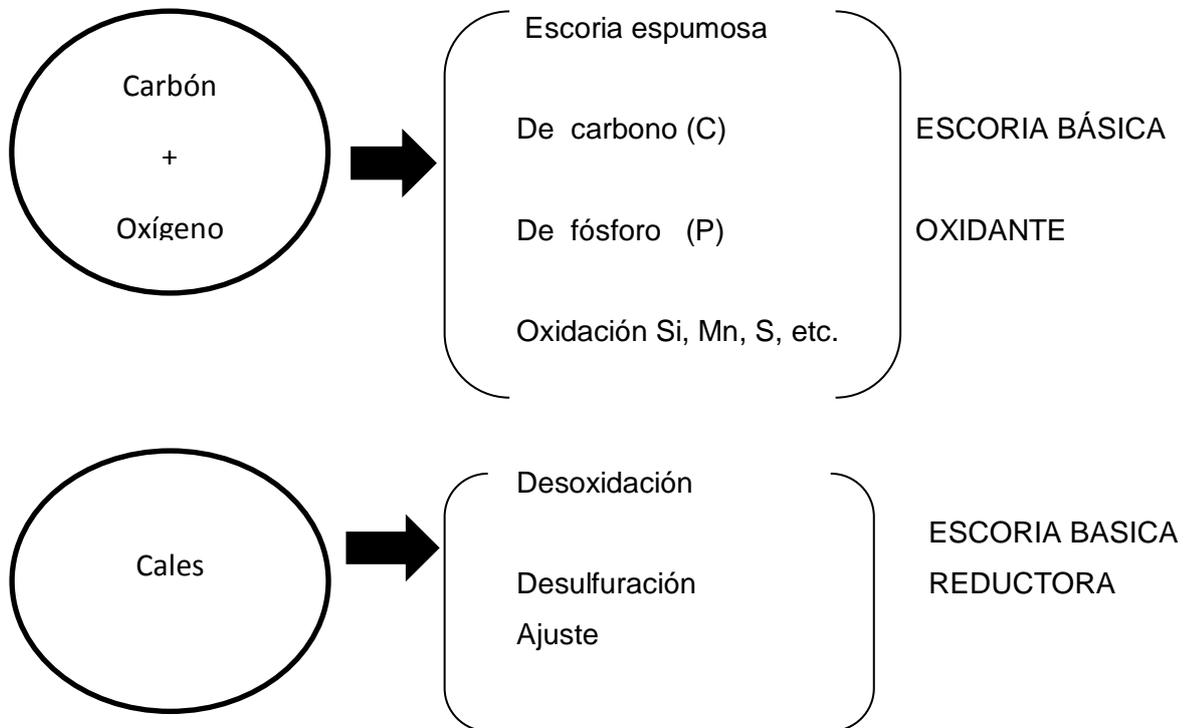


Figura 2: Escoriado

## Afino

### Reacciones:

Elemento	Forma de eliminación	Reacción química
<b>C</b>	Al combinarse con el oxígeno se quema dando lugar al CO y CO <sub>2</sub> gaseoso que se elimina a través de los humos.	$2C + O_2 \rightarrow 2CO$ $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$
<b>Mn</b>	Se oxida y pasa a la escoria. Combinado con sílice da lugar a silicatos.	$2Mn + O_2 \rightarrow 2MnO$ $MnO + SiO_2 \rightarrow \text{silicatos}$
<b>Si</b>	Se oxida y pasa a la escoria. Forma silicatos.	$Si + O_2 \rightarrow SiO_2$ $SiO_2 + \text{óxidos} \rightarrow \text{silicatos}$
<b>P</b>	En una primera fase se oxida y pasa a la escoria. En presencia de carbono y altas temperaturas puede revertir el proceso de fusión. Para fijarlo a la escoria se añade cal formándose fosfato de calcio.	$4P + 5O_2 \rightarrow 2P_2O_5$ $P_2O_5 + 5C \rightarrow 2P + 5CO$ $2P + 5FeO + 3CaO \rightarrow P_2O_5 \cdot 3CaO + 5Fe$
<b>S</b>	Su eliminación debe realizarse mediante el aporte de cal, pasando a la escoria en forma de sulfuro de calcio. La presencia de magnesio favorece a la desulfuración.	$S + Fe + CaO \rightarrow FeO + SCa$ $S + Fe + MnO \rightarrow SMn + FeO$ $S + Fe + Mn \rightarrow SMn + Fe$

## Proceso de obtención del material requerido para la elaboración de hormigones

- **Transporte de escoria de la empresa siderúrgica ANDEC S.A.**

La escoria de acería procedente de la empresa siderúrgica ANDEC S.A. es sometida a un proceso de enfriamiento durante dos días, contado a partir del día de su separación del horno eléctrico, en un depósito ubicado a 200 metros del horno de fundición.

Luego, este residuo es embolsado en costales conocidos como “*big bags*”, cada uno con un peso aproximado de media tonelada. Las bolsas son puestas a bordo de un remolque modelo Volvo FH12, para su viaje a la ciudad de Cuenca; se debe mencionar que existen dos vías para llegar al destino mencionado: la principal Naranjal-Molleturo-Cuenca con una distancia aproximada de 260 km y la vía alterna Troncal-Cañar-Cuenca con 340 km.

Durante el presente estudio se realizó dos entregas de escoria, la primera se llevó a cabo el jueves 17 de enero de 2013 y la segunda el viernes 7 de junio de este mismo año, cada una de seis y ocho *big bags* respectivamente. Ambos fletes se hicieron por la segunda vía mencionada.



**Figura 3: Transporte de escoria**

- **Descarga**

Para descargar cada *big bag* en el sitio de depósito, se utilizó en el primer flete una retroexcavadora John Deere 310D, entre tanto para el segundo viaje el camión de transporte antes descrito, fue equipado con una grúa automática, lo que facilitó la descarga.



Figura 4: Descarga de escoria

Una vez abierto los *big bags* se observó que la escoria siderúrgica presenta tamaños variables entre 2" (50.8 mm) y 1/10" (2.54 mm), lo que conllevó al triturado y tamizado del material.

- **Trituración primaria**

Para la molienda del material se usó una trituradora de impacto, modelo Weg Motores, de eje horizontal, la cual se caracteriza por una elevada tasa de reducción, y por la propiedad de dar forma cúbica al producto. La trituradora de impacto está compuesta por una placa de acero con agujeros que permite obtener un material entre 0.19" a 1" de tamaño máximo nominal. La máquina consta con veinticuatro piezas de impacto integradas al eje y a un conjunto de rotor los cuales giran a 1750 rpm.



Figura 5: Trituración primaria

- **Tamizado**

Una vez triturado el desecho siderúrgico, se lo lleva al laboratorio de materiales de la Universidad de Cuenca, que posee equipos y herramientas para obtener el tamaño requerido del material. Para conseguir un agregado de tamaño máximo nominal 3/8" (9.52 mm) se usaron los siguientes tamices de la serie estándar: 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", tamiz #4 y el fondo según la norma ASTM C 136. Armados los tamices en orden descendente de tamaño, se acciona el equipo vibratorio durante un tiempo de cinco minutos. Finalizado el proceso anterior, se retiran los tamices y se toma el material que pasa por el tamiz 3/8" (9.52 mm de abertura) y retiene el tamiz #4 (4.76 mm de abertura).



Figura 6: Tamizado

- **Limpieza y almacenaje**

En esta etapa el material de estudio es puesto en una concreteira, a la cual se añade agua y se le hace girar a 22 rpm, esto con el afán de limpiar las impurezas y polvos que trae la escoria. El proceso toma alrededor de quince minutos por cada veinticinco kilogramos de material.

Se amontona el material lavado sobre una superficie limpia, evitando que se contamine o mezcle con otros elementos adjuntos.

Posteriormente, el material de tamaño uniforme 3/8" (9.52 mm) requerido, es vertido en sacos de 25 kg y almacenado en el laboratorio de materiales, lugar que posee una temperatura promedio de 18°C y protegido del sol, del viento y de la lluvia.



Figura 7: Limpieza del material

- **Reciclado y reutilizado**

Con el afán de no desperdiciar el material limitado, la escoria retenida por los tamices 3/8", 1/2", 3/4", 1" y 1 1/2", es llevada a la máquina de los ángeles donde se produce la trituración secundaria correspondiente; y por su parte el material retenido por el fondo, es conservado en costales para futuras investigaciones de este agregado fino.



Figura 8: Reciclaje del material

### 2.3 Caracterización mineralógica



Figura 9: Estudio mineralógico

Es de particular interés en este apartado, conocer y describir la composición mineralógica de la escoria de acero empleada en la mezcla de hormigón, debido a que existe una gran cantidad de minerales conocidos y empleados desde la antigüedad, para la fabricación de materiales de construcción.

Para empezar con la caracterización se conoce que los principales componentes de la escoria siderúrgica son los minerales de hierro, los mismos que constituyen cerca del 1.51% en peso de la corteza terrestre. El hierro se encuentra en numerosas presentaciones, ya sea en minerales o mineraloides, tales como: magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), limonita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) y pirita ( $\text{FeS}_2$ ), entre los más importantes.



La caracterización de los minerales que componen la escoria de acero, permite obtener información básica de la formación y usos que se le puede dar a este. Se dispone de una amplia variedad de técnicas para identificar estos componentes, tales como:

- **Microscopía petrográfica (luz transmitida).** Permite identificar los minerales no metálicos y las relaciones que se establecen entre ellos y los metálicos que puedan existir en las muestras estudiadas.
- **Microscopía metalográfica (luz reflejada).** Sirve para identificar los minerales metálicos y sus relaciones mutuas.
- **Difracción de Rayos X.** Permite identificar con mayor precisión la naturaleza de los componentes minerales de una muestra, sobre todo de los que por su pequeño tamaño de grano no sean fácilmente identificables con las técnicas anteriores.
- **Microscopía electrónica.** Son técnicas específicas para el estudio detallado de los minerales que tiene un compuesto, ya sea en el aspecto de relaciones (Microscopía) o bien en el de las variaciones menores de la composición de los minerales o de caracterización detallada de las fases minoritarias, que en determinados casos pueden ser las de mayor valor económico (caso de oro o de los elementos del grupo del platino).

Para el estudio vigente se decidió tomar la técnica de difracción de rayos X, por la mayor precisión que brinda esta técnica en la identificación de los componentes mineralógicos a comparación de las otras técnicas, además por la facilidad económica y de traslado de las muestras para la realización del ensayo.

### **Proceso del Análisis Mineralógico**

El proceso usado para el análisis mineralógico se divide en tres partes: trituración, aplastamiento y análisis de difracción de rayos X de la muestra.

Para la realización de la técnica señalada, se realizó inicialmente un muestreo aleatorio de la escoria en calidad de agregado de tamaño máximo 3/8". Luego se trituró el material y se utilizó un compresor de espécimen, modelo *Diffrac-press Sax instrument*, el cual permite obtener una muestra homogénea previa a la identificación mineralógica. Después se utilizó el difractómetro de rayos X, modelo *Bruker d2 phaser* que analiza y mide los materiales poli cristalinos de forma inmediata mediante el *software DIFFRAC.SUITE*. Por último, los resultados obtenidos por el dispositivo son procesados e impresos.

Cabe indicar que los equipos mencionados pertenecen a la **Industria Guapan S.A.**, empresa con experiencia en la producción y comercialización del cemento en la región sur del Ecuador.

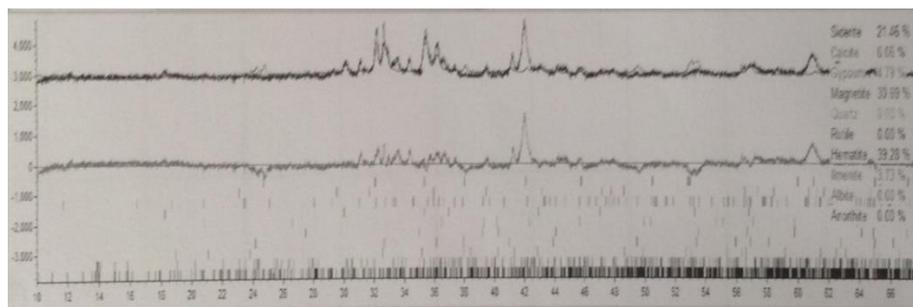


Figura 10: Análisis mineralógico

## Resultados de los elementos

Los resultados impresos se anexan al final de la tesis; sin embargo, en este apartado se indican los minerales más relevantes del material estudiado.

Se han determinado los siguientes minerales mayoritarios con sus respectivos porcentajes:



ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X	
MINERAL	PORCENTAJE %
HEMATITA	39,278
MAGNETITA	30,690
SIDERITA	21,463
GYPSUM	4,785
ILMENITA	3,726
CALCITA	0,056
ANORTITA	0,001

Tabla 1: Análisis mineralógico

A continuación se da una breve descripción de los minerales y sus propiedades especiales.

### Hematita

**Definición:** Es un mineral compuesto de óxido férrico, cuya fórmula es  $Fe_2O_3$ , está constituido por una importante cantidad de hierro puesto que en estado puro contiene el 70% de este metal. A veces posee trazas de titanio (Ti), de aluminio (Al), de manganeso (Mn) y de agua ( $H_2O$ ).

**Propiedades especiales:** es uno de los principales minerales usado para la extracción de hierro. Antiguamente se usaba para la fabricación de espejos. La hematita terrosa tiene un color rojizo y es utilizada como pigmento para marcar al ganado. Se vuelve fuertemente magnética cuando es calentada a altas temperaturas.

### Magnetita

**Definición:** Es un mineral de hierro constituido por óxido ferroso-diférrico ( $Fe_3O_4$ ). Su fuerte magnetismo en estado puro se debe a un fenómeno de ferrimagnetismo.

**Propiedades especiales:** contiene alrededor de un 72% de hierro, motivo suficiente para ser el mineral más importante para la extracción del hierro.



Como material de construcción se usa como añadido natural de alta densidad (4,65 hasta 4,80 kg/l) en hormigones, especialmente para protección radiológica.

### Siderita

**Definición:** Es un mineral de la clase 5 (carbonatos), según la clasificación de Strunz. Es un carbonato de hierro (II) ( $\text{FeCO}_3$ ), del grupo de la calcita. Además es un mineral pesado, tiene una composición de carbonato de hierro y un ordenamiento interno trigonal. A menudo se encuentra en depósitos de lechos sedimentarios mezclada con algún componente biológico, pizarras, arcillas o carbón, lo que sugiere que la siderita es creada biogénicamente en condiciones de bajo pH y baja concentración de oxígeno. También se puede encontrar en rocas sedimentarias así como en pegmatitas y en depósitos de pantanos.

**Propiedades especiales:** Es un mineral de importancia económica para la extracción del hierro. También se encuentra en el espacio y en satélites como la Luna o en meteoritos.

### Gypsum (Yeso)

**Definición:** Es un mineral compuesto de sulfato de calcio hidratado, proveniente de una roca sedimentaria de origen químico. El yeso mineral, en el sistema monoclinico, se cristaliza prismáticamente de forma rómbica con aristas biseladas en las caras. Se presenta en cristales, a veces grandes, maclados en punta de flecha y en punta de lanza; otros en masas y agregados espáticos. Con frecuencia son fácilmente exfoliable (selenita); puede ser sacaroideo y translúcido (alabastro), incoloro, blanco, grisáceo, amarillento, rojizo o incluso negro.

**Propiedades especiales:** *“El yeso triturado se usa para mejorar las tierras agrícolas, pues es rico en azufre y calcio, lo que hace que tenga un gran valor como fertilizante de los suelos, se lo usa pulverizado para que sus componentes se puedan dispersar en el terreno.” (Shumann, 2004, 129).*

En el sector de la construcción, el yeso es la materia prima que, molturada y cocida en hornos especiales, sirve como pasta para enlucidos y revocos, o como pasta de agarre y de juntas.

Por otro lado, el polvo de yeso se emplea en los procesos de producción del cemento Portland, donde actúa como elemento retardador del fraguado.

Es importante conocer que la composición mineralógica de las escorias de acero puede variar considerablemente dentro de una misma factoría, debido a que puede darse cierta heterogeneidad en la escoria resultante según la colada de acero que se produzca en ese momento. Asimismo se ha averiguado que el proceso de obtención de acero es diferente en cada empresa siderúrgica; entre las principales diferencias vienen dadas por la utilización de la cal dolomita frente a cal cálcica lo que produce un aumento del valor de óxido de magnesio en la escoria.

## 2.4 Caracterización química



Figura 11: Muestras para análisis químico

La composición química se refiere a las sustancias que están presentes en una determinada muestra, así como su cantidad. En este caso la caracterización completa de la escoria siderúrgica permitirá identificar aquellos elementos que perjudican al comportamiento mecánico del concreto hidráulico, la salud humana y el medio ambiente.

La escoria enviada al laboratorio para su análisis, fue una muestra de colada con grado de acero SAE-1029, para producir varillas soldables. Los requisitos químicos para obtener el mencionado grado y de otros tipos de aceros se presentan a continuación:

DPTO. CONTROL DEL CALIDAD LABORATORIO QUIMICO		REQUISITOS QUÍMICOS PALANQUILLA ANDEC						
GRADO DE ACERO	COLOR	PRODUCTO A OBTENER	NORMA DE FABRICACION	% C	% Mn	% Si	% P	% S
				MIN-MAX	MIN-MAX	MIN-MAX	MAX	MAX
SAE-1040E	AZUL ROJO	VARILLA DE DUREZA NATURAL 36 mm	INEN 102	0,38-0,42	1,00-1,20	0,20-0,35	0,035	0,035
SAE-1040	ROJO	VARILLA DE DUREZA NATURAL	INEN 102	0,34-0,38	0,75-1,00	0,20-0,35	0,035	0,035
SAE-1029	AMARILLO	VARILLAS SOLDABLES	INEN 2167	0,25-0,30	0,90-1,10	0,15-0,25	0,035	0,045
SAE-1026	ROJO AMARILLO	VARILLAS SOLDABLES 28-32 mm	INEN 2167	0,20-0,25	0,90-1,10	0,15-0,25	0,035	0,045
SAE-1020	VERDE	ÁNGULOS	INEN 2224	0,12-0,16	0,30-0,60	0,15-0,30	0,040	0,045
SAE-1010	AZUL	ALAMBRÓN	INEN 1324	0,08-0,13	0,30-0,60	0,07-0,15	0,040	0,045
		PLATINA	INEN 2222					
		MALLA	INEN 2209					
		BARRA CUADRADA	INEN 2222					
SAE-1008	CELESTE	ALAMBRÓN	INEN 1324	MAX-0,08	0,30-0,50	0,07-0,15	0,040	0,050
		MALLA	INEN 2209					

Tabla 2: Requisitos químicos de la palanquilla

**Nota:** El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad.

*“Un parámetro utilizado para calificar el tipo de escoria es la basicidad, la cual constituye una propiedad fundamental en la metalurgia. La basicidad se valora sobre la base de la relación de sus óxidos según la teoría molecular de las escorias, en relaciones molares o porcentuales. Según datos de Yu. Zeke, refiere Cicuitti. (1997)”.*



De acuerdo al valor de la basicidad se indica lo siguiente:

- a) Si la basicidad es menor que la unidad  $B < 1$  las escorias se consideran ácidas.
- b) Si la basicidad es mayor que la unidad  $B > 1$  las escorias se consideran básicas.
- c) Si la basicidad es igual que la unidad  $B = 1$  las escorias se consideran neutras.

Esta clasificación de las escorias es formal, ya que el valor absoluto de la basicidad de cada compuesto es desconocido, no obstante se permite emitir juicios del comportamiento metalúrgico de las escorias, pues para valores más elevados de basicidad, los valores de actividad del ion de oxígeno  $O_2$  son mayores, es decir, mayores serán en la escoria los iones libres de este. En correspondencia, investigadores aseguran que las escorias ácidas poseen menor capacidad oxidante ya que la entrega de oxígeno al metal en este caso se realiza mediante la ruptura de los aniones complejos de  $SiO_2$  en la frontera del sistema heterogéneo.

Existen varias formas para expresar la basicidad; en la práctica la de mayor utilidad es la expresión que relaciona la concentración del óxido básico principal (CaO) y la del óxido ácido más fuerte ( $SiO_2$ ).

$$B1 = \frac{CaO}{SiO_2}$$

Sin embargo, se conocen otras ecuaciones a través de las cuales se puede dar un criterio sobre la basicidad del sistema de escoria. Entre las que están:

$$B2 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2}$$

**Dónde:**

B = Basicidad.

CaO = Concentración del óxido de calcio (%).

MgO = Concentración del óxido de magnesio (%).

SiO<sub>2</sub> = Concentración del óxido de silicio (%).

Si la escoria contiene una cantidad considerable de fósforo, la ecuación toma la siguiente forma:

$$B = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5}$$

**Dónde:**

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Concentración del óxido de fósforo (%).

En las escorias básicas la variación en una u otra magnitud ocurre en un intervalo estrecho de temperaturas, que en el caso de las escorias ácidas.

Para un contenido constante de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> el aumento de la cantidad de CaO produce un brusco crecimiento de la viscosidad, que es debido al aumento de la capacidad fundente a altas temperatura y a su heterogeneidad. El aumento del contenido de SiO<sub>2</sub> eleva la viscosidad.

En este apartado se indica el último análisis brindado por la empresa en el año 2012.

**CONTROL DE CALIDAD - LABORATORIO QUIMICO  
ANÁLISIS DE ESCORIAS SIDERURGICAS**

FECHA	Colada	Tipo de Acero	tipo de escoria	temperatura de operación	%CaO	%SiO2	%Fe2O3	%MgO	%Al2O3	%MnO	%TiO2	%Cr2O3	%BaO	%V2O5	%ZrO2	%CuO	%P2O5	%SO3	B 1	BZ	Análisis	
17/10/2012	FU-04231-HE	1008	Oxidada/Espumante	1560	21.5	13.31	42.15	12.61	8.91	3.08	0.64	1.12	0.16	0.05	0	0.01	0.27	0.26	1.62	2.56	Rodriguez	
18/10/2012	FU-04238-HE	1008	Oxidada/Espumante	1585	16.7	9.32	52.42	7.18	6.57	3.1	0.6	1.24	0.18	0.05	0.05	0.02	0.22	0.19	1.79	2.56	Anastasio	
18/10/2012	FU-04239-HE	1008	Oxidada/Espumante	1516	16.45	12.57	47.45	11.28	8.27	3.11	0.56	1.12	0.13	0	0.01	0.02	0.32	0.24	1.33	2.29	Anastasio	
18/10/2012	FU-04240-HE	1008	Oxidada/Espumante	1599	16.57	12.42	50.74	9.67	8.15	3.29	0.54	1.23	0.15	0	0.01	0.02	0.3	0.18	1.33	2.11	Anastasio	
17/10/2012	FU-04232-HE	1008	Oxidada/Espumante	1590	21.7	13.19	45.16	9.33	8.4	3.44	0.59	1.13	0.12	0.06	0.0009	0.0009	0.57	0.35	1.65	2.35	Coberia	
17/10/2012	FU-04233-HE	1008	Oxidada/Espumante	1620	15.6	10.36	46.85	8.62	6.68	2.87	0.44	0.95	0.09	0	0.0001	0.0002	0.26	0.21	1.51	2.34	Coberia	
17/10/2012	FU-04234-HE	1008	Oxidada/Espumante	1570	17.21	11.05	50.98	9.6	7.51	3.12	0.54	1.37	0.12	0.04	0.001	0.01	0.31	0.19	1.56	2.49	Coberia	
17/10/2012	FU-04235-HE	1008	Oxidada/Espumante	1590	15.71	10.13	58.25	9.5	6.82	2.85	0.46	0.93	0.11	0.03	0.00049	0.02	0.29	0.21	1.55	2.49	Coberia	
19/10/2012	FU-04252-HE	1008	Oxidada/Espumante	1606	14.26	13.08	47.71	14.77	7.84	6.62	0.53	1.37	0	0	0.0008	0	0.29	0.22	1.09	2.22	Anastasio	
21/10/2012	FU-04275-HE	1029	Oxidada/Espumante	1620	31.79	18.42	13.33	21.96	10.73	4.09	0.79	0.65	0.17	0	0.02	0.01	0.21	0.37	1.73	2.92	Alvarez	
21/10/2012	FU-04276-HE	1029	Oxidada/Espumante	1610	32.32	18.23	13.19	21.46	10.39	4.08	0.81	0.65	0.18	0	0.02	0.01	0.21	0.34	1.77	2.95	Alvarez	
22/10/2012	FU-04278-HE	1029	Oxidada/Espumante	1621	26.31	18.38	16.31	23.88	10.03	5.08	0.82	1.18	0.21	0	0.02	0.02	0.27	0.21	1.43	2.73	Alvarez	
22/10/2012	FU-04279-HE	1029	Oxidada/Espumante	1618	26.95	16.9	15.76	18.57	9.18	4.6	0.88	1.02	0.2	0	0.02	0.01	0.22	0.25	1.59	2.69	Alvarez	
22/10/2012	FU-04280-HE	1029	Oxidada/Espumante	1630	23.58	15.74	32.73	12.31	8.79	3.95	0.7	1.31	0.15	0	0.01	0.02	0.31	0.26	1.50	2.28	Paredes	
22/10/2012	FU-04281-HE	1029	Oxidada/Espumante	1620	27.27	16.61	23.78	13.86	9.4	3.88	0.8	1.46	0.23	0	0.02	0.01	0.4	0.24	1.64	2.48	Paredes	
19/10/2012	FU-04259-HE	1029	Oxidada/Espumante	1620	29.24	15.9	20.73	14.44	10.36	3.62	0.79	0.94	0.21	0	0.02	0.02	0.3	0.23	1.84	2.75	Coberia	
21/10/2012	FU-04269-HE	1029	Oxidada/Espumante	1596	28.36	18.15	22.17	11.61	9.95	4.84	0.83	0.88	0.25	0.08	0.03	0.02	0.39	0.24	1.56	2.20	Coberia	
21/10/2012	FU-04272-HE	1029	Oxidada/Espumante	1602	28.02	17.3	18.64	14.97	10.25	4.9	0.99	0.78	0.18	0	0.01	0.00082	0.41	0.29	1.62	2.48	Coberia	
21/10/2012	FU-04273-HE	1029	Oxidada/Espumante	1615	28.05	16.4	20.61	15.83	10.6	4.79	0.79	0.77	0.17	0	0.02	0.01	0.3	0.2	1.71	2.68	Coberia	
22/10/2012	FU-04274-HE	1029	Oxidada/Espumante	1614	27.61	14.22	22.47	15.44	9.06	4.94	0.77	0.69	0.17	0.09	0.01	0	0.38	0.24	1.94	3.03	Coberia	
22/10/2012	FU-04284-HE	1029	Oxidada/Espumante	20.34	13.06	43.61	11.17	7.57	3.65	0.6	2.07	0.13	0.09	0.01	0.02	0.68	0.21	1.56	2.41	Anastasio		
22/10/2012	FU-04285-HE	1029	Oxidada/Espumante	19.42	13.64	44.68	10.13	8.46	3.71	0.58	2.36	0.13	0.09	0.01	0.02	0.63	0.19	1.42	2.17	Anastasio		
22/10/2012	FU-04288-HE	1029	Oxidada/Espumante	20.81	13.35	43.6	9.94	8.25	3.37	0.56	1.63	0.11	0	0.01	0.01	0.02	0.52	0.23	1.56	2.20	Anastasio	
22/10/2012	FU-04289-HE	1008	Oxidada/Espumante	19.61	13.75	42.89	10.85	8.65	3.33	0.6	1.78	0.09	0.08	0.01	0.02	0.58	0.23	1.43	2.32	Anastasio		
22/10/2012	FU-04291-HE	1008	Oxidada/Espumante	1610	21.16	13.08	40.54	10.58	7.9	3.56	0.58	1.4	0.15	0.06	0.01	0	0.4	0.2	1.62	2.43	Anastasio	
22/10/2012	FU-04292-HE	1008	Oxidada/Espumante	1590	23.48	14.4	37.55	11.18	8.04	4.13	0.6	1.44	0.18	0.08	0.01	0.02	0.58	0.23	1.63	2.41	Anastasio	
23/10/2012	FU-04294-HE	1029	Oxidada/Espumante	1651	27.08	13.18	31.8	11.16	6.73	5.08	0.52	1.15	0.13	0	0.01	0.01	0	0.29	2.05	2.90	Alvarez	
23/10/2012	FU-04295-HE	1029	Oxidada/Espumante	1610	29.13	13.78	30.56	12.31	7.1	4.94	0.54	1.18	0.14	0.08	0.0009	0.01	0.57	0.28	2.11	3.01	Alvarez	
23/10/2012	FU-04297-HE	1029	Oxidada/Espumante	1613	30.32	14.78	22.89	14.72	8	5.16	0.63	1.42	0.13	0	0.01	0.008	0.61	0.24	2.05	3.05	Alvarez	
23/10/2012	FU-04299-HE	1029	Oxidada/Espumante	1612	29.16	13.69	29.36	13.45	6.99	4.69	0.63	1.4	0.1	0	0	0.009	0.054	0.22	2.13	3.11	MARCILLO	
23/10/2012	FU-04300-HE	1029	Oxidada/Espumante	29.69	14.56	29.36	13.45	6.99	4.69	0.63	1.4	0.1	0	0	0	0.009	0.054	0.22	2.04	2.96	MARCILLO	
23/10/2012	FU-04304-HE	1008	Oxidada/Espumante	1592	25.97	14.02	36.98	8.53	8.36	3.85	0.6	1.2	0.12	0.06	0.01	0.02	0.45	0.27	1.85	2.46	Anastasio	
23/10/2012	FU-04305-HE	1008	Oxidada/Espumante	24.74	12.27	37.21	10.08	7.62	3.53	0.48	1.1	0.11	0.11	0	0.01	0.02	0.32	0.34	2.02	2.84	Anastasio	
23/10/2012	FU-04306-HE	1008	Oxidada/Espumante	24.35	12.31	42.03	9.72	7.92	3.68	0.5	1.13	0	0.04	0.01	0.02	0.34	0.28	1.98	2.77	Anastasio		
23/10/2012	FU-04307-HE	1008	Oxidada/Espumante	22.23	12.24	44.79	11.64	7.1	3.4	0.47	1.24	0.09	0	0.01	0.02	0.41	0.25	1.82	2.77	Anastasio		
23/10/2012	FU-04308-HE	1008	Oxidada/Espumante	1610	24.75	13.22	41.02	8.72	8.1	3.5	0.42	1.22	0	0	0.01	0.01	0.35	0.26	1.87	2.53	Alvarez	
24/10/2012	FU-04309-HE	1008	Oxidada/Espumante	1620	21.25	11.3	46.94	9.57	6.95	3.95	0.45	1.58	0.09	0	0.0009	0.02	0.37	0.28	1.88	2.73	Paredes	
24/10/2012	FU-04310-HE	1008	Oxidada/Espumante	1610	20	10.79	50.9	9	6.81	3.56	0.46	1.25	0	0	0.0009	0.03	0.32	0.21	1.85	2.69	Paredes	
24/10/2012	FU-04312-HE	1008	Oxidada/Espumante	1610	22.73	11.2	42.62	11.25	7.16	3.92	0.52	1.25	0.13	0	0.01	0.02	0.33	0.27	2.03	3.03	Alvarez	
24/10/2012	FU-04311-HE	1008	Oxidada/Espumante	1625	21.74	11	46.56	10.25	6.98	3.85	0.51	1.12	0.1	0	0.008	0.02	0.29	0.26	1.98	2.91	MARCILLO	
24/10/2012	FU-04320-HE	1040	Oxidada/Espumante	1597	28.31	17.74	19.59	8.59	4.65	0.64	0.83	0	0.06	0.01	0	0.24	0.26	1.86	3.15	Anastasio		
24/10/2012	FU-04321-HE	1040	Oxidada/Espumante	1621	30.55	18.76	12.02	19.11	11.15	5.05	0.87	0.55	0.18	0.08	0.01	0.01	0.18	0.2	1.63	2.65	Anastasio	
24/10/2012	FU-04322-HE	1040	Oxidada/Espumante	28.14	17.06	17.19	19.04	9.47	5.3	0.82	1	0	0.09	0.01	0.01	0.23	0.12	1.65	2.77	Anastasio		
24/10/2012	FU-04323-HE	1040	Oxidada/Espumante	1626	25.01	16.87	17.34	21.1	9.54	5.06	0.82	1.19	0.16	0.14	0.02	0.01	0.23	0.19	1.48	2.73	Anastasio	
25/10/2012	FU-04324-HE	1040	Oxidada/Espumante	1623	24.87	19.99	22.89	18.49	10.15	5.53	0.96	1.05	0.27	0.09	0.02	0.01	0.31	0.14	1.34	2.37	PAREDIS	
25/10/2012	FU-04325-HE	1040	Oxidada/Espumante	1631	28.87	19.19	14.18	14.73	11.71	5.52	1.02	1.28	0.25	0.1	0	0.01	0.29	0.2	1.50	2.27	PAREDIS	
25/10/2012	FU-04326-HE	1040	Oxidada/Espumante	1620	24.5	19.22	18.62	16.86	10.36	5.36	0.91	0.82	0.25	0	0.02	0.01	0.14	0.13	1.27	2.15	PAREDIS	
25/10/2012	FU-04327-HE	1040	Oxidada/Espumante	1650	25.82	17.07	17.68	21.59	9.81	5.47	0.78	1.18	0.2	0	0.03	0	0.21	0.2	1.51	2.78	PAREDIS	
25/10/2012	FU-04329-HE	1040	Oxidada/Espumante	1659	30.93	16.7	16.87	17.44	9.46	4.15	0.83	0.68	0.21	0.08	0.02	0.02	0.28	0.31	1.8521	2.89641	Coberia	
																					PROMEDIO	
																					1.79	2.74

Tabla 3: Análisis químicos de la escoria



### **Preparación específica de la muestra**

El análisis químico de la escoria recibida en la ciudad de Cuenca se realizó tras un muestreo aleatorio de la misma. Se tomaron seis tipos de muestras, las tres primeras de escoria y las tres siguientes de diferentes tipos de hormigones, las cuales se detallan a continuación:

- Escoria de acero en calidad de árido grueso.
- Escoria de acero en calidad de árido fino.
- Escoria de acero en calidad de polvo.
- Hormigón con escoria de acero HEA G3-5.
- Hormigón convencional de alta resistencia HAR G2-10.
- Hormigón convencional de alta resistencia HAR G2-11.

Se tomaron 2 kilogramos aproximadamente de cada tipo, para obtener una muestra representativa de la escoria y se llevó a Guayaquil, al laboratorio de análisis químico de la empresa ANDEC S.A.

### **Proceso del análisis químico**

El proceso usado para el análisis químico se divide en tres partes: trituración, pulverización y el análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra.

#### **• Trituración de la muestra**

Consiste en la reducción del tamaño del material a 0.6 mm o tamiz #30, por medio de la trituradora de mandíbulas Herzog BB 100/200, la cual machaca materiales duros y dúctiles con grados de dureza de hasta 10, según Mohs.

#### **• Pulverización de la muestra**

Se procede a pulverizar y prensar la muestra del material triturado por medio de la



máquina Herzog HP- MP, a la cual se incorpora un anillo metálico de 4 cm de diámetro que contiene la mezcla entre el material pulverizado y pastillas aglutinantes de marca Mahlhilfe tabletten HP- MP MA14572-5; esto con la finalidad de obtener una masa compacta y homogénea de la muestra a analizarse. Luego de cuatro minutos la máquina expulsa la pastilla mencionada, la misma que para cada tipo de muestra presenta un color en particular.

- **Análisis de fluorescencia de rayos X (XRF)**

Una vez terminado el proceso anterior, se espera cinco minutos para que la muestra preparada se estabilice. Después la pastilla es trasladada a una zona aislada para realizar el análisis de fluorescencia de rayos X (XRF) por medio del aparato Thermo Scientific Niton XL2, que ha sido diseñado para analizar la composición de cualquier tipo de material de una manera rápida, precisa y fiable.

Finalmente los resultados captados por el dispositivo son procesados e impresos por un ordenador, los mismos que presentan el porcentaje de cada uno de los elementos mayoritarios y minoritarios, así como también el porcentaje de óxidos de la muestra. Los resultados impresos emplean términos como BAL, LOD Y TRAZA los cuales se definen a continuación:

**BAL.** Es la suma de los elementos que se encuentran por debajo de los límites de detección del espectrómetro.

**LOD.** Es el límite menor de detección de un elemento.

**TRAZA.** Es la porción diminuta de un elemento que está por debajo del límite de detección del espectrómetro.

El análisis químico se realizó de cada una de las muestra por separado.



## Resultados de los elementos

Los resultados impresos se anexan al final de la tesis, pero en este apartado se indican los elementos más relevantes del estudio químico.

Se han determinado los siguientes elementos mayoritarios con sus respectivos porcentajes:

COMPOSICIÓN QUÍMICA EN PORCENTAJE						
Elemento	Árido grueso	Árido fino	Polvo	HEA	HAR G2-11	HAR G2-10
Ca	26,438	19,317	17,302	22,462	13,678	12,730
Fe	23,673	18,648	14,514	12,548	3,021	3,088
Si	7,641	7,281	17,161	22,732	29,086	28,449
Al	6,227	5,120	9,566	3,778	7,558	6,412
Mg	LOD	LOD	6,457	LOD	LOD	LOD
Mn	3,397	2,788	2,199	1,590	0,082	0,070
Bal	30,529	40,456	30,811	35,187	41,971	47,395

Tabla 4: Composición química de los elementos de la escoria

Por su parte los porcentajes más sobresalientes de los elementos en calidad de óxidos son:

COMPOSICIÓN QUÍMICA EN PORCENTAJE						
Óxido	Árido grueso	Árido fino	Polvo	HEA	HAR G2-11	HAR G2-10
CaO	37,013	27,044	24,223	31,447	19,149	17,822
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,853	26,666	20,755	17,944	4,321	4,416
SiO <sub>2</sub>	16,351	15,581	36,725	48,646	62,245	60,881
MgO	0,000	7,574	10,718	0,000	4,632	0,000

Tabla 5: Composición química de los óxidos de la escoria



## Análisis de resultados

**Escoria.** La formación de escoria en hornos eléctricos constituye algo inherente al propio proceso. Está constituida en sentido general por  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , siendo la basicidad la propiedad fundamental de las mismas.

El material estudiado corresponde a una escoria básica, con índices de basicidad superiores a la unidad.

## Análisis general

Basado en el cuadro anterior el porcentaje de BAL es mayor a elementos tales como el calcio y el hierro, esto debido a la presencia de elementos químicos que se encuentran en pequeñas cantidades dentro de un material específico que no pueden ser detectados por el espectrómetro.

El análisis de la escoria siderúrgica en sus distintas presentaciones, exhibe mayor cantidad de calcio, seguido por el hierro y el silicio; por su parte los hormigones tienen mayor cantidad de silicio debido a que los mismos fueron confeccionados por arena de cuarzo y arena del río, ricos de este mineral.

El óxido de calcio llamado también "Cal" tiene mayor presencia que cualquier otro compuesto dentro del material y considerando las diferentes aplicaciones que tiene la cal, puede utilizarse en la industria de la construcción para la elaboración de prefabricados de cal: hormigón celular o aireado, ladrillos silico-calcáreos y bloques de tierra comprimida.

La muestra no presenta azufre, sulfatos, cloruros y sulfuros que generalmente son sustancias nocivas para el hormigón.

La cal libre ( $\text{CaO}$ ) y el óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) son sustancias presentes en la



escoria y pueden causar expansiones en el hormigón, debido a que reaccionan fuertemente con el agua generando los respectivos hidróxidos; sin embargo, este efecto está fuera del alcance del presente estudio, quedando como tema de investigación futura.

## 2.5 Caracterización física

Los áridos empleados para la confección de hormigones deben estar constituidos por partículas duras, pesadas, de formas adecuadas, que no sean inertes ni reactivas con el álcali del cemento; además deben estar exentos de contener arcillas, limos y materias orgánicas. El peso específico, granulometría, forma, tamaño, entre otros, son factores físicos de los áridos, los cuales pueden repercutir en la resistencia y calidad del hormigón.

Por lo general, la escoria de acero presenta mayor peso que un árido tradicional y por su alta porosidad figura tener gran porcentaje de absorción. Además, posee textura superficial áspera, forma angular y parece tener buena resistencia a la abrasión.

Por lo aludido anteriormente, este apartado tiene como finalidad identificar las características físicas de la escoria siderúrgica en calidad de agregado grueso para tener una idea previa del comportamiento mecánico que tendrá mencionado material para la confección de mezclas de hormigón. Las principales propiedades físicas a ser evaluadas en la escoria son: pesos específicos, porcentaje de absorción de agua, resistencia a la abrasión, granulometría, forma, color y textura superficial.

### 2.5.1 Pesos específicos y absorción



Figura 12: Peso de la canasta

El peso específico en masa es la característica que por lo general se emplea para calcular el volumen ocupado por el agregado en el concreto elaborado con cemento Portland, y por otra parte el porcentaje de absorción de un agregado permite calcular la cantidad de agua que se debe emplear en una mezcla de hormigón.

El presente ensayo tiene como alcance la determinación del peso específico en masa, del peso específico aparente y de la absorción del agregado grueso. Así también, permite determinar, después de veinticuatro horas sumergido en agua, el peso específico de la masa en condición Saturado Superficialmente Seco (SSS).

#### Definiciones.

**Peso específico en masa o seco.** Es la relación entre el peso de la masa seca de la muestra y el volumen ocupado por la misma.

**Peso Específico SSS.** Es la relación entre el peso de la masa de la escoria saturada superficialmente seca y el volumen de vacíos contenidos en la muestra.

**Peso Específico Aparente.** Es el cociente entre el peso de la masa seca de la muestra y el volumen de su materia, excluidos los vacíos que existen.



**Absorción de agua.** Es la relación entre la cantidad de agua que absorbe el material tras haber estado sumergido veinticuatro horas y la masa seca de la muestra.

**Porosidad.** Es la relación entre el volumen de vacíos accesibles al agua contenidos en el material y el volumen de la muestra de áridos incluidos todos los vacíos.

### **Procedimiento.**

Se selecciona, por el método de cuarteo, aproximadamente 400 gr de agregado de la muestra a ensayar, rechazando el material que pase por la malla N: 4.

Después de lavar con cuidado la muestra para remover partículas extrañas, debe secarse y enfriarse al aire, a la temperatura ambiente del laboratorio durante dos horas; después se sumerge en agua por un período de veinticuatro horas.

La muestra se retira del agua y se envuelve en una tela grande absorbente, hasta que todas las películas visibles de agua se hayan removido; los fragmentos de mayor tamaño se secan uno por uno. Se obtiene el peso de la muestra en condición saturada y superficialmente seca. Este y todos los pesos subsecuentes se registran redondeando al más próximo 0.5 g. Después del pesado se debe colocar la muestra en SSS en el picnómetro y se añade agua hasta que quede totalmente lleno el picnómetro, se determina su peso y luego se pesa el picnómetro solo con agua.

Al final la muestra se pesa después de haber sido secada en el horno a una temperatura de 100 a 110°C y luego enfriada dos horas.

$$\text{Peso específico en masa} = \frac{D}{A - (B - C)}$$

$$\text{Peso específico SSS} = \frac{A}{A - (B - C)}$$



$$\text{Peso específico aparente} = \frac{D}{D - (B - C)}$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{A - D}{D} \times 100$$

$$\text{Porosidad} = \frac{A - D}{A - (B - C)}$$

**Dónde:**

A: peso del material superficie saturada seca, en gramos.

B: peso picnómetro + agua + material, en gramos.

C: peso picnómetro + agua, en gramos.

D: peso del material seco, en gramos.

**Resultados.**

Los resultados del ensayo se presentan a continuación en la tabla.

<b>PESOS ESPECÍFICOS ESCORIA 3/8" ( gr/cm<sup>3</sup> )</b>	
<b>A (gramos)</b>	400
<b>B (gramos)</b>	3795
<b>C (gramos)</b>	3516.2
<b>D (gramos)</b>	360
<b>PESO ESPECÍFICO SECO</b>	<b>3,18</b>
<b>PESO ESPECÍFICO SSS</b>	<b>3,30</b>
<b>PESO ESPECÍFICO APARENTE</b>	<b>3,59</b>
<b>% ABSORCIÓN DE AGUA</b>	<b>3,53</b>
<b>POROSIDAD</b>	<b>11,26</b>

**Tabla 6: Pesos específicos**

### 2.5.2 Resistencia a la abrasión



Figura 13: Máquina de los ángeles

La resistencia a la abrasión o desgaste de los agregados no es más que la capacidad de resistir un desgaste superficial. Su conocimiento es indispensable en el diseño de mezclas porque de ella se conocerá la durabilidad y la resistencia que tendrá el concreto.

El ensayo se rige en la norma ASTM C 131, el cual incluye el procedimiento para ensayar agregados gruesos menores de 1 ½" (38.1 mm), los cuales sufrirán el roce continuo del material y de las esferas de acero.

#### **Procedimiento.**

Tomando en cuenta la norma mencionada se tomó una cantidad de 2500 gr del material retenido por la malla ½" (12.7 mm), 2500 gr del material retenido por la malla 3/8" (9.51 mm) y once esferas de acero cuyo diámetro es de 46.8 mm con un peso aproximado de 395 gramos cada una.

La muestra de prueba y la carga de abrasión se colocan en la máquina de los Ángeles, y se hace girar a una velocidad de 30 a 33 rpm, hasta completar las 500 revoluciones.



Después del número de revoluciones prescrito, se descarga el material desgastado y se hace una separación preliminar de la muestra en una malla mayor que la N:12 (1.68 mm). La porción más fina se cierra en la malla N: 12. El material más grueso que la malla N: 12 se lava y se seca en el horno.

Por último el coeficiente de abrasión es la diferencia del peso original y el peso final de la muestra, dividido por el total del material introducido en la máquina, expresado en porcentaje.

### Resultados.

<b>ENSAYO DE ABRASIÓN</b>	
<b>PESO TAMIZ N: 4</b>	2500
<b>PESO TAMIZ N: 8</b>	2500
<b>PESO TOTAL</b>	5000
<b>PESO RETENIDO TAMIZ 12</b>	2880
<b>PESO QUE PASA TAMIZ N:12</b>	2120
<b>% DESGASTE</b>	<b>42,4</b>

Tabla 7: Ensayo de abrasión

El resultado obtenido para la escoria es de 42.4%, lo que indica que el material tiene una baja resistencia al desgaste.

### 2.5.3 Granulometría



Figura 14: Serie de tamices

La granulometría se define como la distribución por tamaños de las partículas de los agregados, generalmente expresado en porcentaje, utilizado para caracterizar un material y comprobar su capacidad para el uso como árido en la mezcla para la elaboración de hormigones.

Se ha seguido el proceso descrito en la norma ASTM C 136: Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos. Este método consiste en la determinación de la distribución de partículas, por tamaños de agregados gruesos, mediante cribado.

#### Procedimiento.

Para realizar el ensayo se acoplan los tamices de la serie gruesa y fina ( $\frac{1}{2}$ " ,  $\frac{3}{8}$ " , N:4, N:8, N:16, N:30, N:50, N:100, N:200 y el fondo metálico que pasa N:200) en orden decreciente de tamaño de abertura, y se coloca 2.4 kilogramos de la muestra en la malla superior; el peso mínimo de la muestra corresponde para un tamaño máximo nominal de la partícula  $\frac{3}{8}$ " según la norma.

El cribado se realiza con una tamizadora automática durante el tiempo necesario, de manera que, una vez terminado, no más del uno por ciento, en peso, del residuo en



cualquier malla individual, pase por ella durante un minuto de cribado continuo a mano.

A continuación el material retenido por cada tamiz se pesa en la balanza al más próximo 0.1 por ciento del peso de la muestra. Finalizado el paso anterior, se hace una gráfica donde se representa la cantidad de material respecto el tamaño de grano.

Cabe recordar que la escoria de estudio se trituró y tamizó previamente, por lo que el material utilizado para este análisis en su mayor parte pasa por el tamiz 3/8" (9.52 mm de abertura) y retiene el tamiz #4 (4.76 mm de abertura). Motivo suficiente para que la curva granulométrica sea denominada "mal graduada" por tratarse de partículas correspondientes a un rango corto o estrecho de tamices. A este tipo de árido se lo conoce como uniforme.

### Resultados.

El resultado del análisis granulométrico de la escoria y su curva granulométrica se presentan en la siguiente tabla y figura respectivamente.

<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>					
<b>PROYECTO: TESIS HORMIGONES CON ESCORIA DE ACERO</b>					
<b>MATERIAL: ESCORIA 3/8"</b>					
<b>FECHA: 13/03/2013</b>					
<b>TAMIZ #.</b>	<b>ABERTURA MM.</b>	<b>PESO RETEN. GR.</b>	<b>P. RET. ACUM. GR.</b>	<b>% RETENIDO</b>	<b>% PASA</b>
1/2"	12,70				100,00
3/8"	9,52	6,84	6,84	0,28	99,72
N.4	4,76	2072,00	2078,84	85,20	14,80
N.8	2,38	273,00	2351,84	96,39	3,61
N.16	1,19	50,00	2401,84	98,44	1,56
N.30	0,59	16,20	2418,04	99,10	0,90
N.50	0,297	13,00	2431,04	99,63	0,37
N.100	0,149	8,96	2440,00	100,00	0,00
N.200	0,074	0,00	2440,00	100,00	0,00

Tabla 8: Granulometría de la escoria

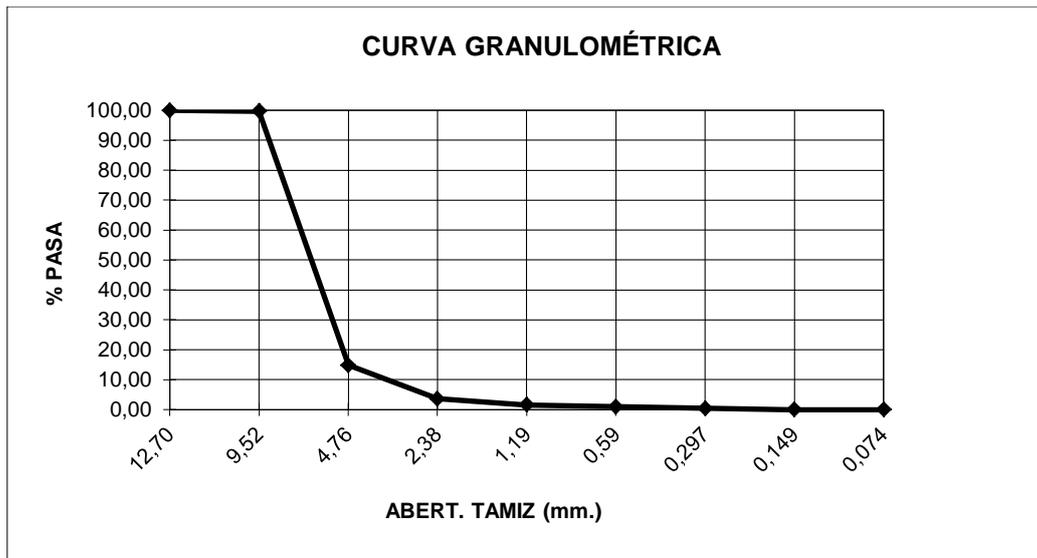


Figura 15: Curva granulométrica escoria

#### 2.5.4 Forma

La forma del árido influye en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón. Se ha demostrado que la grava triturada produce resistencias mayores que la redondeada. Esto se debe a la trabazón mecánica que se desarrolla en las partículas angulosas. Empero, se debe evitar una angulosidad excesiva debido al aumento en el requerimiento de agua y disminución de la trabajabilidad a que esto conlleva.

Para precisar la forma de un agregado, según la norma ASTM C33, se utiliza el denominado coeficiente volumétrico medio o coeficiente de forma, que es igual a la relación entre el volumen de la partícula y el volumen de la esfera en que resulta inscrita.

#### Procedimiento.

Para este ensayo se han tomado 30 granos de escoria de acero de tamaño máximo nominal 3/8". Para determinar el coeficiente de forma del conjunto de partículas consideradas, se procede a medir la dimensión máxima de cada partícula y determinar su volumen aparente aplicando el método para obtener el peso



específico seco del árido. Seguidamente el coeficiente de forma (cf), se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Cf = \frac{V1 + V2 + V3 + \dots + Vn}{\frac{\pi}{6} (D1^3 + D2^3 + D3^3 + \dots + Dn^3)}$$

**Dónde:**

V: volumen de la partícula

D: mayor dimensión de la partícula

De acuerdo al valor del coeficiente de forma se indica lo siguiente:

- Si cf < 0,15 la partícula se considera de mala forma.
- Si 0,15 < cf < 0,20 la partícula se considera de forma regular.
- Si cf > 0,20 la partícula se considera en buena forma.

**Resultados.**

<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>			
<b>VOLUMEN (cm)</b>			
<b>V1</b>	0,43	<b>V16</b>	0,49
<b>V2</b>	0,45	<b>V17</b>	0,42
<b>V3</b>	0,44	<b>V18</b>	0,45
<b>V4</b>	0,35	<b>V19</b>	0,35
<b>V5</b>	0,32	<b>V20</b>	0,47
<b>V6</b>	0,38	<b>V21</b>	0,3
<b>V7</b>	0,46	<b>V22</b>	0,47
<b>V8</b>	0,41	<b>V23</b>	0,46
<b>V9</b>	0,30	<b>V24</b>	0,44
<b>V10</b>	0,36	<b>V25</b>	0,32
<b>V11</b>	0,41	<b>V26</b>	0,38
<b>V12</b>	0,45	<b>V27</b>	0,37
<b>V13</b>	0,41	<b>V28</b>	0,41
<b>V14</b>	0,46	<b>V29</b>	0,35
<b>D1-DN (cm)</b>			0,9525
<b>CF</b>		<b>0,79</b>	

Tabla 9: Coeficiente de forma de la escoria

En base a los resultados conseguidos podemos decir que el Coeficiente de Forma (CF) es muy bueno, si se compara con los agregados naturales de canto rodado, los cuales varían entre 0,20 a 0,40 aproximadamente.

### 2.5.5 Color

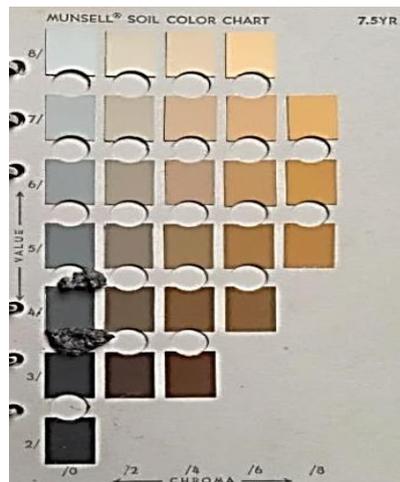


Figura 16: Color de la escoria

El color es una percepción visual que se genera en el cerebro permitiendo identificar cualquier material sin importar la forma que tenga.

### Procedimiento.

Se ha tomado cinco granos de escoria secos y cinco granos en condiciones húmedas. Posteriormente se utiliza la carta de color de suelo Munsell para determinar el color de la escoria siderúrgica empleado para el presente estudio.

### Resultados.

Los agregados presentan pequeños puntos de color naranja rojizo, semi-oscuro y de saturación moderada, esto es el resultado de la oxidación de diminutas partículas de hierro; sin embargo, los colores que priman en el agregado siderúrgico son:



En condiciones secas:	7.5 YR / 4 / 0	gris oscuro
En condiciones húmedas:	7.5 YR / 3 / 0	gris muy oscuro

La nomenclatura representa: Matiz / Valor / Croma; siendo YR amarillo y rojo respectivamente.

### **2.5.6 Textura superficial**

La textura superficial de un agregado permite calificar qué tan lisa o rugosa es la superficie del material. Es una característica física que está ligada a la absorción del material, debido a que los agregados muy rugosos tienen mayor absorción, comparado a los agregados con textura lisa; por lo que se requiere más agua para producir un concreto trabajable, caso contrario se produciría concretos poco plásticos. Además, se dice que las partículas de agregado angulares requieren más cemento para mantener la misma relación agua-cemento.

#### **Procedimiento.**

Para calificar la textura superficial del agregado se han tomado aleatoriamente 30 granos de tamaño máximo nominal 3/8" y se ha clasificado visualmente en grupos según el parecido que tengan en su textura superficial.

#### **Resultados.**

Se han podido identificar los siguientes porcentajes de cada grupo:

El 27% de la muestra (ocho granos) posee una superficie mixta: una parte lisa y la otra rugosa.



**Figura 17: Textura mixta de la escoria**

El 23% del total de la muestra (siete granos) posee una superficie áspera.



**Figura 18: Textura áspera de la escoria**

El 50% del total de la muestra (quince granos) tiene una superficie áspera y cavernosa.



**Figura 19: Textura áspera y cavernosa de la escoria**



## CAPÍTULO III

### 3. ELABORACIÓN DE HORMIGONES

El hormigón es el material de construcción más usado en el mundo y como tal está sujeto a múltiples estudios e investigaciones con la finalidad de mejorar su resistencia, durabilidad y sostenibilidad para cubrir el amplio rango de aplicaciones solicitadas en diversas obras civiles.

Por estas razones el propósito de este apartado es obtener hormigones de elevadas resistencias empleando agregados naturales usados tradicionalmente, así como también la fabricación de hormigones incorporando escoria de acero en calidad de agregado grueso.

#### 3.1 Caracterización de los materiales

Sin duda la caracterización y calidad de los materiales utilizados para esta investigación es importante para conocer las prestaciones físicas y mecánicas que cada uno de ellos aporta para el diseño y la elaboración de hormigones.

Para la fabricación de concretos con áridos naturales y concretos con escoria siderúrgica, se ha utilizado los siguientes materiales: cemento Portland, agua, grava triturada, escoria de acero, arena gruesa de río, arena fina silíceo, microsílca (*Sika Fume*) y aditivos plastificantes.

##### 1. Conglomerante

**Cemento Portland.** El cemento hidráulico utilizado para la confección del hormigón proviene de la empresa multinacional Holcim Rocafuerte. El cemento hidráulico es de tipo GU, es decir, de fraguado normal y uso general, fabricado bajo la norma técnica ecuatoriana INEN 2380, norma que establece los requisitos de desempeño que deben cumplir los cementos hidráulicos.



Los requisitos físicos de este tipo de cemento se describen a continuación:

<b>REQUISITOS FÍSICOS</b>		
	<b>INEN 2380</b>	<b>VALOR</b>
Cambio de longitud por autoclave, % máximo.	0.80	-0.038
Tiempo de fraguado, método de Vicat		
Inicial, no menos de, minutos.	45	222
Inicial, no más de, minutos.	420	323
Contenido de aire del mortero, en volumen, %.	A	3.0
Resistencia a la compresión, mínimo MPa		
1 día.	A	8
3 días.	13	17
7 días.	20	22
28 días.	28	31
Expansión en barras de mortero 14 días, % máx.	0.02	0.006

Tabla 10: Requisitos del cemento

**Nota:** La información corresponde al promedio de los datos obtenidos en febrero de 2012 dentro de la planta hormigonera Holcim-Cuenca. La resistencia a veintiocho días corresponde al promedio del mes mencionado.

(A).- Límite no especificado por la NTE INEN 2380. Resultado reportado solo como información.

(ND).- Resultado del ensayo no disponible para el período de análisis indicado.

## 2. Agua

El agua usada es la de consumo doméstico de la ciudad de Cuenca-Ecuador, la misma que cumple con los requisitos establecidos por la norma INEN para la confección de hormigones así como también, por la Organización Mundial de la



Salud (OMS), las cuales establecen que el agua debe tener una dureza reducida, no poseer color ni turbiedad, y tampoco la presencia de sustancias o microorganismos. Se adjunta al final de la tesis el análisis de agua hecho por el laboratorio químico de la Universidad de Cuenca.

### 3. Agregado grueso

**Grava.** Proviene de la cantera Rocazul situada en el sector de La Josefina-Azuay, la misma que explota los recursos naturales en el mismo sitio. El material es de origen andesítica, triturado a un tamaño máximo nominal 3/8".

A continuación se presenta el análisis y grafico de la granulometría realizada.

<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>					
<b>PROYECTO: TESIS HORMIGONES CON ESCORIA DE ACERO</b>					
<b>MATERIAL: RIPIO 3/8"</b>					
<b>FECHA: 17/01/2013</b>					
<b>TAMIZ #.</b>	<b>ABERTURA MM.</b>	<b>PESO RETEN. GR.</b>	<b>P. RET. ACUM. GR.</b>	<b>% RETENIDO</b>	<b>% PASA</b>
1/2"	12,70				100,00
3/8"	9,52	6,00	6,00	0,25	99,75
N.4	4,76	2070,00	2076,00	85,19	14,81
N.8	2,38	273,00	2349,00	96,39	3,61
N.16	1,19	49,00	2398,00	98,40	1,60
N.30	0,59	15,00	2413,00	99,02	0,98
N.50	0,297	14,00	2427,00	99,59	0,41
N.100	0,149	10,00	2437,00	100,00	0,00
N.200	0,074	0,00	2437,00	100,00	0,00

Tabla 11: Granulometría del ripio

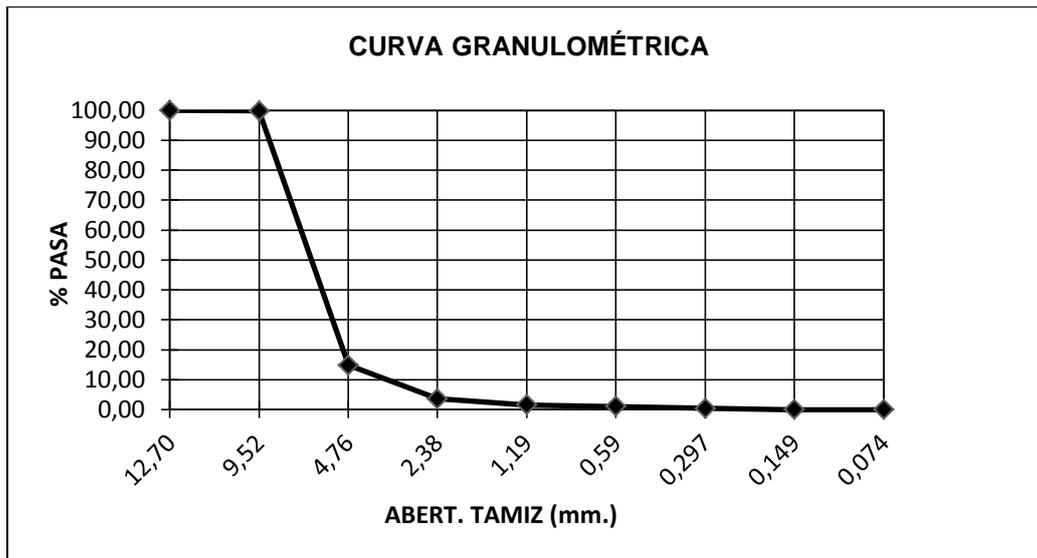


Figura 20: Curva granulométrica del ripio

**Escoria de acero.** Es producida por la empresa siderúrgica ANDEC S.A, en la ciudad de Guayaquil. La característica de la escoria fue indicada en el capítulo 2.

#### 4. Agregado fino

**Arena gruesa.** Este material es procedente de la Cantera Rocazul y fue obtenido del río Santa Isabel- Azuay, el mismo que presenta una granulometría bien graduada.

A continuación se coloca el análisis y grafico granulométrico hecho de este árido.

<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>					
<b>PROYECTO: TESIS HORMIGONES CON ESCORIA DE ACERO</b>					
<b>MATERIAL: ARENA GRUESA STA. ISABEL</b>					
<b>FECHA: 24/01/2013</b>					
<b>TAMIZ #.</b>	<b>ABERTURA MM.</b>	<b>PESO RETEN. GR.</b>	<b>P. RET. ACUM. GR.</b>	<b>% RETENIDO</b>	<b>% PASA</b>
1/2"	12,70				
3/8"	9,52				
N.4	4,76	0,00	0,00	0,00	100,00

N.8	2,38	147,00	147,00	14,70	85,30
N.16	1,19	372,00	519,00	51,90	48,10
N.30	0,59	306,00	825,00	82,50	17,50
N.50	0,297	136,00	961,00	96,10	3,90
N.100	0,149	30,00	991,00	99,10	0,90
N.200	0,074	1,00	992,00	99,20	0,80
PASA #200		8,00			

Tabla 12: Granulometría arena gruesa

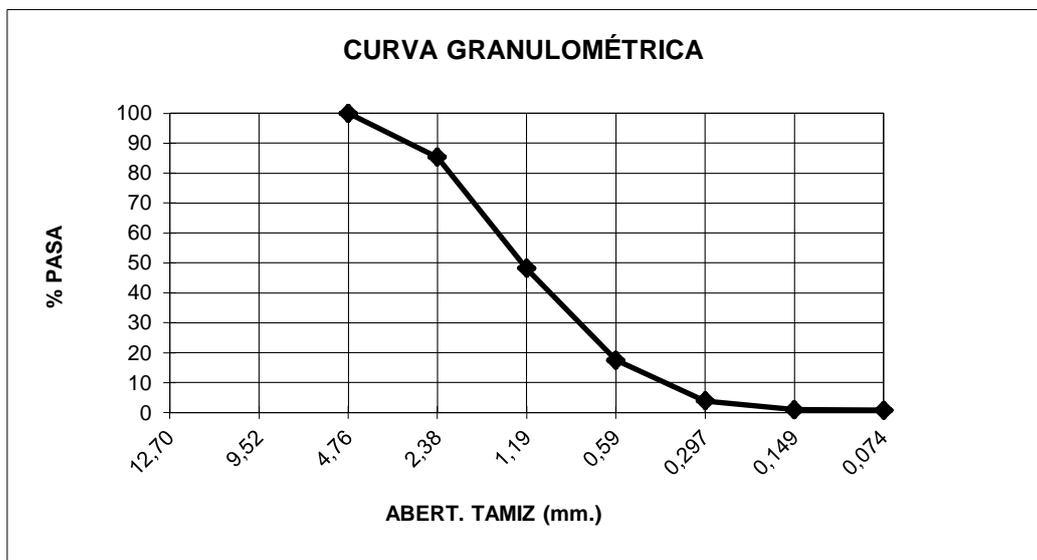


Figura 21: Curva granulométrica de la arena gruesa

El módulo de finura es de 3.44.

**Arena fina:** se utilizó para este estudio la denominada arena colma fina de cuarzo procedente de la empresa Sika. Su granulometría varía entre la malla 30-200. Tiene una densidad aparente de 1.6 kg/litro. Se ha colocado en seguida los resultados del análisis granulométrico de este fino.

<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>					
<b>PROYECTO: HORMIGONES CON ESCORIA DE ACERO</b>					
<b>MATERIAL: ARENA COLMA FINA</b>					
<b>FECHA: 17/01/2013</b>					
<b>TAMIZ #.</b>	<b>ABERTURA MM.</b>	<b>PESO RETEN. GR.</b>	<b>P. RET. ACUM. GR.</b>	<b>% RETENIDO</b>	<b>% PASA</b>
1/2"	12,70				
3/8"	9,52				
N.4	4,76				
N.8	2,38	0,00	0,00	0,00	100,00
N.16	1,19	0,00	0,00	0,00	100,00
N.30	0,59	104,45	104,45	17,41	82,59
N.50	0,297	223,49	327,94	54,66	45,34
N.100	0,149	218,50	546,44	91,07	8,93
N.200	0,074	33,07	579,51	96,59	3,41
PASA #200		20,49			

Tabla 13: Granulometría de la arena fina

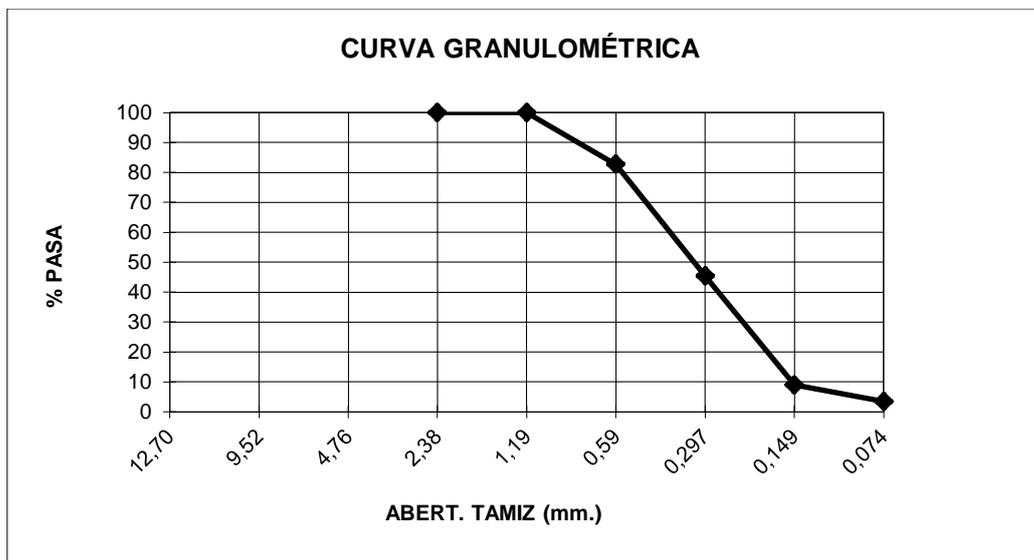


Figura 22: Curva granulométrica arena fina



Los análisis de los materiales antes nombrados son importantes detallar, debido a que el tipo de cemento, al igual que la distribución de tamaños de los áridos, mejora notablemente la resistencia del hormigón, y por su parte la calidad del agua influye en la resistencia al perturbar el fraguado y endurecimiento.

### 3.2 Diseño de mezclas

El objetivo de un diseño de hormigones es obtener una mezcla con determinadas propiedades específicas, tanto en estado fresco como endurecido, al menor costo de producción. Es importante señalar que las propiedades del concreto endurecido son especificadas por el calculista estructural y las propiedades del concreto fresco están definidas básicamente por el tipo de construcción y por las técnicas de transporte y colocación. Por su parte, el costo de elaboración del concreto depende de los equipos, mano de obra y materiales.

Es por este motivo que el diseño de mezclas para hormigones convencionales como para aquellos que incorporan escoria de acero, han sido desarrollados según el proceso de evaluación del primer concurso nacional Hormigones de Alta Resistencia, organizado por el Instituto Ecuatoriano del Cemento y Hormigón (INECYC); competencia cuya temática consiste en elaborar cinco cilindros de 200 por 100 mm y obtener el mayor índice resistencia/costo de la mezcla de hormigón, calculada de la siguiente manera: la resistencia promedio entre probetas de la misma mezcla, menos dos veces la desviación estándar del grupo de probetas, dividido por el costo final de la mezcla. En fórmula expresado como:

$$\text{Índice} = \frac{f'c - 2 \sigma}{\text{Costo final mezcla}}$$

La importancia de incluir la desviación estándar en el índice, es debido a que éste parámetro normaliza las condiciones de aceptabilidad de los hormigones, entendiéndose como aceptabilidad, la regularidad de la producción de un hormigón.



En otras palabras entre más bajo sea la desviación estándar, mayor control de calidad tendrá la mezcla de hormigón, según el Comité 214 del A.C.I.

El costo final se define como la suma del costo de cada material usado para elaborar cinco especímenes de concreto de una misma mezcla.

Cabe indicar que el mencionado concurso tiene el siguiente reglamento:

Los materiales cementantes pueden ser de cualquier combinación de cemento Portland de acuerdo a la ASTM C150, o cualquier mezcla de cemento según la ASTM C595 o ASTM C1157. Materiales cementantes suplementarios pueden incluir cemento aglutinante de acuerdo con la ASTM C989, puzolanas según la ASTM C618, y/o humo de sílice según la ASTM C1240. Puede ser usado cualquier tipo de agregado no-metálico.

Agregados químicos nombrados en la ASTM C260, C494, O C1017 están permitidos.

El uso de epóxicos y otro tipo de polímeros, gomas y aglutinantes no son permitidos.

El curado debe ser a presión atmosférica, y la temperatura del curado no debe exceder del punto de ebullición del agua a temperatura atmosférica.

En base al reglamento anterior se han diseñado once tipos de mezclas para hormigones convencionales, cinco con microsilica y seis sin microsilica, utilizando el Método de Ajuste a la Curva, llamado también *Road Research Laboratory*, el cual consiste en ajustar la granulometría de los áridos a curvas de referencia que consideran parámetros: resistencia media, relación agua/cemento, grado de docilidad, tamaño máximo del agregado, proporciones de mezcla de áridos, cantidad de cemento, dosificación y correcciones por humedades. Por su parte, los diseños de hormigones con escoria de acero serán los mismos utilizados para la confección del hormigón convencional, con la diferencia en que se reemplazará el agregado grueso tradicional por la escoria de acero, con el afán de tener una comparación directa entre ambos.

**Método del diseño de mezclas “*Road Research Laboratory*”**

**1) Aplicación.** Es para todo tipo de hormigones, tanto en masa como armados, siendo este proceso para hormigones en masa.

**2) Resistencia media.** Para diseñar un concreto se debe elegir una resistencia, para la cual hay que tener en cuenta la dispersión de las probetas fabricadas en obra. Varios factores como el cuidado con que se prepare o realice la mezcla, el control de las operaciones y la uniformidad de los componentes del hormigón son los que afectan en la dispersión mencionada.

La siguiente tabla ha servido de guía para determinar la relación que existe entre la resistencia media y la mínima de los hormigones convencionales.

<b>CONDICIONES DE TRABAJO</b>	<b>Resistencia mínima, expresada en tanto por ciento de la resistencia media</b>
Control excelente. Medida de los componentes, en peso. Determinación de la humedad de los áridos. Vigilancia constante.	75
Control mediano. Medida de los componentes, en peso.	60
Control deficiente. Medida de los áridos, en volúmenes.	40

**Tabla 14: Relación resistencia media y mínima**



Para la presente tesis la resistencia mínima, expresada en tanto por ciento de la resistencia media es de 75% debido a que la fabricación del hormigón se lo hizo en laboratorio, el cual cuenta con buenas condiciones de control.

### 3) Relación agua/cemento

La relación agua/cemento necesaria para obtener la resistencia media requerida se indica a continuación:

Relación agua/cemento, en peso	Resistencia a compresión, en kg/cm <sup>2</sup>				
	3 días	7 días	28 días	3 meses	1 año
0,35	267,2	400,7	527,3	611,7	773,4
0,40	225,0	351,5	471,1	548,4	703,1
0,45	189,8	302,3	421,8	492,1	653,8
0,50	154,7	253,1	372,6	442,9	590,6
0,55	126,5	218,0	323,4	393,7	541,4
0,60	105,5	182,8	281,2	351,5	492,1
0,65	84,4	154,7	246,1	309,3	442,9
0,70	63,3	133,6	217,9	274,2	393,7
0,75	56,2	112,5	196,9	246,1	351,5
0,80	49,2	105,5	175,8	217,9	302,3

Tabla 15: Relación agua/cemento

**Nota:** Las cifras dadas por esta tabla son valores medios obtenidos con hormigones de cemento Portland de calidad media, curados a temperaturas normales.

Para el diseño de hormigones convencionales de alta resistencia se han considerado resistencias medias entre 700 a 1000 kg/cm<sup>2</sup>.

### 4) Docilidad

La elección del grado de docilidad depende de las condiciones y método de colocación y compactación de un concreto en particular. Cabe mencionar que para



las probetas patrón de hormigón convencional, usadas para el concurso de hormigones de alta resistencia, no se mide el asentamiento por tener alta fluidez. Pero para los hormigones con escoria de acero se ha tomado una docilidad media de  $75 \pm 2$  mm, que se utiliza en hormigones de armado normal sin vibraciones y secciones muy armadas con vibración, tal como indica la siguiente tabla.

GRADOS DE DOCILIDAD		
DOCILIDAD	ASENTAMIENTO	USOS
Muy baja	0-25 mm	Hormigón vibrado para carreteras o secciones grandes.
Baja	25-50 mm	Cimentaciones de hormigón en masa sin vibración. Secciones armadas sencillas, vibradas.
Media	50-100 mm	Hormigón armado normal sin vibraciones y secciones muy armadas con vibración.
Alta	100-175 mm	Secciones excesivamente armadas. Normalmente el hormigón no es adecuado para vibración.

Tabla 16: Grados de docilidad

### 5) Tamaño máximo de árido

Se determinará de acuerdo con la menor dimensión del molde o encofrado y con la separación de armaduras. Según el método ASTM C172 indica que el diámetro del cilindro deberá ser tres veces el tamaño máximo nominal del agregado; es decir, para el caso de moldes de 10 por 20 cm, el tamaño máximo nominal será de  $4/3$ " (33.7 mm) y para las probetas de 15 por 30 cm es de 2" (50.8 mm). Para este estudio se ha considerado un árido chancado con aristas de canto vivo de tamaño máximo nominal  $3/8$ " (9.52 mm), exento de arcillas. *"Actualmente empresas nacionales usan este tamaño de agregado principalmente en pavimento flexible y elementos prefabricados."* (Ing. Vladimir Carrasco de la Empresa PRETENZA, entrevista realizada por Santiago Vélez G. 03/05/2013).

## 6) Curva de referencia

En las figuras 23, 24 y 25 se representan curvas granulométricas de referencia utilizadas para áridos de tamaños máximos nominales 3/8“(9.52 mm), 3/4“(19.05 mm) y 1 ½ “(38.09 mm) respectivamente.

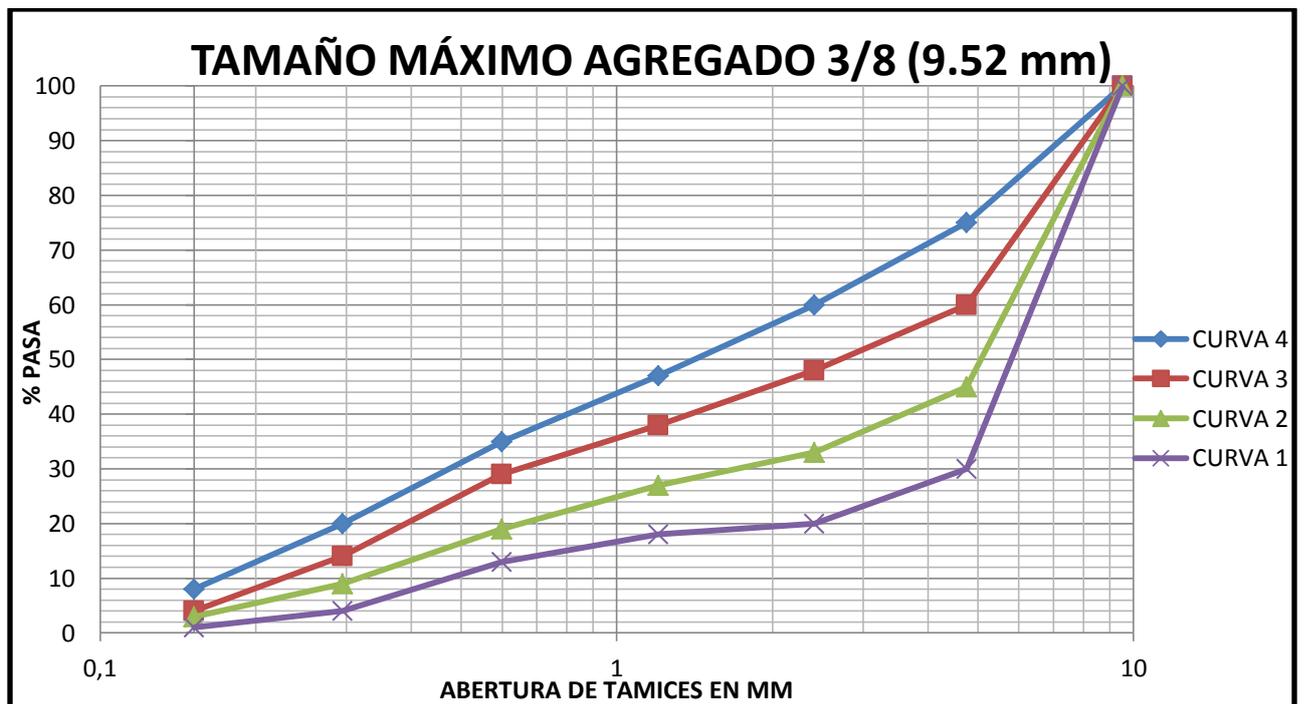


Figura 23: Curvas granulométricas de McIntosh y Erntroy 3/8”.

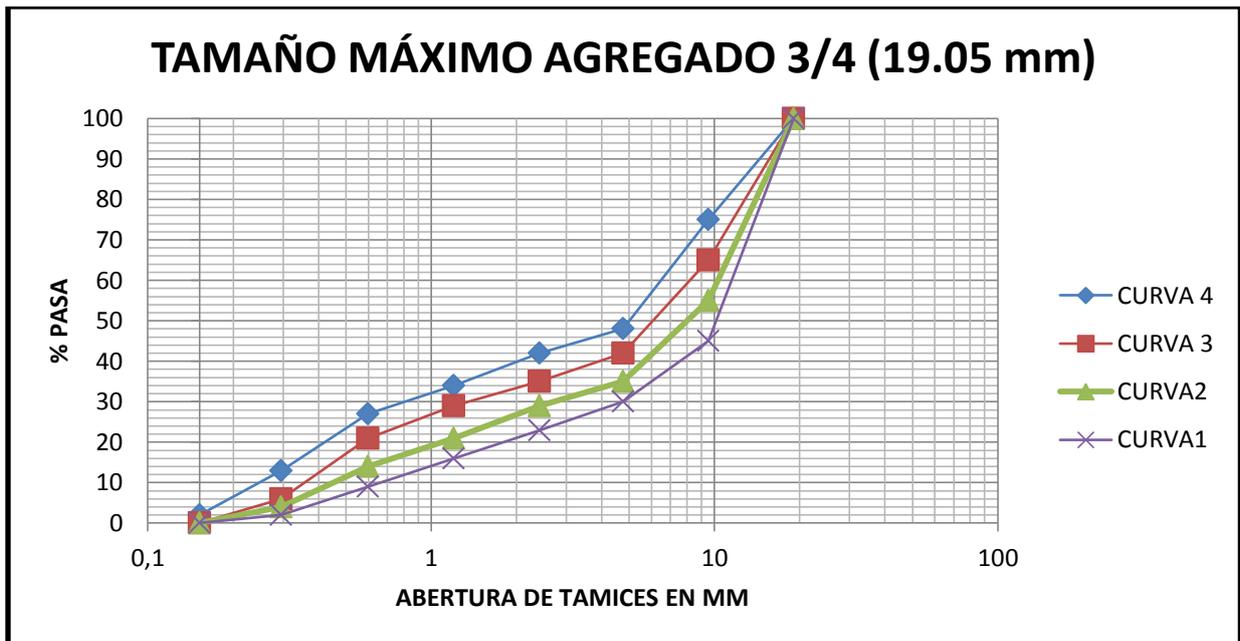


Figura 24: Curvas granulométricas No 4 de Road Note 3/4".

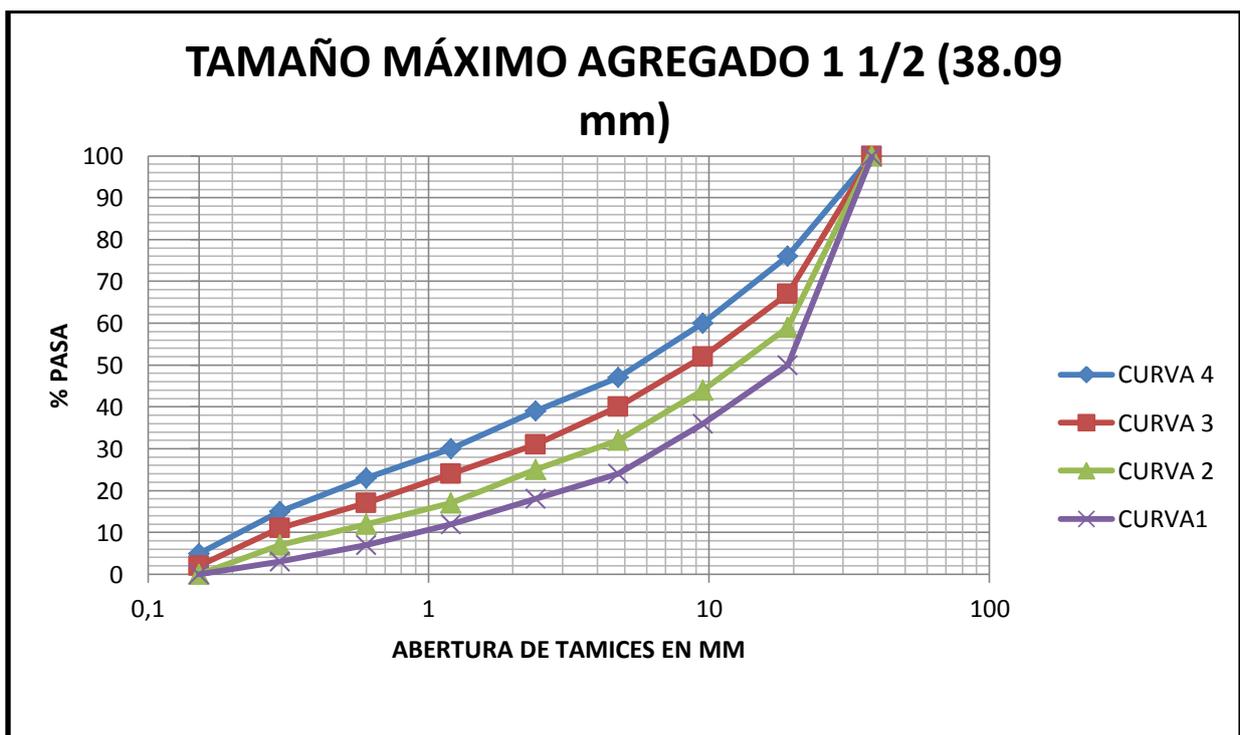


Figura 25: Curvas granulométricas No 4 de Road Note 1 1/2".

Estas curvas han sido establecidas experimentalmente y dan buenos resultados, pero no deben considerarse como granulometría ideales, ya que esto no existe en la práctica.



## 7) Proporciones en que se deben mezclar los áridos

Se opera mediante una hoja electrónica que modifica el porcentaje de cantidad de los distintos áridos disponibles de forma que las curvas granulométricas del árido compuesto se aproximen a las curvas de referencia o queden comprendidas en las zonas determinadas por estas.

## 8) Cantidad de cemento

Las relaciones árido/cemento en peso, requerida para cada uno de los cuatro grados de docilidad y varias relaciones agua/cemento, vienen dadas por la tabla 17, las mismas que toman en cuenta la granulometría, tamaño y tipo de árido.

Se determina, entonces, la relación árido/cemento que corresponde a cada una de las curvas granulométricas del árido compuesto tanteadas y lógicamente, se elegirá de todas ellas la que corresponde a una relación árido/cemento mayor ya que será la más económica.

RELACIÓN ÁRIDO/CEMENTO																
Docilidad	Muy baja				Baja				Media				Alta			
Curva de referencia número	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Relación a/c en peso	Árido redondeado de tamaño máximo 19,05															
0,35	4,5	4,5	3,5	3,2	3,8	3,6	3,2	3,1	3,1	3,0	2,8	2,7	2,8	2,8	2,6	2,5
0,4	6,6	6,3	5,3	4,5	5,3	5,1	4,5	4,1	4,2	4,2	3,9	3,7	3,6	3,7	3,5	3,3
0,45	8,0	7,7	6,7	5,8	6,9	6,6	5,9	5,1	5,3	5,3	5,0	4,5	4,6	4,8	4,5	4,1
0,5	-	-	8,0	7,0	8,2	8,0	7,0	6,0	6,3	6,3	5,9	5,4	5,5	5,7	5,3	4,8
0,55	-	-	-	8,1	-	-	8,2	6,9	7,3	7,3	7,4	6,4	6,3	6,5	6,1	5,5
0,6	-	-	-	-	-	-	-	7,7	-	-	8,0	7,2	x	7,2	6,8	6,1
0,65					-	-	-	8,5	-	-	-	7,8	x	7,7	7,4	6,6
0,7					-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	7,9	7,2
0,75													x	-	-	7,6
0,8													x	-	-	-



0,85														x	-	-	-
0,9																	
<b>Relación a/c en peso</b>	<b>Árido natural irregular de tamaño máximo 19,05 mm</b>																
0,35	3,7	3,7	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	2,7	2,6	2,7	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,2	
0,4	4,8	4,7	4,7	4,0	3,9	3,9	3,8	3,5	3,3	3,4	3,5	3,2	3,1	3,2	3,2	2,9	
0,45	6,0	5,8	5,7	5,0	4,8	4,8	4,6	4,3	4,0	4,1	4,2	3,9	x	3,9	3,9	3,5	
0,5	7,2	6,8	6,5	5,9	5,5	5,5	5,4	5,0	4,6	4,8	4,8	4,5	x	4,4	4,4	4,1	
0,55	8,3	7,8	7,3	6,7	6,2	6,2	6	5,7	x	5,4	5,4	5,1	x	4,8	4,9	4,7	
0,6	9,4	8,6	8	7,4	6,8	6,9	6,7	6,2	x	6	6	5,6	x	x	5,4	5,2	
0,65	-	-	-	8,0	7,4	7,5	7,3	6,8	x	x	6,4	6,1	x	x	5,8	5,6	
0,7	-	-	-	-	8	8	7,7	7,4	x	x	6,8	6,8	x	x	6,2	6,1	
0,75	-	-	-	-	-	-	-	7,9	x	x	7,2	7	x	x	6,6	6,5	
0,8					-	-	-	-	x	x	7,5	7,4	x	x	x	7	
0,85									x	x	7,8	7,8	x	x	x	7,4	
0,9									x	x	x	8,1	x	x	x	7,7	
0,95									x	x	x	-	x	x	x	8	
1													x	x	x	x	
<b>Relación a/c en peso</b>	<b>Árido machacado de tamaño máximo 19,05 mm</b>																
0,35	3,2	3	2,9	2,7	2,7	2,7	2,5	2,4	2,4	2,4	2,3	2,2	2,2	2,3	2,1	2,1	
0,4	4,5	4,2	3,7	3,5	3,5	3,5	3,2	3	3,1	3,1	2,9	2,7	2,9	2,9	2,8	2,6	
0,45	5,5	5	4,6	4,3	4,3	4,2	3,9	3,7	3,7	3,7	3,4	3,3	3,5	3,5	3,2	3,1	
0,5	6,5	5,8	5,4	5,0	5	4,9	4,5	4,3	4,2	4,2	3,9	3,8	x	3,9	3,8	3,5	
0,55	7,2	6,6	6	5,6	5,7	5,4	5	4,8	4,7	4,7	4,5	4,3	x	x	4,3	4	
0,6	7,8	7,2	6,6	6,3	6,3	6	5,6	5,3	x	5,2	4,9	4,8	x	x	4,7	4,4	
0,65	8,3	7,8	7,2	6,9	6,9	6,5	6,1	5,8	x	5,7	5,4	5,2	x	x	5,1	4,9	
0,7	8,7	8,3	7,7	7,5	7,4	7	6,5	6,3	x	6,2	5,8	5,7	x	x	5,5	5,3	
0,75	-	-	8,2	8,0	7,9	7,5	7	6,8	x	x	6,2	6,1	x	x	5,8	5,7	
0,8	-	-	-	-	-	-	7,4	7,2	x	x	6,6	6,5	x	x	6,1	6	
0,85					-	-	7,8	7,6	x	x	7,1	6,9	x	x	6,4	6,3	
0,9					-	-	-	-	x	x	7,5	7,3	x	x	x	6,7	
0,95									x	x	8	7,6	x	x	x	7	
1									x	x	-	-	x	x	x	7,3	
<b>Relación a/c en peso</b>	<b>Árido natural irregular de tamaño máximo 38,09 mm</b>																
0,35	4	3,9	3,5	3,2	3,4	3,3	3,2	2,9	2,9	2,8	2,6	2,5	2,7	2,5	2,3	2,3	
0,4	5,3	5,3	4,7	4,3	4,5	4,5	4,2	3,8	3,8	3,8	3,7	3,4	3,5	3,5	3,3	3,1	



0,45	6,5	6,5	5,9	5,3	5,6	5,6	5,3	4,8	4,6	4,7	4,6	4,3	4,1	4,4	4,3	4
0,5	7,7	7,7	7,1	6,3	6,7	6,6	6,3	5,7	5,4	5,7	5,5	5,1	4,8	5,2	5,1	4,8
0,55	-	-	8,1	7,3	7,8	7,6	7,2	6,6	6,2	6,5	6,3	5,8	x	5,9	6	5,5
0,6			-	-	-	-	-	7,4	7	7,3	7,1	6,6	x	x	6,7	6,2
0,65								8,1	7,8	8,1	7,8	7,2	x	x	7,3	6,9
0,7								-	-	-	-	7,9	x	x	-	7,4
0,75													x	x	-	8
0,8													x	x	-	-
<b>Nota</b>	-	Significa que la mezcla no ha sido ensayada														
	X	Significa que se producirá segregación														

Tabla 17: Relación de árido / cemento de Road Research Laboratory. Road Note No 4.

**Nota:** Las cifras dadas por esta tabla son valores medios obtenidos con hormigones de cemento Portland de calidad media, curados a temperaturas normales.

### 9) Dosificación por metro cúbico

Conociendo las proporciones ponderales de los distintos componentes del hormigón y sabiendo que un metro cúbico de hormigón pesa de 2200 a 2400 kg, puede determinarse fácilmente la dosificación por metro cúbico.

### 10) Correcciones

La dosificación que se acaba de obtener deberá ser corregida para adaptarla al caso concreto de que se trate, de acuerdo con la finura de la arena, el aire incorporado, la humedad de los áridos, etc.

A continuación se exponen los diferentes diseños de mezcla, utilizados para la confección del hormigón.

## MEZCLAS CON MICROSILICA (SIKA FUME) "G1"

### DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA (HAR)

<b>MEZCLA: G1-01</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN:</b> 800 kg/cm <sup>2</sup>											
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla											
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 22/01/2013											
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					18						
<b>CONSTANTES DE LOS MATERIALES</b>					<b>MATERIALES /M3.</b>			<b>MATERIALES/MEZCLA</b>				
<b>MATERIALES</b>	<b>PES. ESP.</b>	<b>PES. ESP.</b>	<b>PES. ESP.</b>	<b>ABS %.</b>	<b>PESO SECO</b>	<b>PESO S.S.S.</b>	<b>VOL. AP.</b>	<b>PESO SECO</b>	<b>PESO S.S.S.</b>	<b>HUM. NAT.</b>	<b>PESO HUM.</b>	
	<b>APAR.</b>	<b>S.S.S.</b>	<b>SECO</b>		<b>kg</b>	<b>kg</b>	<b>lts</b>	<b>Kg</b>	<b>Kg</b>	<b>%</b>	<b>kg</b>	
CEMENTO HOLCIM	3,10				495	495	159,68	8,910	8,910		8,910	
AGUA	1,00				199	178	178,00	3,581	3,204		3,211	
ARENA SILÍCEA	2,58	2,56	2,54	0,60	684	688	265,00	12,307	12,380	1,20	12,454	
RIPIO 3/8"	2,74	2,65	2,60	1,96	978	997	357,00	17,607	17,952	1,50	17,871	
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				8,91	8,91	8,10	0,160	0,160		0,160	
SIKA FUME (5%)	2,10				24,75	24,75	11,79	0,446	0,446		0,446	
AIRE							20,00					
<b>TOTAL</b>					<b>2389</b>	<b>2392</b>	<b>1000</b>					

Relación W/MC =	0,342
Relación Agr/C =	3,404





### DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA (HAR)

<b>MEZCLA: G1-02</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN:</b> 1000 kg/cm <sup>2</sup>										
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla										
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 23/01/2013										
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					18					
CONSTANTES DE LOS MATERIALES					MATERIALES /M3.			MATERIALES/MEZCLA			
MATERIALES	PES. ESP. APAR.	PES. ESP. S.S.S.	PES. ESP. SECO	ABS %.	PESO SECO kg	PESO S.S.S. kg	VOL. AP. lts	PESO SECO Kg	PESO S.S.S. Kg	HUM. NAT. %	PESO HUM. kg
CEMENTO HOLCIM	3,10				595	595	191,94	10,710	10,710		10,710
AGUA	1,00				215	196	196,00	3,876	3,528		3,549
ARENA SILÍCEA	2,58	2,56	2,54	0,60	609	613	236,00	10,960	11,026	1,10	11,080
RIPIO 3/8"	2,74	2,65	2,60	1,96	910	928	332,00	16,374	16,695	1,50	16,620
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				10,71	10,71	9,74	0,193	0,193		0,193
SIKA FUME (5%)	2,10				29,75	29,75	14,17	0,536	0,536		0,536
AIRE							20.00				
<b>TOTAL</b>					2369	2372	1000				

Relación W/MC =	0,314
Relación Agr/C =	2,588



### DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA (HAR)

<b>MEZCLA: G1-03</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN &gt; 1000 kg/cm<sup>2</sup></b>										
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla										
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 23/01/2013										
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					18					
CONSTANTES DE LOS MATERIALES					MATERIALES /M3.			MATERIALES/MEZCLA			
MATERIALES	PES. ESP. APAR.	PES. ESP. S.S.S.	PES. ESP. SECO	ABS %.	PESO SECO kg	PESO S.S.S. kg	VOL. AP. lts	PESO SECO Kg	PESO S.S.S. Kg	HUM. NAT. %	PESO HUM. kg
CEMENTO HOLCIM	3,10				640	640	206,45	11,520	11,520		11,520
AGUA	1,00				226	208	208,00	4,074	3,744		3,738
ARENA SILÍCEA	2,58	2,56	2,54	0,60	578	581	224,00	10,403	10,465	1,00	10,507
RIPIO 3/8"	2,74	2,65	2,60	1,96	863	880	315,00	15,536	15,840	1,73	15,805
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				12.80	12.80	11,64	0,230	0,230		0,230
SIKA FUME (5%)	2,10				32.00	32.00	15,24	0,576	0,576		0,576
AIRE							20,00				
<b>TOTAL</b>					2352	2354	1000				

Relación W/MC =	0,310
Relación Agr/C =	2,283



DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA (HAR)											
<b>MEZCLA: G1-10</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN &gt; 1000 kg/cm<sup>2</sup></b>										
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla										
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 24/01/2013										
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					18					
CONSTANTES DE LOS MATERIALES					MATERIALES /M3.			MATERIALES/MEZCLA			
MATERIALES	PES. ESP.	PES. ESP.	PES. ESP.	ABS %	PESO SECO	PESO S.S.S.	VOL. AP.	PESO SECO	PESO S.S.S.	HUM. NAT.	PESO HUM.
	APAR.	S.S.S.	SECO		kg	Kg	lts	Kg	Kg	%	kg
CEMENTO HOLCIM	3,10				605	605	195,16	10,890	10,890		10,890
AGUA	1,00				203	185	185,00	3,657	3,330		3,440
ARENA	2,58	2,56	2,54	0,60	302	304	117,00	5,433	5,466	1,50	5,515
ARENA DE RÍO	2.70	2.56	2.48	3.24	316	326	117,00	5,686	5,870	10,18	6,265
RIPIO 3/8"	2,74	2,65	2,60	1,96	937	955	342,00	16,867	17,198	1,02	17,039
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				10,89	10,89	9,90	0,196	0,196		0,196
SIKA FUME (5%)	2,10				30,25	30,25	14,40	0,545	0,545		0,545
AIRE							20,00				
TOTAL					2404	2440	1000				

Relación W/MC =	0,291
Relación Agr/C =	2,081



### MEZCLAS "G1" INCORPORANDO ARENA DE RÍO

DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA (HAR)											
<b>MEZCLA: G1-11</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN : 1000 kg/cm<sup>2</sup></b>										
	<b>ASENTAMIENTO: No se mide, fluye la mezcla</b>										
	<b>FECHA ELABORACIÓN: 24/01/2013</b>										
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					18					
CONSTANTES DE LOS MATERIALES					MATERIALES /M3.			MATERIALES/MEZCLA			
MATERIALES	PES. ESP. APAR.	PES. ESP. S.S.S.	PES. ESP. SECO	ABS %.	PESO SECO kg	PESO S.S.S. Kg	VOL. AP. lts	PESO SECO Kg	PESO S.S.S. Kg	HUM. NAT. %	PESO HUM. kg
CEMENTO HOLCIM	3,10				565	565	182,26	10,170	10,170		10,170
AGUA	1,00				199	180	180,00	3,582	3,240		3,123
ARENA	2,58	2,56	2,54	0,60	315	317	122,00	5,666	5,700	1,40	5,745
ARENA DE RÍO	2,70	2,56	2,48	3,24	329	340	122,00	5,929	6,121	7,84	6,394
RIPIO 3/8"	2,74	2,65	2,60	1,96	981	1000	358,00	17,657	18,003	0,82	17,801
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				8,48	8,48	7,70	0,153	0,153		0,153
SIKA FUME (5%)	2,10				16,95	16,95	8,07	0,305	0,305		0,305
AIRE							20,00				
TOTAL					2415	2427	1000				

Relación W/MC =	0,309
Relación Agr/C =	2,331

## MEZCLAS SIN MICROSILICA "G2"

<b>DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA (HAR)</b>											
<b>MEZCLA: G2-01</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN:</b> 800 kg/cm <sup>2</sup>										
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla										
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 18/01/2013										
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					18					
CONSTANTES DE LOS MATERIALES					MATERIALES /M3.			MATERIALES/MEZCLA			
MATERIALES	PES. ESP. APAR.	PES. ESP. S.S.S.	PES. ESP. SECO	ABS %.	PESO SECO kg	PESO S.S.S. kg	VOL. AP. lts	PESO SECO Kg	PESO S.S.S. Kg	HUM. NAT. %	PESO HUM. kg
CEMENTO HOLCIM	3,10				495	495	159,68	8,910	8,910		8.910
AGUA	1,00				182	160	160,00	3,275	2,880		2,880
ARENA SILÍCEA	2,58	2,56	2,54	0,60	715	719	277,00	12,864	12,941	0,60	12,941
RIPIO 3/8"	2,74	2,65	2,60	1,96	1025	1045	374,00	18,446	18,807	1,96	18,807
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				8,91	8,91	8,10	0,160	0,160		0,160
AIRE							21,00				
<b>TOTAL</b>					2425	2428	1000				

Relación W/C =	0,323
Relación Agr/C =	3,563



### DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA (HAR)

<b>MEZCLA: G2-02</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN:</b> 800 kg/cm <sup>2</sup>										
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla										
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 22/01/2013										
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					18					
CONSTANTES DE LOS MATERIALES					MATERIALES /M3.			MATERIALES/MEZCLA			
MATERIALES	PES. ESP.	PES. ESP.	PES. ESP.	ABS %	PESO SECO	PESO S.S.S.	VOL. AP.	PESO SECO	PESO S.S.S.	HUM. NAT.	PESO HUM.
	APAR.	S.S.S.	SECO		kg	kg	lts	Kg	Kg	%	kg
CEMENTO HOLCIM	3,10				535	535	172,58	9,630	9,630		9,630
AGUA	1,00				186	165	165,00	3,353	2,970		3,008
ARENA SILÍCEA	2,58	2,56	2,54	0,60	694	698	269,00	12,492	12,567	1,10	12,630
RIPIO 3/8"	2,74	2,65	2,60	1,96	995	1014	363,00	17,903	18,254	1,40	18,154
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				9.63	9.63	8,75	0,173	0,173		0,173
AIRE							22,00				
<b>TOTAL</b>					<b>2420</b>	<b>2422</b>	<b>1000</b>				

Relación W/C =	0,308
Relación Agr/C =	3,201





### DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA (HAR)

<b>MEZCLA: G2-03</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN:</b> 1000 kg/cm <sup>2</sup>										
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla										
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 23/01/2013										
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					18					
CONSTANTES DE LOS MATERIALES					MATERIALES /M3.			MATERIALES/MEZCLA			
MATERIALES	PES. ESP. APAR.	PES. ESP. S.S.S.	PES. ESP. SECO	ABS %.	PESO SECO kg	PESO S.S.S. kg	VOL. AP. lts	PESO SECO Kg	PESO S.S.S. Kg	HUM. NAT. %	PESO HUM. kg
CEMENTO HOLCIM	3,10				590	590	190,32	10,620	10,620		10,620
AGUA	1,00				210	190	190,00	3,780	3,420		3,511
ARENA SILÍCEA	2,58	2,56	2,54	0,60	632	636	245,00	11,378	11,446	0,60	11,446
RIPIO 3/8"	2,74	2,65	2,60	1,96	940	958	343,00	16,917	17,248	1,42	17,157
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				10,62	10,62	9,65	0,191	0,191		0,191
AIRE							22,00				
<b>TOTAL</b>					<b>2383</b>	<b>2385</b>	<b>1000</b>				

Relación W/C =	0,322
Relación Agr/C =	2,702



### MEZCLAS "G2" INCORPORANDO ARENA DE RÍO

DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA (HAR)											
<b>MEZCLA: G2-04</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN</b> >1000 kg/cm <sup>2</sup>										
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla										
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 23/01/2013										
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					18					
CONSTANTES DE LOS MATERIALES					MATERIALES /M3.			MATERIALES/MEZCLA			
MATERIALES	PES. ESP. APAR.	PES. ESP. S.S.S.	PES. ESP. SECO	ABS %.	PESO SECO kg	PESO S.S.S. kg	VOL. AP. lts	PESO SECO Kg	PESO S.S.S. Kg	HUM. NAT. %	PESO HUM. kg
CEMENTO HOLCIM	3,10				648	648	209,03	11,664	11,664		11,664
AGUA	1,00				209	190	190,00	3,768	3,420		3,414
ARENA SILÍCEA	2,58	2,56	2,54	0,60	611	615	237,00	11,006	11,072	1,00	11,116
RIPIO 3/8"	2,74	2,65	2,60	1,96	910	928	332,00	16,374	16,695	1,73	16,658
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				12,96	12,96	11,78	0,233	0,233		0,233
AIRE							20,00				
<b>TOTAL</b>					<b>2391</b>	<b>2394</b>	<b>1000</b>				

Relación W/C =	0,293
Relación Agr/C =	2,381



### DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA (HAR)

<b>MEZCLA: G2-10</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN &gt; 1000 kg/cm<sup>2</sup></b>										
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla										
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 24/01/2013										
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					18					
CONSTANTES DE LOS MATERIALES					MATERIALES /M3.			MATERIALES/MEZCLA			
MATERIALES	PES. ESP.	PES. ESP.	PES. ESP.	ABS %	PESO SECO	PESO S.S.S.	VOL. AP.	PESO SECO	PESO S.S.S.	HUM. NAT.	PESO HUM.
	APAR.	S.S.S.	SECO		kg	Kg	lts	Kg	Kg	%	kg
CEMENTO HOLCIM	3,10				600	600	193.55	10,800	10,800		10,800
AGUA	1,00				194	175	175.00	3,491	3,150		2,853
ARENA	2,58	2,56	2,54	0,60	315	317	122.00	5,666	5,700	1,50	5,751
ARENA DE RÍO	2.70	2.56	2.48	3.24	329	340	122.00	5,929	6,121	10,18	6,533
RIPIO 3/8"	2,74	2,65	2,60	1,96	978	997	357.00	17,607	17,952	1,02	17,787
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				10,80	10,80	9.82	0,194	0,194		0,194
AIRE							21.00				
<b>TOTAL</b>					<b>2427</b>	<b>2440</b>	<b>1000</b>				

Relación W/C =	0,292
Relación Agr/C =	2,190



### DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA (HAR)

<b>MEZCLA: G2-11</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN &gt; 1000 kg/cm<sup>2</sup></b>										
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla										
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 24/01/2013										
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					18					
CONSTANTES DE LOS MATERIALES					MATERIALES /M3.			MATERIALES/MEZCLA			
MATERIALES	PES. ESP.	PES. ESP.	PES. ESP.	ABS %	PESO SECO	PESO S.S.S.	VOL. AP.	PESO SECO	PESO S.S.S.	HUM. NAT.	PESO HUM.
	APAR.	S.S.S.	SECO		kg	Kg	lts	Kg	Kg	%	kg
CEMENTO HOLCIM	3,10				558	558	180,00	10,044	10,044		10,044
AGUA	1,00				192	172	172,00	3,449	3,096		2,977
ARENA	2,58	2,56	2,54	0,60	325	327	126,00	5,851	5,887	1,40	5,933
ARENA DE RÍO	2.70	2.56	2.48	3.24	338	348	125,00	6,075	6,272	7,84	6,551
RIPIO 3/8"	2,74	2,65	2,60	1,96	1011	1037	369,00	18,199	18,556	0,82	18,348
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				8,37	8.37	7,61	0,151	0,151		0,151
AIRE							20,00				
<b>TOTAL</b>					<b>2432</b>	<b>2445</b>	<b>1000</b>				

Relación W/C =	0,308
Relación Agr/C =	2,434



### Diseño de mezclas incorporando escoria de acero

El diseño de mezclas incorporando escoria de acero se basó en los diseños realizados para los hormigones convencionales de alta resistencias, con la única diferencia que se reemplazó el agregado grueso por la escoria de acería, tomando en cuenta para el diseño los pesos específicos y porcentaje de absorción del material de estudio, el mismo que modifica los pesos de agua y de los agregados de la mezcla. Este reemplazo es para realizar una comparación directa entre un hormigón y otro.

<b>DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CON ESCORIA DE ACERO (HEA)</b>											
<b>MEZCLA 2: G3-01 ESCORIA</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN &gt; 1000 kg/cm<sup>2</sup></b>										
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla										
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 24/01/2013										
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					24					
CONSTANTES DE LOS MATERIALES					MATERIALES /M3.			MATERIALES/MEZCLA			
MATERIALES	PES. ESP. APAR.	PES. ESP. S.S.S.	PES. ESP. SECO	ABS %.	PESO SECO kg	PESO S.S.S. Kg	VOL. AP. lts	PESO SECO kg	PESO S.S.S. Kg	HUM. NAT. %	PESO HUM. kg
CEMENTO HOLCIM	3,10				495	495	159,68	11,880	11,880		11,880
AGUA	1,00				207	160	160,00	4,956	3,840		3,218
ARENA RÍO	2,58	2,56	2,54	0,60	715	719	277,00	17,152	17,255	5,30	18,061
ESCORIA 3/8"	3,59	3,30	3,18	3,53	1343	1390	374,00	32,224	33,361	2,96	33,178
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				8,91	8,91	8,10	0,214	0,214		0,214
AIRE							21,00				
<b>TOTAL</b>					<b>2768</b>	<b>2773</b>	<b>1000</b>				

Relación W/C =	0,270
----------------	-------





<b>DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA (HAR)</b>											
<b>MEZCLA 4: G3-02 ESCORIA 15%</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN &gt; 1000 kg/cm<sup>2</sup></b>										
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla										
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 24/01/2013										
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>						25				
<b>CONSTANTES DE LOS MATERIALES</b>					<b>MATERIALES /M3.</b>			<b>MATERIALES/MEZCLA</b>			
<b>MATERIALES</b>	<b>PES. ESP. APAR.</b>	<b>PES. ESP. S.S.S.</b>	<b>PES. ESP. SECO</b>	<b>ABS %.</b>	<b>PESO SECO kg</b>	<b>PESO S.S.S. Kg</b>	<b>VOL. AP. lts</b>	<b>PESO SECO kg</b>	<b>PESO S.S.S. Kg</b>	<b>HUM. NAT. %</b>	<b>PESO HUM. kg</b>
CEMENTO HOLCIM	3,10				558	558	180,00	13,950	13,950		13,950
AGUA	1,00				234	172	172,00	5,642	4,300		4,727
ARENA DE RÍO	2.70	2.56	2.48	3.24	678	700	251,00	17.000	17.500	4,49	18,000
ESCORIA 3/8"	3,59	3,30	3,18	3,53	1325	1371	369,00	33,118	34,287	1,60	33,648
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				8,37	8.37	7,61	0,151	0,151		0,209
AIRE							20,00				
<b>TOTAL</b>					<b>2779</b>	<b>2785</b>	<b>1000</b>				

Los valores se modificaron debido a que se sugirió el reemplazo del 15% de escoria por arena. Los pesos finales son los siguientes:

<b>MATERIAL</b>	<b>PESO HUM kg</b>
CEMENTO HOLCIM	13,950
AGUA	3,950
ARENA DE RÍO	22,750
ESCORIA	28,600

Relación W/C =	0,308
Relación Agr/C =	3,087





### DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CONVENCIONAL DE ALTA RESISTENCIA (HAR)

<b>MEZCLA 3: G3-03 ESCORIA</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN &gt; 1000 kg/cm<sup>2</sup></b>											
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla											
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 24/01/2013											
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					25						
<b>CONSTANTES DE LOS MATERIALES</b>					<b>MATERIALES /M3.</b>			<b>MATERIALES/MEZCLA</b>				
<b>MATERIALES</b>	<b>PES. ESP. APAR.</b>	<b>PES. ESP. S.S.S.</b>	<b>PES. ESP. SECO</b>	<b>ABS %.</b>	<b>PESO SECO kg</b>	<b>PESO S.S.S. Kg</b>	<b>VOL. AP. lts</b>	<b>PESO SECO kg</b>	<b>PESO S.S.S. Kg</b>	<b>HUM. NAT. %</b>	<b>PESO HUM. kg</b>	
CEMENTO HOLCIM	3,10				558	558	180,00	13,950	13,950		13,950	
AGUA	1,00				226	172	172,00	5,642	4,300		4,621	
ARENA SILÍCEA	2,58	2,56	2,54	0,60	325	327	126,00	8,127	8,176	0,12	8,137	
ARENA DE RÍO	2.70	2.56	2.48	3.24	338	348	125,00	8,438	8,711	4,69	8,833	
ESCORIA 3/8"	3,59	3,30	3,18	3,53	1325	1371	369,00	33,118	34,287	2,31	33,883	
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				8,37	8.37	7,61	0,151	0,151		0,209	
AIRE							20,00					
<b>TOTAL</b>					<b>2779</b>	<b>2785</b>	<b>1000</b>					

Relación W/C =	0,308
Relación Agr/C =	3,044



## DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CON ESCORIA DE ACERO (HEA)

<b>MEZCLA 1: G3-04 ESCORIA</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN &gt; 1000 kg/cm<sup>2</sup></b>											
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla											
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 24/01/2013											
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>					25						
<b>CONSTANTES DE LOS MATERIALES</b>					<b>MATERIALES /M3.</b>			<b>MATERIALES/MEZCLA</b>				
<b>MATERIALES</b>	<b>PES. ESP. APAR.</b>	<b>PES. ESP. S.S.S.</b>	<b>PES. ESP. SECO</b>	<b>ABS %.</b>	<b>PESO SECO kg</b>	<b>PESO S.S.S. Kg</b>	<b>VOL. AP. lts</b>	<b>PESO SECO kg</b>	<b>PESO S.S.S. Kg</b>	<b>HUM. NAT. %</b>	<b>PESO HUM. kg</b>	
CEMENTO HOLCIM	3,10				600	600	193.55	15,000	15,000		15,000	
AGUA	1,00				227	175	175.00	5,676	4,375		4,664	
ARENA SILÍCEA	2,58	2,56	2,54	0,60	315	317	122.00	7,869	7,916	0,03	7,871	
ARENA DE RÍO	2,70	2,56	2,48	3,24	329	340	122.00	8,235	8,502	6,00	8,729	
ESCORIA 3/8"	3,59	3,30	3,18	3,53	1282	1327	357.00	32,041	33,172	2,06	32,701	
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				10,80	10,80	9.82	0,270	0,270		0,270	
AIRE							21.00					
<b>TOTAL</b>					2764	2769	1000					

Relación W/C =	0,292
Relación Agr/C =	2,739





## DOSIFICACIÓN HORMIGÓN CON ESCORIA DE ACERO (HEA)

<b>MEZCLA 5: G3-05 ESCORIA</b>	<b>RESISTENCIA HORMIGÓN &gt; 1000 kg/cm<sup>2</sup></b>										
	<b>ASENTAMIENTO:</b> No se mide, fluye la mezcla										
	<b>FECHA ELABORACIÓN:</b> 24/01/2013										
	<b>VOLUMEN MEZCLA (LTS):</b>							25			
<b>CONSTANTES DE LOS MATERIALES</b>					<b>MATERIALES /M3.</b>			<b>MATERIALES/MEZCLA</b>			
MATERIALES	PES. ESP. APAR.	PES. ESP. S.S.S.	PES. ESP. SECO	ABS %.	PESO SECO kg	PESO S.S.S. Kg	VOL. AP. lts	PESO SECO kg	PESO S.S.S. Kg	HUM. NAT. %	PESO HUM. kg
CEMENTO HOLCIM	3,10				600	600	193.55	15,000	15,000		15,000
AGUA	1,00				227	175	175.00	5,676	4,375		4,664
ARENA DE RÍO	2,70	2.56	2.48	3.24	644	657	244.00	16,1	16.425	6,00	17.066
ESCORIA 3/8"	3,59	3,30	3,18	3,53	1282	1327	357.00	32,041	33,172	2,06	32,701
VISCOCRETE 2100 (1,8%)	1,10				10,80	10,80	9.82	0,270	0,270		0,270
AIRE							21.00				
<b>TOTAL</b>					2764	2769	1000				

Los valores se modificaron debido a que se sugirió el reemplazo del 15% de escoria por arena. Los pesos finales son los siguientes:

MATERIAL	PESO HUM kg
CEMENTO HOLCIM	15,000
AGUA	4,664
ARENA DE RÍO	21.971
ESCORIA	27,801
VISCOCRETE 2100	0,270

Relación W/C =	0,31
Relación Agr/C =	3,26





### 3.3 Confección de hormigones

#### Preparación de los materiales

La confección de una mezcla de concreto se rige en la norma técnica ASTM C 192, la misma que manifiesta lo siguiente:

1. **Temperatura.** Debe mantenerse uniforme de preferencia entre 20 y 25°C, como preparación para el mezclado del concreto.
2. **Cemento.** Se almacenará en un lugar seco dentro de recipientes impermeables, de preferencia metálico. Se revolverá el conglomerante completamente hasta que la muestra quede uniforme. Se desechan los terrones de cemento así como partículas que estén sobre el tamiz N: 16.
3. **Agregados.** Deben tener una condición de humedad definitiva y uniforme, de manera que el peso del agregado que va a usarse en una mezcla no incluya el agua que se vaya a emplear en la misma.
4. **Aditivo.** Parte del aditivo en estado líquido debe ser disuelto en el agua de mezclado previo a su introducción en la concretera; la cantidad de solución que se use debe introducirse al calcular el contenido de agua del concreto. El tiempo para incluir los aditivos puede ocasionar efectos importantes sobre ciertas propiedades de este, como el fraguado y contenido de aire, motivo por el cual se sugiere que el aditivo se aplique uniformemente en cada revolución para simular una práctica de campo adecuada.

#### Equipos

##### 1. Equipos mayores:

**Báscula.** Equipo que sirve para determinar el peso de los materiales a usarse en una mezcla. Para la presente tesis se han utilizado tres tipos de básculas. La primera con capacidad de 600 gramos, marca UWE, la cual permite determinar la



humedad de los materiales; una segunda balanza de capacidad 20.000 gramos, arca UWE, para determinar pesos de moldes, cilindros y vigas; una tercera con capacidad de 50.000 gramos marca Fairbanks morse, para determinar el peso de los materiales para la preparación de la mezcla.

**Probetas.** Son moldes metálicos que permiten al hormigón fresco adoptar la forma cilíndrica dependiendo del tamaño requerido de la muestra. Poseen una superficie lisa y no son absorbentes ni deformables. Aquellos están sujetos a la norma ASTM C 470-94 cuyos tamaños tienen una relación 1:2 (diámetro: altura). Los moldes empleados en el presente estudio tienen dimensiones de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, debido a que requieren menos espacio para su almacenamiento y menor esfuerzo en las prensas para su rotura, en comparación a las probetas usadas comúnmente de 150 por 300 mm, sin embargo, se hará una probeta de esta última dimensión por cada mezcla.

**Concreteira.** Es una máquina que permite una mezcla más homogénea entre los materiales que intervienen en ella, ganando tiempo y calidad en su preparación con respecto al trabajo manual. La concreteira utilizada es de tambor giratorio, marca Talleres Chalco, con una capacidad máxima de 350 litros y rota a 22 rpm.

**Cono de Abrams.** Es un instrumento usado para medir la consistencia o fluidez del hormigón en estado fresco.

## 2. Equipos menores

- **Charola.** Es un recipiente de fondo plano, con profundidad adecuada y capacidad suficiente para permitir el fácil mezclado con pala o cuchara de la mezcla.
- **Carretilla.** Equipo metálico usado para el transporte de la mezcla de hormigón.
- **Pala metálica.** Instrumento utilizado para ayudar a mezclar la muestra de hormigón.



- **Bailejo.** Es un instrumento que permite colocar y enrasar el hormigón utilizado para la fabricación de cada molde.
- **Balde metálico.** Es un accesorio usado para el transporte del material, cuya capacidad es de cinco litros.
- **Cuchara metálica.** Herramienta para recoger y verter el hormigón preparado en las probetas cilíndricas.
- **Flexómetro.** Es un instrumento utilizado para medir el asentamiento en el cono de Abrams.
- **Martillo de goma.** Instrumento usado para liberar burbujas de aire atrapadas en la mezcla.
- **Varillas lisas de 16 mm y 10 mm.** Son herramientas empleadas para el picado de cada capa de la mezcla dentro de las probetas.

## Mezclado

La mezcla para la elaboración del concreto es fundamental en la confección de hormigones, puesto que de ella depende la homogeneidad y en gran parte resistencia de aquella. Existen diferentes maneras de mezclado, mecánico y manual, siendo el primero, el que mejor condiciones de trabajo ha desarrollado debido al gran control que se tiene en el preparado del hormigón. La técnica se rige en la norma ASTM C 192.

### Mezclado mecánico

Se ha colocado el agregado grueso y un poco de agua antes de poner en marcha la concretora. Accionada esta se añade el agregado fino, cemento y agua respectivamente. Es importante indicar que en caso que no sea posible adicionar el agregado fino, cemento y agua en la concretora en movimiento, se procede a suspender el equipo para incorporar los materiales mencionados. Posteriormente se añade el aditivo en forma continua hasta completar la dosificación.



Con todos los ingredientes en la concretora se mezcla durante tres minutos y se deja en reposo otros tres minutos, para revolver finalmente durante dos minutos más. Es de buena práctica cubrir la boca de la concretora a fin de evitar la evaporación en el tiempo de reposo. Fijándose en el estado de la mezcla se toman pequeñas muestras para determinar la trabajabilidad del concreto y verificar si se debe añadir o no más agua.

Finalmente con el propósito de evitar la segregaciones, se deposita el concreto mezclado de forma mecánica en la charola limpia y húmeda y se remezcla con pala o cuchara hasta que presente un aspecto uniforme.

### **Medida de consistencia**

La medida de consistencia o asentamiento del hormigón se rige según la norma ASTM C-143.

El ensayo empieza con el humedecimiento en el interior del cono y colocado sobre una bandeja plana, rígida y humedecida, cuya área es superior a la base del cono. Después se rellena el cono hasta el 1/3 de su capacidad y se compacta con una varilla lisa de 16mm de diámetro y 60cm de longitud, dando veinticinco golpes repartidos uniformemente por toda la superficie. Tan pronto se haya compactado la primera capa se coloca el hormigón hasta 2/3 del volumen del cono y se compacta, cuidando que la varilla penetre ligeramente en la capa anterior. Luego el cono se llena de manera que haya un ligero exceso de hormigón y se compacta otra vez con veinticinco picadas en su superficie. El exceso de hormigón se retira usando el bailejo de manera que el cono quede lleno y nivelado. Por fin el molde se levanta con cuidado en dirección vertical y se mide con el flexómetro la diferencia entre la altura del molde y el punto más alto de la mezcla.

En el presente ensayo se han tomado en cuenta las siguientes sugerencias:

1. Que al momento de colocar el hormigón se mantenga el cono firmemente sujeto en su posición mediante las aletas inferiores.



2. Que una vez medido el asentamiento se observa la forma de derrumbamiento del cono de hormigón mediante golpes laterales con varilla.
3. Que se debe limpiar el hormigón que haya caído alrededor de la base del cono antes de levantar el molde.
4. Que para obtener la consistencia se han de realizar tres ensayos.
5. Que el hormigón usado para el ensayo de consistencia no debe destinarse al ensayo de resistencia.

### **Fabricación de probetas**

Por su parte la fabricación, conservación y curado de probetas cilíndricas a compresión se rige a las normas ASTM C 172.

Los moldes de las probetas deben ser lubricadas con aceite industrial para evitar que el hormigón quede adherido a las paredes de los cilindros, lo que podría repercutir *a priori* en el volumen de la probeta, así como aumentar la dificultad del desencofrado y limpieza del molde. Además, hay que cerciorarse que cada uno de los moldes esté totalmente cerrado y ajustado, tanto en sus paredes como en la base, para evitar que la mezcla se derrame por dichos sitios.

La fabricación de probetas se realiza en un lugar cercano al sitio de almacenado debido a que los cilindros nunca deben ser sometidas a traslados dentro de las primeras veinticuatro horas por el movimiento brusco que puedan sufrir. Esto basado a que existe un gran defecto de confeccionar las probetas cerca de la descarga del hormigón, sin interesar donde sea el sitio de almacenamiento.

Es importante señalar que los moldes de 100 por 200 mm, se llenan uniformemente, es decir, se coloca y se compacta la primera capa en todas las probetas luego se procede de igual manera para la segunda capa, tomando en cuenta que para esta última se vierte un poco más de mezcla para evitar la pérdida del material al momento del enrasado.



Cada molde se compacta mediante un varillado uniforme dando veinticinco golpes a cada capa con una varilla lisa metálica de 10 mm de diámetro y extremo semiesférico. El varillado se realiza de tal forma que la capa que se esté compactando pase ligeramente la capa subyacente; finalizado el picado de cada capa, se golpea los lados del molde con un martillo de goma hasta que hayan desaparecido las huellas dejadas por la varilla, así como para liberar las partículas de aire atrapados en la mezcla que en un futuro pueden reducir la resistencia. La razón de la forma semiesférica de la varilla usada es porque esta se desliza entre los áridos en lugar de empujarlos hacia abajo y además, porque al momento de retirarla la mezcla se cierra suavemente. Finalizada la compactación se procede a separar el hormigón sobrante y se deja la superficie lisa, en lo posible, sin manipular la probeta.

Para la elaboración de la probeta de 150 por 300 mm, usada para medir el módulo de elasticidad y la relación de Poisson del hormigón, se emplea el mismo procedimiento anterior, con la diferencia que se llena el cilindro en tres capas iguales y se utiliza la varilla lisa de 16 mm para la compactación de la mezcla.

En la fabricación de probetas se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Que antes de llenar los moldes, las muestras deben ser remezcladas completamente en una superficie limpia y no absorbente.
2. Que todo instrumento que esté en contacto con la mezcla será humedecido previamente para evitar la absorción del agua calculada para dicho efecto.
3. Que la mezcla sea protegida del sol, del viento y de la lluvia durante el período entre su toma y utilización.
4. Que antes de llenar los moldes, estos se coloquen sobre una superficie lisa, dura y horizontal.
5. Que el tiempo que transcurra entre la obtención de la primera y última porción de las muestras compuestas, sea lo más corto posible, de manera que en ningún momento se exceda los quince minutos.



6. Que las muestras preparadas para pruebas de resistencia deben ser, cuando menos, un volumen de veintiocho litros.
7. Que una probeta de hormigón parece poco importante cuando se está haciendo; pero, si más tarde hay dificultades o problemas en la obra llega a ser inmediatamente un factor crítico.

### **Conservación de muestras**

Las probetas fabricadas en estado fresco se llevan al lugar de almacenamiento sin tocarlas hasta que se haya fraguado por lo menos veinticuatro horas después de su confección. La parte superior del espécimen deberá quedar cubierta con un paño húmedo para evitar la evaporación del agua del concreto que aún no se endurece. La temperatura del sitio de conservación debe oscilar entre los 16 y 27°C. Según la norma los especímenes no deben quitarse de los moldes antes de 20 horas, ni después de 48 horas de elaborados. Desmoldado los cilindros se procede al curado de todos ellos.

### **Curado**

Es el proceso por el cual se busca mantener saturado el concreto hasta que los espacios de cemento fresco, que originalmente estuvieron llenos de agua, sean reemplazados por los productos de la hidratación. El proceso pretende controlar el movimiento de temperatura y humedad hacia adentro y afuera del concreto. Busca también, evitar la contracción de fraguado hasta que el concreto alcance una resistencia mínima que le permita soportar los esfuerzos inducidos por esta. La falta de curado del concreto reduce drásticamente su resistencia.

Existen diversos métodos de curado, con agua, con materiales sellantes y curado al vapor. Sin embargo, se ha optado por utilizar el primer método: curado de agua por inmersión, basado en las normas ASTM C 192.



### **Capeado de especímenes cilíndricos de concreto**

El capeado es un procedimiento para garantizar la correcta trasmisión de la fuerza durante el ensayo de compresión.

Este apartado describe el equipo, materiales y procedimiento para el capeado de cilindros de concreto que van a someterse a cargas de compresión según la norma ASTM C 617.

El material empleado es el mortero de azufre, el mismo que viene en solución de polvo y el cual se convierte en una solución líquida. El cambio de estado sólido a líquido, se debe al calentamiento del azufre en polvo durante ocho minutos a fuego bajo. Una vez listo el mortero se toma el molde de capeado y se cubre con una lámina delgada de aceite, para evitar que el capeado del cilindro se adhiera a la superficie del molde. El capeado será tan delgado como sea posible, por lo general de 3 mm de espesor, pero no más de 8mm. Finalmente el espécimen se coloca sobre el mortero líquido para obtener una superficie lisa. El capeado se ha de realizar en aquellos cilindros cuyos extremos son evidentemente disparejos, convexos y/o cóncavos.

## CAPÍTULO IV

### 4. CARACTERÍSTICAS DE LOS HORMIGONES ENDURECIDOS HEA Y HAR

El hormigón endurecido es aquel concreto que pasa de su estado plástico a sólido, perdiendo paulatinamente humedad y adquiriendo dureza. A medida que el hormigón experimenta este proceso de endurecimiento continuo, las características dependen de su edad, así como también de las condiciones de temperatura a las que haya estado sometido.

Características como las resistencias del hormigón se pueden medir mediante ensayos mecánicos de compresión y tracción. Siendo el primero el más utilizado en el sector de la construcción, y el segundo el más apropiado por reflejar las condiciones de trabajo del hormigón, como puede ser el caso de los empleados en la construcción de vigas, pavimentos de carreteras o aeropuertos.

Por estos motivos y enfocado en los objetivos de la tesis, el presente capítulo tiene como interés conocer el comportamiento mecánico de los distintos hormigones por medio de ensayos de compresión, tracción y módulo de elasticidad a especímenes cilíndricos y elementos estructurales.

#### 4.1 Resistencia a compresión



Figura 26: Ensayo de compresión simple



El ensayo de compresión es un procedimiento práctico para determinar la resistencia y deformación de un hormigón, ante un esfuerzo de compresión. Cuando se utiliza agregados de buena calidad la resistencia de un hormigón está dada principalmente por la relación agua/cemento, sin embargo, pueden presentarse otros factores que afecten a la mezcla de concreto, motivo por el cual se justifica la realización de este ensayo.

**Alcance del ensayo.** Este método trata sobre el procedimiento para ensayar a compresión cilindros de hormigón, según la norma ASTM C 39.

### **Equipo.**

- Máquina de prueba.
- Escalímetro.

**Procedimiento.** La prueba a compresión de especímenes cilíndricos debe realizarse tan pronto se retiren de la cámara de curado. Los extremos de las probetas que difieran de un plano en más de 0.050 mm, deben capearse. Para ensayar los especímenes deberán estar en condiciones húmedas. A continuación se procede a medir el diámetro del cilindro, que resulta del promedio entre dos diámetros que formen un ángulo recto entre sí. Este diámetro sirve para calcular la sección transversal. Por su parte, la longitud del espécimen se medirá redondeando al más próximo 2.5mm.

Posteriormente, se coloca en el equipo de ensayo una placa de apoyo inferior y se limpian las superficies de apoyo de ambas placas, así como también del espécimen de ensayo. Después se coloca el cilindro mencionado sobre la placa inferior, de manera que su eje esté alineado con el centro de la placa.

Por último, la carga se aplica a una velocidad de 5.3 KN/seg en forma continua y sin impacto hasta que el espécimen falle. Se registra la carga máxima soportada por el cilindro y se anotan la apariencia así como el tipo de falla del concreto.

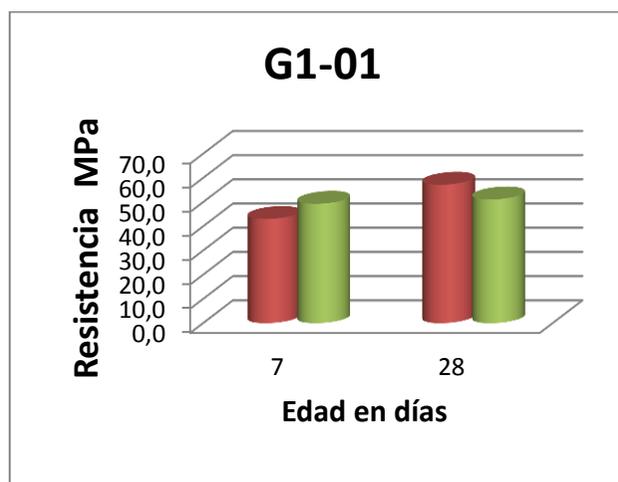
### **Resultados.**

Se exponen a continuación los resultados de las diferentes mezclas confeccionadas.

#### 4.1.1 Hormigones convencionales de Alta Resistencia (HAR).

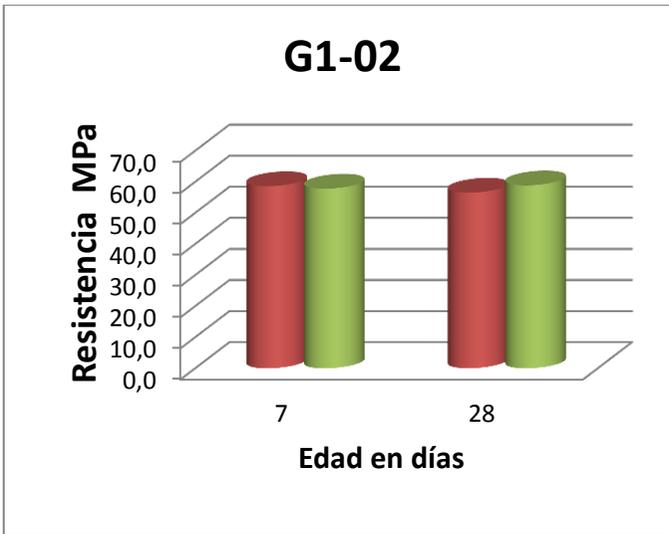
### MEZCLAS CON MICROSILICA "G1"

<b>PROYECTO:</b>		Hormigones de Alta Resistencia									
<b>MEZCLA:</b>		G1-01									
<b>SOLICITADO POR:</b>		Santiago Vélez Guayasamín									
<b>FECHA:</b>		07/07/2013									
<b>ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO</b>										ASTM C39	
<b>DATOS DEL ENSAYO</b>											
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	Cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
R7-1	22/01/2013	29/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	34.486	439	43,1
R7-2	22/01/2013	29/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	39.500	503	49,3
R28-1	22/01/2013	19/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	45.827	583	57,2
R28-2	22/01/2013	19/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	40.944	521	51,1

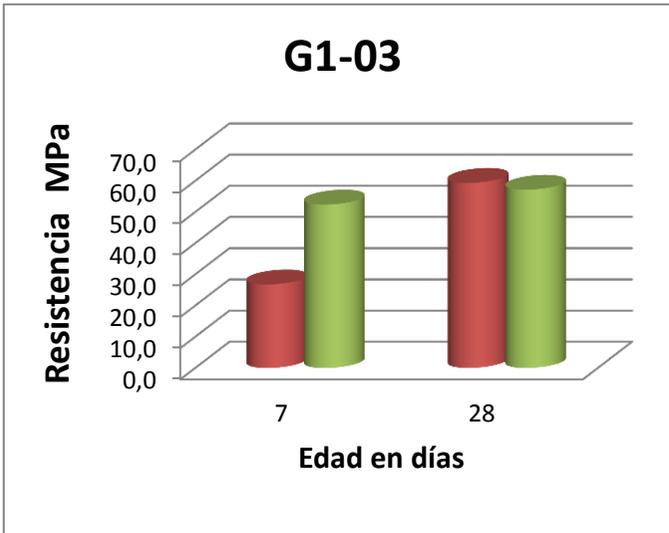




<b>PROYECTO:</b>	Hormigones de Alta Resistencia											
<b>MEZCLA:</b>	G1-02											
<b>SOLICITADO POR:</b>	Santiago Vélez Guayasamín											
<b>FECHA:</b>	07/07/2013											
<b>ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO</b>											ASTM C39	
<b>DATOS DEL ENSAYO</b>												
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA	
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa	
R7-1	23/01/2013	30/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	46.916	597	58,6	
R7-2	23/01/2013	30/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	46.291	589	57,8	
R28-1	23/01/2013	20/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	45.250	576	56,5	
R28-2	23/01/2013	20/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	47.124	600	58,8	



<b>PROYECTO:</b>				Hormigones de Alta Resistencia							
<b>MEZCLA:</b>				G1-03							
<b>SOLICITADO POR:</b>				Santiago Vélez Guayasamín							
<b>FECHA:</b>				07/07/2013							
<b>ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO</b>										ASTM C39	
<b>DATOS DEL ENSAYO</b>											
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
R7-1	23/01/2013	30/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	21.456	273	26,8
R7-2	23/01/2013	30/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	41.958	534	52,4
R28-1	23/01/2013	20/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	47.525	605	59,3
R28-2	23/01/2013	20/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	45.771	583	57,2



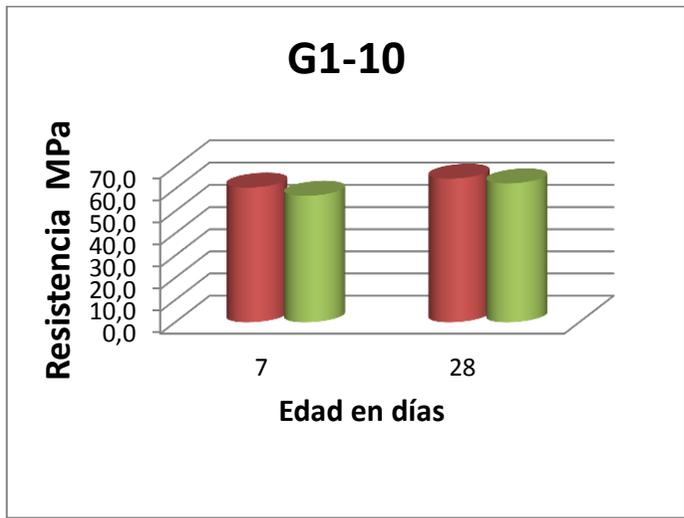


### MEZCLAS "G1" INCORPORANDO ARENA DE RIO

<b>PROYECTO:</b>	Hormigones de Alta Resistencia
<b>MEZCLA:</b>	G1-10
<b>SOLICITADO POR:</b>	Santiago Vélez Guayasamín
<b>FECHA:</b>	07/07/2013

<b>ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO</b>	ASTM C39
--	----------

DATOS DEL ENSAYO											
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
R7-1	24/01/2013	31/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	48.574	618	60,7
R7-2	24/01/2013	31/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	45.626	581	57,0
R28-1	24/01/2013	21/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	51.793	659	64,7
R28-2	24/01/2013	21/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	50.087	638	62,5

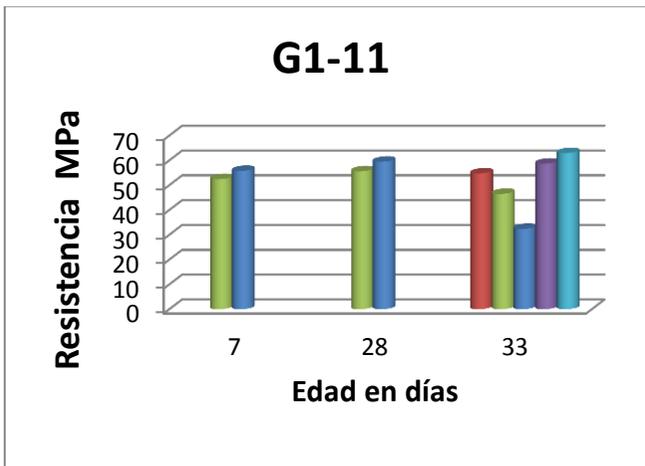




<b>ROYECTO:</b>	Hormigones de Alta Resistencia
<b>MEZCLA:</b>	G1-11
<b>SOLICITADO POR:</b>	Santiago Vélez Guayasamín
<b>FECHA:</b>	07/07/2013

<b>ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO</b>	ASTM C39
--	----------

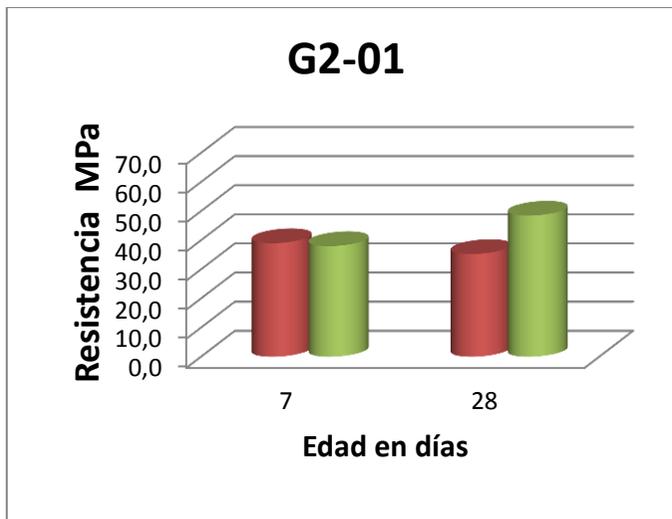
DATOS DEL ENSAYO											
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
R7-1	24/01/2013	31/01/2013	7	3.874	20,0	10,0	78,54	2.466	42.006	535	52,5
R7-2	24/01/2013	31/01/2013	7	3.871	20,0	10,0	78,54	2.464	44.641	568	55,7
R28-1	24/01/2013	21/02/2013	28	3.872	20,0	10,0	78,54	2.465	44.505	567	55,6
R28-2	24/01/2013	21/02/2013	28	3.868	20,0	10,0	78,54	2.462	47.629	606	59,5
R33-1	24/01/2013	26/02/2013	33	3.888	20,0	10,0	78,54	2.475	43.824	558	54,7
R33-2	24/01/2013	26/02/2013	33	3.869	20,0	10,0	78,54	2.463	37.233	474	46,5
R33-3	24/01/2013	26/02/2013	33	3.873	20,0	10,0	78,54	2.466	25.941	330	32,4
R33-4	24/01/2013	26/02/2013	33	3.874	20,0	10,0	78,54	2.466	46.972	598	58,7
R33-5	24/01/2013	26/02/2013	33	3.880	20,0	10,0	78,54	2.469	50.400	642	62,9





### MEZCLAS SIN MICROSILICA "G2"

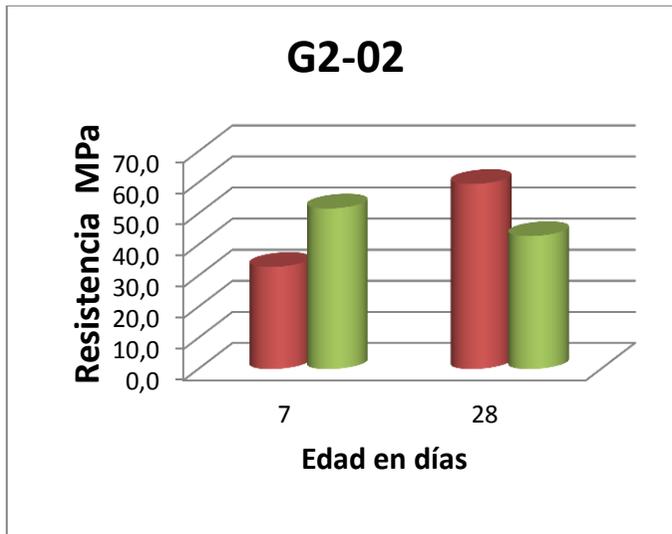
<b>PROYECTO:</b>	Hormigones de Alta Resistencia										
<b>MEZCLA:</b>	G2-01										
<b>SOLICITADO POR:</b>	Santiago Vélez Guayasamín										
<b>FECHA:</b>	07/07/2013										
<b>ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO</b>										ASTM C39	
<b>DATOS DEL ENSAYO</b>											
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
R7-1	22/01/2013	29/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	31.235	398	39,0
R7-2	22/01/2013	29/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	30.434	387	38,0
R28-1	22/01/2013	19/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	28.255	360	35,3
R28-2	22/01/2013	19/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	38.819	494	48,5



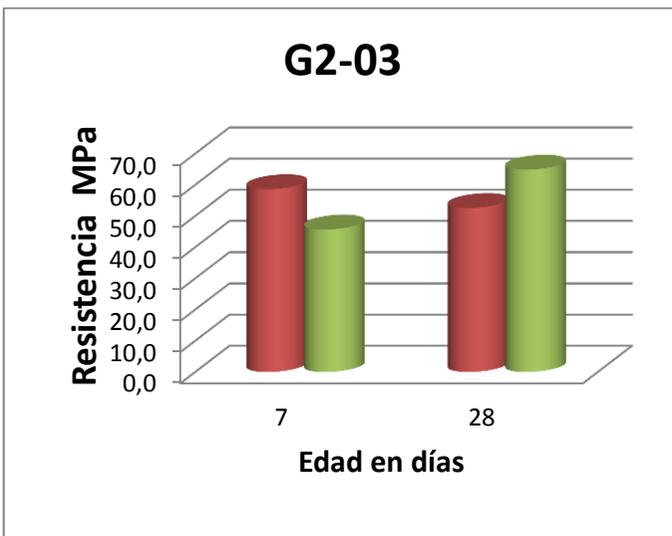
<b>PROYECTO:</b>	Hormigones de Alta Resistencia
<b>MEZCLA:</b>	G2-02
<b>SOLICITADO POR:</b>	Santiago Vélez Guayasamín
<b>FECHA:</b>	07/07/2013

<b>ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO</b>	ASTM C39
--	----------

DATOS DEL ENSAYO											
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
R7-1	23/01/2013	30/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	26.317	335	32,9
R7-2	23/01/2013	30/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	41.382	527	51,7
R28-1	23/01/2013	20/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	47.709	607	59,6
R28-2	23/01/2013	20/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	34.278	436	42,8

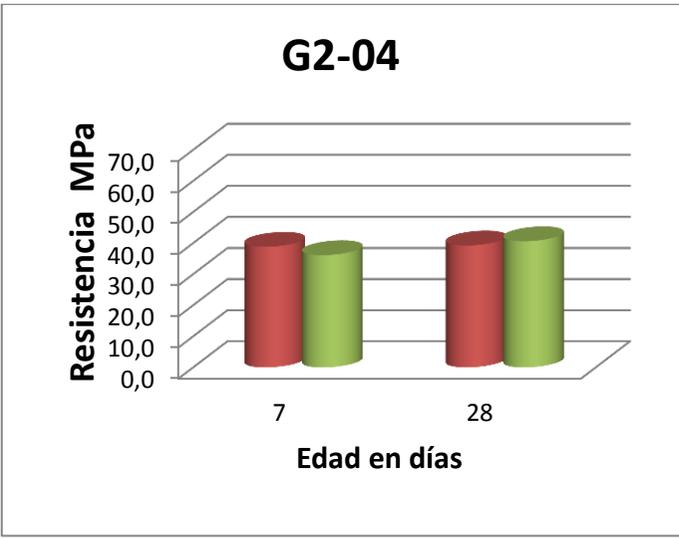


<b>PROYECTO:</b>				Hormigones de Alta Resistencia							
<b>MEZCLA:</b>				G2-03							
<b>SOLICITADO POR:</b>				Santiago Vélez Guayasamín							
<b>FECHA:</b>				07/07/2013							
<b>ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO</b>										ASTM C39	
<b>DATOS DEL ENSAYO</b>											
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
R7-1	23/01/2013	30/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	46.916	597	58,6
R7-2	23/01/2013	30/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	36.584	466	45,7
R28-1	23/01/2013	20/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	42.095	536	52,6
R28-2	23/01/2013	20/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	51.945	661	64,9





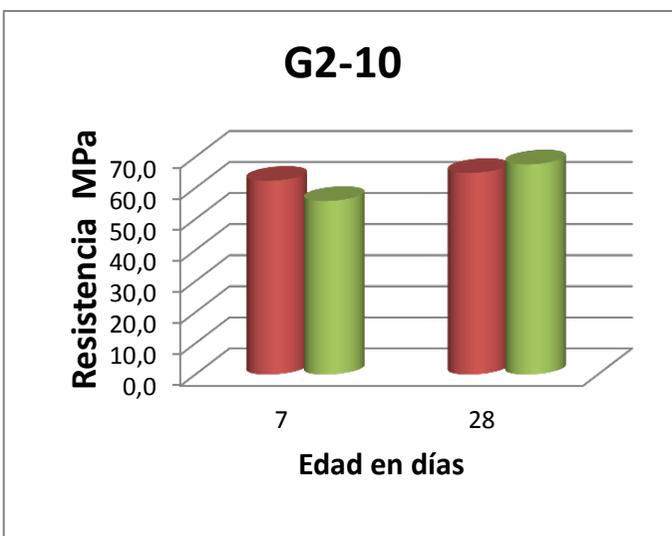
<b>PROYECTO:</b>	Hormigones de Alta Resistencia										
<b>MEZCLA:</b>	G2-04										
<b>SOLICITADO POR:</b>	Santiago Vélez Guayasamín										
<b>FECHA:</b>	07/07/2013										
<b>ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO</b>										ASTM C39	
<b>DATOS DEL ENSAYO</b>											
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
R7-1	24/01/2013	31/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	31.074	396	38,8
R7-2	24/01/2013	31/01/2013	7	-	20,0	10,0	78,54	-	28.928	368	36,1
R28-1	24/01/2013	21/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	31.427	400	39,2
R28-2	24/01/2013	21/02/2013	28	-	20,0	10,0	78,54	-	32.508	414	40,6





## MEZCLAS "G2" INCORPORANDO ARENA DE RIO

<b>PROYECTO:</b>	Hormigones de Alta Resistencia										
<b>MEZCLA:</b>	G2-10										
<b>SOLICITADO POR:</b>	Santiago Vélez Guayasamín										
<b>FECHA:</b>	07/07/2013										
<b>ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO</b>										ASTM C39	
<b>DATOS DEL ENSAYO</b>											
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
R7-1	24/01/2013	31/01/2013	7	3.874	20,0	10,0	78,54	2.466	49.919	636	62,3
R7-2	24/01/2013	31/01/2013	7	3.870	20,0	10,0	78,54	2.464	44.729	570	55,9
R28-1	24/01/2013	21/02/2013	28	3.880	20,0	10,0	78,54	2.470	51.953	661	64,9
R28-2	24/01/2013	21/02/2013	28	3.886	20,0	10,0	78,54	2.474	54.156	690	67,6

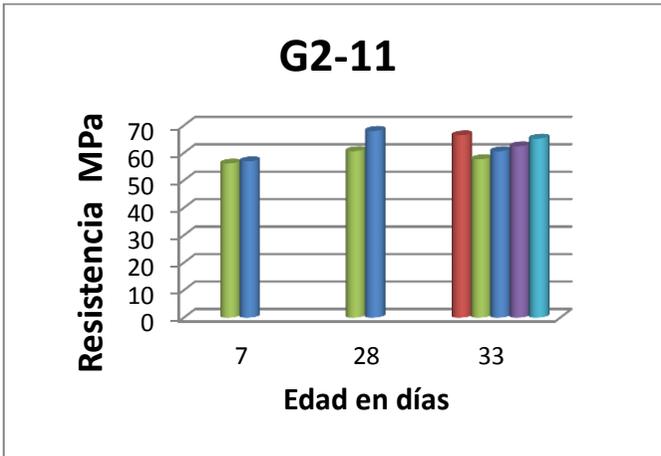




<b>PROYECTO:</b>	Hormigones de Alta Resistencia
<b>MEZCLA:</b>	G2-11
<b>SOLICITADO POR:</b>	Santiago Vélez Guayasamín
<b>FECHA:</b>	07/07/2013

<b>ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO</b>	ASTM C39
--	----------

DATOS DEL ENSAYO											
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
R7-1	24/01/2013	31/01/2013	7	3.842	20,0	10,0	78,54	2.482	44.978	573	56,2
R7-2	24/01/2013	31/01/2013	7	3.872	20,0	10,0	78,54	2.446	45.618	581	57,0
R28-1	24/01/2013	21/02/2013	28	3.876	20,0	10,0	78,54	2.468	48.598	619	60,7
R28-2	24/01/2013	21/02/2013	28	3.880	20,0	10,0	78,54	2.459	54.500	694	68,1
R33-1	24/01/2013	26/02/2013	33	3.873	20,0	10,0	78,54	2.466	53.211	677	66,4
R33-2	24/01/2013	26/02/2013	33	3.876	20,0	10,0	78,54	2.468	46.235	589	57,7
R33-3	24/01/2013	26/02/2013	33	3.872	20,0	10,0	78,54	2.465	48.582	619	60,7
R33-4	24/01/2013	26/02/2013	33	3.875	20,0	10,0	78,54	2.467	50.015	637	62,5
R33-5	24/01/2013	26/02/2013	33	3.871	20,0	10,0	78,54	2.464	52.250	665	65,2





4.1.2 Hormigones con Escoria de Acero (HEA).

**MEZCLAS “G3” INCORPORANDO ESCORIA SIDERÚRGICA**

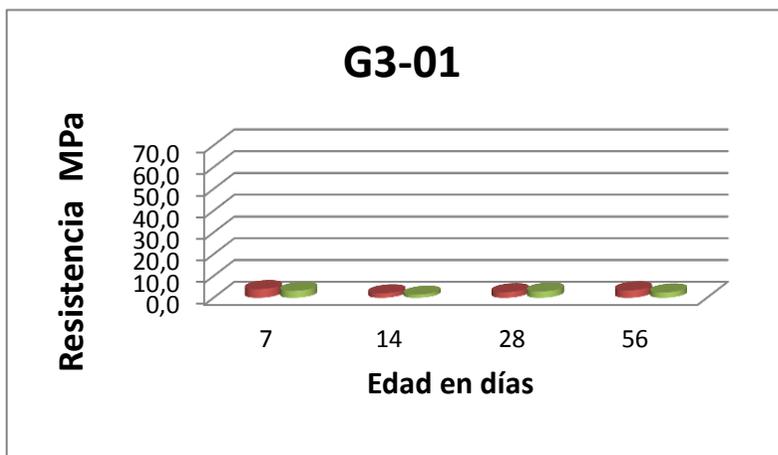
<b>PROYECTO:</b>	Tesis Hormigones con Escoria de Acero
<b>MEZCLA:</b>	G3-01
<b>SOLICITADO POR:</b>	Santiago Vélez Guayasamín
<b>FECHA:</b>	09/08/2013

**ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO**

ASTM C39

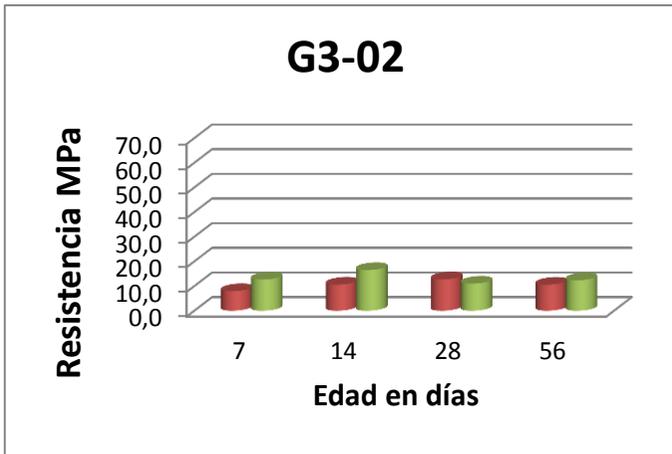
**DATOS DEL ENSAYO**

NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
Cilindro: 1-7	20/05/2013	27/05/2013	7	3.293	20,0	10,0	78,54	2.096	3.221	41	4,0
Cilindro: 2-7	20/05/2013	27/05/2013	7	3.270	20,0	10,0	78,54	2.082	2.586	33	3,2
Cilindro: 1-14	20/05/2013	03/06/2013	14	3.285	20,0	10,0	78,54	2.091	1.675	21	2,1
Cilindro: 2-14	20/05/2013	03/06/2013	14	3.321	20,0	10,0	78,54	2.114	1.182	15	1,5
Cilindro: 1-28	20/05/2013	17/06/2013	28	3.341	20,0	10,0	78,54	2.127	2.101	27	2,6
Cilindro: 2-28	20/05/2013	17/06/2013	28	3.350	20,0	10,0	78,54	2.133	2.356	30	2,9
Cilindro: 1-56	20/05/2013	15/07/2013	56	3.300	20,0	10,0	78,54	2.101	2.781	35	3,5
Cilindro: 1-56	20/05/2013	15/07/2013	56	3.308	20,0	10,0	78,54	2.106	2.001	25	2,5





<b>PROYECTO:</b>		Tesis Hormigones con Escoria de Acero									
<b>MEZCLA:</b>		G3-02									
<b>SOLICITADO POR:</b>		Santiago Vélez Guayasamín									
<b>FECHA:</b>		09/08/2013									
<b>ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO</b>										ASTM C39	
<b>DATOS DEL ENSAYO</b>											
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
Cilindro: 1-7	30/05/2013	06/06/2013	7	3.685	20,0	10,0	78,54	2.346	6.366	81	7,9
Cilindro: 2-7	30/05/2013	06/06/2013	7	3.880	20,0	10,0	78,54	2.470	10.125	129	12,6
Cilindro: 1-14	30/05/2013	13/06/2013	14	3.701	20,0	10,0	78,54	2.356	8.484	108	10,6
Cilindro: 2-14	30/05/2013	13/06/2013	14	3.942	20,0	10,0	78,54	2.510	13.205	168	16,5
Cilindro: 1-28	30/05/2013	27/06/2013	28	3.745	20,0	10,0	78,54	2.384	10.170	129	12,7
Cilindro: 2-28	30/05/2013	27/06/2013	28	3.922	20,0	10,0	78,54	2.497	8.810	112	11,0
Cilindro: 1-56	30/05/2013	25/07/2013	56	3.869	20,0	10,0	78,54	2.463	8.462	108	10,6
Cilindro: 2-56	30/05/2013	25/07/2013	56	3.741	20,0	10,0	78,54	2.382	9.889	126	12,3



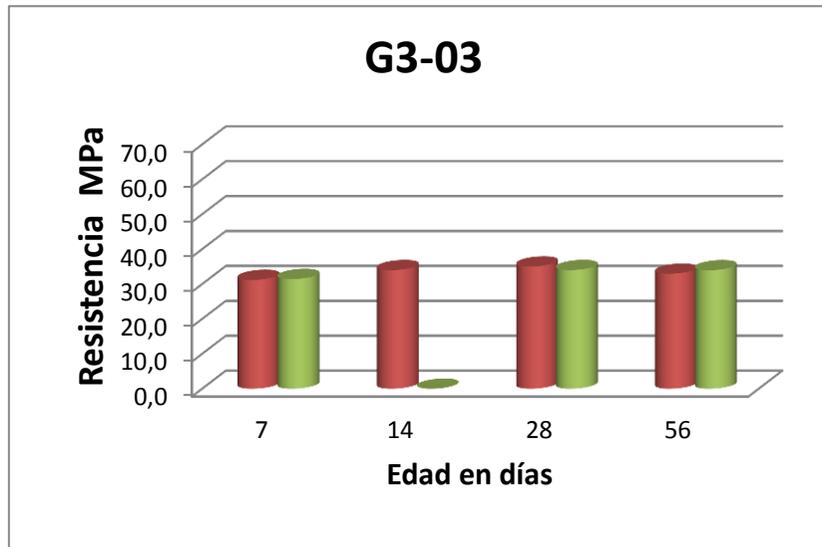
<b>PROYECTO:</b>	Tesis Hormigones con Escoria de Acero
<b>MEZCLA:</b>	G3-03
<b>SOLICITADO POR:</b>	Santiago Vélez Guayasamín
<b>FECHA:</b>	09/08/2013

**ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO**

ASTM C39

**DATOS DEL ENSAYO**

NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA		PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
Cilindro: 1-7	21/05/2013	28/05/2013	7	4.226	20,0	10,0	78,54	2.690	24.975	318	31,2
Cilindro: 2-7	21/05/2013	28/05/2013	7	4.232	20,0	10,0	78,54	2.694	25.178	321	31,4
Cilindro: 1-14	21/05/2013	04/06/2013	14	4.231	20,0	10,0	78,54	2.694	27.217	347	34,0
Cilindro: 1-28	21/05/2013	18/06/2013	28	4.185	20,0	10,0	78,54	2.664	28.052	357	35,0
Cilindro: 2-28	21/05/2013	18/06/2013	28	4,175	20,0	10,0	78,54	2,658	27.239	347	34,0
Cilindro: 1-56	21/05/2013	16/07/2013	56	4.180	20,0	10,0	78,54	2.661	26.398	336	33,0
Cilindro: 2-56	21/05/2013	16/07/2013	56	4.203	20,0	10,0	78,54	2.676	27.197	346	34,0

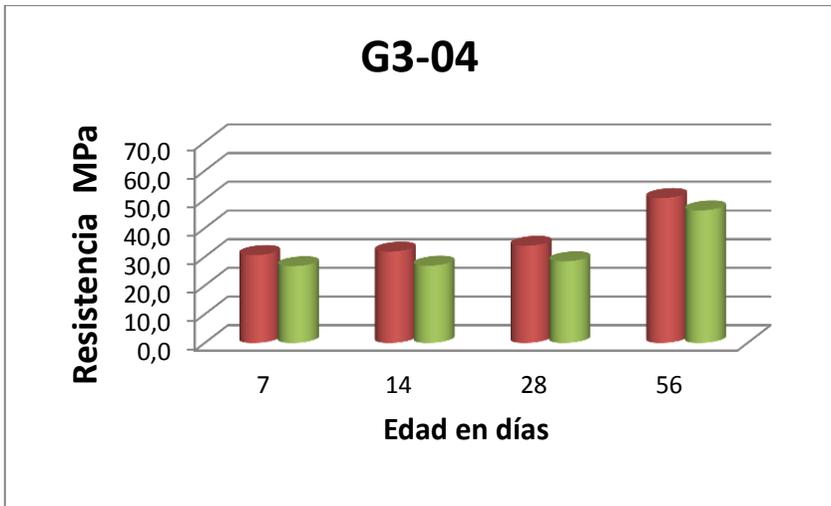




<b>PROYECTO:</b>	Tesis Hormigones con Escoria de Acero
<b>MEZCLA:</b>	G3-04
<b>SOLICITADO POR:</b>	Santiago Vélez Guayasamín
<b>FECHA:</b>	09/08/2013

<b>ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO</b>	ASTM C39
--	----------

DATOS DEL ENSAYO											
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
Cilindro: 1-7	15/05/2013	22/05/2013	7	4.260	20,0	10,0	78,54	2.712	24.515	312	30,6
Cilindro: 2-7	15/05/2013	22/05/2013	7	4.242	20,0	10,0	78,54	2.701	21.417	273	26,7
Cilindro: 1-14	15/05/2013	29/05/2013	14	4.254	20,0	10,0	78,54	2.708	25.484	324	31,8
Cilindro: 2-14	15/05/2013	29/05/2013	14	4.173	20,0	10,0	78,54	2.657	21.573	275	26,9
Cilindro: 1-28	15/05/2013	12/06/2013	28	4.175	20,0	10,0	78,54	2.658	27.118	345	33,9
Cilindro: 2-28	15/05/2013	12/06/2013	28	4.232	20,0	10,0	78,54	2.694	22.787	290	28,5
Cilindro: 1-56	15/05/2013	10/07/2013	56	4.241	20,0	10,0	78,54	2.700	40.435	515	50,5
Cilindro: 2-56	15/05/2013	10/07/2013	56	4.218	20,0	10,0	78,54	2.685	36.992	471	46,2



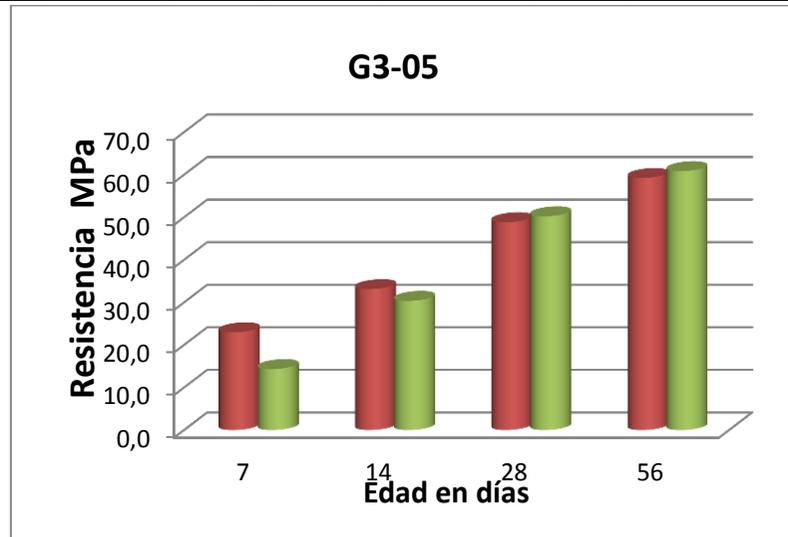
<b>PROYECTO:</b>	Tesis Hormigones con Escoria de Acero
<b>MEZCLA:</b>	G3-05
<b>SOLICITADO POR:</b>	Santiago Vélez Guayasamín
<b>FECHA:</b>	09/08/2013

**ENSAYO A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO**

ASTM C39

**DATOS DEL ENSAYO**

NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
				gr	cm	cm	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kgf	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
Cilindro: 1-7	03/06/2013	10/06/2013	7	4.133	20,0	10,0	78,54	2.631	18.396	234	23,0
Cilindro: 2-7	03/06/2013	10/06/2013	7	4.068	20,0	10,0	78,54	2.590	11.472	146	14,3
Cilindro: 1-14	03/06/2013	17/06/2013	14	4.102	20,0	10,0	78,54	2.611	26.520	338	33,1
Cilindro: 2-14	03/06/2013	17/06/2013	14	4.139	20,0	10,0	78,54	2.635	24.310	310	30,4
Cilindro: 1-28	03/06/2013	01/07/2013	28	4.143	20,0	10,0	78,54	2.638	39.110	498	48,8
Cilindro: 2-28	03/06/2013	01/07/2013	28	4.120	20,0	10,0	78,54	2.623	40.225	512	50,2
Cilindro: 1-56	03/06/2013	29/07/2013	56	4.142	20,0	10,0	78,54	2.637	47.431	604	59,2
Cilindro: 2-56	03/06/2013	29/07/2013	56	4.106	20,0	10,0	78,54	2.614	48.722	620	60,8



## 4.2 Resistencia a tracción Indirecta



Figura 27: Ensayo de tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta en el concreto es un sistema útil para determinar la resistencia de tracción de un hormigón, especialmente, en aquellos casos que no se disponga de otro tipo de probetas que no sean cilíndricas. Nos da un dato básico de cálculo y de control que será significativo cuando el hormigón esté trabajando a este tipo de sollicitación.

**Alcance del ensayo.** El presente ensayo es una forma indirecta para determinar la resistencia de probetas cilíndricas, se usa el ensayo brasileño o método para determinar la resistencia a tensión indirecta. Esta prueba puede correlacionarse en laboratorio con el módulo de rotura por flexo-tracción (MR). La norma usada es la ASTM C 496.

### Equipo.

- Máquina de prueba.
- Placas de apoyo.

**Procedimiento.** El ensayo de tracción por compresión diametral se realiza en las mismas prensas usadas para las pruebas de compresión. Un accesorio especial permite colocar la probeta cilíndrica en posición horizontal y someterla a compresión sobre dos generatrices opuestas, lo que genera tracción en el plano vertical sobre el que se ejerce la presión y produce la rotura de la probeta por tracción en ese plano.



La carga se aplica continuamente y sin impacto a una velocidad uniforme dentro de un intervalo de 7 a 14 kg/cm<sup>2</sup> /min de esfuerzo indirecto de tensión, hasta la falla del espécimen.

La resistencia a tensión indirecta del espécimen se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{2 P}{\pi L D}$$

**Dónde:**

T: Resistencia a tensión indirecta en kg/cm<sup>2</sup>.

P: Carga aplicada máxima, indicada por la máquina de ensaye, en kg.

L: Longitud, en cm.

D: Diámetro, en cm.

### **Correlación entre la resistencia de tracción por compresión diametral y la tracción por flexión.**

Debido a que en una obra civil, las probetas cilíndricas son más manejables que las vigas, Neville desarrolló una ecuación que permite relacionar directamente el esfuerzo de tracción indirecta T y la tracción por flexión MT, la cual se expresa a continuación:

$$MR = 1.333 x T$$

### **Resultados**

A continuación se presentan los resultados de las probetas, utilizando la expresión de resistencia a la tracción indirecta (T) y la formula de Neville para la tracción por flexión (MR).

### 4.2.1 Hormigones con Escoria de Acero (HEA)

#### Mezcla G3-01

No se realizó el ensayo debido a que la mezcla presentó mucha segregación.

#### Mezcla G3-02

ENSAYO A TRACCIÓN INDIRECTA DE CILINDROS DE CONCRETO										ASTM C496	
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	T	MR
				g	cm	Cm	cm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kgf	Mpa	MPa
Cilindro: TI2	30/05/2013	27/06/2013	28	3.995	20,0	10,0	78,54	2.543	10.138	3,17	4,22

#### Mezcla G3-03

ENSAYO A TRACCIÓN INDIRECTA DE CILINDROS DE CONCRETO										ASTM C496	
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	T	MR
				g	cm	Cm	cm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kgf	Mpa	MPa
Cilindro: TI3	21/05/2013	18/06/2013	28	4.149	20,0	10,0	78,54	2.641	12.150	3,79	5,06



**Mezcla G3-04**

ENSAYO A TRACCIÓN INDIRECTA DE CILINDROS DE CONCRETO										ASTM C496	
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	T	MR
				g	cm	Cm	cm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kgf	Mpa	MPa
Cilindro: FT	15/05/2013	12/06/2013	28	4.202	20,0	10,0	78,54	2.675	12.124	3,79	5,05

**Mezcla G3-05**

ENSAYO A TRACCIÓN INDIRECTA DE CILINDROS DE CONCRETO										ASTM C496	
NOMENCLATURA	F. CONFECCIÓN	F. ROTURA	EDAD ENSAYO	PESO	ALTURA	DIÁMETRO	ÁREA	P. VOLUMÉTRICO	CARGA ROTURA	T	MR
				g	cm	cm	cm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kgf	Mpa	MPa
Cilindro: FT	03/06/2013	01/07/2013	28	4.118	20,0	10,0	78,54	2.622	12.155	3,80	5,06

### 4.3 Módulo de elasticidad



Figura 28: Medición de deformaciones

El módulo de elasticidad o módulo de Young del concreto es una propiedad, el cual se utiliza comúnmente en el diseño y aplicaciones de ingeniería, debido a que representa esencialmente una medida de firmeza que influye en las deflexiones, derivas y rigidez de una estructura. Es además un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en que se aplica la fuerza, en otras palabras con el módulo de elasticidad podemos conocer el acortamiento por carga axial de un elemento estructural. Su valor se define como el cociente entre la tensión aplicada y la deformación.

**Alcance del ensayo.** Este método incluye los procedimientos para determinar el módulo de elasticidad estático de cilindros de concreto. La norma utilizada es la ASTM C 469.

#### Equipo

- Máquina de prueba.
- Medidor de deformaciones longitudinales.
- Medidor de deformaciones transversales.

**Procedimiento.** El cilindro de ensayo se capea de la misma manera en que fue hecha para los ensayos de compresión y se determinará el diámetro del espécimen



al promediar dos diámetros que formen ángulo recto. Luego se colocará el equipo medidor de deformaciones en la muestra cilíndrica, considerando que el equipo quede alineado y centrado con respecto a la muestra.

El espécimen se carga en dos ciclos. El primero se efectúa para verificar y calibrar los deformímetros y en el segundo se carga en forma continua, registrando la carga aplicada y la deformación longitudinal. Se debe considerar que la mayor carga que debe soportar el equipo de deformaciones, equivale al 65% de la máxima resistencia de la probeta. Para obtener la curva esfuerzo deformación se toman lecturas en dos o más puntos intermedios en el segundo ciclo.

El módulo de elasticidad se calcula usando la siguiente fórmula:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_1 - 0.000050}$$

**Dónde:**

- E: Módulo de elasticidad secante, en kg/cm<sup>2</sup>.  
S<sub>2</sub>: Esfuerzo equivalente al 65% de la resistencia, en kg/cm<sup>2</sup>.  
S<sub>1</sub>: Esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas, en kg/cm<sup>2</sup>.  
ε<sub>1</sub>: Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S<sub>2</sub>.

**Resultados.**

A continuación se muestran los resultados de los cilindros preparados para este ensayo a los veintiocho días de edad.

### 4.3.1 Hormigones con escoria de acero (HEA)

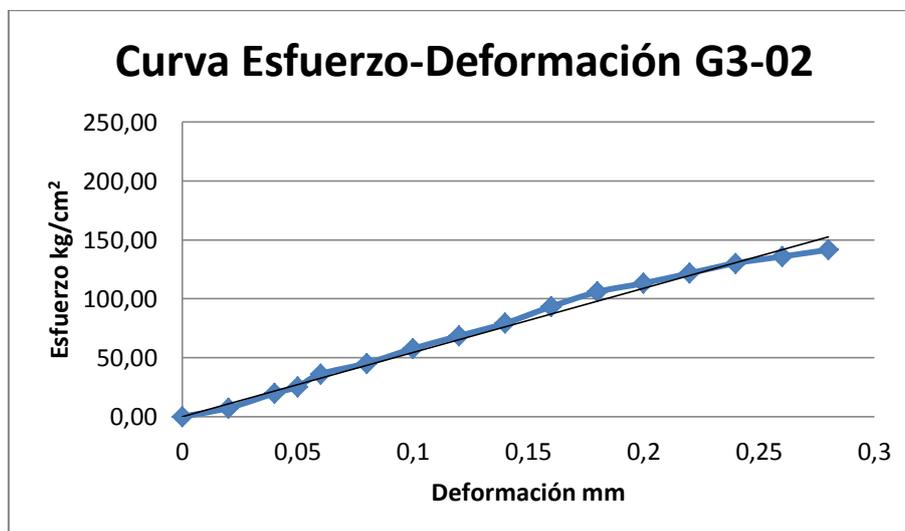
#### Mezcla G3-01

No se realizó el ensayo debido a que la mezcla presentó mucha segregación.



## Mezcla G3-02

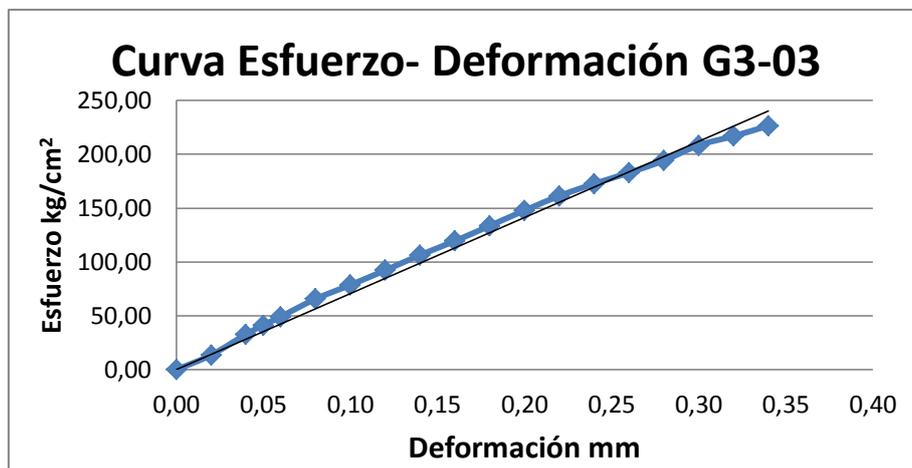
Def. Vertical	Def. Horizontal	Carga	Esfuerzo
mm	Mm	kg	kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0	0,00
0,02	0,001	1300	7,36
0,04	0,001	3500	19,81
0,05	0,002	4500	25,46
0,06	0,003	6400	36,22
0,08	0,004	8000	45,27
0,1	0,006	10200	57,72
0,12	0,007	12100	68,47
0,14	0,008	14000	79,22
0,16	0,009	16500	93,37
0,18	0,01	18700	105,82
0,2	0,011	20000	113,18
0,22	0,013	21500	121,67
0,24	0,015	23000	130,15
0,26	0,016	24000	135,81
0,28	0,017	25000	141,47



**E (kg/cm<sup>2</sup>): 614388,606**

## Mezcla G3-03

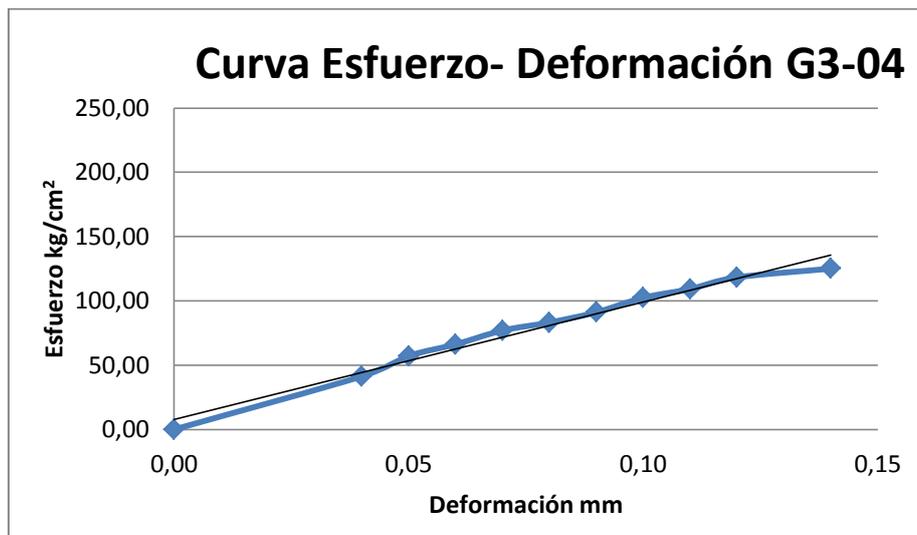
Def. Vertical	Def. Horizontal	Carga	Esfuerzo
mm	mm	kg	kg/cm <sup>2</sup>
0,00	0,00	0,00	0,00
0,02	0,00	2400,00	13,58
0,04	0,00	5800,00	32,82
0,05	0,01	7300,00	41,31
0,06	0,01	8700,00	49,23
0,08	0,01	11600,00	65,64
0,10	0,01	13900,00	78,66
0,12	0,01	16300,00	92,24
0,14	0,01	18800,00	106,39
0,16	0,01	21100,00	119,40
0,18	0,01	23600,00	133,55
0,20	0,01	26100,00	147,70
0,22	0,02	28500,00	161,28
0,24	0,02	30500,00	172,59
0,26	0,02	32300,00	182,78
0,28	0,02	34300,00	194,10
0,30	0,04	36800,00	208,25
0,32	0,04	38300,00	216,73
0,34	0,05	40000,00	226,35



**E (kg/cm<sup>2</sup>): 667743,406**

## Mezcla G3-04

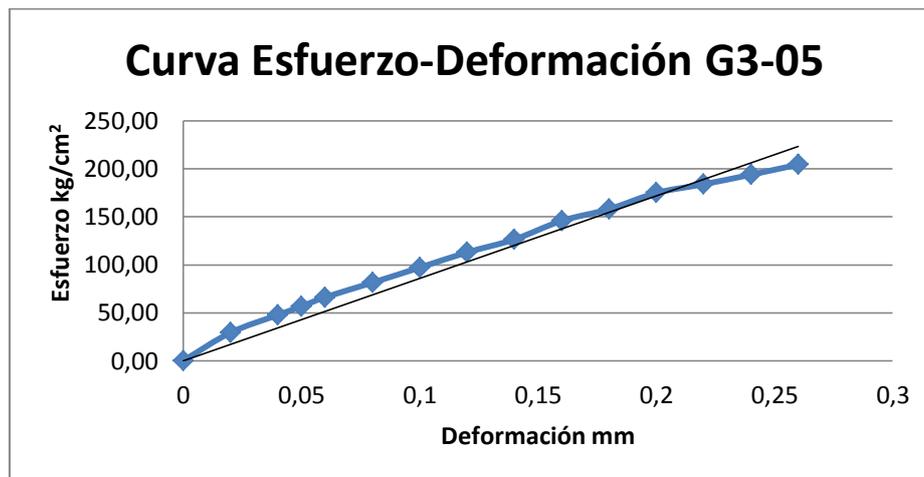
Def. Vertical mm	Def. Horizontal mm	Carga kg	Esfuerzo kg/cm <sup>2</sup>
0,00	0,00	0	0,00
0,01	0,00	0	0,00
0,02	0,00	0	0,00
0,00	0,00	0	0,00
0,04	0,00	7300	41,31
0,05	0,01	10100	57,15
0,06	0,01	11700	66,21
0,07	0,01	13600	76,96
0,08	0,01	14700	83,18
0,09	0,01	16100	91,11
0,10	0,01	18100	102,43
0,11	0,02	19300	109,22
0,12	0,02	20900	118,27
0,14	0,02	22100	125,06



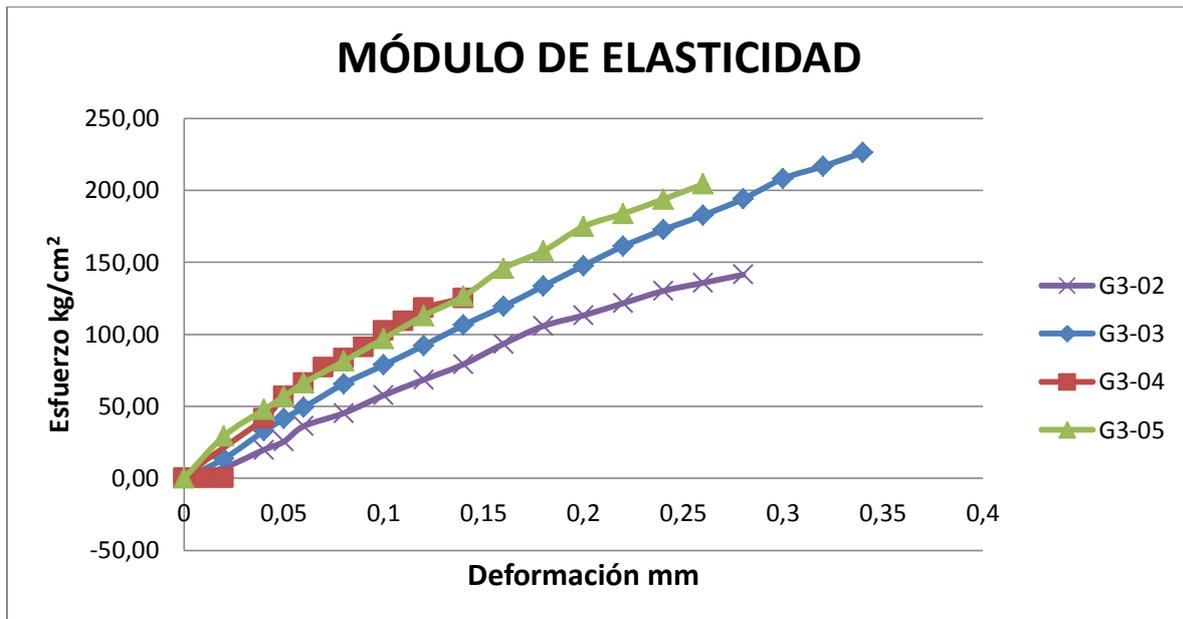
**E (kg/cm<sup>2</sup>): 754512,3228**

## Mezcla G3-05

Def. Vertical	Def. Horizontal	Carga	Esfuerzo
mm	mm	kg	kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0	0,00
0,02	0,001	5184	29,34
0,04	0,002	8436	47,74
0,05	0,0035	10000	56,59
0,06	0,003	11700	66,21
0,08	0,005	14384	81,40
0,1	0,007	17158	97,09
0,12	0,011	19958	112,94
0,14	0,013	22344	126,44
0,16	0,017	25768	145,82
0,18	0,019	27913	157,96
0,2	0,021	30900	174,86
0,22	0,025	32500	183,91
0,24	0,027	34258	193,86
0,26	0,032	36111	204,35



E (kg/cm<sup>2</sup>): 703609,7



#### Resumen de resultados

MEZCLA DE HORMIGÓN	E	kg/cm <sup>2</sup>
G3-02	614388,61	
G3-03	667743,41	
G3-04	754512,32	
G3-05	703609,69	

#### 4.4 Relación de Poisson

La relación de Poisson del concreto representa la relación entre la deformación unitaria transversal y la deformación unitaria longitudinal; este parámetro se determina habitualmente de acuerdo a la norma ASTM C-469.

**Alcance del ensayo.** El módulo de Poisson es una medida que depende de varios factores tales como los materiales usados para la mezcla de concreto, las condiciones climáticas de los ensayos, entre otros. Es importante para el análisis estructural, debido a que sirve para calcular las deformaciones en elementos estructurales.



**Procedimiento.** Se coloca el equipo medidor de deformaciones en la muestra cilíndrica, de la misma forma que se hizo para determinar el módulo de elasticidad, considerando que el equipo quede alineado y centrado con respecto a la muestra. Después el espécimen se carga en dos ciclos. El primero se efectúa para verificar y calibrar los deformímetros y en el segundo se carga en forma continua, registrando la carga aplicada, la deformación longitudinal y la deformación transversal. Se debe considerar que la mayor carga que debe soportar el equipo de deformaciones, equivale al 65% de la máxima resistencia de la probeta. La relación de Poisson se calcula usando la siguiente fórmula:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_1 - 0.000050}$$

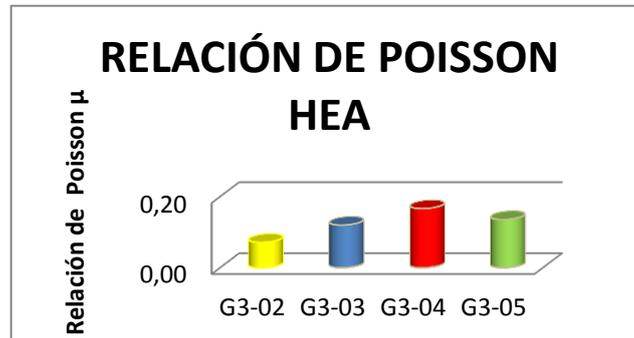
**Dónde:**

- $\mu$ : Relación de Poisson.
- $\varepsilon_{t2}$ : Deformación unitaria transversal, a la mitad de la altura el espécimen, producida por el esfuerzo  $S_2$ .
- $\varepsilon_{t1}$ : Deformación unitaria transversal, a la mitad de la altura el espécimen, producida por el esfuerzo  $S_1$ .
- $\varepsilon_1$ : Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo  $S_2$ .

**Resultados.**

Los valores de las deformaciones verticales y horizontales han sido expuestos en el ensayo previo de módulo de elasticidad. Sin embargo los cuadros siguientes representan los resultados de las probetas preparadas para el ensayo.

#### 4.4.1 Hormigones con escoria de acero (HEA)



MEZCLA DE HORMIGÓN	Relación de Poisson $\mu$
G3-02	0,07
G3-03	0,12
G3-04	0,17
G3-05	0,14

#### 4.4 Elemento estructural



Figura 29: Elemento viga-arco

En este ensayo mecánico se procede a elegir las mezclas con mayor resistencia a compresión de los dos tipos de hormigón confeccionados.

Se emplea el hormigón convencional y con escoria de acero, a un elemento estructural viga-arco sujeto a esfuerzos de compresión, tracción y corte, cuya geometría cumple con las condiciones impuestas por el ACI en la competencia



internacional, el cual exigía que la estructura ingrese en una caja de 1000 mm de longitud, 200 mm de ancho y 200 mm de profundidad, además que tenga un peso máximo de 15 kg. Las vigas serán fortalecidas con varillas de plástico reforzadas con fibra de vidrio FRP, con la finalidad de verificar la adherencia y desempeño de los hormigones con este tipo de refuerzo.

**Alcance del ensayo.** Este apartado contempla el ensayo impuesto por el ACI para la competencia FRP Composites Competition, para determinar la carga máxima y la adherencia entre los dos tipos de hormigones y sus respectivos refuerzos.

**Procedimiento.** El proceso de prueba del presente estudio se detalla a continuación:

La viga será medida y pesada, de manera que cumpla con los requisitos antes mencionados.

El elemento estructural se coloca en la máquina de prueba y en ella se aplica una carga concentrada en el centro de la luz por medio de una placa de carga giratoria. La distancia entre los ejes de apoyo de la viga es de 900 mm (35,4 pulgadas) y los apoyos por donde se transmiten las fuerzas de reacción tienen una medida de 50 mm x 50 mm y no restringen la rotación en los extremos de la estructura.

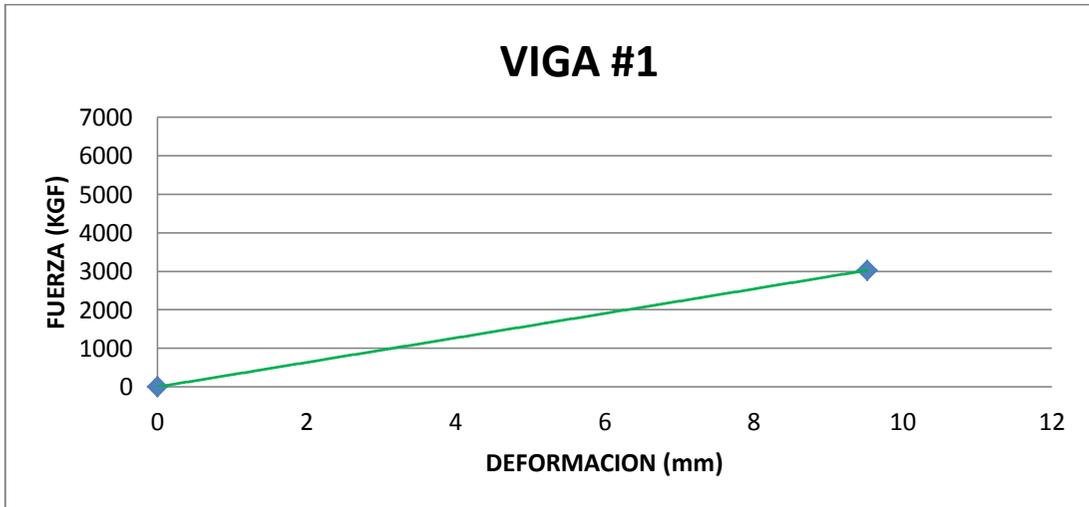
Una vez fija la viga, en la máquina de prueba, se aplica una carga de asentamiento de aproximadamente 0,25 kN (56 libras). Posteriormente se procede a dar carga continua hasta que la estructura falle o hasta que el dispositivo de prueba registre una carga de 67 kN (15.000 lb). Acabado este proceso se registra la carga máxima, que se define como la carga empleada para que falle la estructura, la misma que provoca una reducción del 75% de la misma. Las cargas que ocasionen desprendimientos o fisuras evidentes no serán consideradas como máximas, a menos que cumplan, con lo antes mencionado.

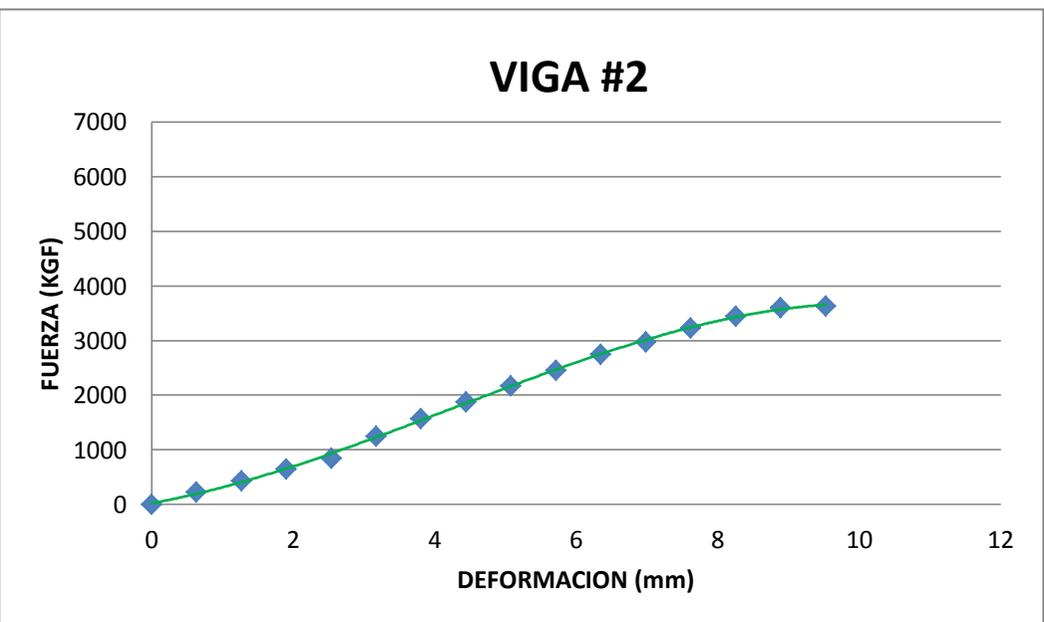
**Resultados.** A continuación se presentan los resultados de las vigas confeccionadas con hormigón convencional de alta resistencia y con hormigón de escoria de acero; ambos reforzados con varillas FRP.



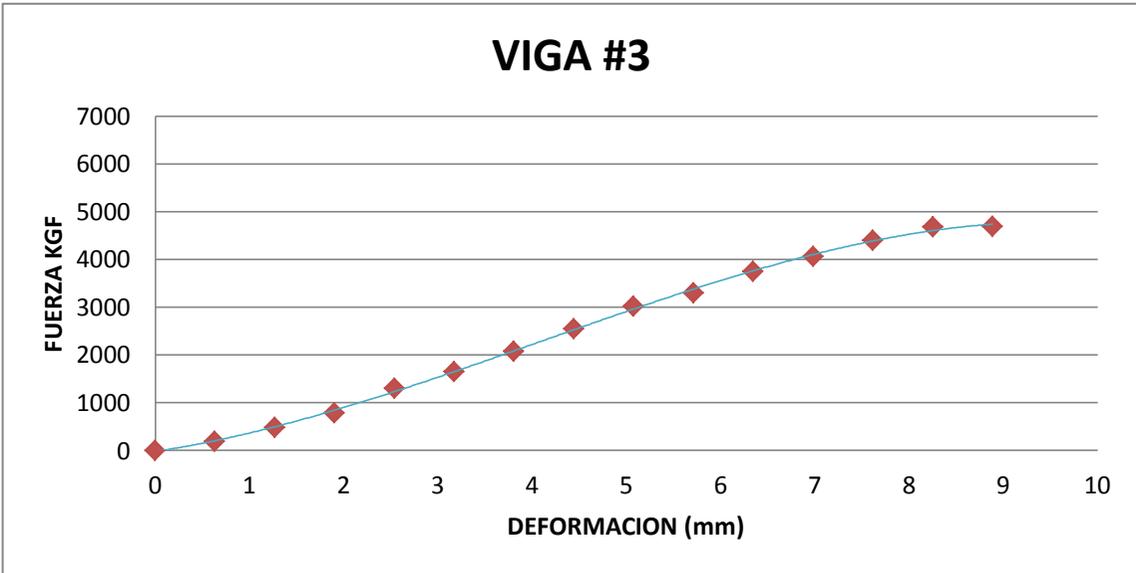
#### 4.5.1 Viga-Arco realizada con HAR reforzada con FRP

VIGA # 1	
NOMENCLATURA	VIGA #1 1C V
F. CONFECCIÓN	15/03/2013
F. ROTURA	18/03/2013
EDAD (días)	3
TIPO DE VARILLA	X PLAST
PESO (kg)	14,7
<b>E (mm)</b>	<b>F (kgf)</b>
0	0
9,525	3025

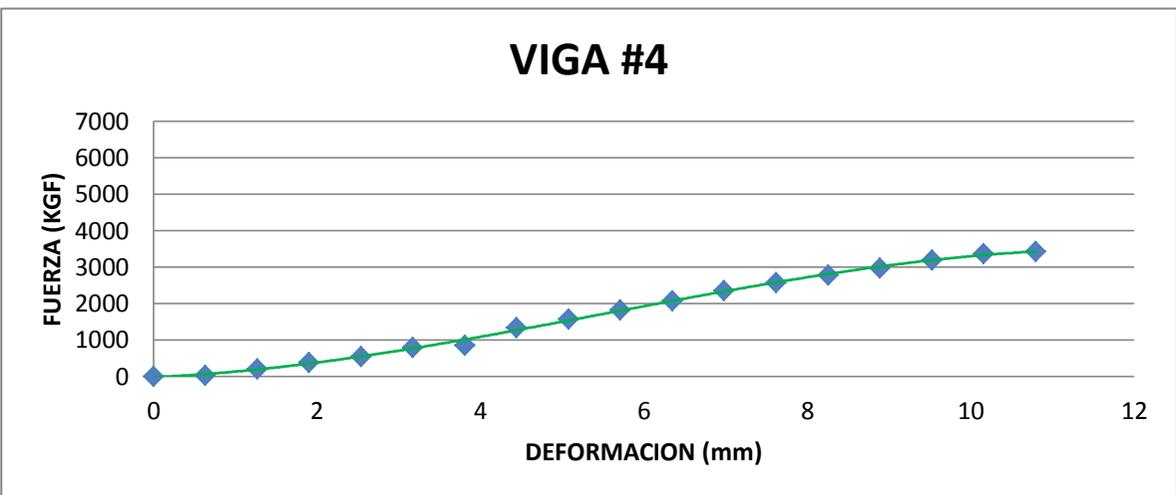




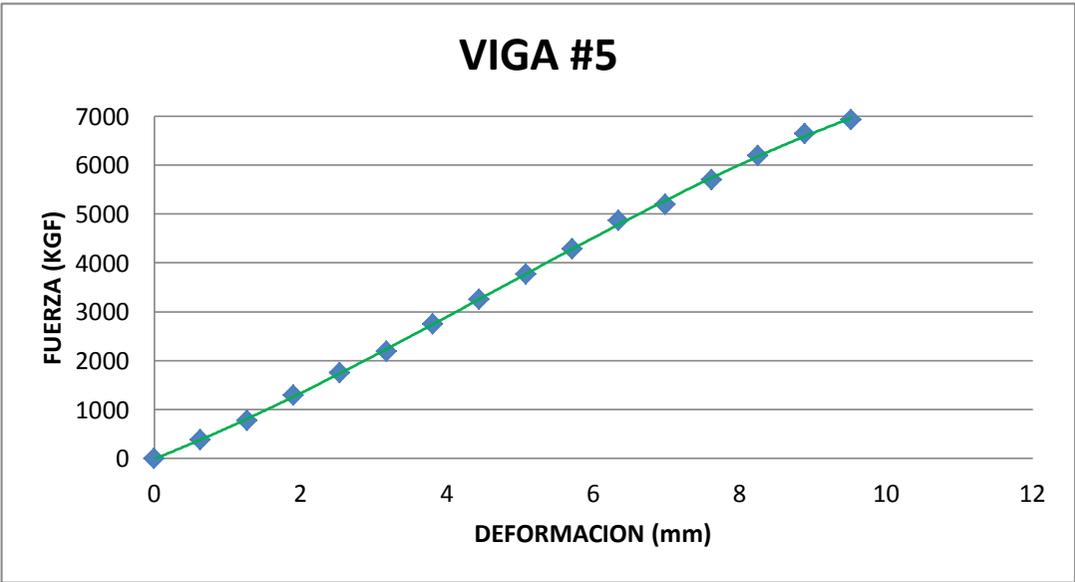
VIGA # 2	
NOMENCLATURA	VIGA #2 1C V
F. CONFECCIÓN	17/03/2013
F. ROTURA	22/03/2013
EDAD (días)	5
TIPO DE VARILLA	X PLAST
PESO (kg)	14,6
E (mm)	F (kgf)
0	0
0,635	231
1,27	430
1,905	653
2,54	846
3,175	1250
3,81	1570
4,445	1880
5,08	2170
5,715	2460
6,35	2750
6,985	2980
7,62	3229
8,255	3450
8,89	3600
9,525	3634



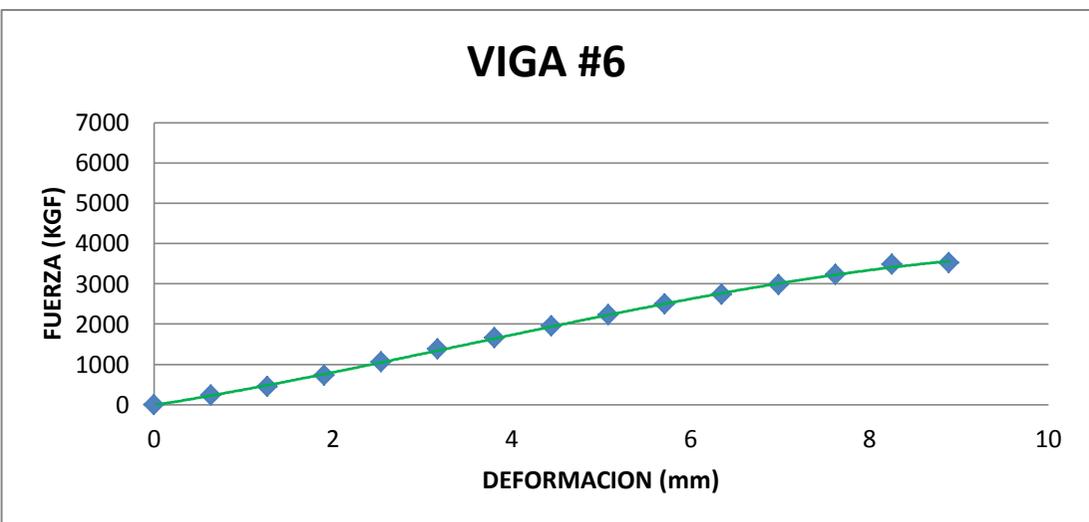
VIGA # 3	
NOMENCLATURA	VIGA #3 2C V
F. CONFECCIÓN	17/03/2013
F. ROTURA	22/03/2013
EDAD (días)	5
TIPO DE VARILLA	X PLAST
PESO (kg)	14,94
E (mm)	F (kgf)
0	0
0,635	190
1,27	480
1,905	789
2,54	1300
3,175	1650
3,81	2080
4,445	2550
5,08	3025
5,715	3300
6,35	3756
6,985	4070
7,62	4400
8,255	4684
8,89	4698



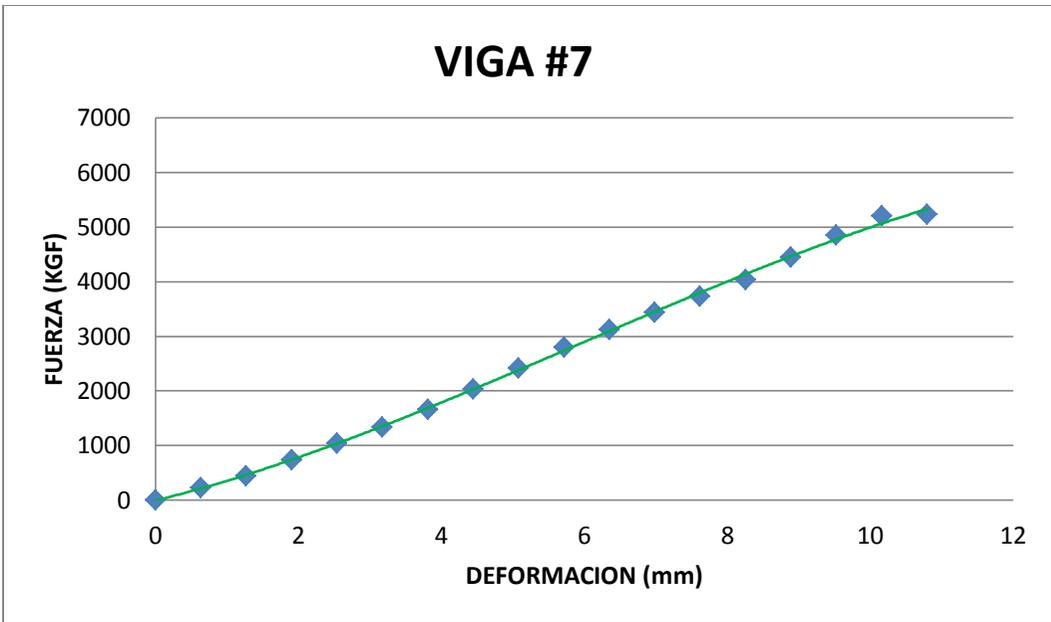
VIGA # 4	
NOMENCLATURA	VIGA #4 1 Vcorrugada
F. CONFECCIÓN	17/03/2013
F. ROTURA	22/03/2013
EDAD (días)	5
TIPO DE VARILLA	C-BAR MARSHALL
PESO (kg)	14,87
E (mm)	F (kgf)
0	0
0,635	34
1,27	200
1,905	380
2,54	540
3,175	800
3,81	850
4,445	1340
5,08	1580
5,715	1830
6,35	2080
6,985	2350
7,62	2570
8,255	2780
8,89	2970
9,525	3190
10,16	3370
10,795	3419



VIGA # 5	
NOMENCLATURA	VIGA #5 2 V Aci
F. CONFECCIÓN	20/03/2013
F. ROTURA	25/03/2013
EDAD (días)	5
TIPO DE VARILLA	TUF BAR BP
PESO (kg)	14,85
<b>E (mm)</b>	<b>F (kgf)</b>
0	0
0,635	384
1,27	778
1,905	1300
2,54	1760
3,175	2200
3,81	2750
4,445	3260
5,08	3780
5,715	4290
6,35	4870
6,985	5200
7,62	5700
8,255	6200
8,89	6645
9,525	6934



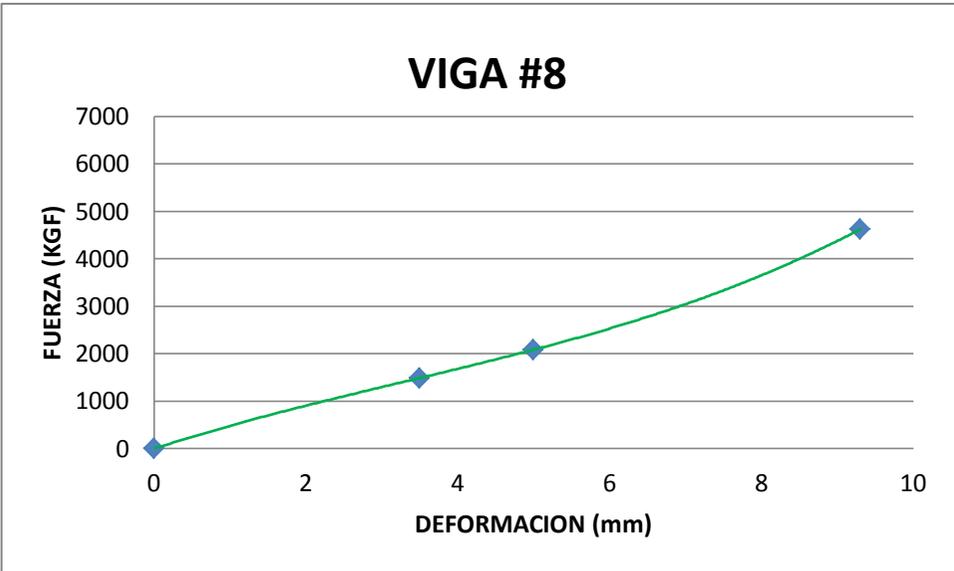
VIGA # 6	
NOMENCLATURA	VIGA #6 UC1
F. CONFECCIÓN	26/03/2013
F. ROTURA	01/04/2013
EDAD (días)	6
TIPO DE VARILLA	PULTRALL VROD
PESO (Kg)	14,86
E (mm)	F (kgf)
0	0
0,635	238
1,27	445
1,905	731
2,54	1060
3,175	1378
3,81	1660
4,445	1948
5,08	2231
5,715	2495
6,35	2740
6,985	2980
7,62	3230
8,255	3480
8,89	3528



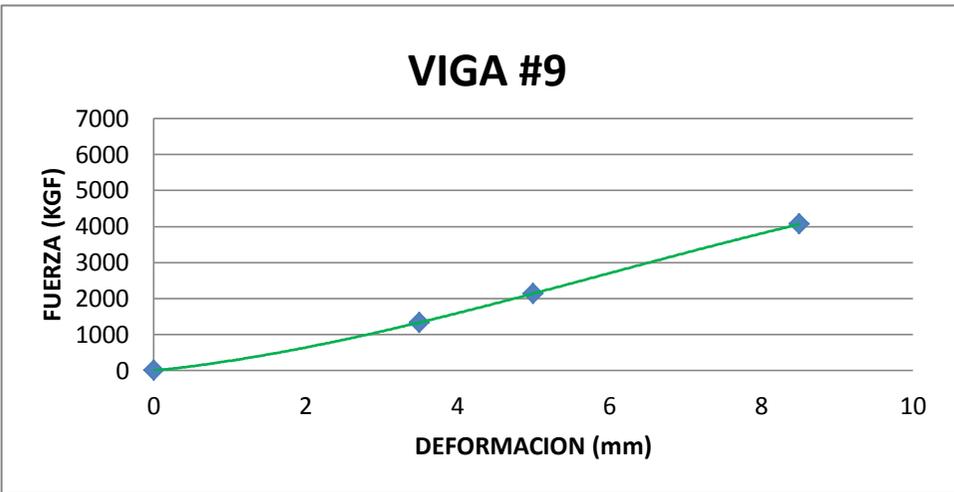
VIGA #7	
NOMENCLATURA	VIGA #7 UC2
F. CONFECCIÓN	26/03/2013
F. ROTURA	01/04/2013
EDAD (días)	6
TIPO DE VARILLA	PULTRALL VROD
PESO (kg)	14,98
E (mm)	F (kgf)
0	0
0,635	224
1,27	445
1,905	738
2,54	1046
3,175	1340
3,81	1659
4,445	2029
5,08	2420
5,715	2800
6,35	3120
6,985	3436
7,62	3729
8,255	4038
8,89	4446
9,525	4850
10,16	5200
10,795	5228



VIGA # 8	
NOMENCLATURA	UC1 ACI
F. CONFECCIÓN	26/03/2013
F. ROTURA	14/04/2013
EDAD (días)	19
TIPO DE VARILLA	PULTRALL VROD
PESO (kg)	14,98
<b>E (mm)</b>	<b>F (kgf)</b>
0	0
3,5	1490,83
5	2086,41
9,3	4626,20



VIGA # 9	
NOMENCLATURA	UC2 ACI
F. CONFECCIÓN	26/03/2013
F. ROTURA	14/04/2013
EDAD (días)	19
TIPO DE VARILLA	PULTRALL VROD
PESO (kg)	14,95
<b>E (mm)</b>	<b>F (kgf)</b>
0	0
3,5	1337,41
5,0	2140,67
8,5	4060,96





## CURVAS FUERZA-DEFORMACIÓN DE VIGAS HAR

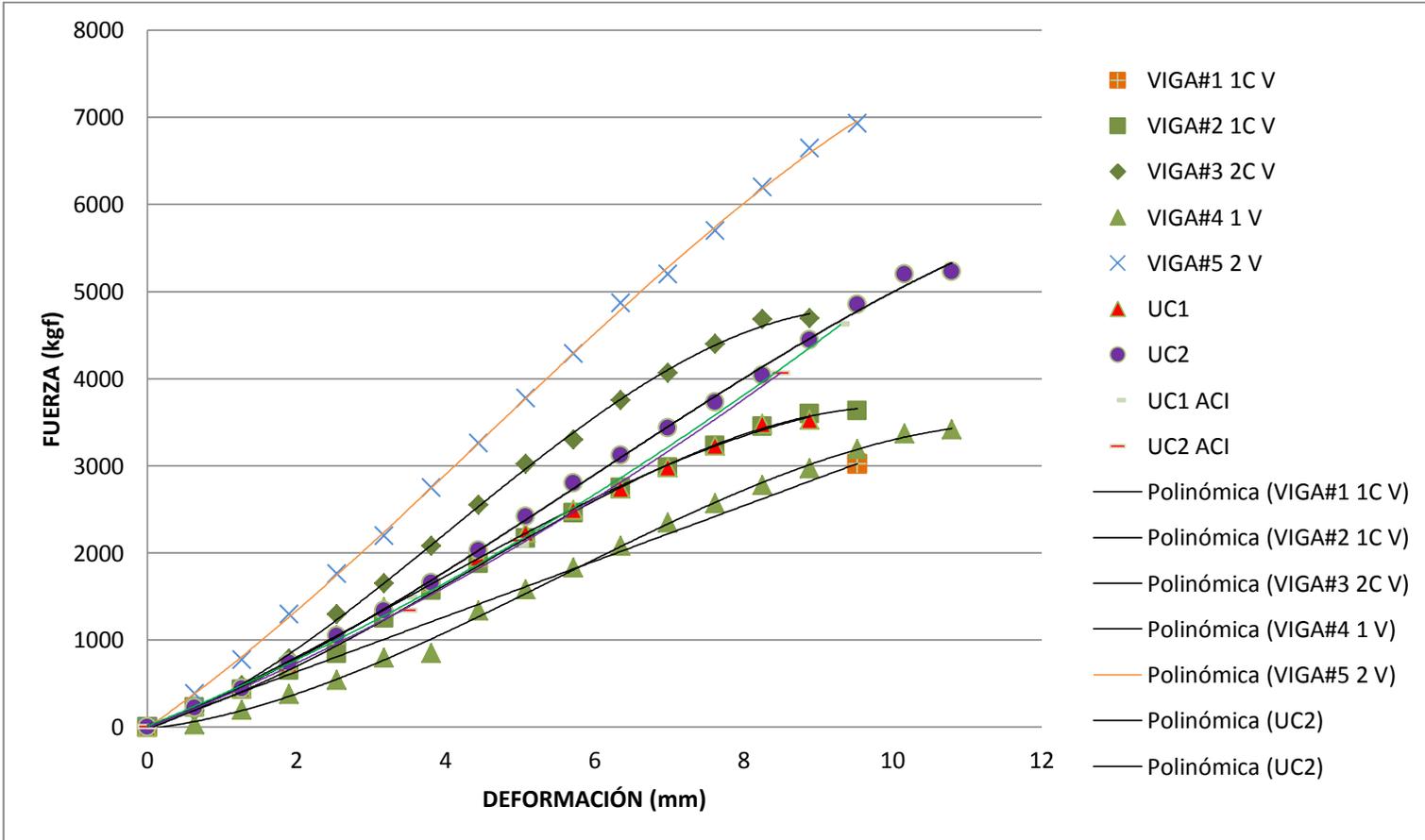


Figura 30: Curvas fuerza-deformación de vigas HAR

## FOTOS DE LAS VIGAS ENSAYADAS



Figura 31: Rotura de vigas 1



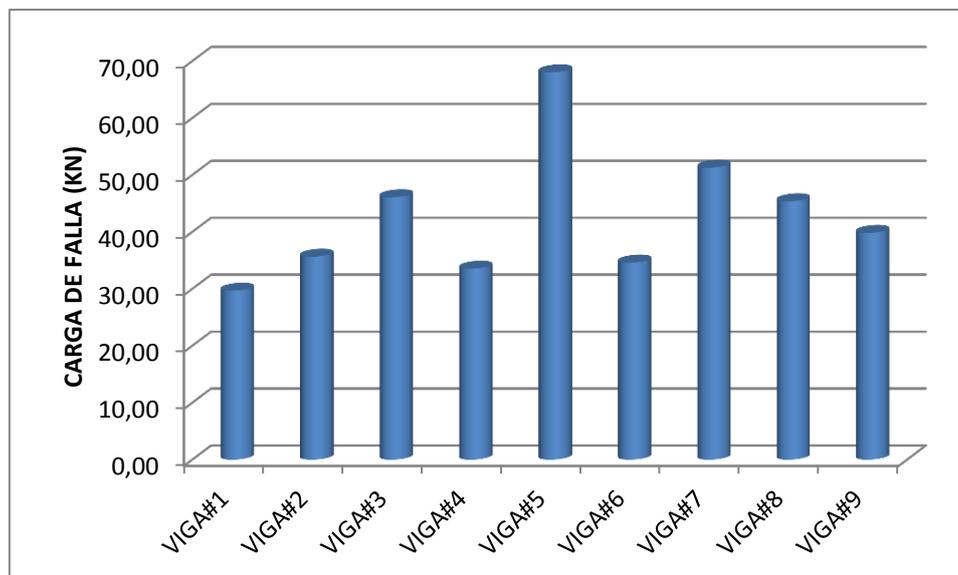
Figura 32: Rotura de vigas 2



Figura 33: Rotura de vigas 3

## RESUMEN DE CARGAS

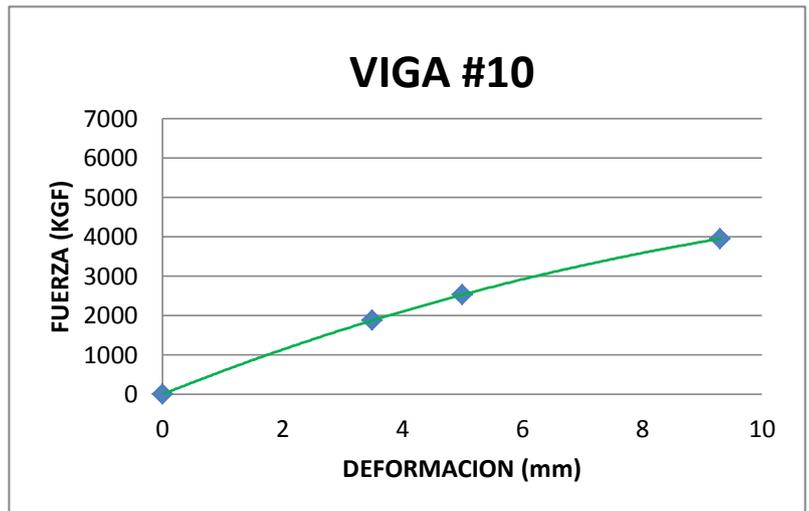
TIPO DE VIGA	CARGA (kg) D:3,5 mm	CARGA DE FALLA (kg)	CARGA DE FALLA (kN)
VIGA#1	-	3025	29,68
VIGA#2	1300	3634	35,65
VIGA#3	1750	4698	46,09
VIGA#4	825	3419	33,54
VIGA#5	1900	6934	68,02
VIGA#6	1450	3528	34,61
VIGA#7	1460	5228	51,29
VIGA#8	1490	4626	45,38
VIGA#9	1337	4060	39,83



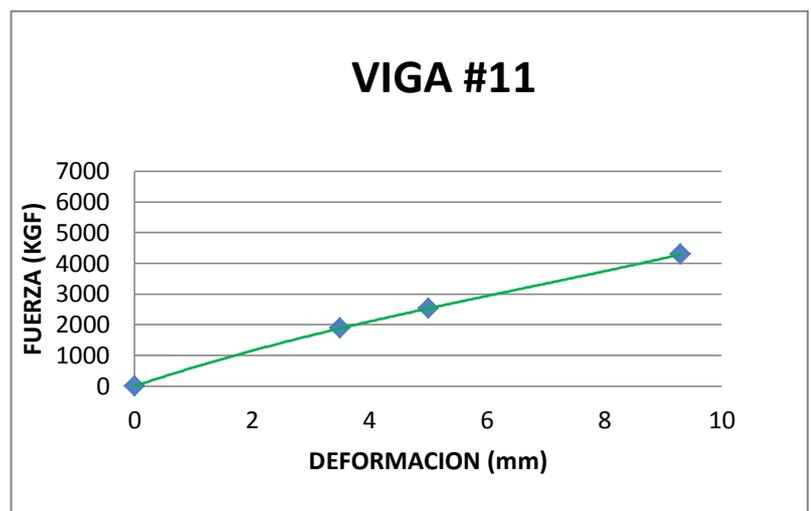
Cabe indicar que durante los ensayos se fue modificando el encofrado de la viga, con el afán de encontrar la forma y sección más apropiadas para obtener el mayor índice carga/resistencia, así también el número de varillas empleadas fue cambiando.

**4.5.2 Viga-Arco realizada con HEA reforzada con FRP**

VIGA # 10	
NOMENCLATURA	ESCORIA 1
F. CONFECCIÓN	11/07/2013
F. ROTURA	25/07/2013
EDAD (días)	14
TIPO DE VARILLA	PULTRALL VROD
PESO (kg)	15,82
<b>E (mm)</b>	<b>F (kgf)</b>
0	0
3,5	1875,00
5	2528,00
8,9	3950,00



VIGA # 11	
NOMENCLATURA	ESCORIA 2
F. CONFECCIÓN	11/07/2013
F. ROTURA	17/08/2013
EDAD (Días)	37
TIPO DE VARILLA	PULTRALL VROD
PESO (Kg)	15,20
<b>E (mm)</b>	<b>F (Kgf)</b>
0	0
3,5	1881,00
5,0	2530,00
8,5	4291,00



Las curvas fuerza-deformación obtenidas tras el ensayo de las dos vigas con escoria, demuestran que tienen un comportamiento semejante a las confeccionadas con hormigón convencional. La falla de las vigas se debe a la adherencia entre la varilla y hormigón, tal como se apreció en los hormigones convencionales. El hormigón con escoria de acero incorporado a un elemento estructural y sujeto a esfuerzos de tracción compresión y corte tiene un comportamiento igual a un convencional.



#### **4.6 Comentarios de Hormigones convencionales de Alta Resistencia (HAR).**

##### **G1-01**

Esta mezcla fue elaborada con arena de cuarzo, la cual a diferencia de la arena de río es más fina y dura. Se incorpora microsíllica con el afán de aumentar la resistencia. Además se añadió súper plastificante para darle trabajabilidad a la mezcla.

En cuanto a los ensayos de compresión, los especímenes ensayados a los siete días de edad presentan resistencias mayores a los 45 MPa, sin embargo las probetas ensayadas a los veintiocho días no sufren cambios significativos, esto muy debido a que el súper plastificante incorpora acelerante.

##### **G1-02**

Debido al requerimiento de tener altas resistencias se aumenta la cantidad de cemento en la mezcla G1-01, y como resultado se obtiene resistencias superiores a los 57 MPa. Las resistencias a compresión, a distintas edades son muy parecidas, esto por efecto del plastificante que actuó también como acelerante.

##### **G1-03**

En esta mezcla de hormigón se aumenta aún más la cantidad de cemento del diseño anterior, y se ajusta la curva granulométrica, manteniéndose dentro de los límites especificados. Las probetas R7-1 y R7-3 presentan una resistencia baja en comparación al R7-2 resto de probetas del mismo tipo, esto muy probablemente a la mala confección de las probetas.

La resistencia máxima alcanzada es de 59 MPa a los 28 días de edad, pero su desviación estándar es muy alta, debido a lo indicado previamente.



### **G1-10**

En la presente se adicionó arena de río a la mezcla G1-03, la cual permitió tener una granulometría más uniforme, y obtener mayor resistencias en contraste a los anteriores diseños.

Las resistencias de las probetas ensayadas a los 28 días de edad son muy semejantes, lo cual ayuda a disminuir la desviación estándar. Se confirma que plastificante actúa como acelerante debido a que la resistencia a los 7 y 28 días son semejantes.

### **G1-11**

La mezcla incorpora los materiales de la mezcla G1-10, sin embargo el ajuste a la curva mejora. Se disminuye la cantidad de cemento. Finalmente ésta composición resultó tener altas resistencias con la menor desviación estándar y fue la utilizada para el concurso nacional de hormigones de alta resistencia.

### **G2-01**

El diseño de la presente mezcla es igual al grupo G1 con la diferencia que carece de microsílica. Las probetas no tienen buen aspecto, esto muy probable al gran contenido de vacíos que se constató en los cilindros por falta de vibrado. En cuanto a la resistencia, los cilindros poseen baja resistencia y alta desviación.

### **G2-02**

El diseño de la mezcla resulta ser la modificación leve del G2-01, se aumenta el contenido de cemento con el afán de obtener superior resistencia. Las probetas presentaron un aspecto muy bueno sin muchas burbujas de aire.

Ensayadas las probetas se obtuvieron resistencias mayores a los 50 MPa.

### **G2-03**

En el presente diseño se opta por mejorar el ajuste a la curva granulométrica, manteniéndose dentro de los límites especificados. Se aumenta la cantidad de cemento del G2-02.



En los ensayos de compresión la probeta R28-2 supera los 60 MPa y se nota un ligero aumento de resistencia.

#### **G2-04**

Esta mezcla presenta menores resistencias en comparación a las de su grupo pero su desviación estándar resulta muy baja, siendo algo positivo en cuanto a la aceptabilidad del hormigón.

#### **G2-10**

La incorporación de la arena de río a la mezcla G2-04 mejoró la curva granulométrica de la presente composición. Las probetas poseen poco poros. Además fue aquella que presentó las mayores resistencias. Por otro lado la edad de los cilindros no influye en las resistencias, esto confirmando lo anteriormente dicho del súper plastificante. Esta mezcla fue utilizada para la elaboración de la viga en el concurso internacional del ACI.

#### **G2-11**

La mezcla incorpora los materiales de la mezcla G2-10, sin embargo el ajuste a la curva mejora. Se disminuye la cantidad de cemento para abaratar la mezcla. Este diseño fue la que dio el mayor índice resistencia a un menor costo, además fue la que presentó la menor desviación estándar en el concurso nacional de Hormigones de Alta Resistencia.

### **4.7 Comentarios de Hormigones con Escoria de Acero (HEA)**

#### **G3-01**

En esta mezcla se utiliza la escoria siderúrgica como agregado grueso. Su diseño parte del G2-10. La mezcla resulta ser poco trabajable debido a que carece de pasta de cemento. Los cilindros fraguados, presentan una superficie totalmente segregada, con apariencia de hormigones permeables. Su peso volumétrico oscila en los 2100 kg/cm<sup>3</sup>.

**Resistencia a la compresión.**

Su resistencia es considerablemente baja y muy variable entre las distintas fechas de ensayo a la compresión, de manera que no se tiene idea exacta del comportamiento del hormigón. Sin embargo se toma como referencia para las siguientes mezclas.

**Resistencia a tracción indirecta.**

Se prueba el espécimen, pero se interrumpe y posteriormente se rechaza el ensayo debido a que se desmorona completamente el hormigón apenas se da carga.

**Módulo de elasticidad.**

No se obtiene un valor debido a la alta segregación que presenta el espécimen. La separación de los materiales impide la buena adherencia entre los elementos que componen el hormigón, por tal motivo se descarta el ensayo.

**Relación de Poisson.**

No se tiene valor alguno, ya que no se realiza el ensayo; esto basado en el punto anterior.

**G3-02**

El diseño parte de la mezcla G3-01, la cual obliga a aumentar el material fino para evitar segregación. Una vez sacado los hormigones de los moldes, estos presentan una superficie semipermeable, con partes compactas similar a un queso. Sin duda se nota un mejoramiento ante la anterior mezcla. Su peso volumétrico aumenta a  $2400 \text{ kg/cm}^3$ .

**Resistencia a la compresión.**

En cuanto a la resistencia es baja pero superior a la muestra preliminar. Sus resistencias son muy variables en cuanto a su edad de elaboración por lo que no se puede dar una interpretación correcta de los datos conseguidos, sin embargo el ensayo demuestra que al aumentar el material fino mejora notablemente la mezcla.

**Resistencia a tracción indirecta.**

El espécimen puesto en ensayo, permitió soportar una carga de 10138 kg, lo cual resulta ser un valor alto para lo que físicamente se veía. Un dato muy interesante que sin duda demuestra que el material posee alguna propiedad de ductilidad.

**Módulo de elasticidad.**

Fundamentado en el gráfico esfuerzo-deformación, se nota un acomodamiento de la probeta en las primeras cargas de sollicitación. Seguidamente la curva parece tomar una tendencia lineal hasta su máxima carga permisible. El resultado obtenido es alto si comparamos con los hormigones convencionales, esto puede que sea por maniobra del laboratorista o por la calibración del deformímetros. Lamentablemente no se puede confirmar el valor debido a que solo se cuenta con un espécimen.

**Relación de Poisson.**

El valor de la relación de Poisson es bajo si lo comparamos con los hormigones convencionales, pero sirve como patrón, puesto a que este valor depende de varios factores, entre ellos el material propio del hormigón y/o la temperatura.

**G3-03**

Con los antecedentes de las dos mezclas realizadas se procede a aumentar aún más la cantidad de fino a la mezcla para dar cohesión entre los materiales que componen el hormigón. Posteriormente al momento de desencofrar el hormigón se nota una superficie homogénea con pequeñas surcos en los cilindros. Su peso específico aumenta alrededor de  $2650 \text{ kg/m}^3$ .

**Resistencia a la compresión.**

La resistencia obtenida los veintiocho días es alta si consideramos que normalmente para viviendas se utilizan hormigones de hasta  $280 \text{ kg/cm}^2$ . Sus resistencias parecen tomar una tendencia creciente debido a la madurez del hormigón, es decir mayor edad más resistencia. Se comprueba que aumentando el material fino, aumenta el enlace entre las partículas gruesas, finas y el material cementante.

**Resistencia a tracción indirecta.**

El espécimen puesto en ensayo, permitió soportar una carga de  $12150 \text{ kg}$ , siendo esta la más alta conseguida en la vigente tesis. El valor determinado demuestra que el hormigón posee buena resistencia de tracción.

**Módulo de elasticidad.**

La figura esfuerzo-deformación, adopta una curva casi lineal, con un ligero acomodamiento al inicio del tramo. El resultado del módulo de elasticidad es bastante alto en comparación al hormigón convencional, por lo que se sospecha de alguna calibración o manipulación, sin embargo no se descarta tan alto valor.

**Relación de Poisson.**

El valor de la relación de Poisson aumenta comparado al diseño G3-02, pero sigue siendo bajo, por lo que surge una discusión en cuanto a su correlación con el módulo de elasticidad. Sin embargo es un valor experimental.

### **G3-04**

En este tipo de mezcla se procedió aumentar el contenido de cemento y resulto ser muy aceptable en cuanto a su trabajabilidad, confección, y terminado. Los cilindros presentan una superficie homogénea con pequeños surcos. Su peso específico aumenta alrededor de  $2690 \text{ kg/m}^3$ .

#### **Resistencia a la compresión.**

Las resistencias aumentan a medida que va madurando el hormigón. Además los resultados tienen poca variación, siendo este aspecto muy importante al momento de aceptar un hormigón. La máxima resistencia alcanzada es de 50.2 MPa.

#### **Resistencia a tracción indirecta.**

El espécimen ensayado soporto una carga de 12124 kg, demostrando una cifra aceptable en su resistencia a tracción. Se comprueba además lo ocurrido en la mezcla anterior, en la cual se tenía dudas de que este tipo de hormigón alcance tales cifras.

#### **Módulo de elasticidad.**

El gráfico esfuerzo-deformación, demuestra un ligero ajuste de la probeta en las cargas iniciales, sin embargo a medida que se incrementa la carga al hormigón su deformación también lo hace de manera lineal. El módulo de elasticidad encontrado es muy alto si se compara con el hormigón convencional. Sin duda este valor llama la atención por su gran elasticidad.

#### **Relación de Poisson.**

El valor de la relación de Poisson aumenta comparado al diseño G3-03. Pese a ello el índice continúa siendo bajo en comparación al hormigón convencional.

**G3-05**

En la presente mezcla se decide reemplazar el 15% de la escoria por arena, brindando así mayor trabajabilidad y cohesión entre los materiales que componen la mezcla. Los especímenes de hormigón una vez fraguados presentan uniformidad en cuanto a su superficie y terminado, sin presentar segregación. Su peso volumétrico oscila entre los 2625 kg/m<sup>3</sup>.

**Resistencia a la compresión.**

La resistencia a compresión de los cilindros aumenta a medida que va incrementando su edad de elaboración. A siete días de ensayo la resistencia es relativamente baja y con alta variación; esto muy probable a la falta de varillado en uno de los cilindros. A los catorce días la resistencia incrementa el doble de la inicial. A los veintiocho días existe un ligero aumento, y finalmente a los cincuenta y seis días las probetas superan los 59 MPa.

**Resistencia a tracción indirecta.**

El espécimen ensayado soportó una carga de 12155 kg, presentando así, una cifra aceptable en cuanto a su resistencia a tracción. Se verifica la cifra alcanzada en la mezcla anterior. El valor obtenido es de 5.06 MPa, cifra similar a la mezcla anterior. Cabe indicar que los valores de tracción por flexión (MR) han sido obtenidos gracias a la ecuación de Neville. El valor conseguido es bueno, si consideramos que para una carretera de tráfico liviano se aceptan valores menores, sin embargo se requiere realizar múltiples ensayos para esta aplicabilidad.

**Módulo de elasticidad.**

La curva esfuerzo-deformación, presenta un ligero acomodamiento ante las primeras cargas, sin embargo pasado los 0.05 mm de deformación el hormigón presenta un comportamiento elástico lineal. El módulo de elasticidad determinado es alto comparado con el hormigón convencional, pero muy similar a la mezcla anterior.



### **Relación de Poisson.**

La relación de Poisson continúa siendo baja en comparación al hormigón convencional, y disminuye ligeramente frente a la mezcla G3-04. Se ha considerado que el valor hallado se debe también a la temperatura y los materiales propios del hormigón.



## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES

Después de superar un sin número de obstáculos y desafíos, así como también de disfrutar de alegrías y triunfos durante la realización de la presente tesis, tengo la convicción de haber cumplido con los objetivos propuestos, los cuales radican en incorporar la escoria de acero en la elaboración de hormigones y evaluar sus prestaciones físicas, químicas y mecánicas.

Es importante recordar que en el presente estudio se ha realizado la caracterización física, química y mineralógica de la escoria, además se ha explicado el proceso de elaboración de hormigones con escoria de acero, y asimismo se ha conocido las características del hormigón endurecido a través de diferentes ensayos.

Por último, esta tesis presenta las conclusiones de cada una de las prestaciones estudiadas, seguido de conclusiones en la elaboración de hormigones, los posibles usos de este tipo de hormigón, los méritos académicos alcanzados, los beneficios del uso de la escoria y las propuestas para futuras investigaciones.

#### 5.1 Prestaciones físicas

##### Análisis físico

El grano de escoria siderúrgica es alrededor de 1.15 veces más pesado que un árido natural, motivo por el cual los hormigones con escoria de acero presentan mayor densidad en comparación con los tradicionales.

La capacidad de absorción y porosidad de la escoria de acero es alta si comparamos con un árido natural, esto debido a los poros internos y externos que tiene el agregado como tal.



La escoria de acero, en calidad de agregado grueso posee un coeficiente de desgaste poco resistente a la abrasión según los límites del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN); sin embargo, según el Ministerio de Transportes y Obras Públicas (MTO), el árido es aceptable como agregado grueso en la confección de hormigones, pues, el máximo establecido es del 50%.

Debido a la textura cavernosa y áspera de la escoria siderúrgica, se necesita más cantidad de mortero en la elaboración del hormigón, aumentando así la adherencia en la zona de contacto mortero-agregado, produciéndose un mayor efecto mecánico entre ambos.

Para el diseño de hormigones convencionales de alta resistencia y hormigones con escoria de acería, se utilizaron áridos gruesos de tamaño máximo nominal 3/8", siendo estos los de menor tamaño posible en su clasificación como agregado grueso y con los de mayor superficie de contacto mortero-agregado grueso. Por lo que en el presente estudio se verificó que para obtener alta resistencia se necesitan agregados compatibles en términos de rigidez y resistencia con la pasta de cemento, más que su dureza o resistencia propia.

Asimismo se concluye que la escoria de acero en calidad de agregado grueso, puede emplearse en la confección de hormigones de alta resistencia.

## 5.2 Prestaciones químicas

### Análisis químico:

El análisis químico realizado a la escoria siderúrgica no reporta la presencia de azufre, sulfatos, cloruros y sulfuros que generalmente son sustancias nocivas para el hormigón y/o refuerzo, ni tampoco exhibe sustancias dañinas para la salud y medio ambiente tales como cobre, zinc, cadmio, mercurio, plomo, arsénico, entre otros. Motivo por el cual, se concluye que este material, en calidad de agregado para hormigones, puede ser utilizado como tal, de manera segura y responsable.



La escoria siderúrgica en sus distintas presentaciones, exhibe mayor cantidad de calcio, seguido por el hierro y el silicio. Por su parte, los hormigones con escoria de acero presentan mayor cantidad de silicio, seguido de calcio y hierro; el aumento del silicio, comparado con el del agregado en sí, es gracias a que los hormigones son confeccionados con arena silíceo y arena de río, ricos de este mineral.

Debido a la presencia mayoritaria del óxido de calcio llamado también "cal" en las muestras tomadas de la escoria, se han considerado posibles aplicaciones de este compuesto, como por ejemplo, puede utilizarse en la industria de la construcción, para la elaboración de prefabricados de cal: hormigón celular o aireado y ladrillos sílice-calcáreos e incluso pueden aplicarse para la estabilización de suelos.

Por otro lado, la presencia de cal libre ( $\text{CaO}$ ) y el óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) en la escoria pueden causar expansiones en el hormigón, debido a que reaccionan fuertemente con el agua generando los respectivos hidróxidos; este efecto está fuera del alcance del presente estudio, quedando como tema de investigación futura.

### **Análisis mineralógico:**

La escoria de acero contiene minerales favorables para su agregación como material en la construcción; por un lado, la magnetita es un mineral que por sus propiedades puede emplearse para sustituir al árido natural en la elaboración de hormigones pesados, así también su composición pétreo permite absorber ondas de rayos X, pretendida de manera especial en obras donde se exija una protección radiológica.

Por otra parte, el porcentaje considerable de gypsum o yeso en la escoria, puede ser aprovechado en los procesos de producción del cemento Portland para retardar el fraguado, o también para actuar como pasta en enlucidos o pasta de agarre en juntas, quedando lo anterior, como tema de investigación.



### 5.3 Prestaciones mecánicas

Las propiedades mecánicas del hormigón con escoria de acero han permitido describir la forma en que este soporta fuerzas externas, las mismas que se han valorado con exactitud mediante los ensayos mecánicos que a continuación se detallan:

En base a los ensayos realizados en los hormigones convencionales de alta resistencia, se obtuvo que la mezcla sin microsilica brindar mayor resistencia a un costo menor en nuestro medio, por lo que se consideró la misma para diseñar la viga arco reforzada con FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) para el concurso internacional organizado por el *American Concrete Institute (ACI)*.

Los hormigones fabricados con escoria poseen resistencias entre 30 – 60 MPa, siendo estos poco menores en comparación con los hormigones convencionales de alta resistencia, pese a que se diseñó con la misma relación agua/cemento. Sin embargo, los hormigones obtenidos con escoria de acero no dejan de ser catalogados como hormigones de alta resistencia porque sus esfuerzos superan los 50 MPa.

La alta resistencia que tienen estos tipos de hormigones con escoria de acero puede deberse principalmente a la excelente unión entre la pasta y la superficie cavernosa de la escoria. Además, puesto que se incrementó el material cementante, se deberá tener control en el incremento de calor de hidratación y la contracción por secado para evitar un potencial agrietamiento en elementos estructurales sujetos al manejo de este tipo de hormigón.

Las fallas más frecuentes de los cilindros ensayados es la aparición de conos en ambos extremos con fisuras verticales menores a 2.5 mm, así como conos bien formados en uno de los extremos, fisuras verticales que recorren la superficie del espécimen.



Se comprobó que la resistencia aumenta con la velocidad de carga de la prensa, con la edad del hormigón y con la temperatura de conservación de las probetas.

El ensayo de tensión indirecta en los hormigones con escoria de acero, ofreció una idea aproximada de la elasticidad y tenacidad del material, siendo los valores de tensión indirecta (T) y la tracción por flexión (MR) superiores a los hormigones convencionales, motivo por el cual se concluye que el material se puede emplear como árido en la construcción de pavimentos.

Los hormigones presentaron resistencias a flexo-tracción muy semejantes, pese a ver sido diseñados con diferentes dosificaciones, no dejando margen a una interpretación de los datos.

La resistencia a compresión de los hormigones con escoria de acero, siempre es mayor o igual que su resistencia a tracción.

En cuanto al comportamiento elástico del hormigón con escoria siderúrgica, su capacidad de recobrar su estado original, tras haber experimentado un esfuerzo introducen cambios significativos comparados a hormigones convencionales. Motivo por lo que se concluye que este material es altamente elástico.

Por su parte, el comportamiento del hormigón con escoria de acero, en un elemento estructural sujeto a tracción y compresión, ha sido satisfactorio, debido a que alcanzó cargas máximas de roturas similares y mayores a los elementos del mismo tipo confeccionados con áridos naturales.

Adicionalmente, la adherencia entre el hormigón con escoria de acero y su refuerzo longitudinal de FRP, es muy semejante a la combinación hormigón convencional y FRP, manifestándose, en ambas, las mismas fallas y/o rupturas después de haberse realizado el ensayo mencionado.



## 5.4 Elaboración de HEA

En lo que respecta a la elaboración de hormigones se concluye que los materiales empleados en la mezcla de hormigón cumplen con las normativas ecuatorianas requeridas para su elaboración, motivo por el cual pueden ser empleados como materiales de construcción en cualquier obra ingenieril.

La cantidad de agua agregada en la fabricación de hormigones con escoria de acero, es mayor al de un hormigón convencional de alta resistencias, esto debido al alto porcentaje de absorción y peso específico que posee la escoria siderúrgica con respecto al árido natural utilizado, motivo por el cual este cambio afecta directamente a la resistencia de los primeros hormigones mencionados.

Durante la realización de las primeras mezclas de hormigón con escoria, se notó una alta segregación, debido probablemente a la falta de material fino (arena-cemento) y la alta absorción y textura superficial que posee la escoria siderúrgica, razón por la que se optó por aumentar el árido fino, con el afán de aumentar la cohesión entre los materiales de las mezclas subsiguientes.

La escoria de acero, en calidad de agregado para hormigones, se comporta de manera similar al ripio, esto en cuanto a la trabajabilidad y manejo del mismo, una vez que fue ajustado la dosificación de la mezcla.

El asentamiento producido en las diferentes mezclas de hormigones con escoria presentó alta docilidad variando su valor de 15 a 20 mm; motivo suficiente para que este concreto sea usado en secciones excesivamente armadas, o en casos donde la distancia entre la planta de hormigón y la obra sea considerable.

## 5.5 Posibles usos del hormigón con escoria de acero

Los campos de aplicación propicias podrían ser en estructuras y aplicaciones donde el peso propio actúe de manera beneficiosa como presas de gravedad.



Para estructuras que requieran edades muy tempranas de servicio, como por ejemplo túneles, sin embargo el empleo de este hormigón en pavimentos rígidos puede dar problemas por falta de resistencia a desgaste por abrasión.

Para construir superestructuras de puentes de mucha luz y para mejorar la durabilidad de sus elementos.

Para satisfacer necesidades específicas de ciertas aplicaciones especiales como durabilidad, módulo de elasticidad y resistencia a flexión. Entre algunas de las muchas aplicaciones se cuentan parqueaderos, pisos industriales de tráfico pesado, cimentaciones marinas, entre otros.

Para reducir la sección efectiva de las columnas en edificaciones donde se requiera incrementar el espacio disponible.

Los hormigones pesados podrían emplearse en anclajes de puentes colgantes, como bunkers de cobertura de materiales radioactivos o para almacenar materiales explosivos.

## **5.6 Beneficios del uso de la escoria**

La escoria de acero podrá ser incorporada como agregado grueso en la mezcla de hormigón, permitiendo en forma indirecta la conservación de recursos naturales usados tradicionalmente para la elaboración de hormigones de esta clase.

Además, se ha contribuido con una posible solución al problema que en la actualidad cuentan las empresas siderúrgicas, tras demostrar que se puede reducir, reciclar y reutilizar la escoria de acería.

Debido a que la escoria siderúrgica posee una propiedad ligante por la presencia de cal, se estima que la creación de una tonelada de escoria (durante la producción de 3.5 ton de metal fundido) ahorra entre 3 y 5 GJ de energía si se compara con la producción del cemento, debido a que evita la cocción de 1000 kg de calcárea, que tiene el potencial de generar entre 900 y 1200 kg dióxido de carbono. “Como



información se tiene la siguiente igualdad:  $41,855 \text{ GJ} = 11,628 \text{ MWh} = 1\,000 \text{ m}^3 \text{ de gas} = 7,33 \text{ barriles de petróleo}$ , como lo afirma Emi, T; Seetharaman.” (2000).

## 5.7 Méritos académicos alcanzados

En febrero del año 2013, el presente estudio de hormigones con escoria de acero me permitió ser parte de un equipo de estudiantes, pertenecientes a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca, en el Primer Concurso Nacional Hormigones de Alta Resistencia, organizado por el Instituto Ecuatoriano del Cemento y de Hormigón (INECYC) en Quito cuya temática fue obtener el mayor índice resistencia/costo de propuestas de mezclas de hormigón. Al final del concurso se obtuvo el primer lugar, acontecimiento que me permitió representar a la Universidad ecuatoriana y al país en la competencia internacional denominada FRP Composites Competition patrocinado por American Concrete Institute (ACI), el mismo que se desarrolló el 14 de abril del presente año en Minneapolis – EE.UU.

En este evento académico equipos procedentes de destacadas universidades internacionales de EE.UU, Canadá, México, Centroamérica y Sudamérica concursaron presentando una viga especial de hormigón de alta resistencia reforzada con barras o mallas de los denominados FRP, la cual debía cumplir una serie de restricciones impuestas por la entidad organizadora del concurso, como peso, dimensiones y elementos de reforzamiento. Ganaba el equipo que obtuviera el mayor índice resistencia/costo (*Load to Cost Category*) y el menor error de predicción de cargas (*Predictions Category*). Manifiesto que se obtuvo el primer lugar en ambas categorías con índices records, además de convertirnos en la única Universidad y país que en su primera participación haya alcanzado ambos premios al mismo tiempo, desde que inició este concurso.

En anexos se adjunta los resultados de las competencias mencionadas.



## 5.8 Investigaciones futuras

Siendo el hormigón, el material de construcción más usado en el mundo, está sujeto a múltiples estudios e investigaciones, por tal motivo sería interesante estudiar la reacción álcali-árido del hormigón con escoria de acero.

Además, se podría estudiar el ataque de sulfatos y efectos del agua de mar en este tipo de hormigones.

Quedan pendientes futuros ensayos tales como el de permeabilidad, contenido de aire y la incorporación de microsílica en la mezcla de hormigones con escoria de acero.

Finalmente esta y las futuras investigaciones permitirán desarrollar proyectos alternativos especialmente enfocados al diseño de concretos de alta resistencias con escoria de acería, los mismos que tendrían incidencia favorable en el reciclaje y en la reutilización de productos industriales que hoy son desechados.



## BIBLIOGRAFÍA

AKVERDIN, I. et al. *“Propiedades físicas de los sistemas fundidos CaO – SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – MgO – CaF<sub>2</sub>.”* Ed; Metalurgia Moscú, 1987.

AMARAL, Luciana. *Hormigones con escorias de horno eléctrico: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental.* Tesis de Escoria de Acero. Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Escuela de Ingeniería, 1999. 265h

ANDRÉS, C. *“La minimización de residuos industriales, un reto de futuro”.* Ingeniería Química. Junio (336). 101-107. España, 1997.

BAISANOV, S, D. *“Peculiaridades del diagrama de fusibilidad de los cortes cuasibinarios del sistema MnO-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. Teoría y práctica de la metalurgia del manganeso.”* Academia de Ciencias de la URSS. 1990.

BERRIDI, Lokin. *Análisis de la influencia de residuos metalúrgicos como áridos en las propiedades del hormigón.*

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/5634/4/03.pdf> Barcelona (2008).

BURGOS, J.” *Procesos metalúrgicos durante la soldadura por fusión. Recopilación y traducción.”* UCLV ,1992.

CASTELLANO, G. et al. *“Consideraciones sobre el coeficiente de transferencia. Rev. Construcción de Maquinaria”.* Núm. 2. 1994.

CECCATO, D.M.<sup>I</sup>; MASUERO, A.B.<sup>I</sup>; MORAES, C.A.M.<sup>II</sup>; VILELA, A.C.F. *Materia (Rio de Janeiro). Reciclaje de escoria granulada de fundición (EGF) como sustitución de parte del cemento en hormigón* [en línea]. Abril 2009, vol.14 no.1. [Fecha de consulta: 16 Marzo 2013.] Disponible en:

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762009000100008](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762009000100008).

CENDOYA, P. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. Efecto en la resistencia de las escorias de fundación de cobre como agregado en el comportamiento resistente*



*del hormigón*. [en línea]. Septiembre 2009, vol. 17 N° 1. [Fecha consultada: 14 Marzo 2013], pp. 85-94. Disponible en:

[http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052009000100009&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052009000100009&script=sci_arttext).

CICUTTI, C. et al. *“Aplicación de herramientas termodinámicas y cinéticas en el proceso de elaboración de aceros”*. 2<sup>do</sup> Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales ABM. Sao Paulo, 1997.

CRUZ A, QUINTANA R, PERDOMO L, GÓMEZ C.R, DÍAZ E, *“Desarrollo de un fundente con el uso de escorias de soldadura ricas en manganeso”*. *Revista Centro Azúcar* 1,2004.

CRUZ, A. et al; *“Fundente para el recargue obtenido a partir de la recuperación de escorias de proceso SAW.”* Memorias de METANICA, 2000, La Habana, Julio del 2000.

GARCÍA R, *“Diagnóstico de problemas ambientales en la Empresa Siderúrgica Antillana de Acero.”* Memorias del Evento 5ta Convención Metánica, 2000.

GARCÍA, R, RODRÍGUEZ, M., SUÁREZ, L., ALONSO, A. *“Producciones de aleaciones fundidas”*, 2003.

JIMÉNEZ O. L., HERNÁNDEZ A., GONZÁLEZ J, *“Planta piloto para la producción de cemento con escoria”* Memorias del Evento 5ta, Convención Metánica, 2000.

KOBLECOVSKY, M. *“Captura de conocimiento de una PYME industrial y construcción de modelos de simulación de costos de producción a partir del mismo”*. Tesinas de Belgrado. Abril 2005.

LÓPEZ, F.A; LÓPEZ, A.; BALCÁZAR N. *“Propiedades físico químicas y mineralógicas de las escorias EAD y AOD”*. *Revista Afinidad Tomo LIII*, N0 461: 39-46, 1996

OLIVERA, F. A. et al. *“Tensión superficial, viscosidad y densidad de algunas escorias CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>”*. *Revista Metalurgia* No 35(2) del 1999.



ONORIN O. P. et al. "*Propiedades fisicoquímicas de las escorias de alto horno con contenido elevado de sílice.*" Izvestia (Chernaya Metalurguía) No8 del 1986.

PNUMA – ONUDI. "*Manual de Auditoria y Reducción de Emisiones y Residuos Industriales*", Informe Técnico N° 7, Naciones Unidas, New York (1994).

ROAD RESEARCH, Design of concrete mixes, D.S.I.R., Road Note No 4 ( Londres, H. M. S. O., 1950).

RODRÍGUEZ L. A., JEREZ R., CRUZ A., PERDOMO L. "*Estudio del potencial hidráulico de escorias de cubilote con dos activadores alcalinos*". Revista Centro Azúcar NO 4/2004 .

SERRANO P. E., SUWARDJO W., GARCÍA L., ARAGÓN B., ZARAGOZA R., FIGUEREDO O. L. "*Tratamiento y utilización integral de las escorias siderúrgicas.*" Memorias del Evento 5ta Convención Metánica 2000.

STEVEN,H.,KOSMATKA., PARANESE, William. "*Diseño de y Control de Mezclas de Concreto PCA.*" Mexico, Portland Cement Association.2004.pág.452

S. WALKER, D.L. BLOEM y R.D. GYNOR, Relationship of concrete strength to maximum size of aggregate, Proc. Highw. Res. Bd., 38, pag. 367 – 79.

SHUMMAN, Walter; 2004, "*Minerales del Mundo*", Barcelona – España, Omega TITOV, N. D., STEPANOV, Yu. A. "*Tecnología del proceso de fundición*". Ed. MIR, Moscú, 1981. 385 pág.

U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Ground Granulated Blast – Furnace Slag. [En línea]. Actualizada: 7 Abril, 2011.

[Fecha consultada: 20 Marzo 2013]. Disponible en:  
<http://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/materialsgrp/ggbfs.htm>



VIEITEZ, D.G, et al. "Cuantificación de residuos sólidos procedentes de industrias del metal en el País Vasco". *Revista Metal* 27(3): 170-176, 1991.

ZARAGOZA R., NASUR A., CONCEPCIÓN A. A., TÁPANES D. "*Utilización de las escorias del horno de arco eléctrico como árido en la fabricación de bloques para la construcción*" Memorias del Evento 5ta Convención Metánica 2000.

## ANEXOS

### RESULTADOS DEL CONCURSO NACIONAL DE ALTA RESISTENCIA

**Resultados**

Resistencia promedio – 2 (desviación standart)/ costo final mezcla  
**FC-2σ/costo**

	Equipo	Resistencia/Costo
1° lugar	Cuenca 2	0,53
2° lugar	USFQ1	0,42
	USFQ 2	0,41
	Hormifortus (ESPOL)	0,26
	Iron concrete	0,26
	Cuenca 1	0,20
	UTPL	0,17
	Centralinos 1 (UCE)	0,16
	Centralinos 2 (UCE)	0,08

**Datos extras**

Equipo	Hormifortus	Centralinos 1	Cuenca 1	USFQ1	Centralinos 2	Cuenca 2	Iron Concrete	USFQ 2	UTPL
Relación agua-cemento	0,29	0,30	0,31	0,29	0,22	0,31	0,28	0,27	0,28
Cemento/m³	520	453	605	620	564	558	510	626	664



RESULTADOS DEL CONCURSO INTERNACIONAL FRP COMPOSITES COMPETITION

2013 FRP Composite Results

University	Beam Mark	Cost	Predicted Ultimate Load kN	Predicted 3.5 mm Load kN	Measured Ultimate Load kN	Measured 3.5 mm Load kN	Load to Cost Ratio	Load to Cost Finish	Pred %	Prediction Finish
Instituto Tecnologico de Durango	Tecno01	\$11.66	10.4807	1.9537	14.586	9.078	1.25	21	53.31	9
Lawrence Technological	LTU1	\$5.59	15.6	8.3	11.896	7.284	2.13	14	22.54	3
Louisiana at Lafayette	X	\$5.47	46	18.9057	38.47	16.155	7.03	DQ - over weight	18.30	DQ - over weight
Minnesota State	MNSU1	\$5.76	66.72	20.72	23.815	12.700	4.13	9	121.65	20
Missouri Univ. of S & T #1	MST1	\$5.22	60	6	23.186	11.632	4.44	8	103.60	15
Missouri Univ. of S & T #2	MST2	\$3.17	52	4	33.535	12.608	10.58	3	61.67	11
New Jersey Institute of Technology	NJIT1	\$9.36	17.68	12	14.2	6.632	1.52	17	52.73	8
North Carolina State Red	NCSU RED	\$15.49	2.4	1.12	1.159	0.545	0.07	26	106.29	16
North Carolina State White	NCSU White	\$17.48	4.3	1.82	7.216	1.271	0.41	24	41.79	7
Polytechnic University of Puerto Rico	PUPR1	\$2.96	28	1.5	12.08	5.780	4.08	10	102.92	14
Polytechnic University of Puerto Rico	PUPR2	\$3.57	40	1.8	4.797	0.716	1.34	20	442.61	25
Purdue University	BLRUP	\$12.34	30	2	17.948	10.152	1.45	18	73.72	12
SIUE	SIUE	\$5.29	20.02	15.57	18.344	6.157	3.47	12	81.02	13
Texas State University San Marcos	TSUSM1	\$7.60	67	67	24.3	10.927	3.20	13	344.44	24
Universidad Autonoma de Nuevo Leon #1	UANL1	\$4.59	16.668	11.596	Broken in shipment					
Universidad Autonoma de Nuevo Leon #2	UANL2	\$4.36	7.55	9.81	7.168	6.702	1.64	16	25.85	6
Universidad de Cuenca #1	UC1	\$3.38	48.21	14.98	45.383	14.624	13.43	1	4.33	1
Universidad de Cuenca #2	UC2	\$3.38	53.15	15.21	39.838	13.120	11.79	2 - no prize awarded per limit of 1 prize per school	24.67	4
Universidad San Francisco #1	USFQ1	\$2.91	47	22	27.229	8.971	9.36	5	108.93	17
Universidad San Francisco #2	USFQ2	\$2.91	47	22	22.165	8.255	7.62	6	139.27	21
Universite de Sherbrooke #1	USher1	\$3.99	44	21.6	26.045	14.046	6.53	7	61.36	10
Universite de Sherbrooke #2	USher2	\$6.38	7.34	3.11	9.089	2.356	1.42	19	25.61	5
University of Florida #1	UF1	\$5.74	25	19.5	3.498	1.801	0.61	23	798.67	26
University of Florida #2	UF2	\$5.74	16.83	13.08	1.693	0.847	0.29	25	1168.82	27
University of Houston	UH	\$4.58	25	8	Broken in shipment					
University of Minnesota Duluth #1	UMD1	\$2.93	44.5	35	32.839	7.300	11.21	2	207.47	23
University of Minnesota Duluth #2	UMD2	\$3.58	54	28.9	34.257	11.098	9.57	4	109.02	18
University of Missouri Columbia	UMC	\$7.01	62.933	27.5199	25.117	15.591	3.58	11	113.54	19
University of Utah	UU	\$2.50	3.6	1.99	4.151	1.833	1.66	15	10.92	2
University of Windsor	UW1	\$11.26	40	15	11.6	7.109	1.03	22	177.91	22
AVERAGES		\$6.21			19.994	8.321	4.70		169.77	



**ESTUDIO QUIMICO DE LA ESCORIA SIDERURGICA Y HORMIGONES**



ACERIAS NACIONALES DEL ECUADOR S.A.  
Av. Dr. Clemente Huerta (S/N) Vía a las Esclusas  
Guayaquil - Ecuador

**Certificate of Verification**

XL2-75119

Reading No 121  
Mode Mining  
Time 2013-04-09 09:49  
Duration 33.23  
Units %  
Sigma Value 2  
Sequence Final  
Flags ModCF CaO  
SAMPLE Polvo  
LOCATION  
INSPECTOR  
MISC  
NOTE

	%	±	Error
Ba	0.142	±	0.015
Sb	< LOD	:	0.007
Sn	< LOD	:	0.012
Cd	< LOD	:	0.003
Pd	< LOD	:	0.002
Ag	< LOD	:	0.008
Bal	30.811	±	1.681
Mo	< LOD	:	0.033
Nb	0.015	±	0.005
Zr	0.023	±	0.003
Sr	0.037	±	0.002
Rb	0.002	±	0.001
Bi	< LOD	:	0.002
As	< LOD	:	0.002
Se	< LOD	:	0.002
Pb	< LOD	:	0.003
W	0.027	±	0.015
Zn	0.040	±	0.005
Cu	0.017	±	0.006
Ni	< LOD	:	0.020
Co	< LOD	:	0.063
Fe	14.514	±	0.428
Mn	2.199	±	0.086
Cr	0.491	±	0.037
V	< LOD	:	0.074
Ti	< LOD	:	0.145
Ca	17.302	±	0.496
K	0.816	±	0.090
Al	9.566	±	1.371
P	< LOD	:	0.141
Si	17.161	±	0.484
Cl	0.044	±	0.018
S	0.199	±	0.047
Mg	6.457	±	3.768
CaO	24.223	±	0.000
SiO2	36.725	±	0.000
MgO	10.718	±	0.000
Fe2O3	20.755	±	0.000



Dr. Gco. Omar Mite  
Supervisor Laboratorio Químico  
ANDEC S.A.

WORLDWIDE CONFIDENTIALITY NOTE: Dissemination, distribution or copying of this e-mail or the information herein by anyone other than the intended recipient, or an employee or agent of a system responsible for delivering the message to the intended recipient, is prohibited. If you are not the intended recipient, please inform the sender and delete all copies.



ACERÍAS NACIONALES DEL ECUADOR S.A.  
Av. Dr. Clemente Huerta (S/N) Vía a las Esclusas  
Guayaquil - Ecuador

Certificate of Verification

XL2-75119

Reading No 120  
Mode Mining  
Time 2013-04-09 09:39  
Duration 36.27  
Units %  
Sigma Value 2  
Sequence Final  
Flags ModCF CaO  
SAMPLE Árido - Fino  
LOCATION  
INSPECTOR  
MISC  
NOTE

	%	±	Error
Ba	0.106	±	0.014
Sb	< LOD	:	0.006
Sn	< LOD	:	0.008
Cd	< LOD	:	0.002
Pd	< LOD	:	0.002
Ag	< LOD	:	0.007
Bal	40.456	±	1.446
Mo	< LOD	:	0.040
Nb	0.025	±	0.005
Zr	0.016	±	0.002
Sr	0.029	±	0.002
Rb	< LOD	:	0.002
Bi	< LOD	:	0.003
As	< LOD	:	0.002
Se	< LOD	:	0.002
Pb	0.008	±	0.002
W	0.032	±	0.015
Zn	0.007	±	0.003
Cu	0.008	±	0.005
Ni	< LOD	:	0.013
Co	< LOD	:	0.067
Fe	18.648	±	0.528
Mn	2.788	±	0.098
Cr	0.812	±	0.044
V	< LOD	:	0.063
Ti	0.176	±	0.082
Ca	19.317	±	0.514
K	0.219	±	0.077
Al	5.120	±	1.052
P	0.130	±	0.078
Si	7.281	±	0.340
Cl	0.030	±	0.016
S	0.177	±	0.045
Mg	< LOD	:	5.887
CaO	27.044	±	0.000
SiO2	15.581	±	0.000
MgO	7.574	±	0.000
Fe2O3	26.666	±	0.000



Dr. Gco. Omar Mite  
Supervisor Laboratorio Químico  
ANDEC S.A.

WORLDWIDE CONFIDENTIALITY NOTE: Dissemination, distribution or copying of this e-mail or the information herein by anyone other than the intended recipient, or an employee or agent of a system responsible for delivering the message to the intended recipient, is prohibited. If you are not the intended recipient, please inform the sender and delete all copies.



ACERIAS NACIONALES DEL ECUADOR S.A.  
Av. Dr. Clemente Huerta (S/N) Via a las Esclusas  
Guayaquil - Ecuador

Certificate of Verification

XL2-75119

Reading No 119  
Mode Mining  
Time 2013-04-09 09:32  
Duration 37.93  
Units %  
Sigma Value 2  
Sequence Final  
Flags ModCF CaO  
SAMPLE Árido - Grueso  
LOCATION  
INSPECTOR  
MISC  
NOTE

	%	±	Error
Ba	0.111	±	0.015
Sb	< LOD	:	0.007
Sn	< LOD	:	0.011
Cd	< LOD	:	0.003
Pd	< LOD	:	0.002
Ag	< LOD	:	0.011
Bal	30.529	±	1.745
Mo	< LOD	:	0.052
Nb	0.011	±	0.005
Zr	0.017	±	0.003
Sr	0.029	±	0.002
Rb	< LOD	:	0.002
Bi	< LOD	:	0.003
As	< LOD	:	0.002
Se	< LOD	:	0.002
Pb	< LOD	:	0.003
W	0.033	±	0.017
Zn	0.005	±	0.003
Cu	0.015	±	0.006
Ni	< LOD	:	0.019
Co	< LOD	:	0.080
Fe	23.673	±	0.748
Mn	3.397	±	0.126
Cr	0.934	±	0.050
V	< LOD	:	0.066
Ti	0.162	±	0.083
Ca	26.438	±	0.697
K	0.320	±	0.085
Al	6.227	±	1.432
P	< LOD	:	0.129
Si	7.641	±	0.361
Cl	0.044	±	0.018
S	0.253	±	0.053
Mg	< LOD	:	10.663
CaO	37.013	±	0.000
SiO2	16.351	±	0.000
MgO	0.000	±	0.000
Fe2O3	33.853	±	0.000



*Dr. Geo. Omar Mila*  
Supervisor Laboratorio Químico  
**ANDEC S.A.**

WORLDWIDE CONFIDENTIALITY NOTE: Dissemination, distribution or copying of this e-mail or the information herein by anyone other than the intended recipient, or an employee or agent of a system responsible for delivering the message to the intended recipient, is prohibited. If you are not the intended recipient, please inform the sender and delete all copies.



ACERÍAS NACIONALES DEL ECUADOR S.A.  
Av. Dr. Clemente Huerta (S/N) Vía a las Esclusas  
Guayaquil - Ecuador

Certificate of Verification

XL2-75119

Reading No 112  
Mode Mining  
Time 2013-04-08 15:42  
Duration 33.51  
Units %  
Sigma Value 2  
Sequence Final  
Flags ModCF CaO  
SAMPLE ensayo 1 muestra con escoria  
LOCATION  
INSPECTOR  
MISC  
NOTE

	%	±	Error
Ba	0.081	±	0.013
Sb	0.005	±	0.003
Sn	< LOD	:	0.008
Cd	< LOD	:	0.003
Pd	< LOD	:	0.002
Ag	< LOD	:	0.009
Bal	35.187	±	1.323
Mo	< LOD	:	0.041
Nb	0.014	±	0.005
Zr	0.017	±	0.002
Sr	0.024	±	0.002
Rb	< LOD	:	0.002
Bi	< LOD	:	0.002
As	< LOD	:	0.002
Se	< LOD	:	0.002
Pb	< LOD	:	0.004
W	0.030	±	0.014
Zn	0.007	±	0.003
Cu	0.013	±	0.005
Ni	< LOD	:	0.012
Co	< LOD	:	0.093
Fe	12.548	±	0.389
Mn	1.590	±	0.071
Cr	0.406	±	0.036
V	< LOD	:	0.077
Ti	< LOD	:	0.139
Ca	22.462	±	0.616
K	0.335	±	0.083
Al	3.778	±	0.962
P	< LOD	:	0.258
Si	22.732	±	0.536
Cl	0.034	±	0.018
S	0.680	±	0.070
Mg	< LOD	:	7.071
CaO	31.447	±	0.000
SiO2	48.646	±	0.000
MgO	0.000	±	0.000
Fe2O3	17.944	±	0.000

  
Dr. Geo. Omar Mite  
Supervisor Laboratorio Químico  
ANDEC S.A.

WORLDWIDE CONFIDENTIALITY NOTE: Dissemination, distribution or copying of this e-mail or the information herein by anyone other than the intended recipient, or an employee or agent of a system responsible for delivering the message to the intended recipient, is prohibited. If you are not the intended recipient, please inform the sender and delete all copies.



ACERIAS NACIONALES DEL ECUADOR S.A.  
Av. Dr. Clemente Huerta (S/N) Via a las Esclusas  
Guayaquil - Ecuador

Certificate of Verification

XL2-75119

Reading No 113  
Mode Mining  
Time 2013-04-08 15:58  
Duration 34.94  
Units %  
Sigma Value 2  
Sequence Final  
Flags ModCF CaO  
SAMPLE concreto normal  
LOCATION  
INSPECTOR  
MISC  
NOTE

	%	±	Error
Ba	0.040	±	0.009
Sb	< LOD	:	0.005
Sn	< LOD	:	0.005
Cd	< LOD	:	0.002
Pd	< LOD	:	0.002
Ag	< LOD	:	0.005
Bal	41.971	±	0.999
Mo	< LOD	:	0.020
Nb	0.014	±	0.003
Zr	0.015	±	0.002
Sr	0.027	±	0.001
Rb	0.003	±	0.001
Bi	< LOD	:	0.002
As	< LOD	:	0.002
Se	< LOD	:	0.002
Pb	< LOD	:	0.002
W	< LOD	:	0.013
Zn	0.006	±	0.002
Cu	< LOD	:	0.005
Ni	< LOD	:	0.008
Co	< LOD	:	0.030
Fe	3.021	±	0.088
Mn	0.082	±	0.014
Cr	< LOD	:	0.023
V	< LOD	:	0.075
Ti	< LOD	:	0.144
Ca	13.678	±	0.388
K	1.032	±	0.084
Al	7.558	±	0.934
P	< LOD	:	0.201
Si	29.086	±	0.569
Cl	< LOD	:	0.022
S	0.638	±	0.061
Mg	< LOD	:	3.410
CaO	19.149	±	0.000
SiO2	62.245	±	0.000
MgO	4.632	±	0.000
Fe2O3	4.321	±	0.000



*Dr. Gco. Omar Mite*  
Supervisor Laboratorio Químico  
**ANDEC S.A.**

WORLDWIDE CONFIDENTIALITY NOTE: Dissemination, distribution or copying of this e-mail or the information herein by anyone other than the intended recipient, or an employee or agent of a system responsible for delivering the message to the intended recipient, is prohibited. If you are not the intended recipient, please inform the sender and delete all copies.



ACERÍAS NACIONALES DEL ECUADOR S.A.  
 Av. Dr. Clemente Huerta (S/N) Vía a las Esclusas  
 Guayaquil - Ecuador

Certificate of Verification

XL2-75119

Reading No 122  
 Mode Mining  
 Time 2013-04-09 11:03  
 Duration 38.14  
 Units %  
 Sigma Value 2  
 Sequence Final  
 Flags ModCF CaO  
 SAMPLE G2 - 10  
 LOCATION  
 INSPECTOR  
 MISC  
 NOTE

	%	±	Error
Ba	0.036	±	0.008
Sb	0.004	±	0.002
Sn	< LOD	:	0.005
Cd	< LOD	:	0.002
Pd	< LOD	:	0.002
Ag	< LOD	:	0.004
Bal	47.395	±	0.838
Mo	< LOD	:	0.018
Nb	0.010	±	0.003
Zr	0.015	±	0.002
Sr	0.025	±	0.001
Rb	0.002	±	0.001
Bi	< LOD	:	0.002
As	< LOD	:	0.002
Se	< LOD	:	0.002
Pb	< LOD	:	0.002
W	0.024	±	0.009
Zn	0.006	±	0.002
Cu	< LOD	:	0.005
Ni	< LOD	:	0.008
Co	< LOD	:	0.037
Fe	3.088	±	0.085
Mn	0.070	±	0.013
Cr	< LOD	:	0.021
V	< LOD	:	0.071
Ti	< LOD	:	0.167
Ca	12.730	±	0.349
K	1.096	±	0.077
Al	6.412	±	0.782
P	< LOD	:	0.150
Si	28.449	±	0.540
Cl	< LOD	:	0.020
S	0.519	±	0.053
Mg	< LOD	:	3.138
CaO	17.822	±	0.000
SiO2	60.881	±	0.000
MgO	0.000	±	0.000
Fe2O3	4.416	±	0.000



Dr. Gco. Omar Mite  
 Supervisor Laboratorio Químico.  
 ANDEC S.A.

WORLDWIDE CONFIDENTIALITY NOTE: Dissemination, distribution or copying of this e-mail or the information herein by anyone other than the intended recipient, or an employee or agent of a system responsible for delivering the message to the intended recipient, is prohibited. If you are not the intended recipient, please inform the sender and delete all copies.

## ANALISIS FISICO-QUIMICO Y MINERALOGICO DEL AGUA

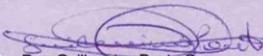
  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**LABORATORIO DE SANITARIA**

RESULTADOS DE ANALISIS FISICO-QUIMICO Y BACTERIOLOGICO DE AGUA			
Muestra procedencia:	Cuenca.- Azuay.		
Tipo de fuente:	Agua potable de la red de distribución		
Condiciones climatológicas:			
Fecha de Análisis:	25 de Junio del 2013		
Análisis solicitado por:	Sr. Santiago Vélez G.		

PARAMETRO	VALOR	UNIDAD	OBSERVACIONES
TEMPERATURA		°C.	in situ
TURBIEDAD	0,5	NTU, FTU	
COLOR APARENTE	14,0	UC, Pt Co	
COLOR REAL	10,0	UC, Pt Co	
CONDUCTIVIDAD	110,0	microsiemens/ cm	
SOLIDOS DISUELTOS TOTALES	72,6	mg/l	por cálculo
PH	7,20		
ALCALINIDAD TOTAL	58,0	mg/l, CaCO3	
ALCALINIDAD F.	0,0	mg/l, CaCO3	
ACIDEZ		mg/l, CaCO3	
CO2		mg/l	
DUREZA TOTAL	50,0	mg/l, CaCO3	
Ca <sup>++</sup>	2,0	mg/l	
Mg <sup>++</sup>	10,9	mg/l	por cálculo
Na <sup>+</sup>		mg/l	
K <sup>+</sup>		mg/l	
HIERRO TOTAL	0,02	mg/l	
MANGANESO	0,01	mg/l	
ZINC	0,01	mg/l	
COBRE	0,0	mg/l	
ALUMINIO	0,090	mg/l	
NIQUEL		mg/l	
CROMO		mg/l	
FLUORURO	0,02	mg/l	
SILICIO	2,41	mg/l	
P.ORTOFOSFATOS DISUELTOS.	0,02	mg/l	como Fósforo
CLORUROS	3,5	mg/l	
SULFATOS	8,0	mg/l	
N. AMONIACAL	0,03	mg/l	como Nitrógeno
N. NTIRITOS	0,0	ug/l	como Nitrógeno
N. NITRATOS	0,03	mg/l	como Nitrógeno
TANINOS Y LIGNINAS	0,0	mg/l	
AEROBIOS MESOFILOS	0,0	colonias/ml	a 35°C. 24 H
COLIFORMES TOTALES	0,0	NMP /100 ML	a 37°C.
E COLI	0,0	NMP /100 ML	a 37°C.
MOHOS Y LEVADURAS	0,0	colonias/ml	a 35°C. - 48H
PSEUDOMONAS	0,0	U.F.C./100 ML	a 35°C. - 24H

Responsable:

  
Dra. Guillermina Pauta C.  
QUIMICO-ANALISTA

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
LABORATORIO DE  
INGENIERIA SANITARIA

Cuenca, Patrimonio Cultural de la Humanidad Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999  
Telefs: (593 - 07) 405 1000, ext. (2300, 2301), 405 1115, Fax: (593-07) 405 1117 Casilla N°. 01.01.168  
Cuenca - Ecuador

  
UNIVERSIDAD DE CUENCA  
desde 1867

# ESTUDIO MINERALOGICO DE LA ESCORIA SIDERURGICA

GUAPAN

DEPARTAMENTO DE CALIDAD

REPORTE DE ANALISIS DE MINERAL DE HIERRO POR DIFRACTOMETRIA

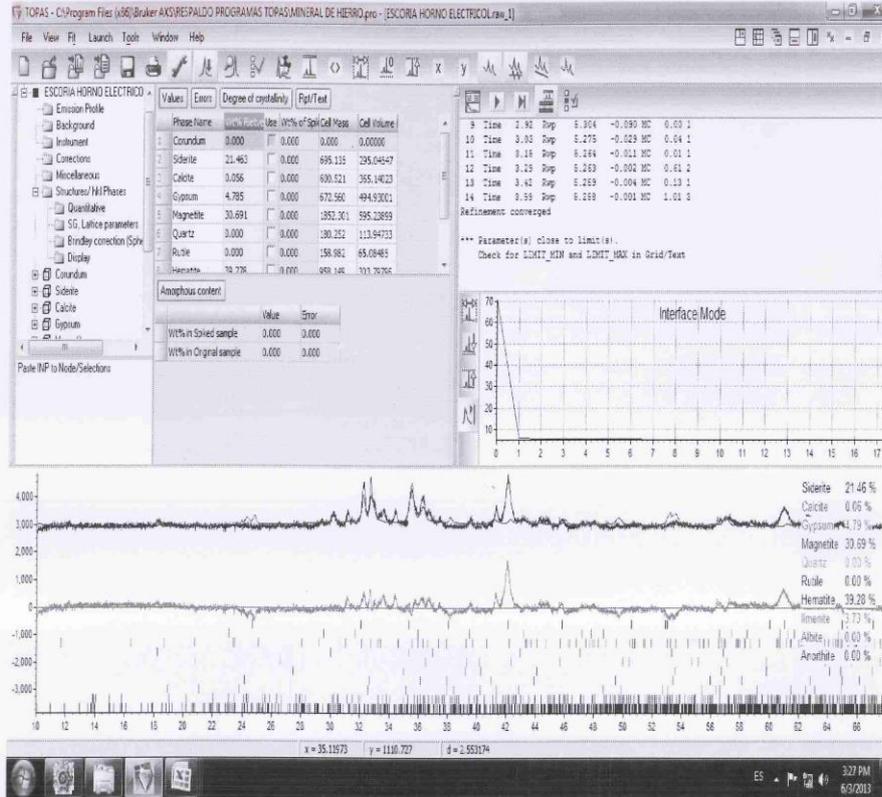
2013

Phase Name	Corundum	Siderite	Calcite	Gypsum	Magnetite	Quartz	Rutile	Hematite	Ilmenite	Albite	Anorthite	F E N O S
ESCORIA DE HORNO ELECTRICO	0	21.463	0.056	4.785	30.69	0	0	39.278	3.726	0	0.001	60.42
												0.00



COMPANIA INDUSTRIAS GUAPAN  
Patricia Ruiz V.  
JEFE DPTO. CONTROL DE CALIDAD

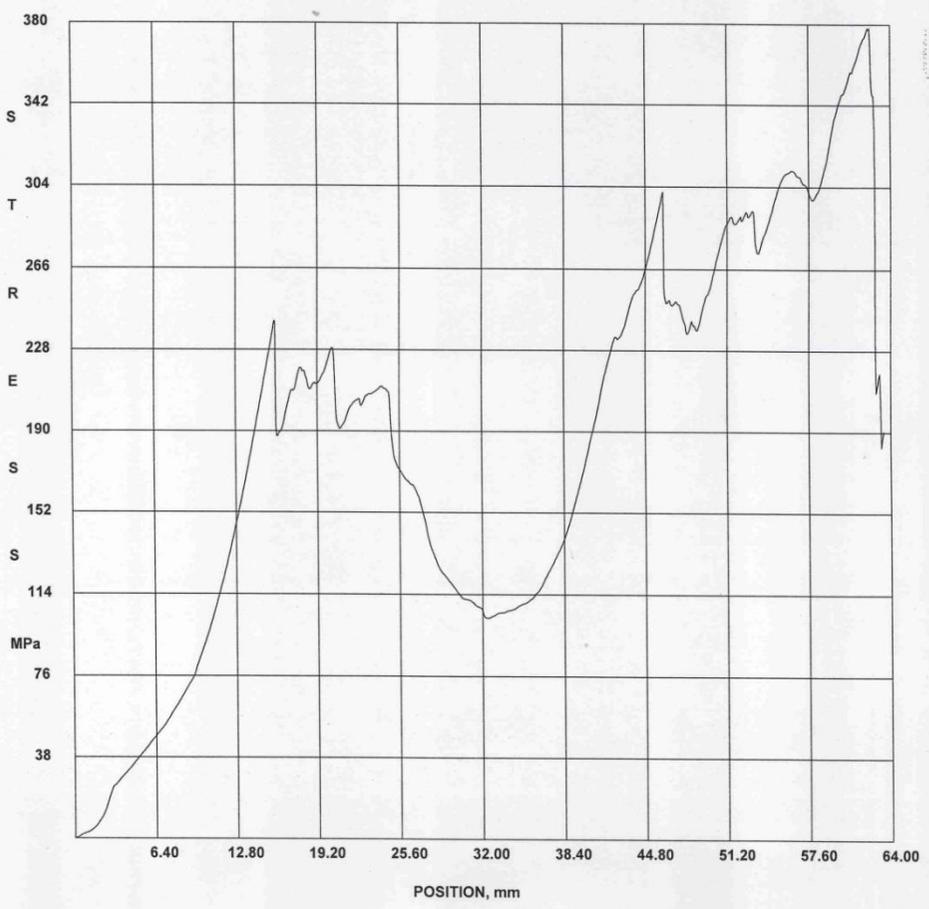




COMPANIA INDUSTRIAS GUAYASAMIN  
*Ing. Patricio Ruiz V.*  
JEFE DPTO. CONTROL DE CALIDAD



# ENSAYO MECÁNICO DE VARILLAS FRP



ANDEC S.A.  
CONTROL DE CALIDAD  
NORMA DE REF. INEN-2167  
LAB. FIS. MEC.(ANDEC)

## ENSAYOS MECANICOS - 2013

Lot Number  
Operator CESAR VILLAVICENCIO  
Test Setting ANDEC POSITION  
TINIUS MEX  
Test Date 05/08/2013

Muestra No: PULTRALLH M16  
Area, mm<sup>2</sup>: 201.0619  
Turno: Administrador  
RESISTENCIA, MPa: 378  
FLUENCIA, MPa: 27.9  
TE, %: 34.4  
Pedido ò:  
Observaciones:  
Ultimate, N: 76100  
Ultimate, N/mm<sup>2</sup>: 378  
OS @ .2, lbf: 1259  
OS @ .2, MPa: 27.9  
TE, %: 34.4

Ing. Julio Morales V.  
Supervisor Control de Calidad  
ANDEC S.A.

May 8, 2013 11:41:13 AM  
SN: 302224-R0 V7.02.10

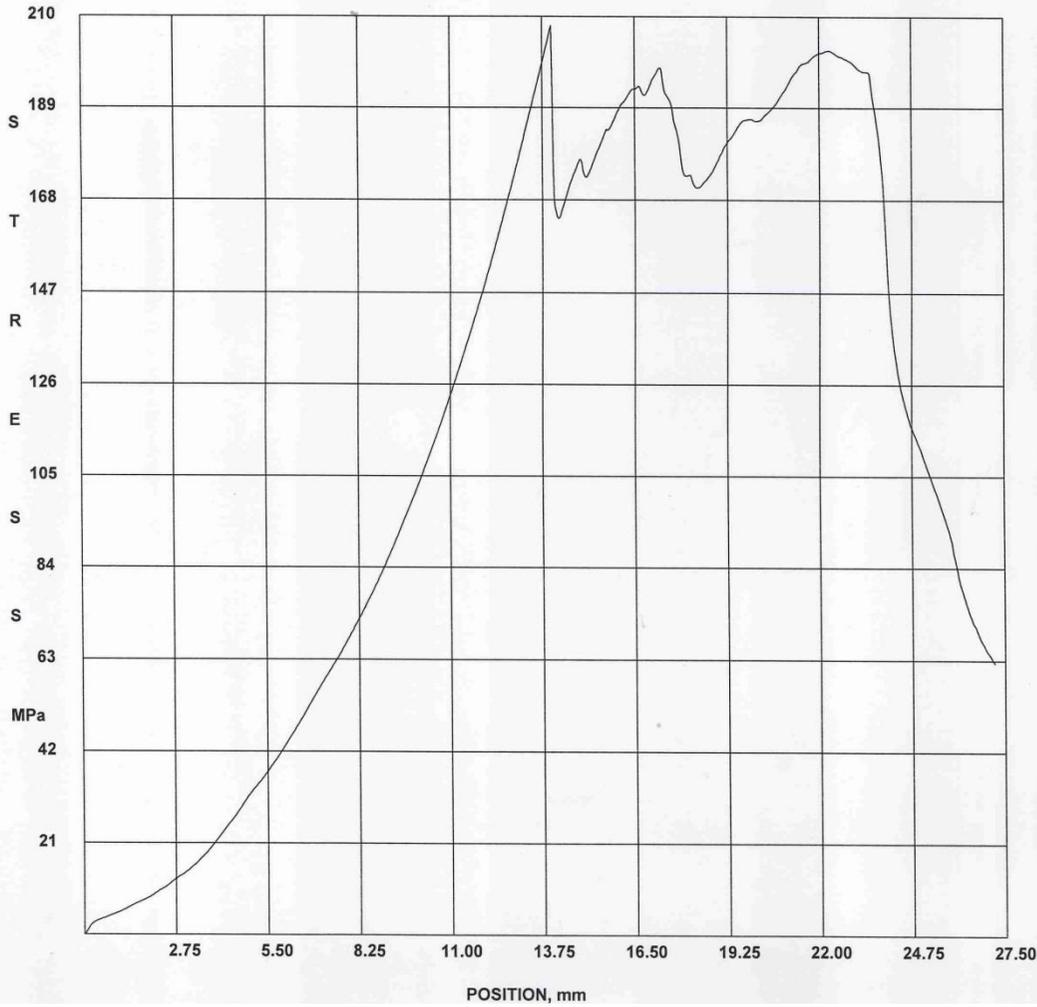


ANDEC S.A.  
CONTROL DE CALIDAD  
NORMA DE REF. INEN-2167  
LAB. FIS. MEC.(ANDEC)

**ENSAYOS MECANICOS - 2013**

Lot Number	
Operator	CESAR
Test Setting	ANDEC POSITION
Test Date	TINIUS MEX 05/08/2013
Muestra No:	PULTRALLH M16-2
Area, mm <sup>2</sup> :	201.0619
Turno:	Administrador
RESISTENCIA, MPa:	208
FLUENCIA, MPa:	4.16
TE, %:	15.09
Pedido ò:	
Observaciones:	
Ultimate, N:	41800
Ultimate, N/mm <sup>2</sup> :	208
OS @ .2, lbf:	188
OS @ .2, MPa:	4.16
TE, %:	15.09

 **Ing. Julio Morales V.**  
Supervisor Control de Calidad  
ANDEC S.A.



May 8, 2013 11:50:12 AM  
SA: 20224 B0 17 00 10

