



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

**EVALUACIÓN DE ESCORIA SIDERÚRGICA COMO
AGREGADO GRUESO PARA CONCRETO**

Luis Gerardo Flores

Asesorado por el Ing. Sergio Vinicio Quiñónez Guzmán

Guatemala, mayo de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE ESCORIA SIDERÚRGICA COMO
AGREGADO GRUESO PARA CONCRETO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS GERARDO FLORES

ASESORADO POR EL ING. SERGIO VINICIO QUIÑÓNEZ GUZMÁN

AL CONFERIRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
EXAMINADOR	Ing. Oscar Humberto Montes Estrada
EXAMINADOR	Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**EVALUACIÓN DE ESCORIA SIDERÚRGICA COMO
AGREGADO GRUESO PARA CONCRETO**

Tema que fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 24 de septiembre de 2008.



Luis Gerardo Flores

Guatemala, 01 de Agosto de 2012

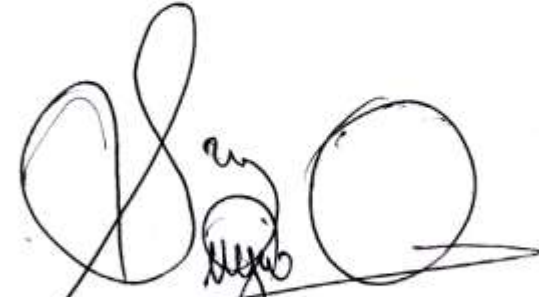
Ing. Guillermo Melini
COORDINADOR DEL ÁREA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Escuela de Ingeniería Civil

Estimado Ing. Melini:

Me place hacer de su conocimiento que he revisado el Trabajo de Graduación titulado **EVALUACIÓN DE ESCORIA SIDERÚRGICA COMO AGREGADO GRUESO PARA CONCRETO**, presentada por el estudiante **Luis Gerardo Flores**.

Después de haber revisado los detalles del contenido en conjunto con el estudiante y en base a la aprobación del protocolo, manifiesto a usted que dicho estudio cumple con los objetivos propuestos para su elaboración, por lo que recomiendo que el presente Trabajo de Graduación sea aceptado.

Sin otro particular, me suscribo de usted.



~~Ing. Sergio Vinicio Quiñonez Guzmán~~
• Colegiado 6394

Sergio V. Quiñonez
INGENIERO CIVIL
COL. 6394



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

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



Guatemala,
20 de noviembre de 2012

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

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **EVALUACIÓN DE ESCORIA SIDERÚRGICA COMO AGREGADO GRUESO PARA CONCRETO**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Luis Gerardo Flores, quien contó con la asesoría del Ing. Sergio Vinicio Quiñónez Guzmán.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Cíviles



FACULTAD DE INGENIERÍA
ÁREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

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



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Sergio Vinicio Quiñónes Guzmán y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Luis Gerardo Flores, titulado **EVALUACIÓN DE ESCORIA SIDERÚRGICA COMO AGREGADO GRUESO PARA CONCRETO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, mayo de 2013.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 363.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería en Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE ESCORIA SIDERÚRGICA COMO AGREGADO GRUESO PARA CONCRETO**, presentado por el estudiante universitario: **Luis Gerardo Flores**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy ~~Olympo~~ Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 29 de mayo de 2013

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Mi madre	Aura Violeta Flores Leiva, por despertar en mí el deseo de superación, por su amor, esfuerzo y sacrificio que me impulsaron todos los días para llegar aquí.
Mis hermanas	Sandra, Edna, Claudia y Andrea Flores, por su amor y apoyo.
Mis tíos	María Teresa y Osberto Rolando Flores Leiva, por sus consejos y apoyo incondicional.
Mis padrinos	Aurora de Hanser y Leonel Merida, por su cariño y guía en la vida.
Mis primos	Omar Flores, Glendy Flores, Otman Flores, Nancy Flores y especialmente a Norma Cruz por su incalculable apoyo.
Mis sobrinos Inés	Paola Morales, Ricardo Morales, Erwin Morales, Morales, Luis Rodas, Daniela Chavac, Gabriela Chavac y Pamela Chavac, por su cariño.
Mi familia	En especial a las familias, Corado Cruz, Flores Leal, Chavac Vega y Morales Rodas.

María del Rosario

Por su amor, apoyo y por ser parte de mí vida.

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Mí amada, gloriosa y tricentenaria casa de estudio.
en especial a la Facultad de Ingeniería, por
brindarme el conocimiento.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios y Virgen María	Por haberme creado, preservado y cuidado hasta hoy, para poder alcanzar esta meta.
Ing. Sergio Vinicio Quiñónez Guzmán	Por el asesoramiento del presente trabajo de graduación.
Ing. Kenneth Molina	Por su colaboración y conocimiento compartido para la realización de este trabajo.
Las empresas SIDEGUA y PRECON	Por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo de graduación.
Casas tipo canadiense	Una familia que me brindó el apoyo durante mi carrera universitaria.
Mis amigos	Por brindarme su amistad y apoyo, que siempre tendré presente por todos los momentos compartidos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. ESCORIA SIDERÚRGICA DE HORNO.....	1
1.1. Definición.....	1
1.2. Tipos de escorias.....	1
1.3. Propiedades.....	3
1.4. Usos.....	3
1.5. Desventajas.....	4
1.6. Experiencia nacional.....	5
1.7. Experiencia internacional.....	5
2. AGREGADOS PARA CONCRETO.....	7
2.1. Clasificación de los agregados.....	7
2.2. Granulometría.....	8
2.2.1. Módulo de finura.....	9
2.2.2. Tamaño máximo nominal y tamaño máximo.....	11
2.2.3. Importancia de la clasificación del agregado.....	12
2.3. Gravedad específica (densidad relativa).....	13
2.4. Absorción y humedad superficial.....	13
2.5. La densidad de masa.....	14

2.5.1.	Factores que afectan la densidad de masa.....	14
2.6.	Forma de la partícula, angularidad y textura de la superficie.....	15
2.7.	Abrasión y resistencia al impacto.....	16
2.8.	Sanidad de los agregados	16
2.9.	Estabilidad química.....	18
2.10.	Sustancias nocivas en el agregado.....	19
3.	PROPIEDADES DEL CONCRETO INFLUENCIADAS POR LOS AGREGADOS.....	21
3.1.	Propiedades del concreto endurecido influenciadas por los agregados.....	22
3.1.1.	Durabilidad.....	23
3.1.1.1.	Congelación y descongelación.....	23
3.1.1.2.	Humedecimiento y secado.....	24
3.1.1.3.	Calentamiento y enfriamiento.....	24
3.1.1.4.	Resistencia a la abrasión.....	25
3.1.1.5.	Agregados reactivos.....	27
3.1.1.6.	Resistencia al fuego.....	30
3.1.1.7.	Resistencia al ácido.....	31
3.1.1.8.	Otras reacciones.....	32
3.1.2.	Resistencia.....	32
3.1.3.	Contracción.....	35
3.1.4.	Propiedades térmicas.....	36
3.1.5.	Peso unitario.....	37
3.1.6.	Módulo de elasticidad.....	38
3.1.7.	Propiedades de la superficie de fricción.....	38
3.1.8.	Economía.....	40

3.2.	Propiedades del concreto fresco influenciadas por los agregados.....	40
3.2.1.	Propiedades de mezcla	41
3.2.2.	Trabajabilidad	44
3.2.3.	Bombeabilidad	45
3.2.4.	Exudación.....	47
3.2.5.	Características de acabado.....	47
3.2.6.	Contenido de aire.....	48
3.2.7.	Gradación de los agregados.....	49
3.2.8.	Forma y textura superficial de los agregados.....	50
3.2.9.	Relación pasta-agregados.....	51
3.2.10.	Relación arena-agregados.....	51
3.2.11.	Aditivos.....	52
3.2.12.	Segregación.....	52
3.2.13.	Temperatura.....	53
3.2.14.	Otras propiedades.....	54
3.3.	Factores externos que afectan el concreto fresco.....	55
3.3.1.	Condiciones de clima.....	55
3.3.2.	Condiciones de producción y colocación.....	56
4.	CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON ESCORIA.....	57
4.1.	Diseño y dosificación de mezclas de concreto.....	57
4.2.	Descripción de la dosificación según ACI - 211.1	58
4.3.	Mezclas propuestas.....	61
4.4.	Propiedades de las mezclas frescas	63
4.5.	Resultados a la compresión.....	66
4.6.	Gráficas.....	70

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
CONCLUSIONES.....	85
RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	89
ANEXOS.....	95

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Juego de tamices	10
2.	Formación de grietas causadas por la expansión anormal debido a la reacción álcali-agregados	20
3.	Gráfica de slump	64
4.	Gráfica de temperatura	64
5.	Gráfica de peso unitario	65
6.	Gráfica de porcentaje de aire	65
7.	Gráfica de cantidad de agua	66
8.	Gráfica comparativa No. 1	68
9.	Gráfica comparativa No. 2	68
10.	Gráfica comparativa No. 3	69
11.	Gráfica comparativa No. 4	69
12.	Gráfica No. 1	70
13.	Gráfica No. 2	71
14.	Gráfica No. 3	72
15.	Gráfica No. 4	73
16.	Gráfica No. 5	74
17.	Gráfica No. 6	75
18.	Gráfica No. 7	76
19.	Gráfica No. 8	77
20.	Gráfica No. 9	78
21.	Gráfica No. 10	79
22.	Gráfica No. 11	80

TABLAS

I.	Rango de las propiedades físicas de peso normal para áridos empleados en el concreto	11
II.	Proporciones de diseño de mezcla por peso (kg.) para 1m. ³	61
III.	Proporciones de diseño de mezcla por peso (kg.) para prueba ...	62
IV.	Propiedades de las mezclas frescas	63
V.	Resultados a la compresión	67
VI.	Cuadro No. 1	70
VII.	Cuadro No. 2	71
VIII.	Cuadro No. 3	72
IX.	Cuadro No. 4	73
X.	Cuadro No. 5	74
XI.	Cuadro No. 6	75
XII.	Cuadro No. 7	76
XIII.	Cuadro No. 8	77
XIV.	Cuadro No. 9	78
XV.	Cuadro No. 10	79
XVI.	Cuadro No. 11	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
etc.	Etcétera
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
kg/m³	Kilogramo por metro cúbico
lb/p³	Libras por pie cúbico
m.	Metro
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
μm.	Micrómetro
mm.	Milímetro
MF	Módulo de finura
No.	Número
MgO	Óxido de magnesio
p.	Pie
%	Porcentaje
pulg.	Pulgadas
RAC	Reacción álcali-carbonato
RAS	Reacción álcali-sílice
a/c	Relación agua-cemento
Slump	Revenimiento
Ton.	Tonelada
Ton./m.³	Tonelada por metro cúbico

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials. (Asociación Americana de los Funcionarios de las Autopistas Estatales y del Transporte de Estados Unidos).
ACI	American Concrete Institute. (Instituto Americano del Concreto).
Aditivo	Material, que no sea agua, agregado y cemento, usado como ingrediente del concreto y adicionado inmediatamente antes o durante el mezclado.
Agregado	Material mineral granular, tal como la arena natural, la arena manufacturada, la grava, la piedra triturada, la escoria granulada.
Agregado fino	Agregado que pasa por el tamiz 9.5mm. (3/8pulg.), pasa casi totalmente por el tamiz de 4.75mm. (4) y se retiene predominantemente en el tamiz de 75mm. (200).
Agregado grueso	Grava natural, piedra triturada o escoria, frecuentemente mayor que 5mm. (0.2pulg.) su tamaño normalmente varía entre 9.5mm. y 37.5mm. (3/8pulg. y 1 1/2pulg.).

Aire atrapado	(Aire ocluido) Vacío de aire no intencional, con forma irregular, en el concreto fresco o endurecido, con tamaños iguales o superiores a 1 mm.
ASTM	American Society for Testing and Materials. (Sociedad americana de ensayos y materiales).
Cohesión	Atracción mutua a través de la cual los elementos de una sustancia se mantienen unidos.
Compactación	Proceso de inducción de una disposición más cercana de las partículas sólidas en el concreto, a través de la reducción de los vacíos, frecuentemente logrado con la vibración, el varillado, los golpes o la combinación de estos métodos también llamada de consolidación.
Dosificación	Proceso de medición, por peso o por volumen, de los ingredientes y su introducción en la mezcladora para una cantidad de concreto.
EE.UU.	Estados Unidos.
Exudación	Flujo del agua de la mezcla del concreto fresco, causado por el asentamiento de los materiales sólidos de la mezcla. También conocido como (sangrado).

Fraguado	Espacio de tiempo en el cual el concreto fresco pierde su plasticidad y se endurece gradualmente.
Granulometría	(Graduación) Distribución del tamaño de las partículas de agregado, que se determina por la separación a través de tamices normalizados.
Hidratación	Es la reacción química entre el cemento hidráulico y el agua, a través de la cual se forman nuevos compuestos que confieren resistencia al concreto.
Inclusión de aire	Introducción intencional de aire en la forma de minúsculas burbujas desconectadas (normalmente menores de 1mm.) durante el mezclado del concreto para mejorar las características deseables, tales como cohesión, trabajabilidad y durabilidad.
Mortero	Mezcla de materiales cementantes, agregado fino y agua, que puede contener aditivos y normalmente se usa para unir unidades de mampostería.
Permeabilidad	Propiedad que permite el paso de fluidos y gases.
Plasticidad	Aquella propiedad del concreto fresco que determina su trabajabilidad, resistencia a deformación o facilidad de moldeo.

Relación agua-cemento	Relación entre la masa de agua y la masa de cemento en el concreto. Denotado generalmente como (a/c).
Rendimiento	Volumen por amasada de concreto que se expresa en metros cúbicos.
Revenimiento	Medida de consistencia del concreto fresco, igual al asentamiento inmediato de una probeta moldeada con un cono normalizado, (asentamiento de cono de Abrams).
Segregación	Separación de los componentes del concreto fresco (agregados y mortero), resultado en una mezcla sin uniformidad.
Trabajabilidad	Es la propiedad del concreto fresco que determina sus características de trabajo, es decir, la facilidad para su mezclado, colocación, moldeo y acabado.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la evaluación de la escoria de horno de arco eléctrico de la empresa Siderúrgica de Guatemala (Sidegua), con el objetivo de poder aprovechar sus propiedades de la misma forma que en otros países del mundo al conocer y determinar tanto sus características físicas y químicas como sus propiedades mecánicas. Se utilizó como agregado en el concreto diseñando mezclas en las cuales se sustituyó este material por los agregados, que son usados normalmente para la fabricación de concreto. Logrando así obtener concretos con pesos específicos y resistencias más altas, además de una economía en su fabricación y logrando conformar un concreto ecológico por ser este un subproducto.

Se realizaron varios diseños de mezcla, manteniendo la relación agua-cemento y sustituyendo la escoria por los agregados gruesos y finos en diversas proporciones, con los análisis obtenidos se logró crear un diseño de mezcla donde se sustituyó por escoria en un 100% el agregado grueso y en un 40% el agregado fino, en donde la demanda de agua se redujo, debido a que la absorción de la escoria es menor obteniendo resultados muy favorables que confirman el aprovechamiento de este recurso en la implementación de nuevos diseños de mezclas de concreto según las propiedades, necesidades y requerimientos del constructor, así como de las obras que requieran concretos especiales.

La escoria de alto horno eléctrico no contiene metales ni compuestos orgánicos u otras sustancias nocivas restringidas en los agregados naturales,

es un agregado de alto peso específico y densidad de masa que presenta una alta resistencia a la abrasión, su textura es rugosa y vesicular, que reduce la absorción de agua en la mezcla y ayuda en las propiedades físico-mecánicas del concreto como la resistencia a la compresión y el peso unitario. En las mezclas utilizadas se logró determinar que si es factible utilizar la escoria, tomando en cuenta que hay que realizar un rediseño para obtener concretos que cumplan las propiedades requeridas para la construcción.

OBJETIVOS

General

Evaluar la escoria siderúrgica de horno de arco eléctrico como agregado grueso en una mezcla de concreto.

Específicos

1. Caracterizar la escoria de horno de arco eléctrico.
2. Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla de concreto utilizando la escoria siderúrgica como agregado.
3. Comparar las propiedades físico-mecánicas de mezclas de concreto con y sin escoria en diferentes proporciones.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala, de una gran cantidad de materiales que pueden utilizarse para la construcción se encuentra la escoria de horno de arco eléctrico; que es un material no metálico que surge de la separación de materias primas al realizar el proceso de fundir chatarra (desperdicios con partes metálicas), el cual contiene óxidos no ferrosos que por su menor densidad flotan sobre el arrabio (hierro líquido) permitiendo su separación.

La escoria siderúrgica ha sido utilizada en varios países del mundo desde hace muchos años, para conformar taludes, bases no estabilizadas de suelos, mezclas con asfalto y sellos, así como agregado en cementos para formar el concreto.

En este trabajo se describe la escoria siderúrgica, sus tipos, usos, ventajas, desventajas y la experiencia nacional e internacional; también se analiza sus características físicas, químicas y las propiedades mecánicas para su uso como agregado grueso y el efecto que crea en las características de la mezcla de concreto.

1. ESCORIA SIDERÚRGICA DE HORNO

La escoria es un subproducto de la fundición de minerales para purificar y extraer metales.

1.1. Definición

Es la combinación no metálica de sílice cristalina y otros materiales que se forman en un estado de fundición en la superficie del colado del hierro producido en un alto horno. Cuando la escoria fundida se vierte en pozos o bancos y se le permite que se enfríe y solidifique lentamente en condiciones atmosféricas, el resultado es escoria enfriada por aire.

1.2. Tipos de escorias

Existen dos (2) tipos de escoria:

- La escoria de altos hornos: se produce cuando se reducen los óxidos de hierro para convertirlos en arrabio líquido. Esta escoria es utilizada comúnmente en la fabricación del cemento y no tiene aplicación directa en obras de vialidad.
- La escoria de acería: es un subproducto del proceso siderúrgico en que el arrabio y/o la chatarra se refina para producir acero. Este material cuando está en estado sólido es un excelente agregado para la construcción de carreteras y vías férreas.

La escoria de alto horno expandida es el resultado de la rápida agitación con una cantidad controlada de agua, o la inyección con una cantidad controlada de agua, vapor, o agua comprimida con aire. Cuando la escoria fundida de repente se apaga en el agua, el resultado es escoria granulada. Sin embargo, cuando se enfría, la escoria puede ser triturada y cernida en una variedad de tamaños. Sólo la escoria de alto horno expandida o refrigerada por aire puede ser utilizada como agregado de concreto. La escoria granulada se muele hasta obtener un polvo fino y se utiliza como material cementante.

La espumación de la escoria está causada principalmente por la generación de burbujas de gas monóxido de carbono, dióxido de carbono, vapor de agua, dióxido de azufre, oxígeno e hidrógeno en el interior de la escoria, que se hace espumosa como si fuera agua con jabón. En un horno básico de oxígeno (HBO), además por la combustión del carbono del propio metal, y es un inconveniente del proceso; la escoria espumosa puede salirse violentamente, quitando metal del horno y creando un humo denso y marrón que puede causar problemas en el sistema de eliminación de humo o causar un problema de salud y seguridad. La espumación se puede controlar mediante la inyección de gas en la base del horno o introduciendo partículas finas de coque en la escoria.

Sin embargo, en un horno de arco eléctrico (HAE), la espumación de la escoria está causada por la combustión deliberada de partículas grandes de coque introducidas en la escoria. La espumación es vital para el funcionamiento de los (HAE) modernos, ya que la espuma envuelve a los arcos, protegiendo las paredes y el techo del horno del calor radiante de los arcos y transfiriendo una mayor cantidad del calor del arco a la fundición, mejorando así la eficiencia del horno. La espumación de la escoria también se

utiliza en la fundición del cobre, níquel, cromo y (experimentalmente) del hierro.

1.3. Propiedades

La escoria tiene muchos vacíos internos sin conexión, resultando en un agregado estructural de alto peso específico y densidad de masa. Debido a que los poros son burdos y no interconectados, los agregados de escorias tienen resistencia alta a la descongelación. El agregado de escoria no se ve perjudicado por los álcalis y no contiene arcilla, pizarra, sílices, compuestos orgánicos u otras sustancias nocivas generalmente restringidas en las especificaciones para los agregados naturales.

La escoria de alto horno triturada es más o menos cúbica en forma y tiene una textura rugosa. La Norma COGUANOR NTG 41007. Especificaciones Estándar para Agregados de Concreto, no especifica una abrasión requerida para escorias de horno enfriadas por aire, porque se ha determinado que la prueba no es significativa con respecto a esta. No obstante, especifica una mínima densidad de la masa compactada de 1120 kg/m^3 (70 lb/p^3).

Por otro lado la microtextura de la escoria de acería es vesicular, es decir que al no ser porosa no es absorbente lo cual permite secado rápido, reduce absorción y refuerza las propiedades mecánicas.

1.4. Usos

La escoria tiene muchos usos comerciales y raramente se desecha. A menudo se vuelve a procesar para separar algún otro metal que contenga. Los restos de esta recuperación se pueden utilizar como balasto para las líneas del

ferrocarril y como fertilizante. Se ha utilizado como material agregado para pavimentación y como una forma barata y duradera de fortalecer las paredes inclinadas de los rompeolas para frenar el movimiento de las mareas.

A menudo se utiliza escoria granular de alto horno en combinación con el mortero de cemento Portland como parte de una mezcla de cemento. Este tipo de escoria reacciona con el agua para producir propiedades cementosas. El mortero que contiene escoria granular de alto horno desarrolla una gran resistencia durante largo tiempo, ofreciendo una menor permeabilidad y mayor durabilidad. Como también se reduce la unidad de volumen de cemento Portland, el mortero es menos vulnerable a la reacción álcali-sílice y al ataque de sulfato.

Este agregado de escoria es parecido al granito y sus usos son similares a cualquier agregado, con la salvedad que no es recomendable su uso en ciertos hormigones debido al contenido de óxido de magnesio (MgO).

Debido a su graduación, limpieza, resistencia a la degradación y a los efectos ambientales se elaboran con ellas bases granulares para pavimentos que tienen un comportamiento ideal. Por su textura rugosa angular producen superficies de rodamiento antiderrapantes que mantienen esta característica con el tiempo, por lo cual son ampliamente utilizadas mundialmente en sellos y tratamientos superficiales.

1.5. Desventajas

Su alto valor de peso unitario tanto en estado suelto como compactado en una mezcla asfáltica puede incidir en un costo adicional en el transporte y en el valor de mezcla asfáltica por m³.

Algunos contratistas han manejado que -por ser subproducto del acero- ocasiona un desgaste más rápido de los elementos de trabajo (cuchillas de motoniveladora, tamices de planta, paletas del mezclador de planta, camisas de la caja de mezclado, etc.).

1.6. Experiencia nacional

En el país se han realizado trabajos de investigación sobre cementos mezclados con escorias tales como:

- Caracterización de la escoria de hornos de la planta Sidegua como puzolana artificial hecha por el Ing. Edgar Francisco Solórzano Jiménez, en 2003.
- Evaluación de morteros para albañilería y revestimientos elaborados a base de cementos mezclados con escorias de horno hecha por el Ing. Kenneth Alejandro Molina Escobar, trabajo de graduación en el que caracterizó cementos mezclados con escoria de hornos de arco eléctrico de Sidegua y los aplicó en morteros, en 2006.
- Evaluación de bloques huecos de mampostería fabricados con cementos mezclados con escoria de hornos trabajo de graduación del Ing. David Estuardo Álvarez Cruz, en el cual utilizó los cementos caracterizados por el Ing. Kenneth Alejandro Molina Escobar, en 2006.

1.7. Experiencia internacional

El uso de escorias en obras civiles es una práctica antigua. En el Reino Unido se ha utilizado en capas bases y pavimentos asfálticos. Las calles del

norte de Londres y áreas alrededor de Coventry y Birmingham han sido asfaltadas con escoria. En Estados Unidos se puede mencionar la pista de aterrizaje jumbo del aeropuerto internacional de Pittsburgh. En Brasil, la pavimentación de la ciudad de Mogi das Cruzes, Sao Paulo y la Br-381. En Chile, en carreteras que soportan el gran peso por ejes de camiones de la industria maderera, utilizando alrededor de 150,000 toneladas en los últimos años. En Venezuela se ha utilizado en bases granulares, mezclas asfálticas, recubrimientos de hombros y taludes en protección contra erosión.

Son también utilizadas frecuentemente en Australia, Japón, la India, La antigua Unión Soviética, México y otros países europeos. Además del uso en mezclas con asfalto, la escoria se usa extensamente como riego de sello en obras de tratamiento superficial en muchos países cuya lista sería larga de enumerar.

Su uso está contemplado en las especificaciones de construcción de vías de la mayoría de los países y en su manejo son aplicables los equipos de construcción normales que se utilizan convencionalmente para cualquier agregado.

2. AGREGADOS PARA CONCRETO

El concreto de cemento hidráulico es una pasta de cemento y agua, en la que las partículas de agregado están integradas. El agregado es un material granular tal como la arena, grava, piedra triturada, escoria de altos hornos, y agregados livianos que por lo general ocupa aproximadamente del 70 al 85% del volumen del concreto. Las propiedades de los agregados afectan significativamente la trabajabilidad del concreto plástico así como su durabilidad, resistencia, propiedades térmicas y la densidad del concreto endurecido.

2.1. Clasificación de los agregados

Los agregados pueden clasificarse generalmente como naturales o artificiales, ambos con respecto a la fuente y método de preparación. Las arenas y gravas naturales son el producto de la acción erosiva del viento o del agua, mientras que, los agregados manufacturados son producidos por trituración de piedra natural.

La trituración, cribado y el lavado pueden ser utilizados para procesar los agregados de los depósitos de arena y grava o canteras de piedra. Los agregados pueden ser producidos a partir de rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas, pero el tipo geológico, por sí solo no hace que un agregado sea adecuado o inadecuado para su uso en el concreto.

La aprobación de un agregado para su uso en concreto en un determinado trabajo o el cumplir una especificación en particular, debe

basarse en información específica obtenida de las pruebas utilizadas para medir la calidad del agregado o más importante aún, su registro de funcionamiento o ambos. Otras pruebas de desempeño pueden utilizarse para evaluar los agregados en el concreto. Una especificación típica de los agregados fino y grueso para el concreto se encuentra consensuado en la Norma COGUANOR NTG 41007.

Los agregados sintéticos pueden ser subproductos del proceso industrial, en el caso de la escoria de altos hornos o productos de procesos desarrollados para la fabricación de agregados con propiedades especiales, como en el caso de arcillas expandidas, esquisto o pizarra utilizados para agregados livianos. Algunos agregados livianos tales como piedra pómez o escoria volcánica también se producen de forma natural.

Otras clasificaciones de los agregados pueden estar basadas en su densidad (ASTM C33, C330, y C637), la composición mineralógica (ASTM C294) y forma de las partículas, pero éstas, así como lo anteriormente discutido, sirven principalmente como auxiliares en la descripción de un agregado.

2.2. Granulometría

La granulometría se refiere a la distribución de tamaños de partículas presentes en un agregado. La clasificación se determina de conformidad con la Norma ASTM C136 Análisis por tamices de los agregados finos y gruesos. Una muestra del agregado es sacudida a través de tamices con malla cuadrada, anidados uno encima del otro en orden de tamaño, con el tamiz de mayor abertura en la parte superior; el que tiene menor abertura en la parte inferior y debajo de estos un recipiente que recoge el material que pasa el

tamiz más fino (figura 1). Las medidas de tamiz comúnmente utilizadas para los agregados del concreto se detallan en la tabla 1 y varias propiedades físicas de agregados de peso normal, con valores de rango medio.

Los agregados gruesos y finos son generalmente tamizados por separado. La parte de un agregado que pasa el tamiz 4.75 mm. (4) y que en su mayoría queda retenido en el tamiz de 75 μm . (200) se conoce como agregado fino o arena y el agregado más grande se llama "agregado grueso". El agregado grueso puede estar disponible en varios grupos de diferentes tamaños, como 19 a 4.75 mm. (3/4 pulg. al 4) o 37.5 a 19 mm. (1-1/2 a 3/4 pulg.).

La Norma COGUANOR NTG 41007 Especificaciones estándar para los agregados del concreto. Enumera varios grupos de tamaño, empleando la designación de número en la recomendación de la práctica simplificada. El número y tamaño de tamices seleccionados para un análisis granulométrico depende del tamaño de las partículas presentes en la muestra y clasificación de los requisitos especificados.

2.2.1. Módulo de finura

Usando el resultado del análisis granulométrico, es a menudo computarizado un índice numérico llamado el módulo de finura (MF). El MF es la suma del total de porcentajes de grosores en aumento de una serie determinada de tamices, dividido por 100.

Los tamices especificados son 75.0, 37.5, 19.0, y 9.5 mm (3, 1.5, 3/4 y 3/8 pulgadas) y 4.75 mm., 2.36 mm., 1.18 mm, 600 μm , 300 μm , y 150 μm (No. 4, 8, 16, 30, 50 y 100). Tomando en cuenta que el límite menor de la serie

especificada de tamices es el de 150 μm (No. 100) y que el tamaño real de la aberturas en cada tamiz más grande es el doble del tamiz siguiente. A mayor grosor del agregado, mayor es el MF. Para el agregado fino utilizado en el concreto, el MF generalmente oscila desde 2.3 hasta 3.1 como se indica en la Norma COGUANOR NTG 41007, pero en algunos casos, las arenas finas se utilizan con un MF menos de 2.0 y en otros casos, una agregado fino más grueso con un MF mayor que 3.1.

Figura 1. **Juego de tamices**



Fuente: ACI E1-07.

Tabla I. **Rango de las propiedades físicas de peso normal para áridos empleados en el concreto**

Propiedades	Rangos típicos
Módulo de finura del agregado fino	2.0 a 3.3
Tamaño máximo nominal del agregado grueso	9.5 a 37.5 mm (3/8 a 1-1/2 pulg.)
Absorción	0.5 a 4%
Peso específico (densidad)	2.30 a 2.90
Secado a granel densidad del agregado grueso	1280 a 1920 kg/m ³ (80 a 120 lb/p ³)
Contenido de humedad de la superficie agregado grueso	0 a 2%
agregado fino	0 a 10%

Fuente: ACI E1-07.

2.2.2. Tamaño máximo nominal y tamaño máximo

El tercer factor que se deriva del análisis granulométrico es el tamaño máximo nominal que está definido como la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado sea el 15% o más.

En la práctica, lo que indica el tamaño máximo nominal, es el tamaño promedio de las partículas más grandes que hay dentro de la masa de agregado. Este factor define mejor el tamaño máximo nominal de las partículas más grandes de la masa de agregados en su fracción gruesa, mientras que el tamaño máximo sólo indica el tamaño de la partícula más grande que hay en la masa, la cual en algunos casos puede ser única.

El tamaño máximo del agregado es otro factor que se deriva del análisis granulométrico y está definido como la abertura del menor tamiz de la serie que permite el paso del 100% del material.

En la práctica, lo que indica el tamaño máximo de un agregado es el tamaño de la partícula más grande que hay dentro de la masa de agregados, el cual debe ser compatible con las dimensiones y especificaciones de la estructura.

2.2.3. Importancia de la clasificación del agregado

Hay varias razones para especificar ambos límites de la clasificación así como el tamaño máximo del agregado. Los agregados que contienen una suave curva granulométrica y ninguna deficiencia ni exceso de un tamaño en partículas, generalmente producen mezclas con menos vacíos entre las partículas. Debido a que el cemento tiene un costo más alto que el de los agregados y que el requerimiento de pasta de cemento para el concreto aumenta, el contenido de vacíos de los agregados combinados se incrementa, es conveniente mantener el contenido de vacíos lo más bajo posible.

Si no hay suficiente agregado fino para llenar los vacíos entre las partículas del agregado grueso, el espacio debe ser llenado con pasta de cemento. Tales mezclas con bajo contenido de arena tienden a ser ásperas y difíciles de darles acabado. Por otra parte, las combinaciones de agregado con cantidades excesivas de agregado fino o con arenas finas en exceso pueden producir concretos de alto costo debido a la mayor área superficial de las partículas más finas, que requiere de cemento adicional.

2.3. Gravedad específica (densidad relativa)

La gravedad específica de un agregado, es la masa del agregado en el aire dividido por la masa de un volumen igual de agua. Un agregado con una gravedad específica de 2.50 puede además ser dos y media veces tan pesado como el agua. Cada partícula de agregado está hecha de materia sólida y vacía que pueden o no contener agua. Debido a que la masa del agregado varía en su contenido de humedad, la gravedad específica se determina con un grado de humedad fija. Se definen cuatro condiciones de humedad para los agregados dependiendo de la cantidad de agua retenida en los poros o en la superficie de las partículas y se describen de la siguiente manera:

- Húmedo o mojado - agregado en el cual sus poros conectados a la superficie, se llenan con el agua.
- Secado de superficie saturada - agregado en el que los poros conectados a la superficie se rellenan con agua no así con el agua en la superficie.
- Secado al aire - agregado que tiene una superficie seca, pero contiene un poco de agua en los poros.
- Secado al horno - agregado que no contiene agua en los poros o en la superficie.

2.4. Absorción y humedad superficial

Agua de mezcla y relación agua-materiales cementantes. Los estados de humedad diferentes en los que un agregado puede existir han sido descritos con anterioridad. Dos de ellos, secado al horno y secado de superficie

saturada, se utilizan como base para el cálculo de la gravedad específica. Los agregados que se apilan en el campo rara vez los encontraremos en estos estados. Por lo general, estos acarrean alguna humedad en la superficie que se convierte en parte del agua del mezclado. Los agregados gruesos recién lavados contienen agua libre, pero debido a que se secan rápidamente, están algunas veces en un estado de secado al aire cuando son utilizados y absorben una parte del agua de la mezcla.

2.5. La densidad de masa

La densidad de masa de un agregado, es la masa del agregado dividida por el volumen de las partículas y los vacíos entre las partículas.

2.5.1. Factores que afectan la densidad de masa

La densidad de la masa depende del contenido de humedad de los agregados. Para agregados gruesos el incremento en el contenido de humedad aumenta la densidad de masa; para agregados finos aumentar el contenido de humedad además de la condición de secado de la superficie saturada puede disminuir la densidad de la masa.

Esto se debe a que las películas delgadas de agua sobre las partículas de arena ocasionan que se peguen de manera tal que no son tan fácilmente compactadas. El aumento en el volumen resultante disminuye la densidad de masa. Este fenómeno, denominado agrupamiento, es de poca importancia si los agregados de una mezcla de concreto se dosifican por masa, pero hay que tener en cuenta si la dosificación volumétrica se utiliza y varía el contenido de humedad.

Otras propiedades que afectan a la densidad de masa de un agregado incluyen la graduación, gravedad específica, textura superficial, forma y angularidad de las partículas.

Los agregados que no tengan ni una deficiencia ni un exceso de cualquier tamaño suelen tener una densidad de masa más alta que aquellos con una preponderancia de un tamaño de partícula. Una mayor gravedad específica de las partículas repercute en una mayor densidad de masa para una clasificación en particular y los agregados redondeados y suaves generalmente tienen una densidad de masa más alta que las partículas angulares en bruto de la misma composición mineralógica y clasificación. La densidad de masa compactada de los agregados utilizados para concretos de peso normal generalmente oscila desde 1200 hasta 1760 kg/m.³ (75 a 110 lb/p.³).

2.6. Forma de la partícula, angularidad y textura de la superficie

La forma de las partículas se define en términos de "Compactación", que es una medida de la partícula si es compacta en forma, es decir, si está cerca de ser esférica o cúbica en lugar de ser plana (como disco) o alargadas (como aguja).

La angularidad se refiere a la agudeza de los filos o la angularidad de los bordes y las esquinas de las partículas. Cuanto mayor sea la compactación de las partículas (cuanto más se aproxima a una esfera o un cubo), menor será su área de superficie por unidad de peso y por lo tanto reducirá tanto su demanda de agua de mezcla de concreto como la cantidad de arena en la mezcla necesaria para proporcionar trabajabilidad. Más agregados gruesos

angulares y menos esféricos requieren una mayor mezcla de agua y contenido de agregado fino para proporcionar una mayor trabajabilidad.

La textura de la superficie se refiere al grado de rugosidad o irregularidad de la superficie de las partículas del agregado. La textura de la superficie por lo general se describe cualitativamente empleando términos como áspera, granular, cristalina y vidriosa en lugar de ser descrita cuantitativamente. Las partículas lisas requieren una menor mezcla de agua y por tanto menos material cementante a una relación agua-cemento particular para producir concreto con una mayor trabajabilidad, pero además tiene menor superficie de área que las partículas ásperas para adherirse a la pasta de cemento.

2.7. Abrasión y resistencia al impacto

La abrasión y resistencia al impacto de un agregado es su capacidad para resistirse a ser desgastado por el roce y la fricción o roturas al momento del mismo. Se trata de una medida general de la calidad del agregado y la resistencia a la degradación debido a la manipulación, el almacenamiento o la mezcla.

2.8. Sanidad de los agregados

La sanidad de un agregado se refiere a su capacidad en el concreto para soportar la exposición agresiva, sobre todo debido al clima.

En áreas con inviernos severos o moderados, la principal causa de deterioro del agregado en el concreto expuesto es la congelación y descongelación. Si una partícula de agregado absorbe mucha agua para que sus poros estén casi completamente llenos, no podrá acomodar la expansión

que se produce cuando el agua se convierte en hielo. A medida que el hielo se forma, la expansión resultante empuja el agua no congelada a través de los poros del agregado y la resistencia a este flujo resulta en presiones que puedan ser lo suficientemente altas como para agrietar las partículas. Estas presiones pueden quebrar la partícula del agregado y también el concreto que los rodea.

La presión desarrollada depende de la tasa de congelación y el tamaño de partícula por encima de la cual la saturación total de esta partícula ocasionaría su falla. Este tamaño crítico depende de la porosidad, tamaño de poro y el volumen total del poro del agregado; la permeabilidad o tasa de descarga del flujo de agua a través del agregado y la resistencia a la tracción de la partícula.

Para los agregados de grano fino con baja permeabilidad (por ejemplo como algunas sílices), el tamaño crítico de las partículas puede estar en el rango de los tamaños normales del agregado. Esto es mayor para materiales de grano grueso o aquellos con sistemas de poros interrumpidos por numerosos poros demasiado grandes para contener el agua por capilaridad.

Para estos materiales, el tamaño crítico puede ser demasiado grande para ser de consideración, a pesar de que la absorción puede ser alta. Además, si potencialmente los agregados vulnerables están secos cuando se utilizan o son usados en el concreto sometido a secado periódico mientras esta en uso, se vuelva lo suficientemente saturada para causar fallas bajo ciclos de congelación y descongelación.

2.9. Estabilidad química

Los agregados que son químicamente estables nunca reaccionarán con el cemento en una manera perjudicial ni serán afectados químicamente por influencias externas normales. En algunas áreas, se pueden producir reacciones entre los agregados compuestos de ciertos minerales y alcalinos presentes en el concreto, a partir de fuentes internas o externas.

Una reacción, por ejemplo, la reacción álcali-sílice (RAS), implica ciertos minerales de sílice que se encuentran en algunos agregados. El proceso se inicia cuando los alcalinos (sodio y el óxido potásico) ingredientes del concreto, entran en la solución y se combinan con reactivos minerales silíceos para formar un gel álcali-sílice que tiende a absorber agua y expandirse. Esta dilatación puede causar una expansión anormal y agrietamiento del concreto en un patrón aleatorio o mapeado (figura 2).

Estos materiales reactivos puede encontrarse en el cuarzo, esquistos, calcedonítica u opalina, caliza silícea u opalina, pizarra opalina y en rocas volcánicas vítreas ácidas a intermedias. Algunas filitas, argilitas, cuarcitas, granitos de gneis y gravas de cuarzo también son reactivos a causa de la reactividad del cuarzo compacto o microcristalina tensas. Se puede consultar la norma ASTM C294 para obtener una descripción de la mineralogía de los agregados.

Otro tipo de reacción perjudicial es la reacción álcali-carbonato (RAC), que normalmente es producida por desdolomitización (la conversión del magnesio enriquecido de piedra caliza a calcio enriquecido de piedra caliza) y ocurre entre los álcalis y las calizas argilíticas dolomíticas con cantidades apreciables de arcilla. Estas rocas tienen una microestructura característica

que puede ser reconocida por un petrógrafo experimentado. La RAC es menos común que la RAS.

2.10. Sustancias nocivas en el agregado

Las sustancias nocivas que pueden estar presentes en los agregados incluyen impurezas orgánicas, limo, arcilla, lignito y algunas partículas más livianas y suaves. Estas pueden ocurrir naturalmente en el agregado o pueden ser introducidas cuando los agregados son transportados en góndolas, coches, barcos o camiones previamente utilizados para transportar las sustancias contaminantes. Los agregados pueden ser contaminados por petróleo durante la manipulación.

Las impurezas orgánicas como la turba, humus, limo orgánico, el retardo del fraguado y endurecimiento del concreto debido a azúcares a veces conducen a su deterioro.

Los limos, arcillas u otros materiales que pasan el tamiz de 75 μm (No. 200) pueden estar presentes en forma de polvo o pueden formar una capa sobre las partículas del agregado. Las cantidades excesivas de este material aumentan indebidamente el agua necesaria para producir una trabajabilidad dada para los concretos o si la cantidad de material fino varía de lote a lote, puede causar fluctuaciones indeseables en la trabajabilidad, el aire contenido y la resistencia. Estos recubrimientos delgados de polvo en las partículas gruesas pueden debilitar la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado grueso.

El carbón, lignito, sílices ligeros y otros materiales blandos y de poco peso como la madera, pueden afectar la durabilidad de los concretos si están

presentes en cantidades excesivas. Si estas impurezas ocurren en o cerca de la superficie del concreto pueden dar origen a ratoneras y manchas.

Figura 2. Formación de grietas causadas por la expansión anormal debido a la reacción álcali-agregados



Fuente: ACI E1-07.

3. PROPIEDADES DEL CONCRETO INFLUENCIADAS POR LOS AGREGADOS

Según lo establecido con anterioridad, los agregados son aquellos materiales inertes de forma granular naturales o artificiales, que aglomerados con el cemento portland en presencia de agua conforman un todo compacto (piedra artificial) conocido como concreto u hormigón.

Como agregado para concreto se pueden considerar todos aquellos materiales, que teniendo una resistencia propia suficiente, no perturban ni afectan las propiedades y características del concreto y garantizan una adherencia suficiente con la pasta endurecida del cemento portland.

En general, la mayoría son materiales inertes, es decir que no desarrollan ningún tipo de reacciones con los demás constituyentes del concreto, especialmente con el cemento. Por esta razón el tipo y calidad correcta del agregado a utilizar no se puede subestimarse. Los agregados fino y grueso ocupan del 60% al 80% del volumen del concreto (70% a 85% de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado plástico (fresco) como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del concreto.

Los agregados finos generalmente consisten en arena natural o piedra triturada con la mayoría de sus partículas menores a 5 mm. y los agregados gruesos generalmente entre 9.5 mm. y 37.5 mm. Algunos depósitos naturales de agregado, llamados gravas de mina, consisten en grava y arena que se pueden usar inmediatamente en el concreto, después de un procesamiento mínimo. La grava y la arena naturales normalmente se excavan o dragan de

los minerales, de un río, lago o del lecho marino. La escoria de alto horno enfriada al aire y triturada también se usa como agregado fino y grueso.

Los agregados frecuentemente se lavan y se gradúan en mina o en planta. Se puede esperar alguna variación en el tipo, calidad, limpieza, granulometría, contenido de humedad y otras propiedades. Estos deben cumplir con algunas normas para que su uso en ingeniería se optimice: deben ser partículas limpias, duras, resistentes, durables y libres de productos químicos absorbidos, revestimientos de arcilla u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.

Las partículas de agregados friables (disgregables, deleznales o desmenuzables) o capaces de rajarse son indeseables. Se deben evitar agregados que contienen cantidades apreciables de esquisto u otras rocas esquistosas, de materiales blandos y porosos. Se deben evitar, en especial, algunos tipos de sílices, pues tienen poca resistencia al intemperismo y causan defectos superficiales tales como las erupciones. Solamente la identificación de los componentes de un agregado nos puede dar una base para el pronóstico del comportamiento del agregado en servicio. La inspección visual normalmente revela debilidades en los agregados gruesos.

3.1. Propiedades del concreto endurecido influenciadas por los agregados

El concreto es un material compuesto, en el cual existe una gran variabilidad en las características de sus componentes, especialmente en los agregados. Siendo éstas de carácter físico y químico.

3.1.1. Durabilidad

Para muchas condiciones la propiedad más importante del concreto es su durabilidad. Hay muchos aspectos de la durabilidad del concreto y prácticamente todos están influenciados por las propiedades del agregado.

3.1.1.1. Congelación y descongelación

El concreto que contiene una pasta resistente a congelarse y descongelarse puede no ser resistente si contiene partículas de agregado que se saturan de forma crítica. Una partícula de agregado se considera críticamente saturada cuando no hay suficiente espacio de los poros vacíos para dar cabida a la expansión del agua que acompaña a la congelación, como lo menciona Verbeck y Landgren, en la “Influencia de las características físicas de los agregados sobre la resistencia del concreto”.

Las observaciones de campo, estudios de laboratorio y análisis teóricos indican que hay un tamaño de partícula fundamental sobre el cual la partícula se fractura bajo ciclos repetidos de congelación-descongelación si ha sido críticamente saturada. Este tamaño depende de la estructura de poros, permeabilidad y resistencia a la tensión de la partícula.

Aún no se ha demostrado que los agregados finos están directamente relacionados con el deterioro por congelación-descongelación del concreto. Algunos agregados gruesos porosos, por el contrario, causan el deterioro del concreto debido a la congelación. Para agregados gruesos de grano fino con sistemas de poros de textura fina y baja permeabilidad, el tamaño crítico puede estar en el rango de tamaños de agregados normales.

Para materiales de grano grueso con sistemas de poros de textura gruesa o material con un sistema capilar interrumpido por numerosos macro poros, el tamaño crítico puede ser tan grande como para no tener consecuencia práctica, a pesar de que la absorción puede ser alta. En tales casos, la tensión no es lo suficientemente alta como para dañar el concreto.

3.1.1.2. Humedecimiento y secado

La influencia del agregado en la durabilidad del concreto sometido a la humedad y el secado es también controlada por la estructura de los poros del agregado. El problema que se produce no solo suele ser tan grave como el daño causado por la congelación y descongelación. La expansión diferencial que acompaña el aumento de la humedad de una partícula de agregado con un sistema de poros de textura fina puede ser suficiente para provocar el fallo de la pasta de los alrededores y como resultado el desarrollo de una ruptura de poro.

La cantidad de esfuerzos desarrollados es proporcional al módulo de elasticidad del agregado. Muchas veces las partículas deleznablees o bolas de arcilla en el agregado, las cuales son detectadas por el ensayo ASTM C 142, se debilitan al mojarse y se pueden degradar en repetidos ciclos de mojado y secado.

3.1.1.3. Calentamiento y enfriamiento

El calentamiento y el enfriamiento inducen tensiones en cualquier material no homogéneo. Si el rango de temperatura es grande, se podría dañar. Para los agregados de uso común y los cambios de temperatura comúnmente encontrados, esto no suele ser un factor crítico en concreto. Sin

embargo, se ha reportado por Willian, et al., en el ACI 221-R96, que las grandes diferencias en el coeficiente de expansión y difusión térmica entre la pasta y el agregado puede resultar en tensiones dañinas en el concreto sujeto a los cambios de temperatura normal.

En la interpretación de las pruebas de laboratorio y observaciones de campo, es difícil aislar los efectos térmicos de otros efectos como los cambios de humedad, la congelación y descongelación. Aunque la práctica habitual es no restringir el coeficiente de expansión del agregado por exposición a temperaturas normales, los agregados con los coeficientes que son extremadamente altos o bajos pueden requerir una investigación antes de su uso en ciertos tipos de estructuras. Normalmente, los agregados de concreto que contienen un bajo módulo de elasticidad resisten tensiones de temperatura mejor que el conjunto que contiene un alto módulo, referenciado por Carrette, et al en el ACI 221-R96.

3.1.1.4. Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión y resistencia al impacto localizada del concreto es una propiedad que depende en gran medida de la calidad tanto de la pasta de cemento como del agregado cerca de la superficie que recibe el impacto localizado y esfuerzos abrasivos.

En aquellos casos en que la profundidad de desgaste no es grande, habrá poca exposición del agregado grueso y sólo la presencia de un agregado fino duro y fuerte en una pasta de cemento de buena calidad, puede ser necesaria para proporcionar la resistencia adecuada de la superficie. Ejemplo de esto podrían ser suelos industriales, ciertas estructuras hidráulicas y pavimentos. En otros usos, tales como carreteras, algo de

exposición del agregado grueso suele ser aceptable, siempre y cuando el material grueso no sea fácilmente desgastado por el tráfico, especialmente cuando se utilizan los neumáticos con clavos o cadenas.

El método ASTM C 131 (o C535 para el agregado mayor de 3/4 pulg. [19 mm]), generalmente se conoce como la prueba de abrasión de Los Ángeles y se utiliza como una prueba de calidad a la abrasión, impacto o la degradación de agregados gruesos. La prueba consiste en el impacto y tiende a romper los agregados duros y quebradizos que pueden no quebrarse en uso.

Es de conocimiento general que hay una mala relación entre el porcentaje de pérdida o desgaste, en la prueba de desgaste y la durabilidad de concreto en uso. Se puede proporcionar un medio de identificación de productos evidentemente inferior, que tienden a degradarse en el manejo de la producción o en el uso. Sin embargo, la especificación de un valor excesivamente bajo puede no garantizar una buena resistencia a la abrasión de una superficie de concreto. Por el contrario, un valor alto de la prueba no podrá evitar una buena resistencia a la abrasión del concreto. La dureza del agregado se requiere para resistir rayado, desgaste y pulido de los tipos de desgaste en el uso.

De acuerdo con Stiffler en su reporte núm. J-15 en 1967 y su reporte especial núm. 101 en 1969, condujo pruebas en las cuales los minerales fueron sometidos a desgaste con abrasivos, *"La dureza es la característica más importante que controla el desgaste total."* Para los usos del concreto en donde la resistencia a la abrasión es crítica, ensayos de abrasión al concreto que contiene los agregados propuestos deben ser realizadas por un procedimiento de prueba apropiado. Las normas ASTM C 418, C 779 y C 944

ofrecen una selección de acciones abrasivas de concreto seco y la ASTM C 1138 proporciona un método bajo el agua.

3.1.1.5. Agregados reactivos

El uso de algunos agregados puede dar lugar a una reacción química nociva entre ciertos componentes de los agregados y ciertos componentes en el cemento, por lo general los alcalinos. Generalmente se cree que todos los agregados son reactivos en cierto grado cuando se utiliza concreto de cemento Portland y algunas evidencias de reacción han sido identificadas petrográficamente en muchos concretos que están actuando de manera satisfactoria.

Sólo cuando la reacción se vuelve lo suficientemente extensa como para provocar la expansión y el agrietamiento del concreto se considera que es una reacción nociva. La gama de condiciones de humedad y temperatura del concreto en uso pueden influir significativamente en la reactividad y sus efectos. En la mayoría de los casos, no es necesario volver a examinar la reactividad de los agregados si se les conoce un buen historial de uso, cuando se utiliza con cemento en niveles similares de alcalinos. Dos principales reacciones perjudiciales entre los agregados y los alcalinos de cemento identificadas son:

- Reacción álcali-sílice
- Reacción álcali-carbonato

En ambos casos, una reacción perjudicial puede resultar en la expansión anormal del concreto con grietas asociadas por ruptura de poro o pérdida de fuerza.

- Reacción álcali-sílice

Las manifestaciones típicas de la reacción álcali-sílice son la expansión, el cierre de las juntas, la dislocación de los elementos estructurales y maquinaria, formación de grietas (por lo general patrones de grietas), exudaciones de álcali-silicato de gel a través de los poros o fisuras que forman gotas gelatinosas o duras sobre las superficies, la reacción en los bordes de las partículas de agregado afectadas dentro del concreto y ocasionalmente en los poros reventados. Cabe señalar que algunas de estas manifestaciones también pueden producirse por otros fenómenos, como el ataque de sulfatos. Un examen petrográfico debe ser utilizado para identificar las causas de dicha reacción.

Los materiales rocosos identificados como potencial y perjudicialmente reactivos son el ópalo, calcedonia, cuarzo microcristalino a criptocristalino, cuarzo cristalino que está intensamente fracturado o tensado y vidrio latítico o andesítico o productos criptocristalinos de la desvitrificación del vidrio. Todos estos materiales son altamente silíceos.

Algunos de los principales tipos de rocas que pueden contener los minerales reactivos son sílex, calizas silíceas y dolomitas, areniscas, cuarcitas, riolitas, dacitas, andesitas, esquistos, filitas, pizarras, gneis de granito y grauwacas. Sin embargo, estos tipos de roca, no necesariamente contienen algunos de los minerales reactivos. El vidrio manufacturado, tal como botellas de vidrio, puede ser reactivo cuando se presenta de otra forma como un contaminante en el agregado adecuado. El agregado de vidrio reciclado no debe ser utilizado en el concreto.

Los principales factores que rigen el grado de reactividad expansiva de los agregados son:

- La naturaleza, cantidad y tamaño de las partículas del material reactivo.
- La cantidad de álcali soluble aportado por el material de cemento en el concreto.
- La disponibilidad de agua

Una forma de evitar la expansión del concreto resultante de la reacción álcali-sílice es evitar el uso de agregados reactivos. Algunas veces esto no es económicamente viable. Si se requiere el uso de los agregados reactivos, debe ser sólo después de pruebas exhaustivas para determinar el grado de reactividad de los agregados. El rango de humedad y temperatura del concreto en el servicio pueden influir significativamente en la reactividad. Luego de obtener este dato, los límites adecuados en el contenido de álcali del cemento pueden ser establecidos, el uso de una puzolana efectiva o escoria puede ser considerado así como una combinación para reducir el potencial de reacción, como se explica en ACI 201.2R.

- Reacción álcali-carbonato

Ciertos agregados de rocas calizas dolomíticas encontradas son susceptibles a esta reacción. Sin embargo, la mayoría de las rocas de carbonato utilizadas como agregado de concreto no son expansivas. Todas las rocas de carbonato de reactivos expansivos generalmente poseen las siguientes características:

- Son dolomíticas, pero contienen cantidades apreciables de calcita
- Contienen arcilla y/o limos
- Tienen una matriz de grano extremadamente fina
- Poseen una textura característica que consiste en pequeños rombos de dolomita aislada difundida en una matriz de arcilla o de limo y calcita finamente dividida.

La arcilla puede contribuir a la expansión ofreciendo caminos mecánicos a los rombos de dolomita que reaccionan rompiendo el marco estructural de la roca, lo que debilita la matriz de carbonato. La investigación sobre esta reacción ha sido llevada a cabo por Buck en su reporte técnico en 1975 y las medidas de control han sido desarrolladas para uso de rocas potencialmente expansivas (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU., 1985). Estos incluyen la explotación de canteras selectiva para eliminar la roca perjudicial o limitar su cantidad y el uso de cemento con un máximo del 0.40% de alcalinos como el óxido de sodio equivalente.

3.1.1.6. Resistencia al fuego

Los tipos de agregados ejercen una influencia en la resistencia al fuego de las estructuras de concreto como se explica en ACI 216R. Las pruebas de laboratorio elaboradas por Selvaggio y Carlson en 1964; y por Abrams y Gustaferrero en 1968, han demostrado que el concreto con agregados ligeros es más resistente al fuego que el concreto con agregados de peso normal. Este material más ligero reduce la conductividad térmica del concreto y por lo tanto aísla de mejor manera el concreto de la fuente de calor. Además, la escoria de alto horno es más resistente al fuego que otros agregados de peso normal, según lo publicado por Lea en “La Química del Cemento y del Concreto”, debido a su ligereza y estabilidad mineral a temperatura alta. Muy poca

investigación se ha realizado sobre la resistencia al fuego de los agregados pesados.

Los agregados de carbonato generalmente son más resistentes al fuego que los agregados silíceos. Las Dolomitas se calcinan entre 600-700 °C (1110-1290 °F) y la calcita en la piedra caliza se calcina a unos 900 °C (1650 °F) en una atmósfera de dióxido de carbono al 100%. A medida que la capa calcinada se forma, está aísla el concreto de la fuente de calor y reduce la velocidad a la que el interior del concreto se calienta.

Agregados de cuarzo como el granito, arenisca y cuarcita son susceptibles al daño por fuego. Aproximadamente a 570 °C (1060 °F), el cuarzo sufre una repentina expansión de 0.85% causado por la transformación de cuarzo alpha a cuarzo beta. Esta expansión puede ocasionar que el concreto se descascare y pierda fuerza.

3.1.1.7. Resistencia al ácido

Los agregados silicios (cuarcita, granito, etc.) son generalmente resistentes a los ácidos. Es todo lo contrario a los agregados de carbonatos (piedra caliza y dolomita), que en la mayoría de condiciones, reacciona con los ácidos.

Sin embargo, la pasta de cemento de concreto también reaccionan con el ácido y en condiciones de acidez suave un concreto con agregados de carbonato puede ser más tolerante a la acidez que si se hace con los agregados silíceos. Esto es así porque bajo estas condiciones, el "efecto del sacrificio" del carbonato puede prolongar la vida funcional del concreto. Donde el concreto esta habitualmente expuesto a ambientes ácidos graves, puede ser

requerida una capa de protección apropiada o concreto de cemento no Portland (tales como resina epoxidica) con el agregado resistente al ácido.

3.1.1.8. Otras reacciones

Las otras reacciones químicas que involucran el agregado y que puede conducir al debilitamiento del concreto endurecido, incluyen la hidratación de los minerales anhídridos, intercambio de base y cambio de volumen en las arcillas u otros minerales, componentes solubles, oxidación e hidratación de compuestos de hierro así como las reacciones que implican sulfuros y sulfatos; materiales que pueden causar este tipo de reacciones se pueden detectar en las pruebas estándar de conjunto y en particular mediante el examen petrográfico.

Otras sales solubles en agua, tales como sulfatos y cloruros, pueden estar presentes en los agregados naturales de algunas zonas y contribuir a la eflorescencia o corrosión del acero embebido. Si las mediciones de rutina de cloruros totales exceden los límites de ACI 201.2R y ACI 318, se recomienda probar el concreto o agregados para cloruros solubles en agua, utilizando los métodos AASHTO T 260, ASTM C 1218, y ASTM D 1411. Algunos minerales zeolíticos y arcillas están sujetos a intercambio de bases que pueden influir en las reacciones álcali-agregado y se cree que causan la expansión del concreto.

3.1.2. Resistencia

Tal vez la segunda propiedad más importante del concreto y para la cual los valores se especifican, es la resistencia. Los tipos de resistencia usualmente considerados son la compresión y a la flexión. La resistencia

depende en gran medida de la fuerza de la pasta de cemento y en el vínculo entre la pasta y el agregado. La resistencia de los agregados también afecta la resistencia del concreto, pero la mayoría de los agregados de peso normal tienen resistencias mucho mayores que la resistencia de la pasta de cemento con el que se utilizan.

El vínculo entre la pasta y el agregado tiende a establecer un límite superior a la resistencia del concreto que se puede obtener con un determinado conjunto de materiales, en particular en el caso de resistencia a la flexión. Este vínculo está influenciado por la textura de la superficie, la composición mineral, el tamaño y forma de partículas así como la limpieza de los agregados. La pasta de cemento normalmente se une mejor a una superficie de textura rugosa que a una superficie lisa. La textura de la superficie es más importante para los agregados gruesos que para los agregados finos.

Recubrimientos que continuamente se adhieren a los agregados, incluso durante el proceso de mezcla pueden interferir con la adherencia. Los que se retiran durante la mezcla tienen el efecto de aumentar la finura en los agregados. Si los recubrimientos que quedan en la superficie de la partícula de agregado después de mezclarla y de su colocación son de una determinada composición química, puede producir una reacción nociva con álcalis en el cemento como se detalla en el Capítulo 36 del documento STP 169C (ASTM, 1994).

El revestimiento de arcilla normalmente interfiere con la adherencia, mientras que los revestimientos no adherentes como las capas de polvo aumentan la demanda de agua como consecuencia del incremento de los agregados finos, según lo reportado por Lang en "Sustancias perjudiciales".

Las partículas angulares y las que tienen superficies rugosas y vesiculares tienen un requerimiento de agua más alto que el material redondeado. Sin embargo, los agregados gruesos triturados y naturales en general, dan sustancialmente las mismas fuerzas de compresión para un factor de cemento dado. Para concreto de alta resistencia, los agregados gruesos cúbicos triturados generalmente producen una mayor resistencia a la compresión que la grava redondeada de clasificación y calidad comparables.

Algunos agregados, tienen un mayor requerimiento de agua que lo normal debido a las características de calificación desfavorable o la presencia de una gran proporción de partículas planas o alargadas. Con estos materiales, es necesario utilizar un mayor factor de cemento normal para evitar relaciones excesivamente altas de agua-cemento y en consecuencia, la resistencia suficiente.

Los requerimientos de agua también pueden ser aumentados por recubrimientos no adherentes y por resistencia pobre a la abrasión del agregado en que ambas incrementan la cantidad de agregados finos en la mezcla. La granulometría fina, forma de las partículas y la cantidad, tienen una mayor influencia en la resistencia del concreto debido a su efecto sobre la demanda de agua. Dentro de los límites, las proporciones deben ajustarse para compensar los cambios en la clasificación de los agregados finos, más de un agregado fino grueso y menos de un agregado fino más fino, debe ser utilizado en el concreto.

Existe evidencia experimental por Walker y Bloem en 1960, para demostrar que a una tasa fija de agua-cemento, la fuerza disminuye a medida que aumenta el tamaño máximo de agregado, en particular, para tamaños superiores a 1 1/2 pulg. (38 mm.). Sin embargo, para el mismo contenido de

cemento, esta aparente ventaja de su menor tamaño no se puede mostrar debido a los efectos de compensación de la cantidad necesaria de agua en la mezcla. Para concreto de alta resistencia, el tamaño óptimo máximo del agregado suele ser menor de 1 1/2 pulg. (38 mm.) y este tamaño tiende a disminuir con el aumento de la fuerza, según lo experimentado por Cordon y Thorpe en “Dosificación y Evaluación de Mezclas de Concreto”.

3.1.3. Contracción

El agregado tiene un efecto importante en la contracción por secado del concreto. Con la pasta de cemento que tiene un potencial alto de contracción, el agregado introducido en la pasta para hacer el mortero o concreto reduce la contracción de pasta debido a la restricción prevista por el conjunto y para el efecto de dilución (menos pasta). La contracción resultante del concreto es una fracción de la contracción de la pasta debido a estos efectos. Por lo tanto, la retracción del concreto bajo ciertas condiciones de secado depende del potencial de contracción de la pasta y las propiedades así como de la cantidad de agregado. La importancia relativa de estos factores variará.

Los factores asociados con el agregado que afectan la contracción por secado del concreto son los siguientes:

- Rigidez, compresión o módulo de elasticidad del agregado
- Propiedades de los agregados, tales como clasificación, forma de las partículas y el tamaño máximo de los agregados que influyen en la cantidad de agua requerida por el concreto y la cantidad de agregado utilizado en el mismo.
- Propiedades de los agregados (textura, porosidad, etc.) que afectan a la unión entre la pasta y el agregado.

- Arcilla en o dentro del agregado que contribuye a una contracción real de los agregados en el secado o que contribuye a la pasta de arcilla. Algunos agregados que encogen al secarse tienen altos valores de absorción.

Los agregados de cuarzo o feldespato, piedra caliza, dolomita, granito y algunos basaltos por lo general se pueden clasificar como de baja producción en la contracción de agregados. Los agregados que contienen arenisca, pizarras, grauvacas o algunos tipos de basalto se han asociado con concreto de alta contracción. Sin embargo, las propiedades de un tipo de agregado dado, como la piedra caliza, granito o arenisca, pueden variar considerablemente con diferentes fuentes. Esto puede resultar en una variación significativa en la contracción del concreto hecho con un determinado tipo de agregado.

La contracción por secado del concreto está influenciada por el contenido de agua del concreto. Por lo tanto, las propiedades de diversos agregados que influyen en la cantidad de agua utilizada son un factor en la cantidad de contracción por secado. Estos factores son la forma de las partículas, textura de la superficie, clasificación, tamaño máximo del agregado y el porcentaje de agregado fino.

3.1.4. Propiedades térmicas

Las propiedades de los agregados que tienen un efecto sobre las características térmicas del concreto son el calor específico, coeficiente de expansión térmica, conductividad térmica y difusividad térmica.

El coeficiente de expansión térmica de los agregados comúnmente utilizados varía según la composición mineralógica de los mismos, sobre todo con la cantidad de cuarzo que contiene la roca. A mayor presencia de cuarzo, mayor es el coeficiente de expansión térmica. La pasta de cemento tiene un coeficiente de dilatación térmica de aproximadamente 1.5 veces más que el cuarzo, que tiene el mayor coeficiente de expansión térmica de los minerales comunes.

Por lo tanto, cuando los esfuerzos térmicos diferenciales a lo largo de una sección del concreto sea una preocupación, sería preferible utilizar un agregado con un coeficiente térmico bajo. Sin embargo, el uso de un agregado con un coeficiente inferior aumentaría las tensiones térmicas diferenciales entre la pasta y el agregado. Por lo tanto, debe decidirse cuál de estas dos situaciones de tensión es de mayor preocupación.

La conductividad térmica varía directamente con la unidad de peso del concreto. En general, cuanto más denso es el agregado utilizado, mayor será el valor de la conductividad térmica. La pasta de cemento tiene una conductividad térmica más baja que la mayoría de los agregados. Por lo tanto, a mayor agregado utilizado en la mezcla mayor será la conductividad térmica.

3.1.5. Peso unitario

El peso unitario del concreto depende de la gravedad específica del agregado, de la cantidad de aire, proporciones de la mezcla y las propiedades anteriormente discutidas que determinan el requerimiento de agua. Dado que el peso específico de la pasta de cemento es menor que la del agregado de peso normal, el peso unitario normalmente aumenta a medida que disminuye la cantidad de pasta.

3.1.6. Módulo de elasticidad

La influencia de los agregados en el módulo de elasticidad del concreto se determina normalmente mediante pruebas de mezclas de concreto que contienen el agregado en cuestión. Tanto en compresión como en tensión, las curvas de tensión-deformación de las muestras de roca son normalmente una relación bastante lineal que indica que el agregado es razonablemente elástico. Por el contrario, el mortero de concreto, tiene una relación de curva de tensión-deformación cuando la tensión supera el 30 por ciento de resistencia definitiva. Esto es debido al comportamiento no lineal de la pasta de cemento y la formación de cadenas de grietas y el deslizamiento en la interface de la pasta-agregado.

En general, cuando el módulo de elasticidad del agregado aumenta también lo hace el módulo de elasticidad del concreto y que a medida que el volumen del agregado aumenta, el módulo del concreto se acercará al módulo de elasticidad del agregado. Sin embargo, cuando el módulo de elasticidad del concreto se debe conocer con bastante exactitud, las pruebas al concreto se recomiendan en lugar del cálculo del módulo de elasticidad de las propiedades del agregado basado en relaciones empíricas o relaciones teóricas.

3.1.7. Propiedades de la superficie de fricción

El coeficiente de fricción o deslizamiento de las superficies de concreto está influenciado por las propiedades de los agregados utilizados en las superficies. Inicialmente, la textura de acabado de la superficie y la dureza del agregado fino son importantes. El agregado grueso se involucrará sólo si hay suficiente pérdida de material de superficie para exponer una cantidad significativa de las partículas gruesas. El pulido es una forma especial de

desgaste abrasivo donde el tamaño es bastante pequeño, como la arena típica para carretera de 10 a 40 micrómetros y la acción es tal que la textura es gradualmente suavizada y pulida.

La resistencia al deslizamiento de la superficie del pavimento en caso de lluvia depende de la micro textura y también de la macro textura si las velocidades significativas están involucradas. La macrotextura de una superficie de concreto se produce por la operación de acabado y es importante para proporcionar canales de escape para el exceso de agua entre el neumático y el pavimento durante el tiempo lluvia. La microtextura es controlada por la clasificación de los agregados finos y cualquier agregado grueso expuesto y las características de textura y el pulido de la pasta de cemento, agregado fino y agregado grueso expuesto en la superficie.

Las características del pulido del agregado están relacionadas con la petrología del mismo. Algunos agregados de carbonato se pulen más rápidamente que la mayoría de los otros tipos de agregados y la prueba de residuo de ácido insoluble ASTM D 3042 se utiliza para medir la cantidad de minerales no carbonatados más duros presentes en los agregados de carbonato en un intento de definir mejor la susceptibilidad del pulido de varias fuentes de agregados de ese grupo.

La mayor parte del material agregado, el mineral utilizado en el concreto será pulido gradualmente cuando se expone a la superficie del pavimento, con los minerales más suaves el pulido será más rápido que los minerales duros, según el reporte especial núm. 101 de Colley, et al., en 1969 y por Mullen, et al., en su reporte núm. 376 en 1971. Las excepciones son partículas friables o agregado vesicular, que conforme al uso tiende a romper las piezas, lo que expone a las nuevas superficies sin pulir. Estos materiales pueden dar lugar a

mayores tasas de desgaste en la cinta asfáltica, creando surcos. Sin embargo, pueden proporcionar un alto nivel de fricción durante un largo período de tiempo.

3.1.8. Economía

Generalmente, el costo de los agregados al total del precio del concreto colocado es relativamente bajo, a menos que se especifiquen agregados especiales. Los costos de los agregados se rigen generalmente por la disponibilidad, el costo de procesamiento, transporte y distancia. Con frecuencia, hay otros factores que, si se consideran, pueden tener un impacto mucho mayor económicamente o un impacto ambiental que el costo directo del agregado.

Algunos de los factores más importantes son la calidad total (limpieza, durabilidad), forma de las partículas, clasificación, requisitos de agua, los requisitos de cemento, la densidad y el rendimiento, el efecto sobre la resistencia del concreto y el efecto sobre la colocación y acabado. Un conocimiento profundo de estos factores y su interrelación cuando se utiliza en la dosificación de mezclas de concreto pueden afectar significativamente el precio del concreto colocado.

3.2. Propiedades del concreto fresco influenciadas por los agregados

Los agregados pueden variar mucho de composición debido a los factores geológicos implicados en su formación, con posteriores deformaciones y la mineralogía del material original. Otras de las diferencias en la composición de los agregados pueden ser debido a los procesos utilizados en la trituración, el tamaño y la limpieza. Puede haber una gran

variedad en las diferentes propiedades físicas y químicas de los agregados. Las diferencias en propiedades entre las fuentes de agregados, así como la variación en las propiedades del agregado de una sola fuente puede afectar el rendimiento de la mezcla de concreto fresco.

Las propiedades físicas de los agregados que afectan las propiedades del concreto recién mezclado incluyen la clasificación, tamaño máximo, forma y textura de las partículas, peso unitario de la masa, absorción, gravedad específica y la cantidad de finos de arcilla. La presencia de cantidades excesivas de materiales orgánicos o sales solubles puede afectar a las propiedades del concreto recién mezclado por ejemplo, la pérdida de revenimiento, tiempo de fraguado, la demanda de agua y el contenido de aire.

Mientras que el concreto es muy variable en sus propiedades, para un concreto satisfactorio la mayoría de los tipos se pueden hacer con una amplia gama de agregados, selección de materiales y mezcla de dosificación para proporcionar concretos que posean las características requeridas en sus propiedades, tanto recién mezclado y en estado endurecido. Realizar pruebas de mezcla es muy recomendable para hacer el mejor uso de los materiales disponibles a menos que haya una cantidad sustancial de información estadística en la experiencia previa. Los agregados no deben ser sustituidos en una proporción de mezcla sin antes realizar un análisis por los cambios potenciales en la demanda de agua del sistema.

3.2.1. Propiedades de mezcla

La clasificación y la forma de las partículas de los agregados influyen en las proporciones que son necesarias para obtener mezclas de concreto trabajables y al mismo tiempo proporcionar las propiedades del concreto

endurecido con una economía razonable. El ACI 211(Práctica estándar para la elección de las proporciones de los concretos normal, pesado y masivo.) proporciona orientación sobre el uso de las curvas de densidad máxima para determinar el óptimo de la granulometría del agregado combinado.

La cantidad de agua de la mezcla necesaria para obtener un revenimiento o trabajabilidad deseada depende del tamaño máximo del agregado grueso, de la forma y textura de las partículas tanto de los agregados gruesos como de los finos y los rangos de las partículas de agregado grueso.

Las diferencias significativas en las necesidades de agua del concreto que utilizan agregados finos de diferentes áreas geográficas. El agregado fino angular requiere mayor cantidad de agua en la mezcla así como más cemento para mantener la relación agua-cemento.

El aumento de angularidad y rugosidad de los agregados gruesos también puede aumentar las necesidades de agua de la mezcla (y contenido necesario del mortero) de concreto para un determinado nivel de trabajabilidad, sin embargo, su efecto es por lo general menor a la forma y las propiedades de textura del agregado fino.

Grandes cantidades de partículas planas y alargadas de los agregados puede hacer que el concreto sea demasiado duro para algunos métodos de colocación, dando lugar a vacíos (ratoneras) u obstrucciones de bombeo. La sustitución de un agregado natural por uno fabricado (triturado) a menudo modifica las características significativamente. En particular, las arenas naturales más redondas pueden mejorar la capacidad de bombeo de las mezclas de concreto.

La forma de las partículas del agregado se puede evaluar visualmente o mediante el uso de las pruebas cuantitativas. Sin embargo, en la actualidad existe poco uso de estas propiedades como criterios reales de especificación. El examen visual de la forma del agregado y la estimación de su efecto en el concreto requiere experiencia y juicio personal.

Los resultados numéricos pueden obtenerse mediante la clasificación de partículas por dimensiones y medición de la longitud de las partículas, el grosor y la anchura para llegar a una cantidad de partículas planas y alargadas. Esta es más factible para el agregado grueso que para agregado fino donde una partícula plana se define en la norma (ASTM C 125) como una en la que la relación entre la anchura de espesor es mayor que el valor determinado (generalmente por 3) y una pieza alargada de agregado es una con relación entre la longitud y el ancho superior a un valor determinado (también 3 generalmente).

Por lo general, la mayor preocupación con las partículas alargadas y planas está en relación de agregados triturados, aunque pueden ocurrir en gravas naturales derivadas finamente de camas de roca.

Un tercer método para evaluar la forma de la partícula, la redondez y la textura de los agregados implica la determinación de su paso a través de un orificio o el porcentaje de vacíos del material suelto después de haber caído en un contenedor. Los vacíos se calculan a partir del volumen conocido del contenedor y el peso específico de los agregados.

La clasificación y forma de las partículas de los agregados gruesos influyen en la cantidad de mortero necesaria para proporcionar concreto trabajable. Cualquier cambio en la clasificación o angulosidad que disminuye o

aumenta los vacíos interpartículas del agregado grueso requerirá la correspondiente disminución o aumento en la fracción de mortero de concreto. Con los agregados finos cuyas partículas son más pequeñas, se requiere menos agregado fino y puede utilizarse más agregado grueso para obtener una trabajabilidad comparable.

3.2.2. Trabajabilidad

La trabajabilidad también conocida como manejabilidad, se considera como aquella propiedad del concreto mediante la cual se determina su capacidad para ser colocado y consolidado apropiadamente y para ser terminado sin segregación dañina alguna.

La resistencia, apariencia, permeabilidad y la utilidad general del concreto, depende de la efectiva colocación y consolidación del concreto recién mezclado sin vacíos indeseables, paneles de abejas o ratoneras. Esta mezcla debe ser lo suficientemente trabajable para que fluya en el encofrado con un buen procedimiento de colocación y la consolidación técnica, para llenar completamente los espacios alrededor del refuerzo, el flujo en las esquinas, atrapando bolsas de aire macroscópicas que se formen y contra la superficie del encofrado, creando una masa razonablemente homogénea sin separación indebida de los ingredientes y del agua en el concreto.

La trabajabilidad queda definida como la cantidad de trabajo interno útil y necesario para producir una compactación completa, debido a que la fricción interna es una propiedad intrínseca de la mezcla y no depende de un tipo o sistema particular de construcción.

Las propiedades del agregado deben ser consideradas en la dosificación del agregado o forma de las partículas que afectan el requerimiento de agua en la mezcla. Por lo tanto, un cambio en la forma o clasificación de las partículas puede cambiar la consistencia del concreto si la cantidad de agua de la mezcla se mantiene constante.

El revenimiento es una medida de la consistencia del concreto. Sin embargo, no es, por sí mismo, una medida de trabajabilidad. Otras consideraciones tales como la cohesión, dureza, segregación, sangrado, facilidad de consolidación y el acabado también son importantes y estas propiedades no son del todo medidas por el revenimiento. Los requerimientos de trabajabilidad son necesarios para una ubicación concreta que dependerá en gran medida del tipo de construcción y en el equipo que se utiliza para transportar y consolidar el concreto.

3.2.3. Bombeabilidad

El concreto fabricado con agregados de mayor angularidad o con agregados mal clasificados supone mayor dificultad al bombear porque su fricción interna es superior. La forma de las partículas de agregado grueso tendrá un efecto mínimo en la capacidad de bombeo y en la línea de presión. Las propiedades del agregado fino desempeñan un papel importante en la dosificación de las mezclas para el bombeo.

Los estándares ACI 211.1 y 304R disponen que, para el concreto que se va a bombear, la cantidad de agregado grueso se puede disminuir hasta en un 10 por ciento. Esto significa que la relación de agregado grueso-mortero podrá incrementarse si es necesario para proporcionar más concreto trabajable. Si se necesitan ajustes en las proporciones de la mezcla o la clasificación del

agregado depende en gran medida de las proporciones originales, el uso de productos químicos y aditivos minerales, el tamaño de la línea de bombeo, las características y el estado de la bomba.

Un método de dosificación de concreto utiliza la unidad de medida de peso seco del agregado grueso, que se ve afectada por la forma, la clasificación, y la gravedad específica de la partícula de agregado grueso. La pérdida de la unidad de medida de peso seco puede deberse a la forma de las partículas angulares, con clasificación más gruesa y menor gravedad específica del agregado.

El uso del concepto de esta unidad de medida de peso seco resulta, en menos uso de agregado grueso cuando es angular, lo que requiere una proporción mayor de agregado grueso-mortero para la misma trabajabilidad. Las recomendaciones ACI 211.1 no reconocen satisfactoriamente que son las diferencias de forma de las partículas finas y su efecto sobre la trabajabilidad y la demanda de agua, aunque las diferencias de clasificación en la forma del módulo de finura son tomadas en cuenta.

Para algunos agregados finos, particularmente el agregado fino manufacturado mal graduado, puede ser necesario un estrecho control para producir concreto bombeable. Esto puede incluir el mejoramiento de la forma de la partícula, aumentando la cantidad de tamaños más finos en el agregado fino, utilizando una mezcla natural de agregado fino o el uso de un mayor contenido de cementante (tal vez como ceniza volante o puzolanas) para mejorar la trabajabilidad y disminuir el sangrado. El concreto que sangra en exceso es más difícil de bombear y puede no ser bombeable si la presión de bombeo expulsa el agua del concreto.

3.2.4. Exudación

También conocido como sangrado del concreto, está influenciado por proporciones de la mezcla y por las características de los materiales, contenido de aire, revenimiento, uso de minerales y aditivos químicos, en particular la angulosidad y la clasificación del agregado fino. Un valor alto del sangrado puede ser indeseable, particularmente para el bombeo y en el acabado fresco del concreto.

Por el contrario, una alta tasa de sangrado es conveniente, en concreto procesado al vacío ya que el agua puede ser más fácil de remover. Además, se pueden producir rayas de arena en las paredes. El acabado del concreto puede ser dañado y puede debilitar la superficie del concreto. El sangrado también puede reducir el potencial de agrietamiento por contracción y características angulares del agregado fino así como a las proporciones de la mezcla. El uso de agregados más finos, mezcla de arena, un mejor control y clasificación de agregados finos manufacturados, el aumento del cemento y/o el contenido de puzolanas, uso de algunos aditivos químicos e inclusión de aire son factores que pueden reducir el sangrado.

3.2.5. Características de acabado

La forma angular, la clasificación de agregados, la cantidad de sangrado y proporciones de la mezcla del concreto son factores que pueden influir en el acabado. En caso que ocurra algún problema de acabado en el trabajo debe ser observado de forma muy crítica. Asimismo las propiedades del material y la mezcla de proporciones se revisarán para determinar qué puede hacerse para mejorar la situación.

Posibles soluciones para mejorar el acabado del concreto incluyen el uso adicional de finos, el uso de una mezcla de arena, más cemento, más puzolana, el uso de algunos aditivos químicos, el uso de la inclusión de aire, las modificaciones de la clasificación global (tanto fino y grueso) o cambios en las proporciones de la mezcla. Si la viscosidad es el problema, menos fino en el agregado fino, menos cemento, menos puzolana, ajustes de aditivos químicos o la reducción en el contenido de aire puede ayudar. Si el problema es el sangrado excesivo, su reducción puede llevarse a cabo como se discutió previamente. El agua del sangrado puede ser removida por arrastre o esteras de aspirado.

Si el problema es el agregado fino o grueso en el tamaño de tamices 9,5 a 2,36 mm (3/8" a No. 8) el golpeteo hacia arriba o balanceo, como el de la llana al pasar sobre el concreto, la cantidad de estos tamaños puede ser excesivo. Además, este problema puede ser atribuido a una gran cantidad de partículas muy planas y alargadas en el tamaño de tamices 9,5 a 4,75 mm (3/8" No. 4). La reducción o eliminación de estos tamaños por lo general puede mejorar tanto la trabajabilidad y características de acabado.

3.2.6. Contenido de aire

El aumento de la trabajabilidad cuando el concreto se encuentra en estado plástico, es debido a que una parte de las burbujas de aire aumentan el volumen de la pasta y por otra actúan como lubricante de los agregados, permitiendo una mejor movilidad. Esto quiere decir que para una misma consistencia es factible reducir el contenido de agua de manera que se disminuya la relación agua-cemento y se recupere parte de la resistencia que se pierde por la presencia de vacíos dentro del concreto.

Una cantidad significativa de agregado que pasa el tamiz de 75 micras (No. 200), sobre todo en la forma de arcilla, puede reducir el contenido de aire en el concreto, por lo tanto, más aditivo de inclusor de aire en la mezcla debe ser utilizado. Algunas veces este material resulta del uso de agregados finos "sucios" y es muy variable, lo que causa problemas en el control del contenido de aire, así como causar otros problemas que incluyen variaciones en el requerimiento de agua, el revenimiento y la resistencia.

Por el contrario, mayores cantidades de tamaño de 600 a 300 micras (Tamices No. 30 y 50) de los agregados finos disminuirá la dosificación de mezcla de inclusión de aire necesario para el mismo contenido de aire. La forma angular del agregado fino no ha demostrado tener un efecto significativo en la dosis necesaria en el contenido de aire inferior a ocho por ciento. Los materiales orgánicos contenidos en algunos agregados requieren un cambio en la dosificación de aditivos de inclusión de aire y puede dar lugar a grandes burbujas de aire y un sistema desfavorable de vacíos. El uso de inclusión de aire en la dosificación de la mezcla puede variar según las diferentes fuentes de agregado.

3.2.7. Gradación de los agregados

La distribución granulométrica de los agregados es un factor que incide en la trabajabilidad de una mezcla de concreto, debido a que un agregado mal gradado presenta exceso de vacíos que deben ser llenados con pasta en el caso de la arena y con mortero en el caso del agregado grueso, para que la mezcla sea manejable y no quede porosa.

El caso de la arena es el más crítico debido a que ésta no debe retener más de un 45% de material entre dos mallas consecutivas, considerando la

serie Tyler de tamices (No. 4, 8, 16, 30, 50, 100). Debe evitarse la utilización de arenas muy finas o muy gruesas, ya que con las primeras el requerimiento de agua es muy alto y fácilmente se segregan y con las segundas se obtienen mezclas muy ásperas y poco cohesivas.

Por lo general, para que las arenas proporcionen una adecuada trabajabilidad, el valor del módulo de finura debe tener un límite inferior de 2.2 en arenas finas y un límite superior a 3.0 en arenas gruesas. Sin embargo, esto no implica que no se puedan diseñar mezclas de concreto con arenas que se salgan de estos límites, ya que es posible en determinados casos hacer una combinación óptima de los agregados disponibles.

3.2.8. Forma y textura superficial de los agregados

Para mantener una trabajabilidad comparable los agregados gruesos con partículas alargadas, aplanadas o de forma cúbica y textura rugosa exigen mayor cantidad de arena, agua y pasta en una mezcla, que los compuestos por partículas redondeadas y lisas, debido a fricción generada por el atascamiento que existe entre las partículas.

Son más adecuados los agregados naturales (cantos rodados y arenas de río) que los obtenidos por los procesos de trituración. En caso de utilizarse agregados triturados, éstos deben tener forma aproximadamente cúbica y con un porcentaje máximo de partículas aplanadas o alargadas de 15% para que su efecto sobre la trabajabilidad no sea importante.

3.2.9. Relación pasta-agregados

La relación que hay entre la cantidad de pasta y el área superficial de los agregados que ésta debe cubrir y lubricar es un factor que afecta la trabajabilidad de una mezcla de concreto. Esto es lo que se conoce como relación pasta-agregado.

En la medida que esta relación tenga un valor alto, los agregados se podrán mover libremente dentro de la masa. Pero si la cantidad de pasta se reduce a tal punto que no sea suficiente para llenar los espacios vacíos entre las partículas de los agregados y permitir que éstos floten, la mezcla se volverá granulosa y áspera.

3.2.10. Relación arena-agregados

Una mezcla que tenga un bajo contenido de arena es difícil de manejar, colocar y terminar, con el inconveniente adicional de tener tendencia a la segregación y exudación por ser una mezcla poco cohesiva, en su caso el concreto tiene una apariencia pedregosa (exceso de agregado grueso).

Por el contrario, cuando el porcentaje de arena es elevado, hay necesidad de añadir agua o pasta en exceso para que la mezcla sea manejable, presentándose también tendencia a la segregación o exudación. En estos casos, la mezcla presenta una apariencia pastosa (exceso de arena).

En general, el porcentaje de arena que requiere una mezcla preparada con una cantidad de pasta dada (relación agua-cemento fija) es menor si la arena es fina y mayor si es gruesa, para obtener una trabajabilidad determinada.

3.2.11. Aditivos

Dentro de las funciones de los aditivos está la de mejorar las condiciones de trabajo de una mezcla de concreto en estado plástico, de manera que se pueda mejorar su trabajabilidad, especialmente cuando los agregados son deficientes en finos y el cemento tiene tendencia a producir exudación.

En la clasificación se encuentran los aditivos reductores de agua y los reductores de agua de alto rango (superplastificantes), que permiten aumentar la plasticidad de una mezcla, sin necesidad de aumentar el contenido de agua o bien reducir el contenido de agua para una consistencia dada manteniendo una misma relación agua-cemento.

Los aditivos para inclusión de aire, se recomiendan para los agregados de escoria a fin de incorporar aire en el concreto que ayuda a la trabajabilidad, incluso en aplicaciones de descongelación. El aire incluido debe por supuesto, ser utilizado en todo el concreto expuesto a la congelación y descongelación. El aire incluido es especialmente deseable cuando el concreto de agregado de escoria se va a bombear. También es conveniente mantener la escoria en una condición saturada antes de su dosificación y mezcla para asegurar que el agua de mezclado no es absorbida por el agregado grueso.

3.2.12. Segregación

Es la separación de los materiales que constituyen una mezcla heterogénea como es el concreto, de manera que su distribución deje de ser uniforme por falta de cohesión.

Entre las causas inherentes al concreto, que pueden producir segregación, se encuentran la diferencia en tamaño de las partículas y su distribución granulométrica, así como la densidad de los constituyentes y su proporción dentro de la mezcla. Otras causas que dependen del manejo y la colocación pueden ser el mal mezclado, transporte largo y sometido a vibración, colocación inadecuada y sobre vibración al consolidarlo.

En general, la segregación se puede presentar de dos maneras: en la primera las partículas gruesas tienden a separarse por desplazamiento sobre los taludes de la mezcla amontonada o porque se asientan más que las partículas finas por acción de la gravedad; ésta generalmente ocurre en mezclas secas y poco cohesivas. En la otra la segregación es la separación de la pasta (cemento y agua) de la mezcla, lo cual ocurre en mezclas húmedas y con pasta muy diluida.

Para evitar la presencia de segregación en la mezcla se debe proporcionar adecuadamente los materiales y revisar el aspecto de la mezcla cuando se prueban los diseños. Por otra parte, con unos adecuados procedimientos de mezclado, transporte, colocación y consolidación del concreto, como los descritos en el documento ACI-304, la probabilidad de segregación se reduce considerablemente.

3.2.13. Temperatura

La temperatura del concreto fresco afecta todas las propiedades del concreto en estado plástico, especialmente el asentamiento y el contenido de aire. Por ello, es conveniente verificarla, aunque hoy en día no existe ningún método normalizado para medirla. Sin embargo, el empleo de un termómetro de bolsillo con precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ es suficiente (ASTM C1064).

Las temperaturas elevadas en el concreto dan por resultado que se requiera mayor cantidad de agua de mezclado para mantener un determinado asentamiento y mayor cantidad de algún aditivo de inclusión de aire para producir el contenido de aire requerido.

La temperatura del concreto fresco depende del aporte calorífico de cada uno de sus componentes, ya que la influencia de cada material depende de su calor específico, de su masa y de su temperatura, además del calor liberado por la hidratación del cemento, la energía añadida durante el mezclado y el calor absorbido o entregado al medio ambiente.

Las normas estipulan una temperatura media de la mezcla de concreto fresco comprendida entre 10°C y 29°C en climas cálidos; sin embargo, la máxima establecida es de 32°C, por razones de velocidad, hidratación y endurecimiento del cemento, ya que una mayor temperatura se produce una hidratación más rápida, pero menos eficiente y por lo tanto un fraguado acelerado, dando lugar a una estructura física menos uniforme y pobre.

3.2.14. Otras propiedades

El tiempo de fraguado del concreto no suele ser afectado por el agregado. Sin embargo, la presencia de sales solubles o materiales orgánicos en el agregado puede influenciar las temperaturas y propiedades de calor específico de los materiales que lo conforman.

El agregado al estar presente en mayor cantidad, tiene un gran efecto sobre la temperatura del concreto. En el clima caluroso, la aspersión o el sombreado de las reservas de agregados reducen la temperatura del concreto. En los casos que se necesitan concretos muy fríos el concreto puede ser

enfriado al mezclar con agua fría o rociando el agregado existente (ACI 305R). Cuando hace frío, la calefacción puede ser necesaria para obtener concreto de agregados con temperaturas deseadas (ACI 306R). Los agregados congelados no deben ser utilizados en mezclas de concreto.

La gravedad específica y la cantidad de cada agregado utilizado en el concreto afectarán a la unidad de peso resultante del concreto fresco. Con agregados de alta porosidad, el peso unitario del concreto puede variar en función de que la absorción ha sido satisfecha por humedecimiento previo del agregado antes de ser procesados los lotes.

3.3. Factores externos que afectan el concreto fresco

Entre los factores externos que pueden afectar la trabajabilidad de una mezcla se encuentran los agentes atmosféricos (sol, lluvia, viento, etc.), la temperatura y el tiempo transcurrido entre el mezclado y la colocación.

3.3.1. Condiciones de clima

Los agentes atmosféricos pueden cambiar la consistencia de la mezcla debido a que si hay evaporación por causa del sol o del viento, la mezcla se puede endurecer rápidamente y por consiguiente perder trabajabilidad. Por el contrario, si hay lluvia, además de un aumento en la relación agua-cemento y pérdida de resistencia, la humedad de la mezcla se puede incrementar hasta el punto de causar segregación. Por tal motivo, las condiciones en que se va a producir y colocar el concreto deben ser estudiadas con anterioridad, con el fin de proveer las protecciones del caso.

Por otra parte, la trabajabilidad de una mezcla se ve afectada también por la temperatura ambiente, aunque en su sentido estricto lo que importa es la temperatura del concreto. Sin embargo, resulta lógico pensar que el tiempo de vida útil de una mezcla de concreto, en estado plástico, para su colocación es más corta en clima cálido que en clima frío.

3.3.2. Condiciones de producción y colocación

Finalmente, hay algunos otros factores externos que influyen en el grado de trabajabilidad de una mezcla, entre los cuales se cuentan los siguientes, teniendo presente que las condiciones de producción, colocación y tipo de obra no son iguales en todos los casos:

- Método de dosificación
- Método de mezclado
- Sistema de transporte
- Sistema de colocación
- Tipo de compactación
- Tipo de acabado
- Tipo de obra

4. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON ESCORIA

Por medio de este se puede encontrar los diversos rangos que distingue las mezclas normales de las con la escoria y determinar la apropiada según los requerimientos deseados.

4.1. Diseño y dosificación de mezclas de concreto

El proceso de determinación de las características requeridas del concreto y que se pueden especificar se llama diseño de mezcla. Las características pueden incluir: Propiedades del concreto fresco, propiedades mecánicas del concreto endurecido, exclusión o límite de ingredientes específicos. El diseño de la mezcla lleva al desarrollo de la especificación del concreto.

La dosificación de la mezcla se refiere al proceso de determinación de las cantidades de los ingredientes del concreto, usando materiales locales, para que se logren las características especificadas. Un concreto adecuadamente proporcionado debe presentar las siguientes cualidades:

- Trabajabilidad aceptable del concreto fresco
- Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto endurecido
- Economía

Es importante el entendimiento de los principios básicos del diseño de mezcla, tales como los cálculos usados para establecer las proporciones de la mezcla. Las cualidades anteriormente citadas se pueden alcanzar en las construcciones de concreto sólo con la selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla.

Tal fue el caso de las pruebas realizadas para la elaboración de este trabajo de graduación donde se realizaron los diseños de mezcla sustituyendo agregados finos o gruesos y también ambos, sustituyéndolos por la escoria y dosificando con diferentes cantidades de agua y cemento para llegar a una mezcla adecuada.

4.2. Descripción de la dosificación según ACI - 211.1

Este método tiene fundamento en la expresión b/b_o que fue introducida por Richart y Talbot entre 1921 y 1923 en los Estados Unidos de América. En esta expresión:

b = Volumen absoluto o sólido del agregado grueso, por unidad de volumen de concreto.

b_o = Volumen absoluto o sólido del agregado grueso, por unidad de volumen compactada de agregado grueso.

b/b_o = Volumen compactado de agregado grueso, por unidad de volumen de concreto.

Esta relación y su significado se comprenden fácilmente haciendo la siguiente consideración:

$$V = b + (PV) \quad \text{ecuación (1)}$$

Dónde:

V = Volumen seco y compactado del agregado grueso por volumen unitario de concreto. (Volumen de las partículas de agregado más el volumen de los espacios entre partícula y partícula).

b = Volumen absoluto o sólido del agregado grueso, por unidad de volumen de concreto.

P = Porcentaje de vacíos en el conjunto. (Espacios entre partículas y partículas).

Pero, el volumen b_o puede ser expresado como:

$$b_o = 1 - (P1) \quad \text{ecuación (2)}$$

Luego:

$$P = 1 - b_o$$

Remplazando este valor en la ecuación (1) se obtiene:

$$V = b + (1 - b_o) V$$

$$V = b + V - (b_o V)$$

Luego,

$$b = b_o V$$

Dónde:

$$V = b / b_o \quad \text{ecuación (3)}$$

El valor de b_o se puede calcular a partir de la masa unitaria seca y compactada con varilla del agregado grueso y de su densidad aparente seca, puede que:

$$b_o = \frac{\text{Masa unitaria compactada}}{\text{Densidad aparente seca}} \quad \text{ecuación (4)}$$

El Método ACI 211 aprovecha que la relación óptima del volumen seco y compactado de agregado grueso al volumen total de concreto, depende únicamente del tamaño máximo del agregado y de la granulometría del agregado fino. En este caso. La forma de las partículas del agregado grueso no entra directamente en la relación debido a que, por ejemplo, el agregado triturado tiene un volumen aparente mayor para un mismo peso (es decir, masa unitaria menor) que un agregado bien redondeado. Por lo tanto, el factor de forma es automáticamente tomado en cuenta en la determinación de la masa unitaria.

4.3. Mezclas propuestas

Son mezclas realizadas a través de diseño de mezcla para determinar sus propiedades y compararlas con mezclas de control.

Tabla No. II. **Proporciones de diseño de mezcla por peso (kg.) para 1 m.³**

Tipo de mezcla	Proporciones de diseño de mezcla por peso (Kg) para 1 m. ³								Observaciones
	Cemento	Agregado fino	Agregado 3/8"	Escoria	Agua (l.)	A/C	Aire (%)	Fluidificante (ml.)	
Control No.1	460	1085	790	0	207	0.45	2.5	9	
Control No. 2	440	955	780	0	198	0.45	3	9	El agregado fino se mezcló con arena lavada.
Prueba No. 1	460	1135	425	400	207	0.45	2.5	9	Sustitución de ambos agregados
Prueba No. 2	440	700	780	284	198	0.45	4.25	9	Sustitución de agregado fino
Prueba No. 3	440	477.05	390	1285	198	0.45	3	7.56	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 4	440	477.05	390	1285	198	0.45	3	7.56	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 5	440	477.05	390	1285	198	0.45	3	7.56	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 6	440	477.05	390	1285	198	0.45	3	7.56	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 7	440	477.05	390	1285	198	0.45	3	7.56	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 8	440	477.05	390	1285	198	0.45	3	7.56	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 9	440	477.05	390	1285	198	0.45	3	7.56	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 10	606	275	0	1800	212.1	0.35	3	7.56	Sustitución de agregados y mayor cantidad de cemento
Prueba No. 11	483	220	0	2215	169.1	0.35	3	7.56	Sustitución de agregados y mayor cantidad de cemento

Fuente: elaboración propia.

Tabla No. III. **Proporciones de diseño de mezcla por peso (kg.) para prueba**

Proporciones de diseño de mezcla por peso (Kg) para prueba								
Tipo de mezcla	Cemento	Agregado fino	Agregado 3/8"	Escoria	Agua (l.)	A/C	Fluidificante (ml.)	Observaciones
Control No.1	27.6	92.7	140.1	0	13	0.47	540	
Control No. 2	26.4	83.7	130.5	0	12	0.45	540	El agregado fino se mezcló con arena lavada.
Prueba No. 1	27.6	95.7	121.2	24	12.42	0.45	540	Sustitución de ambos agregados
Prueba No. 2	26.4	68.4	115.2	17.04	12	0.45	540	Sustitución de agregado fino
Prueba No. 3	26.4	55.05	78.45	155.55	12	0.45	540	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 4	26.4	55.05	78.45	155.55	15	0.57	540	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 5	26.4	55.05	78.45	155.55	12	0.45	540	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 6	26.4	55.05	78.45	155.55	16	0.61	540	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 7	26.4	55.05	78.45	155.55	12	0.45	540	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 8	26.4	55.05	78.45	155.55	12	0.45	540	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 9	26.4	55.05	78.45	155.55	12	0.45	540	Sustitución del 50% de ambos agregados
Prueba No. 10	38	28.32	0	130	14.4	0.38	680	Sustitución de agregados y mayor cantidad de cemento
Prueba No. 11	29	13.2	0	134	10.14	0.35	454	Sustitución de agregados con 40 Kg de escoria fina

Fuente: elaboración propia.

4.4. Propiedades de las mezclas frescas

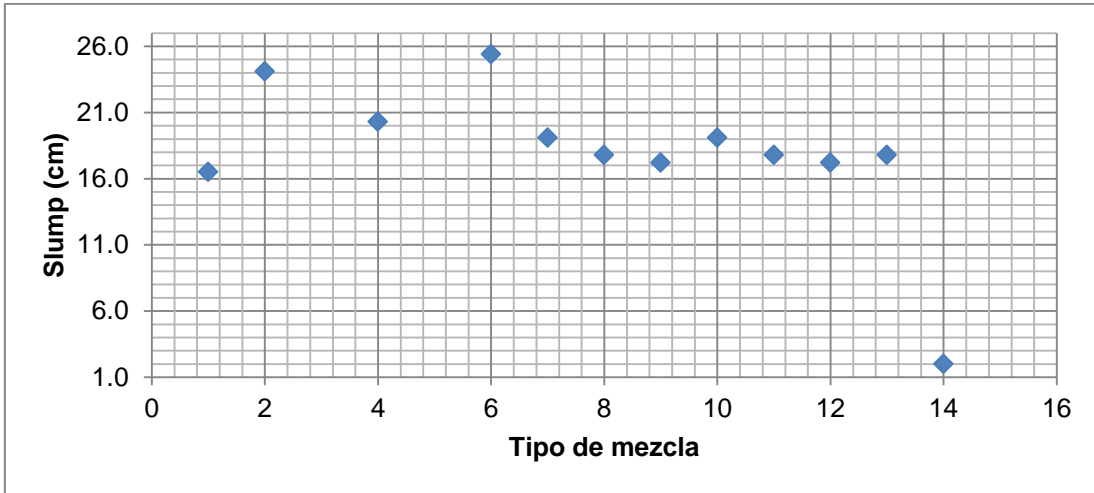
Son mezclas realizadas para determinas sus propiedades y compararlas con mezclas de control, para efectos de diseño.

Tabla No. IV. Propiedades de las mezclas frescas

Propiedades de las mezclas frescas						
Tipo de mezcla	Slump (cm)	Temperatura (°C)	Pu (kg/m ³)	Aire (%)	Agua (lt.)	Observaciones
Control No.1	16.5	29	2376	3.00	13.00	
Control No. 2	24.1	27	2236	3.20	12.00	
Prueba No. 1	20.3	29	2390	4.25	12.42	
Prueba No. 2		27	2324	1.50	12.00	55 cm de flujo
Prueba No. 3	25.4	27	2365	1.80	12.00	
Prueba No. 4	19.1	25	2166	2.20	15.00	
Prueba No. 5	17.8	28	2396	1.50	12.00	
Prueba No. 6	17.2	29	2143	0.80	16.00	
Prueba No. 7	19.1	26	2428	2.20	12.00	
Prueba No. 8	17.8	27	2238	1.50	12.00	
Prueba No. 9	17.2	25	2372	2.40	12.00	
Prueba No. 10	17.8	32	2306	3.00	14.40	
Prueba No. 11	2.0	29	2631	2.80	10.14	

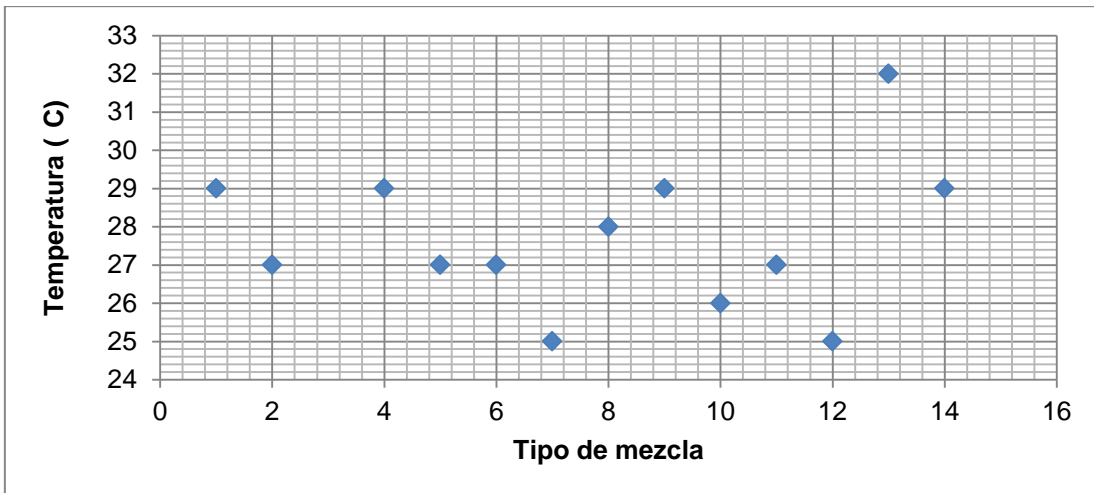
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Gráfica de slump



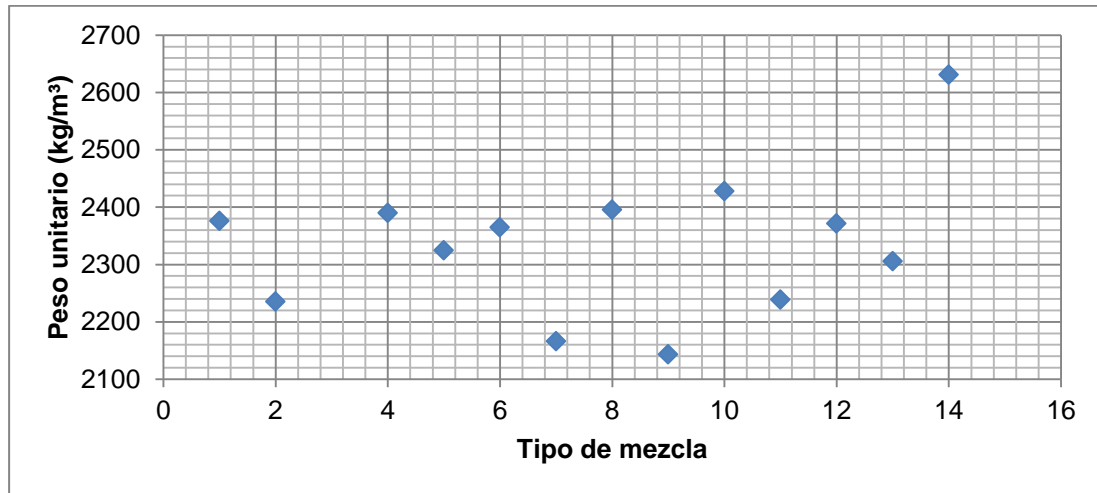
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Gráfica de temperatura



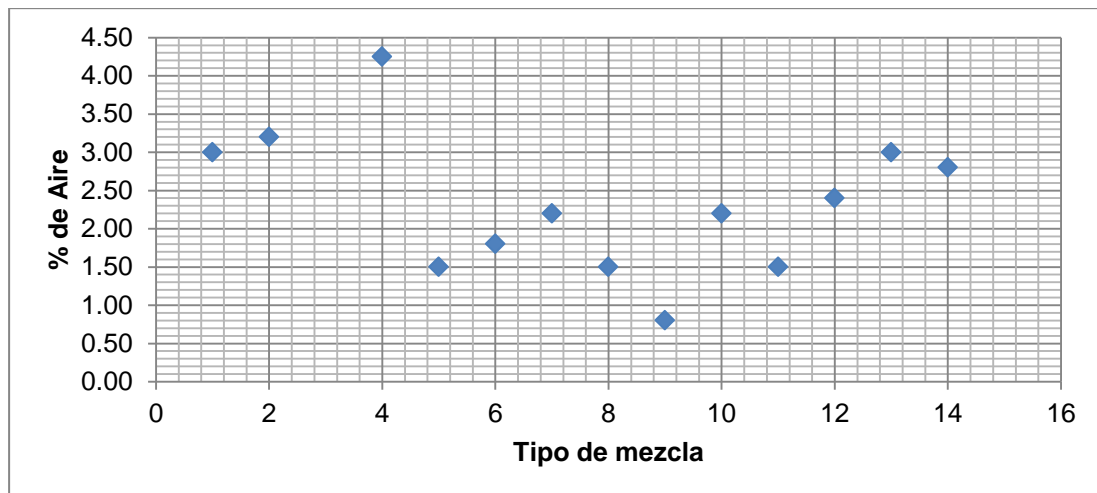
Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Gráfica de peso unitario



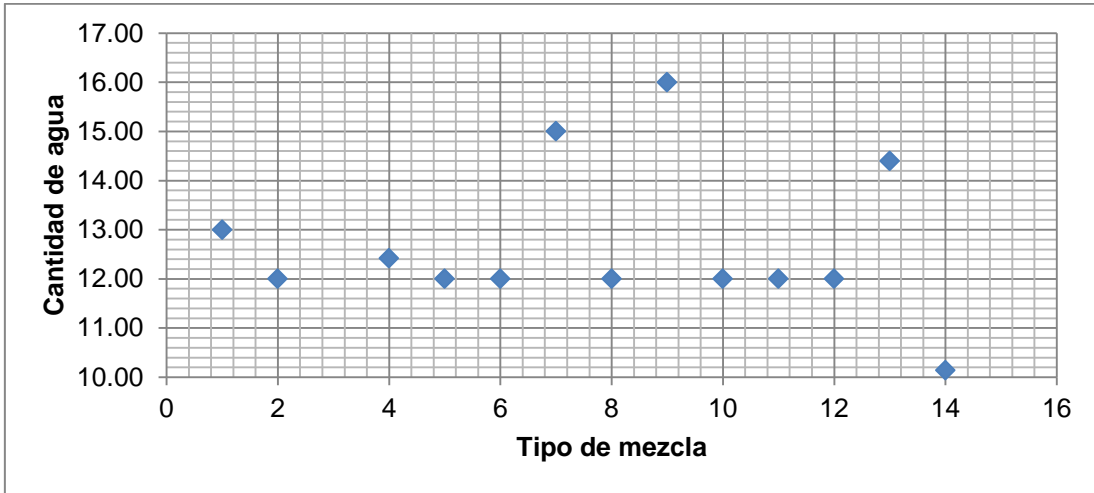
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Gráfica de porcentaje de aire



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Gráfica de cantidad de agua**



Fuente: elaboración propia.

4.5. Resultados a la compresión

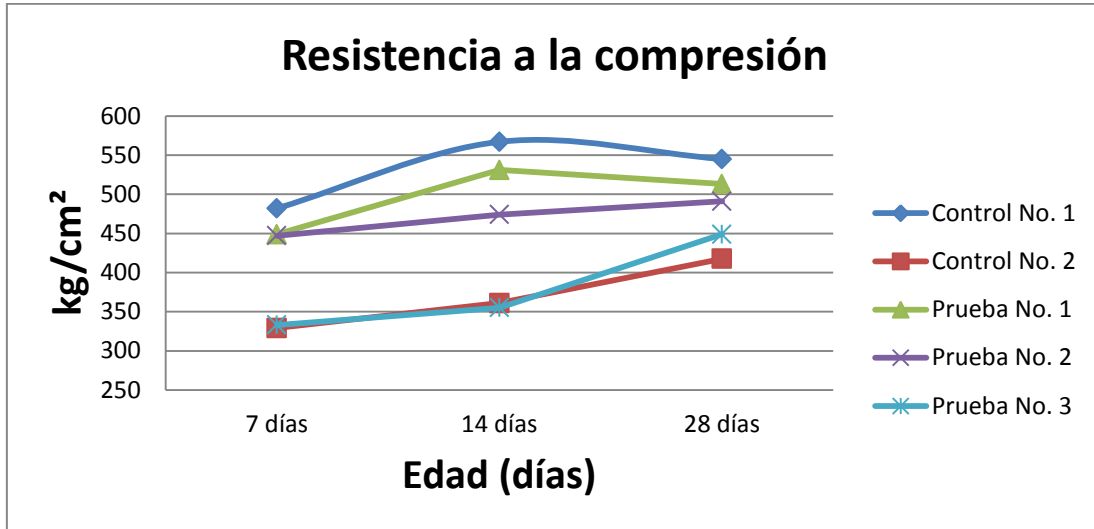
Resultados obtenidos de ensayar cilindros de concreto con escoria a diversas edades y comparadas con muestras de control.

Tabla No. V. **Resultados a la compresión**

Resistencia a la compresión (kg/cm²)			
Tipo de mezcla	7 días	14 días	28 días
Control No. 1	482	567	545
Control No. 2	329	361	418
Prueba No. 1	449	531	513
Prueba No. 2	447	474	491
Prueba No. 3	333	355	449
Prueba No. 4	377	414	488
Prueba No. 5	335	355	412
Prueba No. 6	303	346	374
Prueba No. 7	161	190	211
Prueba No. 8	427	381	407
Prueba No. 9	354	379	404
Prueba No. 10	581	615	612
Prueba No. 11	629	671	716

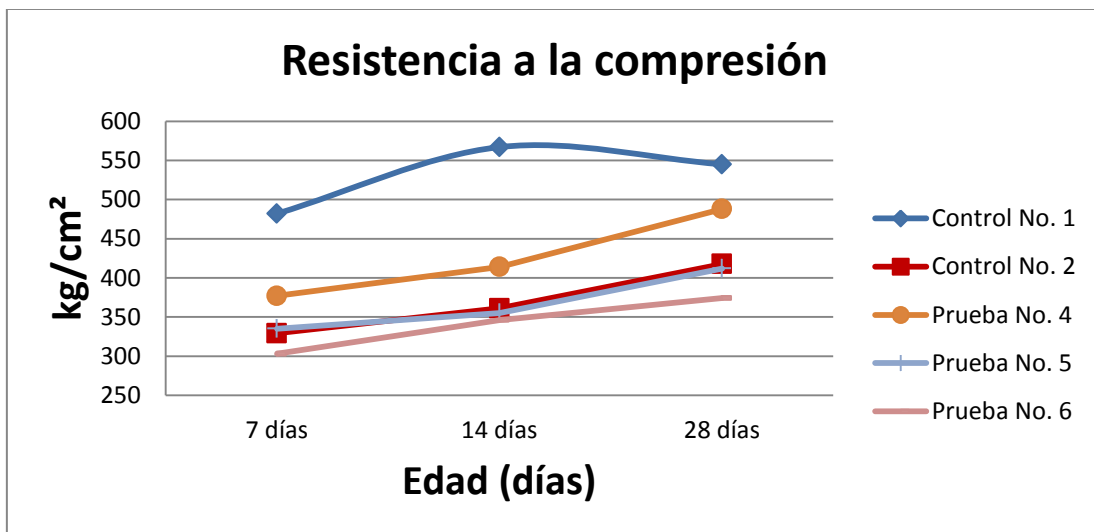
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Gráfica comparativa No. 1



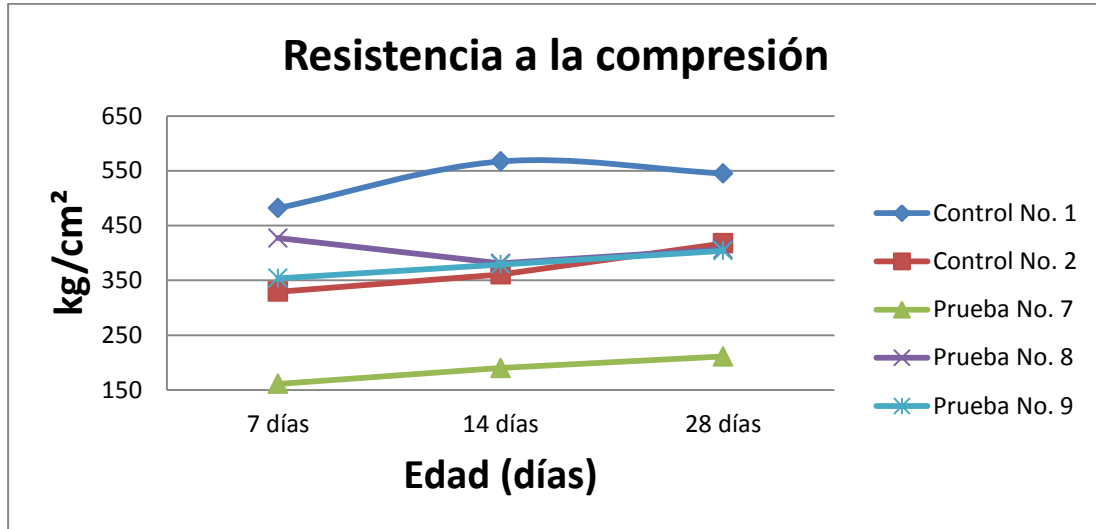
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Gráfica comparativa No. 2



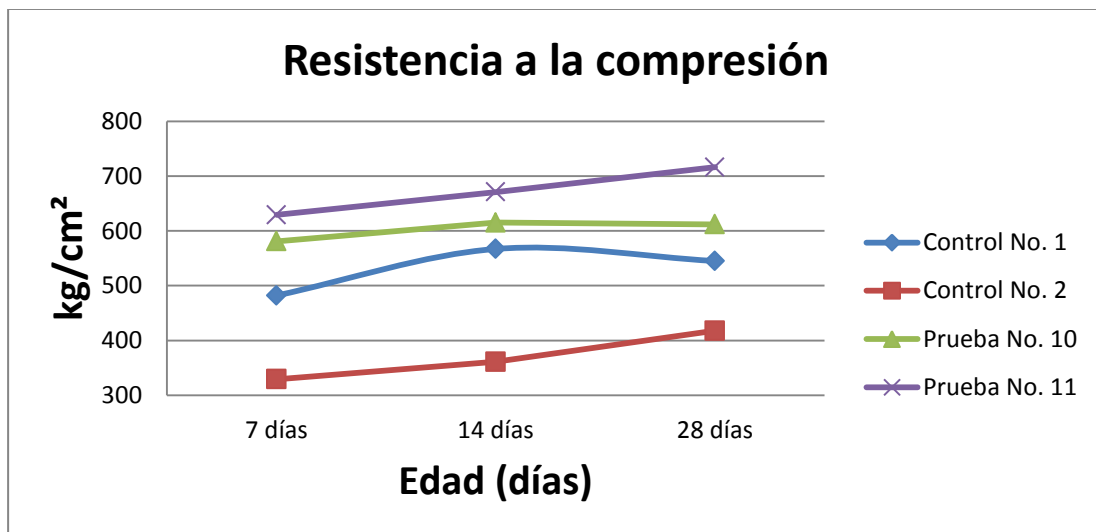
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Gráfica comparativa No. 3



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Gráfica comparativa No. 4



Fuente: elaboración propia.

4.6. Gráficas

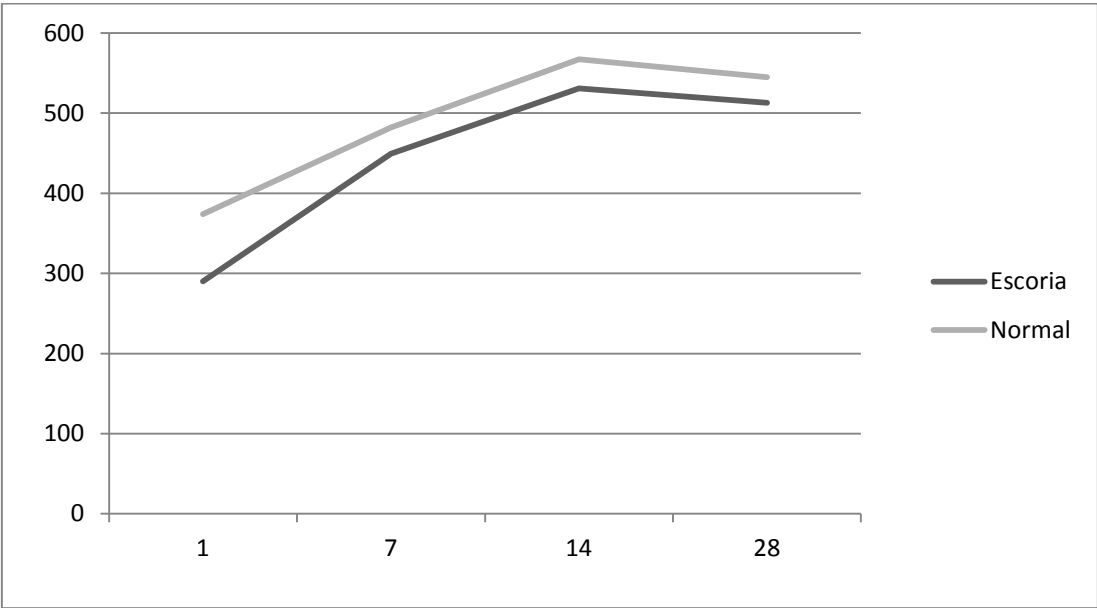
Resultados obtenidos de los ensayos realizados en diversas edades.

Tabla VI. **Cuadro No. 1**

Días	Normal (kg/cm²)	Escoria (kg/cm²)
1	374	290.10
7	482	449.37
14	567	530.99
28	545	512.98

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Gráfica No. 1**



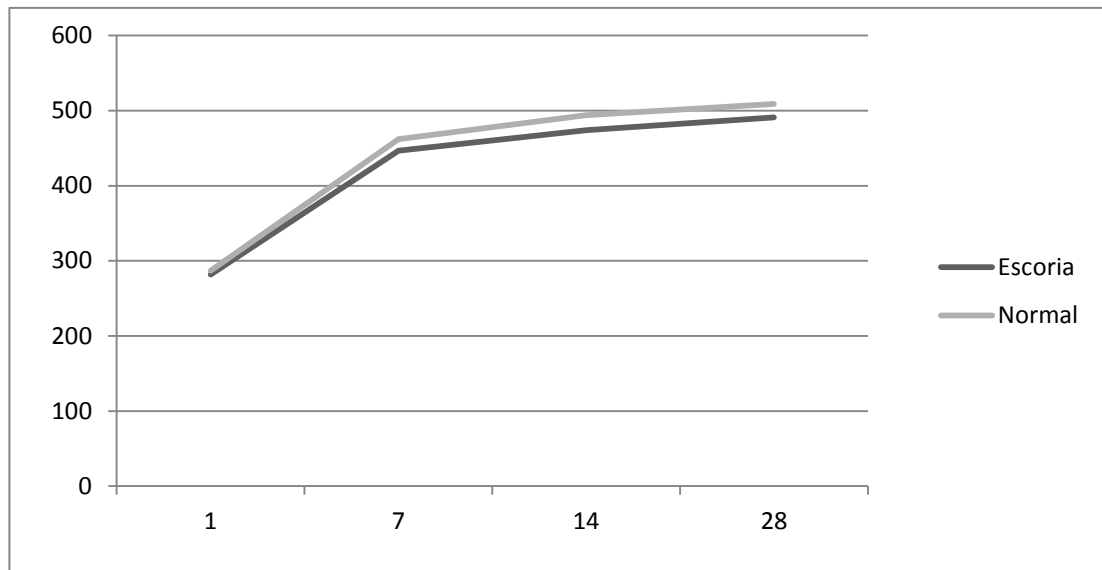
Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Cuadro No. 2**

Días	Normal (kg/cm ²)	Escoria (kg/cm ²)
1	287	281.73
7	462	446.81
14	494	473.80
28	509	491.17

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Gráfica No. 2**



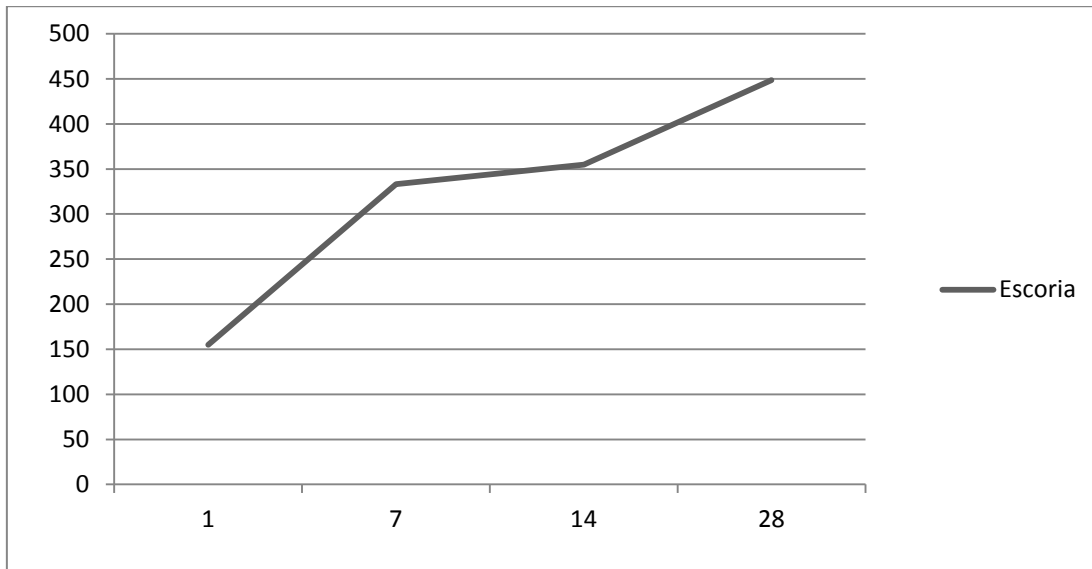
Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Cuadro No. 3

Días	Normal (kg/cm ²)	Escoria (kg/cm ²)
7		333.08
14		354.70
28		448.66

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Gráfica No. 3



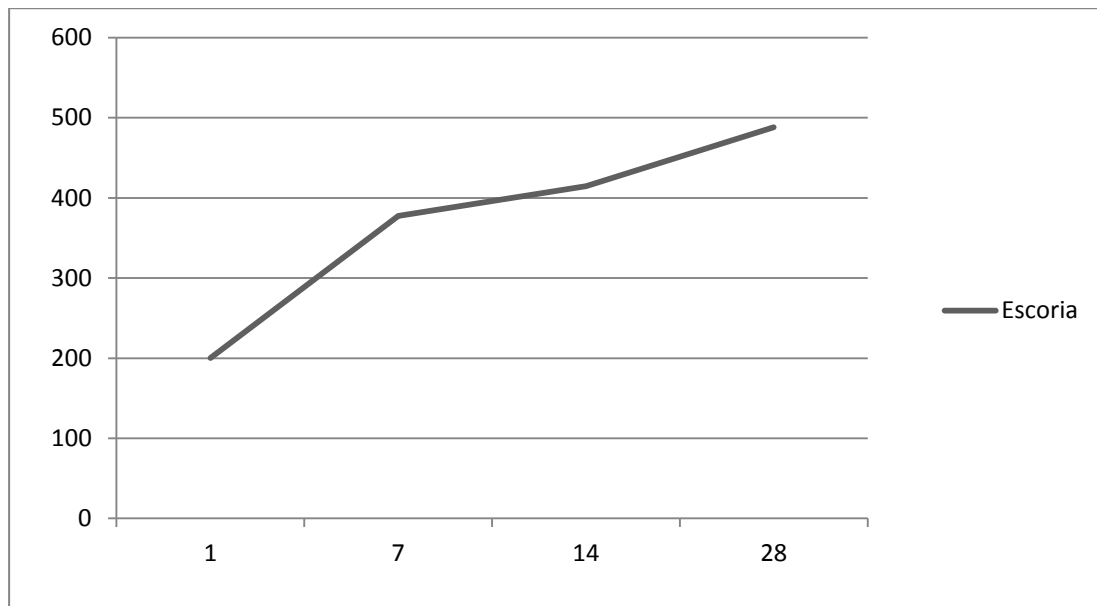
Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Cuadro No. 4**

Días	Normal (kg/cm²)	Escoria (kg/cm²)
7		377.36
14		414.47
28		488.21

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Gráfica No. 4**



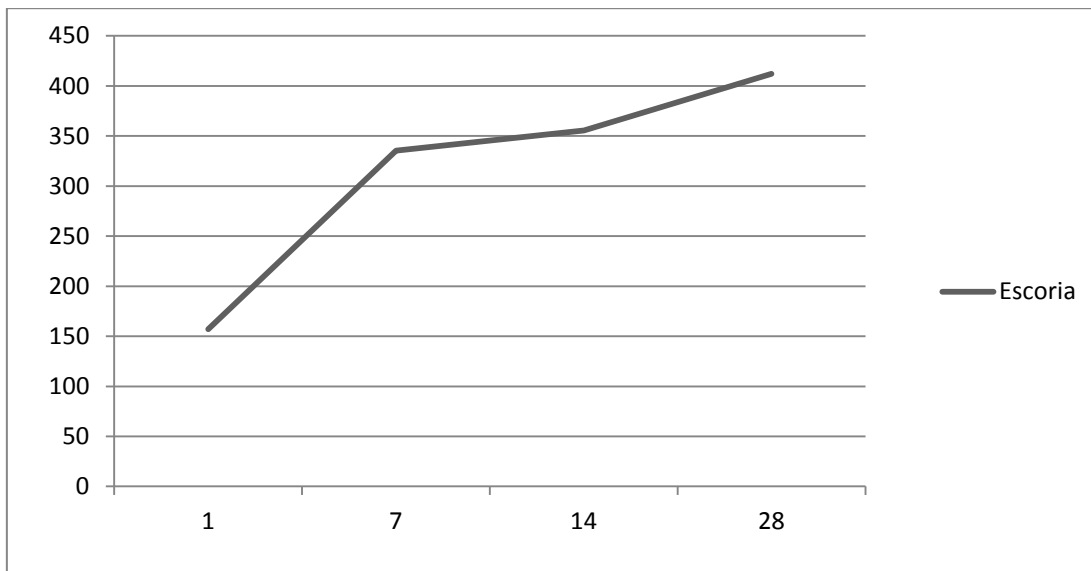
Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Cuadro No. 5**

Días	Normal (kg/cm ²)	Escoria (kg/cm ²)
7		335.32
14		355.32
28		411.99

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Gráfica No. 5**



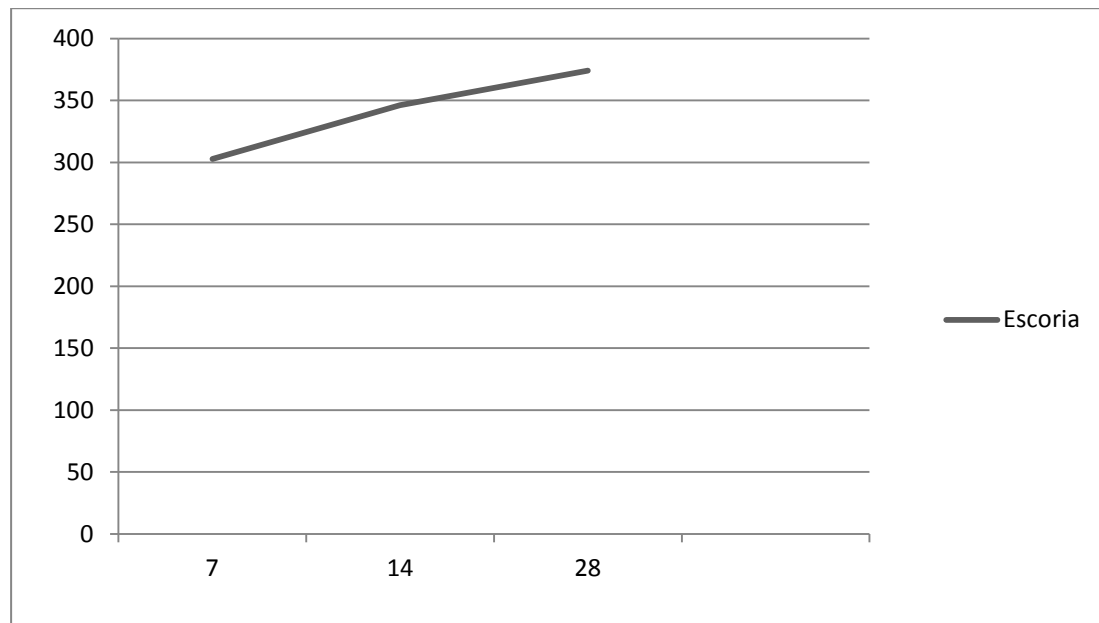
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Cuadro No. 6**

Días	Normal (kg/cm²)	Escoria (kg/cm²)
7		302.84
14		346.24
28		374.08

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Gráfica No. 6**



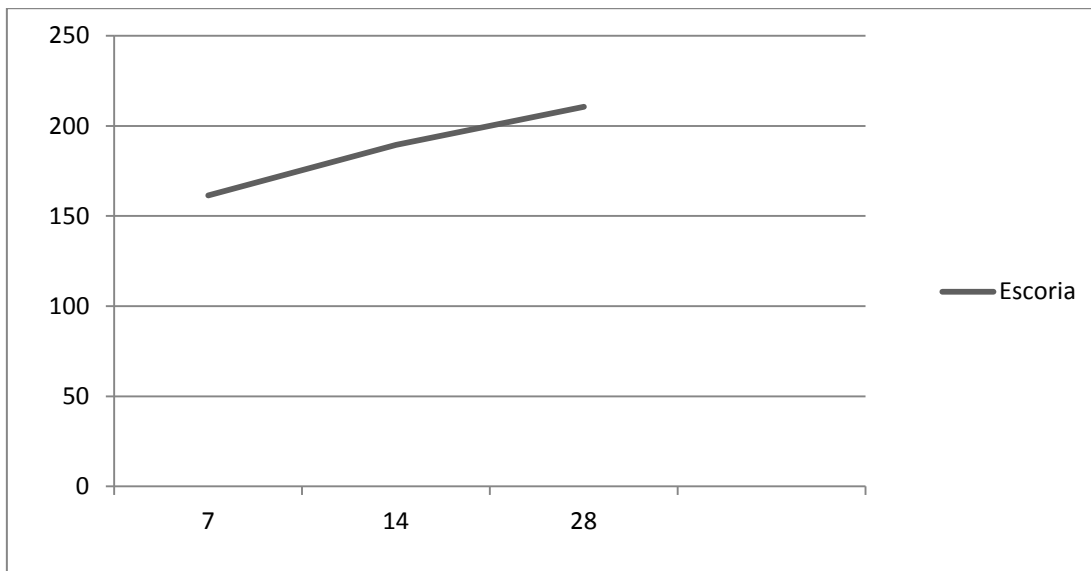
Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Cuadro No. 7**

Días	Normal (kg/cm ²)	Escoria (kg/cm ²)
7		161.49
14		189.53
28		210.61

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Gráfica No. 7**



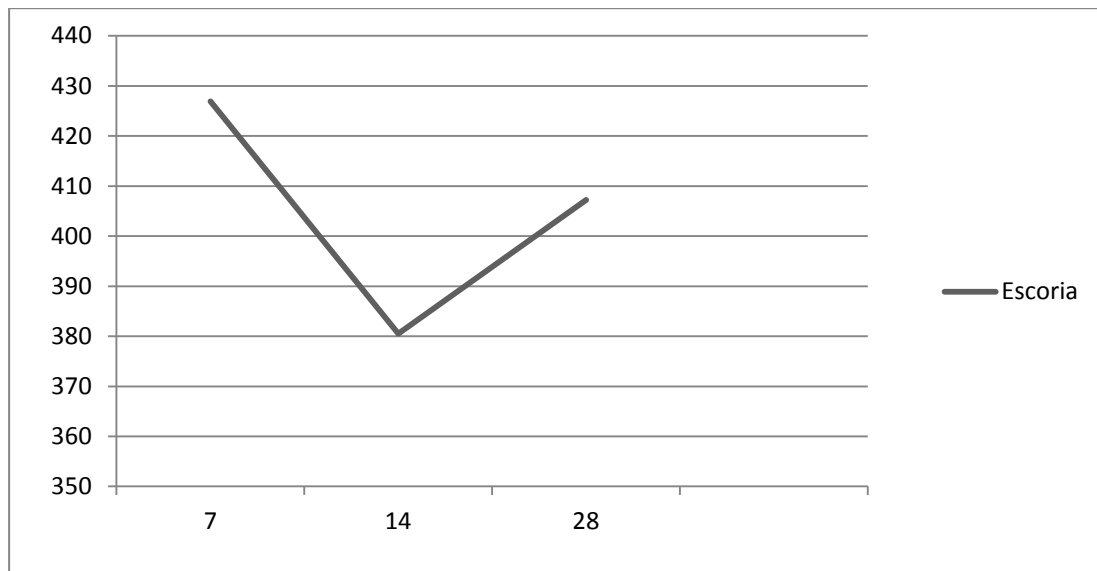
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Cuadro No. 8**

Días	Normal (kg/cm²)	Escoria (kg/cm²)
7		426.91
14		380.53
28		407.23

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Gráfica No. 8**



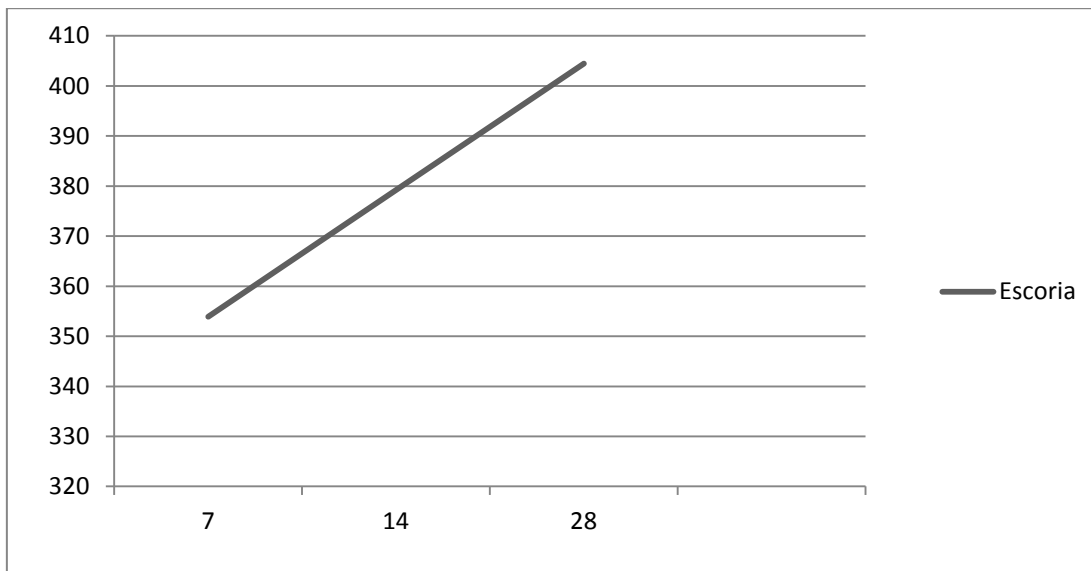
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Cuadro No. 9

Días	Normal (kg/cm ²)	Escoria (kg/cm ²)
7		353.90
14		379.20
28		404.43

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Gráfica No. 9



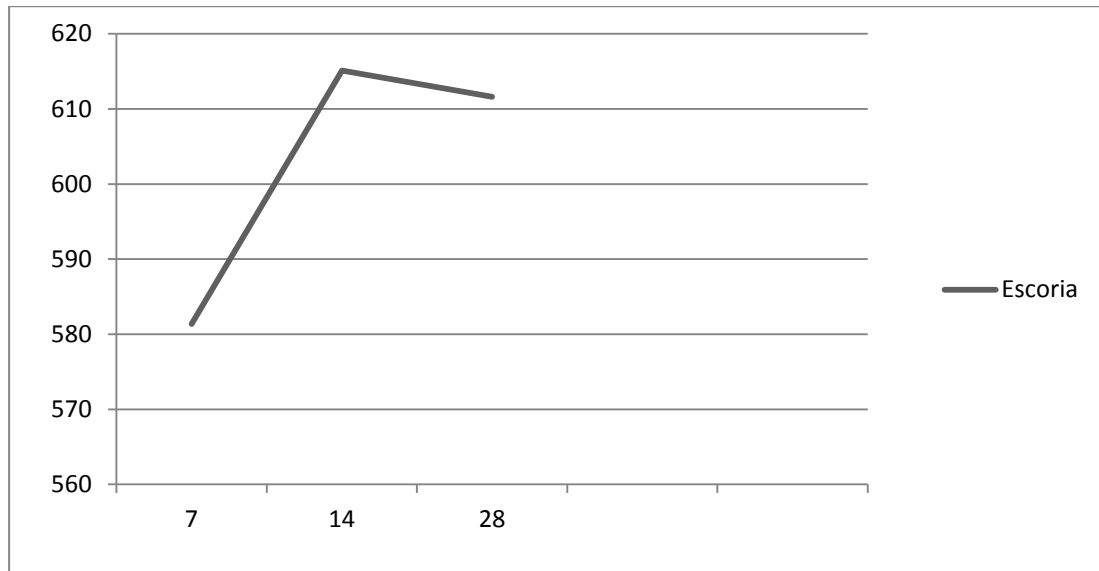
Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Cuadro No. 10**

Días	Normal (kg/cm²)	Escoria (kg/cm²)
7		581.38
14		615.11
28		611.63

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Gráfica No. 10**



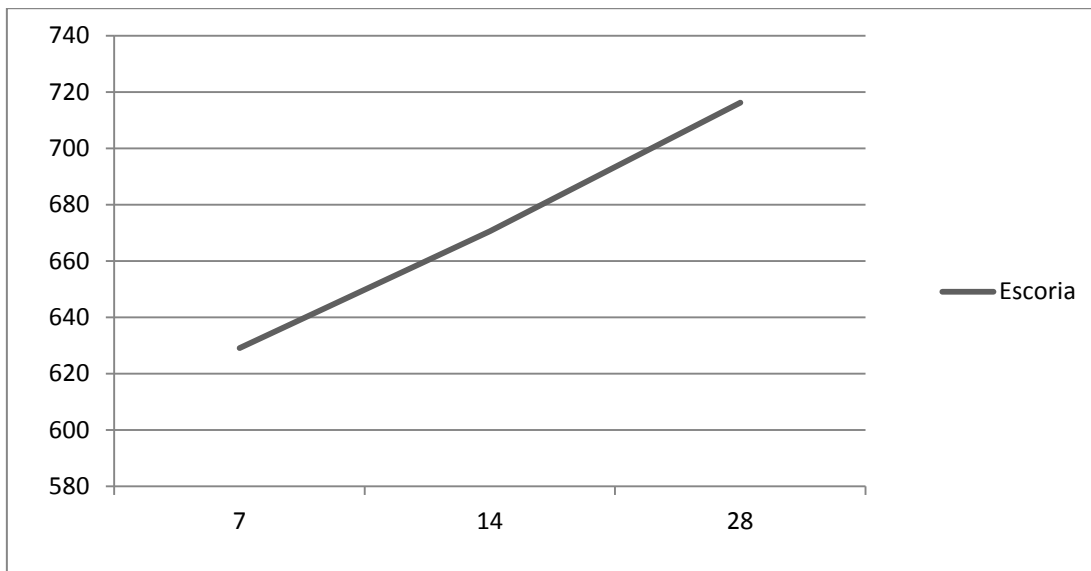
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Cuadro No. 11

Días	Normal (kg/cm ²)	Escoria (kg/cm ²)
7		629.16
14		670.56
28		716.23

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Gráfica No. 11



Fuente: elaboración propia.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Según lo establecido en la Ley de Duff Abrams para los mismos materiales y condiciones de ensayo, la resistencia de un concreto completamente compactado, a una edad dada, es inversamente proporcional a la relación agua-cemento.

Dado lo anterior, en los diseños de mezclas se realizaron dos relaciones a/c de las cuales se obtuvieron diferentes datos, que dependieron del agua requerida por la mezcla al momento de su preparación; comprobándose así las hipótesis sobre los materiales utilizados y permitiendo la descripción de cada prueba realizada.

Basándose en los diseños de mezclas control, se obtuvo en la primera mezcla una consistencia aceptable con el ensayo del cono de Abrams; se obtuvo que el porcentaje de aire y agua utilizada concuerde con el diseño propuesto. En la segunda mezcla control se utilizó la relación a/c según lo diseñado y se obtuvo resultados donde afectó el porcentaje de aire, peso unitario y una consistencia más fluida, reflejando datos fuera de los parámetros de diseño aunque con resistencias aceptables.

De los datos obtenidos en las mezclas control se diseñan las mezclas de prueba en las cuales se incorpora la escoria como parte del agregado. En la primera prueba se incorpora un pequeño porcentaje de escoria como parte del agregado grueso, obteniendo de inmediato variaciones en el porcentaje de aire y peso unitario más altos, con una consistencia aceptable y estos datos sirvieron de parámetro para realizar las otras pruebas.

En la segunda prueba se aumentó la cantidad de escoria agregada, sustituyendo tanto agregado fino como grueso, obteniendo resultados de mezcla fresca con una consistencia muy fluida y el porcentaje de aire muy bajo, no obstante la utilización de la misma cantidad de agua que en la otra prueba, obteniendo peso unitario y resistencias a la compresión similares a la primera mezcla control.

A partir de la tercera prueba se utiliza el mismo diseño de mezcla hasta la prueba nueve, en la cual se incorpora la escoria reduciendo en un 50% los agregados fino y grueso, dentro de los datos obtenidos se utilizó la cantidad de agua requerida según diseño, obteniendo una pasta más cohesiva que en la mezcla anterior pero con un asentamiento fuera de los parámetros del ensayo del cono de Abrams; el porcentaje de aire se mantuvo bajo y el peso unitario similar a las mezcla control.

La mezcla de prueba número cuatro, requirió más cantidad de agua, al tener los agregados una condición de humedad distinta a las pruebas realizadas ya que el ensayo de asentamiento dio un resultado más bajo, porcentaje de aire más cercano a lo diseñado, peso unitario bajo y resistencias similares a las obtenidas en las mezclas control.

La quinta prueba requirió la cantidad de agua según el diseño realizado, obteniendo menor porcentaje de aire y asentamiento, con un peso unitario y resistencias a la compresión muy parecida a la mezcla control dos.

La prueba seis requirió más cantidad de agua de lo diseñado, dando como resultado el menor porcentaje de aire de las pruebas realizadas, asentamiento entre los parámetros y consistencia aceptable, peso unitario y resistencias a la compresión más bajas que las mezclas control.

La séptima prueba refleja diferencias en los resultados como el asentamiento alto, cantidad de agua entre lo diseñado, con una consistencia más fluida, mayor peso unitario, afectando las resistencias a la compresión con resultados menores a las edades ensayadas.

La prueba ocho mejoró resultados con consistencia aceptable, asentamiento apegado al rango, porcentaje de aire bajo, peso unitario igual a la mezcla control dos, aunque con resistencias disparejas y decrecientes en las edades ensayadas.

Se logró en la novena prueba controlar los resultados tanto en las propiedades de mezcla fresca como en la resistencia a la compresión, dentro de los rangos esperados.

Para la décima prueba, se rediseñó a una relación agua-cemento más baja que las trabajadas con anterioridad, con más cemento, sustitución del agregado grueso por completo y remplazándolo con la escoria. La cantidad de agua utilizada fue menor a la diseñada y se obtuvo una buena trabajabilidad, peso unitario y porcentaje de aire según lo diseñado, reflejando resultados más altos a la compresión con relación a los obtenidos anteriormente.

En la undécima y última prueba realizada, se trabajó con la misma relación agua-cemento en proporciones de materiales diferentes a la prueba anterior, reduciendo cemento y creando una mejor granulometría de los agregados al incluir un porcentaje de escoria que pasa el tamiz No.4, obteniendo los mejores resultados de todas las pruebas realizadas en relación a/c, porcentaje de aire, dentro de lo diseñado y con datos de mezcla fresca buenos; el asentamiento fue menor al esperado, establecido por los rangos de ensayo y un peso unitario bastante alto, siendo esta una mezcla de

consistencia muy dura ideal para aplicación en directo por su poca trabajabilidad. Obteniendo resultados a la compresión mucho más altos que en todas las pruebas realizadas.

En los resultados de resistencia a la compresión se tiene que las pruebas 3, 4, 5, 6 y 9 son las más cercanas a las mezclas control, tomando en cuenta sus variaciones en las propiedades de mezcla fresca obtenidas. Las otras pruebas que no se apegaron a las mezclas control sirvieron como parámetros de comportamiento y análisis para rediseñar la relación a/c dando como resultado las pruebas 10 y 11 de las cuales se obtuvieron mejores resultados y se determinó su mejor uso según las propiedades brindadas.

CONCLUSIONES

1. La escoria de alto horno eléctrico puede remplazar al agregado fino y grueso en la mezcla de concreto, rediseñando según sus propiedades.
2. Cuenta también con una granulometría variable, se requiere complementarla con un pequeño porcentaje de agregado fino para obtener un mejor diseño de mezcla, logrando brindar así una relación a/c más baja, resistencias más altas, mayor peso unitario y poder aprovecharla en estructuras que así lo requieran.
3. Además es un agregado estructural de alto peso específico y densidad de masa, tiene durabilidad alta a la descongelación, una textura rugosa, baja absorción, reforzando así las propiedades mecánicas y mejorando la resistencia a la compresión.
4. En su composición la escoria no presenta partículas orgánicas u otras sustancias nocivas para la mezcla.
5. La mezcla de concreto con escoria reduce su precio de producción debido a que se puede sustituir por los agregados fino y grueso que tienen un alto precio de producción.

RECOMENDACIONES

1. Que el Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), realice una línea de investigación para evaluar:
 - 1.1. La vulnerabilidad de la mezcla con escoria, a las reacciones álcali-agregados y al ataque de sulfatos.
 - 1.2. Contracciones por secado, resistencia química y corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto.
 - 1.3. Teorías de uso de la escoria considerando el peso, su textura y su resistencia. En aislamiento de radiación nuclear, sellos, tratamientos superficiales y pavimentos de alto impacto de tránsito por su resistencia a la compresión y mejor rugosidad brindando superficies antiderrapantes.

2. Al sector interesado para analizar los efectos en:
 - 2.1. El estudio económico en la producción de concreto con escoria de alto horno.
 - 2.2. La utilización del concreto con escoria en aplicación directa, ya que al ser más pesado que el concreto normal, disminuyendo su trabajabilidad en volúmenes mayores y elevando así el costo de bombeo y colocación.

- 2.3. Comprobar que la escoria ayuda a evitar el agrietamiento de la mezcla por descongelamiento en cuartos fríos, ya que dentro de las propiedades de la escoria se encuentra la durabilidad alta a la descongelación.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of state and highway transportation officials. *Standard method of test for sampling and testing for chloride ion in concrete and concrete raw materials: T 260-97*. USA: AASHTO, 2009. 15p.
2. American Concrete Institute. *Aggregates for concrete: ACI Bulletin E1-07*. Farmington Hills, MI. USA: ACI, 2007. 29p.
3. _____. *Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318*. Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2001. 473p.
4. _____. *Guide for determining the fire endurance of concrete elements: ACI 216R*. Farmington Hills, MI, USA: ACI 1994. 48p.
5. _____. *Guide for use of normal weight and heavyweight aggregates in concrete: ACI 221R-96*. Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2001. 29p.
6. _____. *Guide for measuring, mixing, transporting, and placing concrete: ACI 304R-00*. Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2000. 46p.
7. _____. *Guide to hot weather concreting: ACI 305R-96*. Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2010. 23p.

8. _____. *Guide to cold weather concreting: ACI 306R-96.* Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2010. 26p.
9. _____. *Guide to durable concrete: ACI 201.2R.* Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2001. 41p.
10. _____. *Manual of Concrete Practice:* Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2013. ed. 4, vol. 2, 2363p.
11. American Society for Testing and Materials. *Annual Book of Standards.* USA: ASTM, 2003. vol. 04.01 and 04.02, 161p.
12. _____. *Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates: C 294-98.* USA: ASTM, 1998. 10p.
13. _____. *Standard Specification for Concrete Aggregates: C 33-01.* USA: ASTM, 2001. 11p.
14. _____. *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine: C 131-96.* USA: ASTM, 1996. 4p.
15. _____. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates: C 136-05.* USA: ASTM, 2005. 5p.
16. _____. *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates: C 142-97.* USA: ASTM, 1997. 3p.

17. _____. *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete: C 330-00*. USA: ASTM, 2000. 4p.
18. _____. *Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete: C 637-98a*. USA: ASTM, 1998. 4p.
19. _____. *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting: C 418-98*. USA: ASTM, 1998. 3p.
20. _____. *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine: C 535-96e1*. USA: ASTM, 1996. 3p.
21. _____. *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method): C 1138-97*. USA: ASTM, 1997, 4p.
22. _____. *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method: C 944-99*. USA: ASTM, 1999. 4p.
23. _____. *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces: C 779-00*. USA: ASTM, 2000. 5p.
24. _____. *Standard Test Method for Insoluble Residue in Carbonate Aggregates: D 3042-97*. USA: ASTM, 1997. 4p.
25. _____. *Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete: C 1218-99*. USA: ASTM, 1999. 3p.

26. ABRAMS, M. S.; GUSTAFERRO, A. H., "*Fire Endurance of Concrete Slabs as Influenced by Thickness, Aggregate Type, and Moisture*", Skokie, Illinois, USA: Journal, PCA research and development laboratories, vol. 10, num. 2, 1968. 24p.
27. BUCK, Alan D. "*Control of reactive carbonate rocks in concrete*". *Final report. Technical report: USA*; Army Engineer Waterways Experiment Station, 1975. 36p.
28. COLLEY, B. E.; CHRISTENSEN, A. P.; NOWLEN, W. J. "*Factors Affecting Skid Resistance and Safety of Concrete Pavements*". Special report num. 101, Highway Research Board: 1969. 80p.
29. Comisión Guatemalteca de Normas. *Agregados para concreto. Especificaciones. NTG 41007*. Guatemala: Coguanor, 2007. 24p.
30. CORDON, William A.; THORPE, J. Derle. "*Proportioning and Evaluation of Concrete Mixtures*", ACI JOURNAL, Proceedings: 1975. vol. 72, num. 2, 29p.
31. DETWILER, Rachel J.; BHATTY, Javed I.; BHATTACHARJA, Sankar. *Supplementary cementing materials for use in blending cements, research and development bulletin RD112T*. Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association, 1996. 108p.
32. KOSMATKA, Steven H.; et al. "*Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Boletín de Ingeniería EB201*". Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association, 2004. 456p.

33. LANG, F. C. *“Deleterious Substances, Report on Significance of Tests of Concrete and Concrete Aggregates, STP-22A”*, Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 1943. 661p.
34. LEA, F. M. *The Chemistry of Cement and Concrete*. New York, USA: Chemical Publishing Company, 1971. 740p.
35. MULLEN, W. G.; DAHIR, S. H. M.; BARNES, B. D. *“Two Laboratory Methods for Evaluation of Skid Resistance Properties of Aggregates”*, Highway Research Record No. 376, Highway Research Board: 1971. 135p.
36. SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. *Tecnología del Concreto y del Mortero*. 5a. ed. Santafé de Bogotá, Colombia: Bhandar editores, 2001. 349p.
37. SELVAGGIO, S. L.; CARLSON, C. C. *“Fire Resistance of Prestressed Concrete Beams, Study B-Influence of Aggregate and Load Intensity”*. Journal, PCA Research and Development Laboratories, vol. 6, num. 1, 1964. 295p.
38. STIFFLER, Kent. *“Mineral Wear in Relation to Pavement Slipperiness”*. Report num. J-15, Joint Road Friction Program and Automotive Safety Research Program, Pennsylvania State University, University Park, 1967. 89p.
39. STIFFLER, Kent. *“Relation between Wear and Physical Properties of Roadstones”*. Special Report num. 101, Highway Research Board, 1969. 56-68 p.

40. VERBECK, George; LANDGREN, Robert. *Influence of physical characteristics of aggregates on front resistance of concrete*. Philadelphia: American Society for Testing Materials, 1960. 22p.

41. WALKER, Stanton; BLOEM, Delmar L., "*Effects of Aggregate Size on Properties of Concrete*", ACI JOURNAL, Proceedings, vol. 57, edition 9, 1960. 283-298p.

ANEXOS

Chatarra



Fuente: planta de SIDEGUA.

Escoria siderúrgica procesada



Fuente: planta de SIDEGUA.

Granulometría de la escoria



Fuente: laboratorio de PRECON.

Consistencia de la mezcla



Fuente: laboratorio de PRECON.

Ensayo con el cono de Abrams



Fuente: laboratorio de PRECON.

Ensayo a la compresión



Fuente: laboratorio de PRECON.



O.T. No. 25833
Informe Lab. No. 50-09

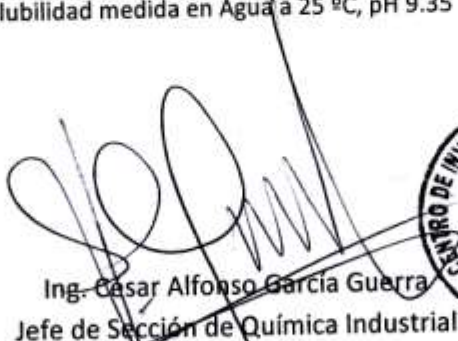
Interesado: Luis Gerardo Flores
Muestra: 1 muestra de escoria siderúrgica
Fecha: 16 de Septiembre de 2009

Determinación del porcentaje de aluminio, hierro, calcio, magnesio por métodos complexométricos y pérdida por calcinación y residuo insoluble por métodos gravimétricos.

Parámetro*	Porcentaje (%)
Aluminio (Al_2O_3)	39.79
Hierro (Fe_2O_3)	16.545
Calcio (CaO)	10.83
Magnesio (MgO)	8.73
Pérdida por calcinación	2.69
Residuo insoluble**	1.33

*Muestra proporcionada por el interesado.

**Solubilidad medida en Agua a 25 °C, pH 9.35


Ing. Cesar Alfonso Garcia Guerra
Jefe de Sección de Química Industrial




Vo. Bo. Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CH/USAC

