



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Licenciatura en Ingeniería Civil

Opción de titulación
Tesis

“DETERMINACIÓN DE LAS PROPORCIONES DE ESCORIA DE ARCO ELÉCTRICO (EAFS) PARA SU USO EN UNA MEZCLA DE CONCRETO ESTRUCTURAL”

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Ingeniero Civil

Presenta:

Edgar Daniel Martínez Álvarez

Dirigido por:

Dr. Enrique Rico García

Dr. Enrique Rico García
Presidente

Firma

M. en C. Gisela Morales Ibarra
Secretario

Firma

M. C. Darío Hurtado Maldonado
Vocal

Firma

Dr. Eduardo Alvarez Mendiola
Suplente

Firma

Dr. Omar Chávez Alegría
Suplente

Firma

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Julio 2015

RESUMEN

El siguiente trabajo se expone el uso de escorias de acero proveniente del arco eléctrico (EAFS) en la producción de concreto hidráulico y las proporciones usadas para generar un concreto de calidad y que cumple con las características del concreto convencional. En el documento se presenta la evaluación de las características físicas de los materiales usados en el diseño de mezclas de concreto. Para el diseño de mezclas, se utilizó el método del American Concrete Institute (ACI) con la finalidad de cumplir con una metodología estándar para el diseño de las mismas. Una vez elaborado el diseño de mezcla y caracterizados los materiales, se realizaron especímenes cilíndricos de una altura de 30 cm y diámetro de 15 cm (para el análisis a compresión del concreto) y vigas de 15 cm x 15 cm x 50 cm (para el análisis a flexión del concreto). Estos especímenes se curaron y se ensayaron conforme a lo establecido en las normas ASTM C39 – Resistencia a la compresión y la ASTM C78 – Resistencia a la flexión del concreto cargado en los puntos tercios. La variante con la que se trabajó fue el cambiar en diferentes proporciones la EAF hasta observar un incremento en sus propiedades mecánicas. Al analizar los resultados, pudimos observar un incremento en la resistencia a la compresión y a la flexión comparándolo con la mezcla patrón estándar. También se pudo observar que una completa sustitución del agregado fino por EAFS finas da como resultado un decremento en estas características mecánicas. Con esto claro, demostramos que una correcta proporción de las EAFS en las mezclas de concreto hidráulico pueden hacer viable la producción del mismo, teniendo un desempeño en sus características mecánicas igual o mejor a la mezcla estándar convencional y además de ser factible su producción dentro de la región teniéndola como una opción para los agregados pétreos convencionales, en este caso, como una opción para la arena y ayudando al medio ambiente con la una reducción a la sobreexplotación de los bancos de materiales.

(Palabras clave: concreto, escoria de acero, resistencia a la compresión, módulo de ruptura).

SUMMARY

The following paper describes the use of Electric Arc Furnace Slag (EAFS) in the production of hydraulic concrete and the proportions used to generate a concrete with quality and also complies with the characteristics of conventional concrete. The document presents the evaluation of the physical characteristics of the materials used in the design of concrete mixes. For the concrete mix design, we used the method of the American Concrete Institute (ACI) with the purpose of complying with a standard methodology for the design of the same. Once the mix design prepared and characterized the materials, cylindrical specimens were made from a height of 30 cm and diameter of 15 cm (for the analysis to compression of the concrete) and beams of 15 cm x 15 cm x 50 cm (for the analysis to flexure of the concrete). These specimens were cured and tested in accordance with the rules set out in ASTM C39 – compression strength and ASTM C78 – flexural strength of the concrete loaded in the third points. The variant with which work was the change in different proportions of EAF to observe an increase in their mechanical properties. In analyzing the results, we were able to observe an increase in the compression resistance and bending by comparing it with the mixture standard pattern. Could also be observed that a complete replacement of the fine aggregates by EAFS fine results in a decrease in these mechanical characteristics. With this clear, we show that a correct proportion of the EAFS in mixtures of hydraulic concrete can make viable the production of the same, having a better performance in its mechanical characteristics equal or better than the standard blend conventional and in addition to being feasible their production within the region as a best option for the conventional stone aggregates, in this case, as an option for the sand and helping the environment with a reduction to the overexploitation of banks of materials.

(Key words: concrete, steel slag, compressive strength, rupture modulus)

DEDICATORIAS

Quisiera describir por medio de estas líneas todos los sentimientos, anécdotas y recuerdos que me han dejado todas las personas que me han acompañado a lo largo no nada más de la carrera si no también, en mis proyectos, metas y sueños.

Cecilia, el amor de mi vida, que siempre ha estado conmigo en las buenas y en las malas, espero que al final de esta fase de mi vida, sepas que quiero que estés conmigo para siempre, así como lo hecho durante todo este tiempo. Gracias por tu paciencia y por tu gran amor que me das.

Gracias a mi familia, porque saben, aunque no resulte ser un familiar perfecto, me gustar ser ese familiar con quien pueden contar. Gracias a mis hermanas y en especial a mi ma por siempre preocuparse por mi.

Quisiera llenar esta parte con muchas otras personas que se me vienen a la mente, pero en realidad, este espacio lo dedicare a quien siempre quiso verme terminar mi carrera. Abuelita, donde estes, recuerda que aquí tienes al primer nieto, jejeje, el primero que termino la carrera, ese niño que dejo de ser solo eso, un niño, y se convirtió en un adulto con la responsabilidad de ser mejor persona.

Pd: a todos los que me pusieron obstáculos, los que no me dijeron "no" o no tuvieron un poco de tiempo... Becasuse of them, I did it myself.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a dios por darme la oportunidad de concluir mis estudios y seguir creciendo como profesionista. También a todos mis seres queridos que han estado a mi lado y que además de eso, me han apoyado para seguir adelante. Por ultimo darle gracias a mi facultad, la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por todo el apoyo que me brindaron durante estos 4 años y en especial a la coordinación de ingeniería civil.

Hago hincapié en el apoyo recibido por la M. en C. Gisela Morales Ibarria y el Señor Don Juventino García Becerra por el apoyo y la paciencia para poder terminar este trabajo, de los conocimientos adquiridos y la ganas de generar conocimiento por medio de la experimentación, le doy las gracias a mi profesor el Dr. Enrique Rico García y a los ingenieros Ricardo Antonio Peña Silva y Rafael Hernández Gómez y todo el equipo de grupo SAN que ayudaron para conseguir la materia prima para el desarrollo de esta tesis.

También agradezco a las personas como los trabajadores del laboratorio Geotecnia y concreto SC además de los muchachos de servicio social en especial a mi compañero de carrera Antonio por haber colaborado con la realización de este trabajo de tesis.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES	2
1.2	PROPÓSITO	5
1.3	ALCANCES	7
2.	REVISIÓN DE LITERATURA	9
2.1	INFORMACIÓN GENERAL	9
2.2	CONCRETO	9
2.3	AGREGADOS: ARENA Y GRAVA	9
2.4	ESCORIA DE ARCO ELÉCTRICO.....	11
2.4.1	<i>Definición y producción</i>	11
2.4.2	<i>Usos actuales de la escoria</i>	13
2.4.3	<i>Propiedades de la escoria</i>	14
2.4.4	<i>Efectos en la salud y en el ambiente</i>	18
2.4.5	<i>Depósito y manejo de la escoria de acero</i>	19
2.5	INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO	20
2.6	DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO	22
3.	METODOLOGÍA	25
3.1	ACTIVIDADES PROGRAMADAS	25
4.	RE SULTADOS	43
4.1	VALORES CARACTERÍSTICOS DE LOS MATERIALES USADOS	43
4.2	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	45
4.3	MÓDULO DE RUPTURA	48
5.	CONCLUSIONES	50
6.	REFERENCIAS	55
7.	APÉNDICES	58
7.1	ANEXO II MAPA ANEXO AL ESTUDIO	58
7.2	ANEXO II DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO.	59

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

<i>Tabla 2-1 - 2-2 Propiedades físicas de diferentes agregados EAFS, caliza y arena de río (agregado fino y grueso) (Papayianni & Anastasiou, 2010).</i>	16
<i>Tabla 2-3 Análisis típicos de escorias (SEMARNAT, 2003).</i>	17
<i>Tabla 2-4 Propiedades mecánicas típicas en la escoria de acero (Noureldin, A. S. & R. S. McDaniel, 1990)</i>	18
<i>Tabla 2-5 Porosidad en diferentes tipos de arreglos (Ollivier, Torrenti, & Carcassès, 2012).</i>	21
<i>Tabla 4-1 Tabla de resultados promedio obtenidos en los ensayos a compresión de las probetas de concreto.</i>	46
<i>Tabla 4-2 Tabla comparativa de los valores obtenidos. Se observan las diferencias obtenidas entre las diferentes mezclas de concreto.</i>	47
<i>Tabla 4-3 Valores obtenidos en el ensaye a flexión del concreto.</i>	48
<i>Tabla 5-1 Control de calidad sugerido para muestreo de agregados</i>	52
<i>Figura 2-1 Ilustración esquemática de la producción de acero por medio del horno de arco eléctrico (National Slag Association, 2008).</i>	12
<i>Figura 2-2 Estructura de la escoria de acero</i>	15
<i>Figura 2-3 Arreglos de esferas de igual dimensión (Ollivier, Torrenti, & Carcassès, 2012)</i>	20
<i>Figura 2-4 Efecto del mezclado de dos clases granulares (finos y gruesos) en la porosidad (Ollivier, Torrenti, & Carcassès, 2012).</i>	22
<i>Figura 3-1 Acuerdo en las instalaciones de grupo San para la extracción y muestreo del material usado para el desarrollo de esta tesis.</i>	30
<i>Figura 3-2 Ubicación de instalaciones Grupo SAN.</i>	31
<i>Figura 3-3 Ingreso a la zona de depósito y manejo temporal de la escoria. Se puede observar un electro magneto para recuperar el metal que no se haya procesado durante el proceso de fundición.</i>	32
<i>Figura 3-4 Se observa también la zona de cribado y un proceso por el que pasa la escoria</i>	32
<i>Figura 3-5 Depósito de escoria una vez que ha sido cribada.</i>	33
<i>Figura 3-6 Montículo de material muestreado.</i>	33
<i>Figura 3-7 Muestreo de material para su posterior uso.</i>	34
<i>Figura 3-8 Proceso de cribado manual para obtener solo la fracción de arena.</i>	35
<i>Figura 3-9 Cribado de material, aquí se pidió ayuda a compañeros de la carrera para poder lograr estas actividades.</i>	35
<i>Figura 3-10 Cuarteo y posterior reducción del mismo. Como se puede observar se realizó también el respectivo análisis granulométrico del mismo.</i>	36

<i>Figura 3-11 muestra para determinación de absorción.</i>	37
<i>Figura 3-12 Cono para la determinación de la absorción.</i>	37
<i>Figura 3-13 Se puede observar la tonalidad más oscura al aumentar el contenido de agua.</i>	37
<i>Figura 3-14 Matraz aforado para la determinación de la densidad de solidos de la arena.</i>	37
<i>Figura 3-15 a) y b) Pesaje y repetición de la prueba realizada</i>	38
<i>Figura 3-16 a) y b) se determinó la densidad especifica de los agregados por medio del picnómetro. Se observa el brillo característico del material usado para la determinación del mismo</i>	39
<i>Figura 3-17 a) y b) Mezclado y elaboración de cilindros de concreto.</i>	40
<i>Figura 3-18 a) y b) Desmontaje y posterior curado de los cilindros de concreto.</i>	41
<i>Figura 3-19 Ensayes realizados en la máquina de compresión</i>	42
<i>Figura 4-1 Curva granulométrica de la grava</i>	44
<i>Figura 4-2 Curva granulométrica de la arena</i>	44
<i>Figura 4-3 Curva granulométrica de la escoria</i>	45
<i>Figura 4-4 Grafica de esfuerzo a la compresión simple vs contenido de escoria de las mezclas realizadas.</i>	46
<i>Figura 4-5 Grafica de módulo de ruptura de las mezclas de concreto</i>	49
<i>Figura 4-6 Grafica edad vs módulo de ruptura</i>	49

1. INTRODUCCIÓN

La construcción es una actividad que ayuda al desarrollo de la sociedad, además de mejorar su calidad de vida. Uno de los problemas radica en la cantidad de materiales que son necesarios para desarrollar dichas actividades, las cuales tienen como materia prima los recursos que provienen de fuentes naturales. Estas fuentes naturales por lo general se encuentran limitadas ya sea por el simple hecho de su ubicación y/o por el simple hecho del impacto ambiental que se tiene al momento de explorarlas.

Otro de los problemas es que este desarrollo ayuda a la generación de grandes cantidades de residuos sólidos los cuales después de un tiempo, se empiezan a convertir en un problema que en un principio es del tipo ingenieril ya que la mayoría de ellos al no tener una aplicación útil se desechan en espacios destinados para su acumulación y es donde ese problema se transforma en uno del tipo social ya que se convierten en zonas que pueden tener un efecto negativo sobre la salud y otros recursos que se pudieran generar (como el agua y el suelo).

Esta problemática se puede observar en el anexo II en donde se observan las instalaciones de grupo San por medio de una fotografía aérea de google earth gracias a una licencia de uso libre. En la misma, se muestra la ubicación de la zona de almacenamiento de la escoria dentro de las instalaciones del grupo San, ubicada en Eje 114 No. 415 Zona Industrial, 78395 San Luis Potosí, SLP y el crecimiento del área de almacenamiento de este tipo de material.

Por lo anterior, se propone como tema de estudio la “**Determinación de las proporciones de escoria de arco eléctrico (EAFS) para su uso en una mezcla de concreto estructural**” y con esto lograr con esto una alternativa viable para la producción de dicho material compuesto (concreto) que generara beneficios en el aspecto económico, reduciendo las cantidades de material usadas para su producción y dicho sea de paso, traerá beneficios a nuestro medio ambiente ya que se le da uso a aquellos residuos sólidos, se reduce la emisión de CO₂ generada por la manufactura de cemento Portland y se disminuye el impacto al entorno natural proveniente de los bancos de explotación de los materiales que constituyen al concreto.

1.1 Antecedentes

La escoria, como subproducto de los procesos de producción del acero y otros metales, ha sido utilizada en la ingeniería civil en varias de sus ramas y por más de 100 años (Geiseler, 1999.). Su aplicación se ha enfocado desde aplicaciones como las vías terrestres hasta la estabilización de suelos, pero muy recientemente se ha investigado acerca del potencial que tiene este material en la elaboración de concreto. Un ejemplo de que la industria ha tenido casos de éxitos con la reutilización de estos desechos son las escorias de acero de producidas por el método de Basic-Bessemer o Thomas. Desde 1880 estas escorias se han utilizadas fertilizantes fosfatados (H. Motz, 2001)

La producción de acero en hornos de arco eléctrico genera hasta un 15% de escoria, que es, clasificado como residuos no peligrosos. La eliminación de dicho

material requiere grandes superficies y es más bien desfavorable en términos económicos. Por lo tanto, las investigaciones y estudios realizados por (Alenka Rastov an- Mio , 2009) han demostrado que la escoria se puede utilizar para la agricultura con la finalidad de mejorar la capacidad inorgánica del suelo, en el sector de la construcción como un aditivo para cemento y en las vías terrestres como un aditivo para la construcción de carreteras.

(R. Alizadeh, 2003) Realizó experimentos donde se evaluaron las propiedades del concreto con EAFS como agregado grueso en donde se verifico la absorción de agua, la reacción álcali-sílice, la resistencia a la degradación y la resistencia de los agregados. También analizaron probetas de concreto hidráulico que analizaron con pruebas de resistencia a la compresión y a la tensión. Con esas pruebas llegaron a la conclusión que la adición de ese material como agregado pétreo mejoraba las características mecánicas del concreto y que no solo eso, sino que también el agregado de este tipo tenía un mejor desempeño en concreto de alta resistencia que el agregado convencional.

La durabilidad del concreto se revisó en un estudio realizado por (Manso, Polanco, & Losañez, July 2006) en donde se realizaron pruebas para evaluar el coeficiente de dilatación interna de dilatación interna de la escoria, su reactividad química con algunos componentes del cemento y su resistencia a los agentes ambientales, el hielo y la humedad. Ellos concluyen que la durabilidad del concreto es aceptable en comparación con una mezcla de concreto convencional. Esto se logra si se busca la proporción adecuada de escoria ya que de lo contrario, en concreto reduce su durabilidad prematuramente. También realizaron pruebas de

lixiviados para determinar el impacto de la escoria en las propiedades de absorción del concreto a este líquido y se observó un importante efecto de enclaustramiento de la matriz de este concreto

Las propiedades mecánicas y la durabilidad fueron evaluadas nuevamente por los investigadores italianos Pellegrino, C., Gaddo, V. (2009). Con base en sus pruebas realizadas a especímenes de concreto, la escoria mostró buenas características de resistencia ya que en condiciones ambientales normales, las propiedades de la matriz agua-cemento-agregado que contenía escoria de EAFS son mejores que los observados para un concreto tradicional. Por el contrario, las propiedades químicas de la escoria como un alto contenido de calcio y óxidos de magnesio pueden afectar directamente a la durabilidad del concreto.

(Luckman Muhmood, 2009) investigaron las propiedades de la escoria en las propiedades cementantes y pozolánicas de los morteros. Encontraron que la sustitución del 20% de EAFS no reducía la fuerza más allá de los 28 días. El mortero de control tenía una resistencia de 58.6 Mpa en comparación a los 58 Mpa del mortero con escoria. También encontraron un 8.0 Mpa en fuerza puzolánica con una combinación de Clinker y escoria tratada.

En la investigación realizada por Abu-Eishah et al. (2012) se analizó la escoria de la región del golfo árabe como agregado grueso en la producción del concreto. Se evaluaron Propiedades del concreto en estado fresco y endurecido en cinco mezclas de concreto con diferentes grados (30, 50 y 70 MPa) además de la inclusión de materiales cementantes suplementarios (SCM), como cenizas volantes de clase F

(FA) y el humo de sílice (SF). Se concluyó que la escoria de acero afectó de manera benéfica las propiedades de ingenieriles (es decir, físico-mecánica) del concreto producido. Se concluyó que si la clasificación del agregado es controlada, ayudaría a mejorar la calidad del concreto producido.

(Pofale, 2012) concluyo que la resistencia a la compresión de concreto mejoro en casi todas las mezclas de escoria-concreto en proporciones entre el 6 y 7 por ciento para agregado grueso y 30 y 50 en agregado fino, todo esto optimizado por el método de Taguchi. Los resultados también arrojaron que la resistencia a la flexión y a la tracción mejoraba en un 6 y 7 por ciento en comparación con los de la mezcla patrón de análisis. En comparación con el concreto hecho de áridos naturales (silico-calcáreos), los concretos con áridos de escoria de acero inoxidable tienen mejores propiedades mecánicas. Las características de durabilidad y expansión de estos concretos son aceptables para el uso en la construcción. (Adégoloyé, Beaucour, & Ortol, 2013)

1.2 Propósito

La visión actual de la mayoría de los países desarrollados y en desarrollo es la de que se encuentran en un inminente problema debido a la falta de recursos naturales para satisfacer las necesidades de su población. Esto trae consigo problemáticas ya de índole ambiental, social y financiero en donde, aunque las tecnologías verdes siguen avanzando, cada vez más nos enfrentamos a una realidad en la que el factor ingeniería debe hacer uso de lo que existe y seguir apostando por una mejora en sus procesos y en la materia prima utilizada para desarrollarlos.

Es entonces en donde la construcción, al ser una actividad económica que es importante para el desarrollo de una sociedad y que utiliza como insumos la producción proveniente de varias industrias, pasa a ser un factor importante para el desarrollo de opciones viables en respuesta a la problemática anteriormente mencionada. He aquí, con el fin de reducir el agotamiento de los recursos desde este sector que se propone como solución el uso de materiales de desecho (escoria de acería) en la producción de concreto hidráulico.

Contando con que el sector de la construcción ha tenido un rápido crecimiento en las últimas décadas, que el concreto es uno de los materiales que mayor uso se tienen en el desarrollo de las actividades en este sector y que de acuerdo con Tu, T.Y., Chen, Y.Y., Hwang, C.L., (2006), en un futuro se tendrá un consumo global anual entre 8 y 12 billones de toneladas de agregados naturales para la producción del concreto y que teniendo en cuenta que para su producción, el agregado constituyen generalmente del 60 al 75% del volumen del concreto (Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C., 2002), podemos destacar la importancia que tiene el agregado en la producción del concreto hidráulico.

Esto implicaría que el uso de los materiales de desecho traería consigo no solo un impacto ambiental positivo (ya que con esto se evita la sobre explotación de los bancos de material y/o la búsqueda de nuevas zonas de explotación) sino que también se vería reflejado en la reducción en los costos de almacenamiento ya que este tendría una aplicación y no solo se depositaría en grandes extensiones de terreno y que de acuerdo con Faraone, N., Tonello, G., Furlani, E., Maschio, S.,

(2009) nos acercaría a lo que la mayoría de las actividades humanas buscan que es la de la generación de cero residuos.

1.3 Alcances

El alcance central de esta tesis es encontrar las propiedades del concreto con escoria de arco eléctrico que, con una proporción adecuada y cumpliendo con los requerimientos establecidos por las normativas vigentes, pueda dar resultados similares o mejores a los que nos da una mezcla común de concreto.

Objetivo.

Usar EAFS como agregado en diferentes proporciones en una mezcla de concreto hidráulico y evaluar el desempeño del concreto en pruebas de resistencia a la compresión-tensión y con esto determinar una proporción óptima para la producción del concreto.

Hipótesis

“La inclusión de EAFS en la mezcla de concreto mejora su resistencia a compresión y tensión dada una proporción óptima”.

METAS

Obtener la proporción de EAFS óptima en una mezcla de concreto estructural (agua-cemento-EAFS-arena con $f'c$ de 200 kg/cm²).

Comparar con una mezcla patrón (agua-cemento-arena) para observar así una mejora en las características físicas y mecánicas del concreto.

Metas específicas:

- Obtener los valores de $f'c$ de las mezclas de concreto modificadas con EAFS.
- Elaborar graficas de cantidad de EAFS en el concreto versus $f'c$ y $f'c$ versus tiempo, esto con la finalidad de revisar alguna variable que afecte el desempeño de mezcla propuesta.
- Lograr obtener una curva-ecuación teórica de proporción EAFS- $f'c$ y EAFS-Mr para así realizar diseños de mezclas de concreto.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Información general

En este capítulo se describirán las propiedades generales del concreto además del origen de las escorias de acero y sus efectos en la incorporación de las mismas en una mezcla de concreto hidráulico.

2.2 Concreto

El concreto es un material sólido, compuesto principalmente de materiales granulares y una matriz de cemento-agua (esa matriz reacciona químicamente generando una especie de “pegamento” que causa una adhesión entre partículas de material granular) y que con el paso del tiempo endurece y mejora sus propiedades mecánicas. La cantidad de agregados, cemento y agua son proporcionados para un mejor desempeño ya que estos varían de acuerdo a su aplicación.

El concreto es usado principalmente en el área de la construcción ya que el material al ser vaciado en un recipiente y al endurecerse, toma la forma de la estructura deseada.

2.3 Agregados: Arena y grava

Definiremos a la parte de agregado como un conjunto de granos minerales que tienen origen ya sea por sedimentación o por la trituración de algún tipo de roca de alta dureza

Los agregados son obtenidos principalmente de rocas y bancos naturales de extracción. Por su parte, el cemento es un material formado de una mezcla de arcilla y caliza disgregada y calcinada adicionada con yeso, siendo este último, el que le da la capacidad de fraguar y endurecerse con ayuda del agua y el tiempo.

Los agregados podemos dividirlos en dos partes:

- Agregados finos: son aquellos materiales que pasan a través de la malla de 4.75 mm (o también conocida como No. 4) y se retienen en la malla 200. Tiene un tamaño entre 4.75 mm y 0.075 mm.
- Agregados gruesos: son aquellos materiales más gruesos que los agregados finos y por lo tanto, se retienen en la malla no. 4. Tiene un tamaño entre 90 mm y 4.75 mm.

Los agregados son la parte esencial de la elaboración de una mezcla de concreto ya que estos ocupan aproximadamente entre el 70 y el 75 por ciento del volumen de la masa endurecida (Nilson, 2001). Comparando con otros materiales para la construcción, el peso de volumétrico oscila entre 1.9 y 2.5 ton/m³ esto es debido a que este valor depende de los agregados pétreos que utilizan (González cuevas, 2005). A esto podemos agregar que si el agregado tiene una mejor gradación, menor porosidad, mayor resistencia, durabilidad y libre de impurezas se puede tener un concreto de mejores características ya que de lo contrario, afectaría directamente en la unión de la base agua-cemento con los agregados y por consiguiente no tendría la reacción química deseada.

2.4 Escoria de arco eléctrico

2.4.1 Definición y producción

La escoria de arco eléctrico (Electric Arc Furnace Slag, EAFS) es un subproducto de la producción de acero metalúrgico que se origina en la tercera fase de producción del acero. De acuerdo al convenio de concertación de (SEMARNAT, 2003) se define de la siguiente manera:

“La escoria es un subproducto que se obtiene de la fusión de los metales y que flota en la superficie del metal líquido y está formado principalmente por una combinación de óxidos, fundentes, carga metaliza, ceniza y revestimiento del horno provenientes de los procesos siderúrgicos : horno de arco eléctrico, alto horno, aceración al oxígeno así como horno de arco sumergido para la fabricación de ferroaleaciones”.

También señala que:

“ ..la escoria se genera en las fases líquidas, etapas en las cuales se forman cristales con ligas fuertes, similares a los que se obtienen de los procesos de vitrificación, no libera elementos de su matriz, por lo que no se encuentran clasificadas como residuos peligrosos en la NOM-052-SEMARNAT-1993, excepto ferroaleaciones”.

Para su producción, usando el método de arco eléctrico (que es el tipo de escoria producida para este estudio), no se usa el metal caliente, sino que se usa chatarra fría. El material es cargado a un recipiente donde es llevado del estado sólido al líquido por medio de una corriente eléctrica generada por electrodos. La

electricidad, al no tener ningún efecto electroquímico en el metal, la hace perfecta para este proceso de fusión. Durante este proceso, se añaden otros metales a la mezcla, esto para garantizar la composición química requerida del acero. Mientras tanto, se inyecta oxígeno en el horno de arco eléctrico para purificar el acero. Es en esta parte donde al finalizar este proceso, la escoria flota en la superficie del acero líquido y es retirada para su enfriamiento.

De acuerdo con (SEMARNAT, 2003) en los apartados del 6.1 al 6.4 se establecen los criterios que se deben de tomar una vez que la escoria se ha retirado del acero líquido. En esta marcan la recepción, enfriamiento, transporte, acondicionamiento, reciclaje, almacenamiento y recomendaciones establecidas para un mejor manejo de este tipo de subproducto. En la siguiente figura se describe de modo general el proceso de generación de escoria por medio del horno de arco eléctrico.

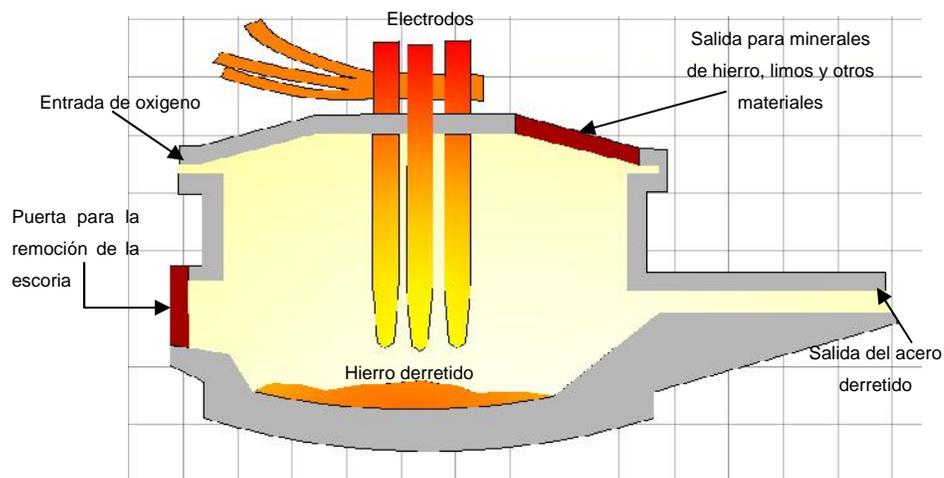


Figura 2-1 Ilustración esquemática de la producción de acero por medio del horno de arco eléctrico (National Slag Association, 2008).

2.4.2 Usos actuales de la escoria

De acuerdo con (National Slag Association, 2008), los usos de la escoria de acero actualmente son los siguientes:

1. La escoria de acero es un excelente agregado en producción de mezcla asfáltica en caliente. Esto es debido a su alta resistencia a la fricción y al deslizamiento. La naturaleza de sus partículas (particularmente cúbicas) y su textura rugosa, ofrece mayor resistencia que los agregados redondeados, lisos y alargados.
2. Es usado también para la aplicación en bases asfálticas, ya que el contacto entre las partículas de los agregados no se rompen durante el proceso de disposición, fabricación y compactación de esta capa de pavimento. El Departamento de Transporte de Illinois (IDOT) ha especificado con éxito las mezclas de escoria acero usado en carreteras.
3. Es usada para la manufactura de cemento Portland.
4. Es usada como material de hombro en la construcción de muros de contención y terraplén.

5. Es también utilizado en la agricultura debido a la cantidad de minerales como el hierro, manganeso, magnesios, zinc y molibdeno que son valiosos nutrientes para las plantas.
6. Es amigable con el ambiente. Durante la producción del cemento, las emisiones de CO₂ se reducen debido a la proceso de calcinación previa de la escoria.
7. Se usa para la estabilización o mejora del suelo y para la remediación de la escorrentía de las aguas residuales industriales.

2.4.3 Propiedades de la escoria

El departamento de Transporte y Administración de Carreteras Federales de los Estados Unidos junto con el Centro de investigación de Carreteras Turner-Fairbank, han enlistado una serie de características de la escoria de acero, las cuales son las siguientes:

2.4.3.1 *Propiedades físicas*

Se observa que las partículas de la escoria presentan una estructura angular, con formas planas o alargadas. Se puede notar a simple vista (figura 2) la forma vesicular áspera con muchas células no interconectadas de sus poros, que dan una mayor área superficial que los agregados lisos de igual volumen; esta característica le provee una excelente unión entre ellos y el cemento portland.



Figura 2-2 Estructura de la escoria de acero

Debido a lo anterior, la escoria tiene un alto grado de fricción y alta resistencia al esfuerzo cortante. Su forma y textura rugosa garantizan una resistencia mayor a otros materiales pétreos. Algunas de las ventajas de este agregado se enumeran a continuación.

1. Tienen excelente forma y con ellos, crean una mejor estructura de unión entre sus partículas y las de otros materiales.
2. Tienen alta resistencia a la abrasión y al impacto.

El producto se solidifica en igual forma a la roca fundida y obtiene una estructura porosa que a su vez, le da una apariencia de roca tipo basalto vesicular. Tiene una apariencia grisácea y sus características se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 2-1 Propiedades físicas de diferentes agregados EAFS, caliza y arena de río (agregado fino y grueso) (Papayianni & Anastasiou, 2010).

Propiedad	Método de prueba	EAFS	Caliza	Arena de río
Absorción (%)	EN 1097-6	3.16	0.71	1.35
Módulo de finura	ASTM C125	3.73	2.83	2.37
Contenido de finos (%)	EN 933-1	0.5	13.5	1
Densidad específica aparente (kg/m ³)	EN 1097-6	3330	2680	
Densidad aparente (suelta) (kg/m ³)	EN 1097-3	1482	1385	
Porcentaje de vacíos (%)	EN 1097-3	55.5	48.3	
Absorción (%)	EN 1097-6	2.5	0.75	
Desgaste (%)	AASHTO T96	13.9	24.1	
Partículas lajeadas (%)	EN 933-3	8	38.4	
Resistencia a la congelación (1% NaCl) (%)	EN 1367-6	0.81	0.87	
Sanidad (sulfato de magnesio)(%)	EN 1367-2	23.6	21.4	
Expansión (%)	EN 1744-1	0.14	–	

2.4.3.2 Propiedades químicas y mineralógicas

La escoria de acero usualmente contiene mayormente óxidos, limos, magnesio, sílice y aluminatos. En menor cantidad contiene sulfatos, acero, manganeso, álcalis y una cantidad menor de otros tipos de compuestos. La composición química de la escoria esta generalmente expresada en términos de la cantidad de óxidos determinados por medio de análisis como lo son los rayos x. De acuerdo con el Instrumento Técnico Normativo acordado por el convenio de concertación SEMARNAT CANACERO, las escorias contienen la siguiente composición química:

Tabla 2-2 Análisis típicos de escorias (SEMARNAT, 2003).

Compuesto	Contenido (%)
CaO	13-40
SiO ₂	7-30
Al ₂ O ₃	2-27
MgO	4-15
FeO	20-50
MnO	0.1-9
P ₂ O ₆	≤1
Cr ₂ O ₃	≤2.5
S	<2
Fe total	15-50

La temperatura a la que se enfría la escoria se mantiene lo suficientemente baja para que sus componentes cristalinos sean formados. Los componentes predominantes en la escoria son el silicato dicálcico, silicato tricálcico, ferrita dicálcica, merwinite, aluminatos de calcio, óxidos de hierro-magnesio, algunos limos libres y magnesio. La escoria de acero es media alcalina (con valores de pH en el rango de 8 a 10), sin embargo, el pH del lixiviado de la escoria de acero puede ser superior a 11 y con ese nivel, puede ser corrosivo para tuberías de acero galvanizado o tubos de aluminio colocados en contacto directo con la escoria.

De acuerdo con el Departamento de Transporte (DOT) y la Administración Federal de Carreteras (FHWA), la cantidad de óxidos de calcio y magnesio libres no son consumidos completamente por escoria de acero. Esto resulta en un problema, ya que la hidratación del magnesio y de los limos

activados en contacto con un ambiente húmedo es la principal responsable de la naturaleza expansiva de la mayoría de las escorias de acero. Los limos libres se hidratan rápidamente, causando rápidos cambios de volumen en un periodo muy corto de tiempo, mientras que los hidratos de magnesio reaccionan más lentamente, contribuyendo a una expansión a largo plazo que puede continuar durante años.

2.4.3.3 *Propiedades mecánicas*

De acuerdo con la FHWA, la escoria de acero tiene propiedades mecánicas favorables para su uso como agregado, incluida buena resistencia a la abrasión, buenas características de sanidad y un alto CBR (California Bearing Ratio).

Tabla 2-3 Propiedades mecánicas típicas en la escoria de acero (Noureldin, A. S. & R. S. McDaniel, 1990)

Propiedad	Valor
Prueba de abrasión de Los Ángeles (ASTM C131), %	20 - 25
Sanidad de los agregados (ASTM C88), %	<12
Angulo de fricción interna	40° - 50°
Dureza (medido con la escala de dureza de Mohs)*	6 - 7
California Bearing Ratio (CBR), % TMA de 19 mm (3/4")**	up to 300

* La dureza de la dolomita medida en la misma escala es de 3 a 4.

** El valor típico de CBR para una grava basáltica es de 100%

2.4.4 Efectos en la salud y en el ambiente

En 1995 fue formada la Coalición de la Escoria de Acero para proveer un estudio comprensivo sobre la escoria de acero. La coalición está formada por la unión de los productores, laboratorios químicos y equipos de evaluación de riesgo, un grupo de científicos ambientales y toxicólogos. Todos ellos fueron unidos para

elaborar un estudio detallado acerca de los riesgos en la salud y al ambiente que tienen este tipo de desechos, llegando a la conclusión de que este tipo de residuos no tiene ningún efecto nocivo a la salud ni al ambiente cuando tienen un uso en la agricultura, residencial o en la construcción. La escoria ha sido efectivamente aplicada para el tratamiento del drenaje en minas de ácido y en la remoción del exceso de fósforo de las descargas de agua, haciendo además el manejo de aguas residuales más ecológico. (Wagaman, T & W.J.Stanley, 2005)

2.4.5 Depósito y manejo de la escoria de acero

La escoria de acero, una vez extraída del proceso de fundición, se deja enfriar para posteriormente comenzar con el proceso de trituración de la misma. En una fase previa a la trituración, se evalúa el potencial expansivo de la escoria por medio de prueba estandarizada ASTM-D4792 "Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions" que como su nombre lo indica, el origen del potencial expansivo nace de los procesos de hidratación de la escoria y la química del mismo. Por lo anterior y de acuerdo con la bibliografía revisada, se recomienda usar escoria depositada y dejada a la intemperie de por lo menos 4 meses una vez muestreada. Durante este proceso, la escoria reaccionará a la humedad de la intemperie y las condiciones en las que este expuesta, reduciendo así su potencial expansivo.

2.5 Influencia de los agregados para el diseño de mezclas de concreto

La mejora de las mezclas de concreto está relacionada al desempeño en la calidad de su estructura granular. El uso de aditivos, tales como los plastificantes, reductores de agua, etc., han traído toda una nueva gama de productos de última generación en donde, los antes mencionados, mejoran las características físicas del concreto en estado fresco. Todo esto se debe a que se dispersan dentro de la masa de agua cemento en pequeñas partículas que rellenan los vacíos existentes dentro de la mezcla y manteniendo sus propiedades de fluidez, les dan, dependiendo del tipo de aditivo, una mayor resistencia o una mejor trabajabilidad de la mezcla de concreto.

Consideremos entonces que los agregados tienen una superficie esférica idéntica, en donde si consideramos una cierta cantidad “n” de esferas con las mismas características, estas se pueden organizar de varias formas **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

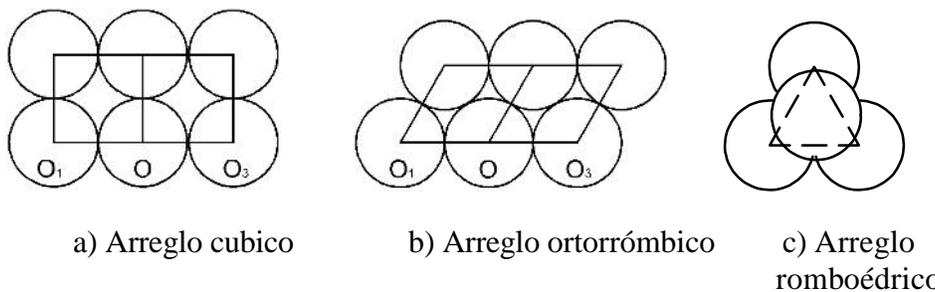


Figura 2-3 Arreglos de esferas de igual dimensión (Ollivier, Torrenti, & Carcassès, 2012)

Como se puede observar en la tabla siguiente, la porosidad de las esferas es menor en donde se tiene un arreglo de tipo romboédrico.

Tabla 2-4 Porosidad en diferentes tipos de arreglos (Ollivier, Torrenti, & Carcassès, 2012).

Tipo de arreglo	De capas cuadradas (una esfera sobre otra)			De capas rómbicas (esferas llenando vacíos)		
	Cúbica	Ortorrómbica	Romboédrica	Ortorrómbica	Esférica	Romboédrica
Numero de coordinación	6	8	12	8	10	12
Porosidad	0.476	0.395	0.260	0.395	0.300	0.260

Por lo anterior se puede decir que la porosidad de las esferas, aunque sean idénticas, es independiente del tamaño de las esferas. Sin embargo, el tamaño de los vacíos entre las esferas depende del diámetro de las esferas, mientras mayor sean las esferas, mayor serán los vacíos entre ellas.

Esto es lo que se busca en el concreto, mejorar la mezcla de agregados sin usar una mayor cantidad de base agua-cemento y así el acomodo de las partículas dentro de la masa de concreto reduciría el espacio entre agregado y agregado (porosidad), y con esto optimizar la compacidad dentro de la mezcla tanto para obtener la trabajabilidad y la resistencia deseada.

Esta compacidad se puede aumentar incrementando la mezcla entre diferentes granos de diferentes tamaños como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

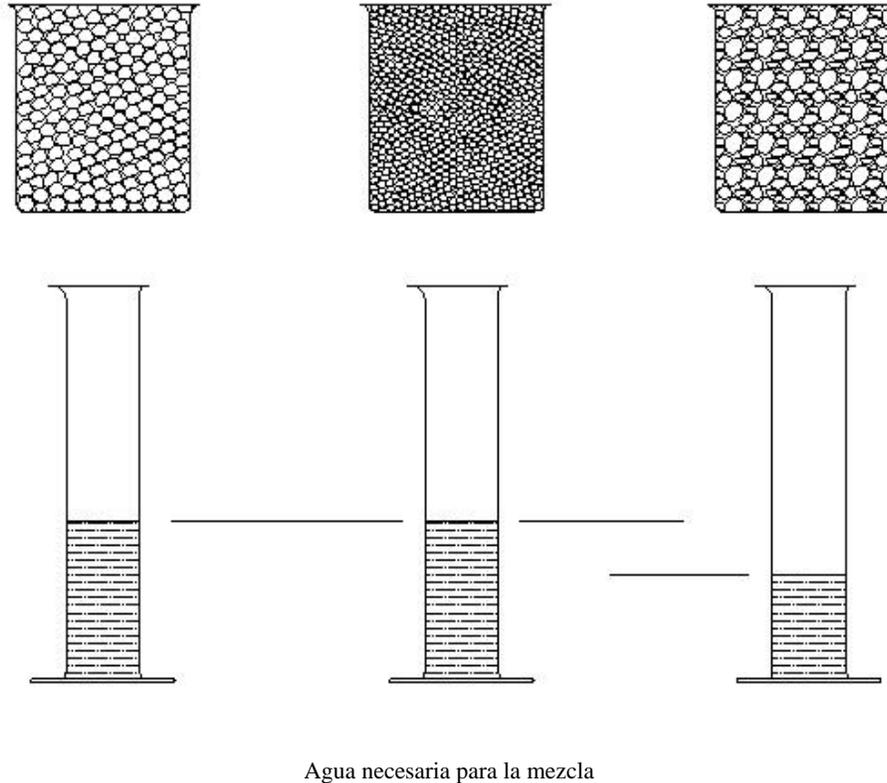


Figura 2-4 Efecto del mezclado de dos clases granulares (finos y gruesos) en la porosidad (Ollivier, Torrenti, & Carcassès, 2012).

Como se puede observar en la figura, la porosidad es casi dependiente del diámetro de los granos y es posible disminuir la porosidad (midiendo el volumen necesario para llenar los vacíos) mezclando dos clases granulares de agregados donde los de menor diámetro quedan entre los de mayor diámetro. Este proceso que puede llegar teóricamente al infinito se le llama “Empaquetado Apolonio”.

2.6 Diseño de mezclas de concreto

De acuerdo con lo que se mencionó anteriormente, el concreto es una mezcla de materiales el cual, deberán de ser proporcionados para obtener las características físicas y mecánicas que se requieran. Los agregados deben de ser caracterizados antes de usarse para el diseño de alguna mezcla de concreto ya que sus

características cambian entre ellos. Esa caracterización se realiza debido a que en la mezcla se debe de mejorar su desempeño y para lograr esto se requiere que los agregados tengan una forma, gradación, contenido de humedad, peso específico y relación de vacíos y con esto, presentar las proporciones de agregados óptimas para la aplicación deseada.

Estas proporciones pueden ser extraídas de datos estadísticos mostrados en tablas, en donde para poder usarlas, se deberán de usar en las mismas condiciones (materiales, proporciones, calidad de agua, condiciones de fraguado) para obtener las características esperadas. Cuando no existen tablas o los registros son insuficientes, la mezcla óptima de concreto se determina por medio de ensayo-error.

Para poder realizar estas mezclas, existen varios métodos de dosificación. Por lo general los métodos de dosificación se basan en dos procedimientos generales: la determinación de contenido de vacíos de los agregados combinados y mediante el empleo de factores empíricos. Los métodos del American Concrete Institute (ACI) y el británico usan, en términos generales, factores empíricos para el diseño de mezclas, en los cuales se determinan primero el agua de la mezcla de acuerdo con el revenimiento y el tamaño máximo del agregado y después la cantidad de la grava, para el caso del ACI, o de la arena, para el método británico, el último de los componentes se calcula por diferencia.

Debemos mencionar también que el concreto, al ser un material rígido, resistirá esfuerzos mayores a compresión que a la tensión y por eso se da el uso del acero de refuerzo (en el caso de tensión) o aditivos (para la compresión) para

mejorar sus características mecánicas y alcanzar mayores resistencias. Por lo anterior, el proporcionamiento del concreto no solo influye en las propiedades mecánicas y físicas del concreto, sino también en la economía de su producción, ya que no es lo mismo tener un concreto con un diseño para una cierta resistencia a que en donde esas mismas condiciones se tengan que alcanzar en un menor tiempo, esto debido a que el costo de sus componentes (agua-agregados-cemento) es el mismo pero, los materiales adicionales (aditivos, acero, etc.) hacen que la mezcla se vuelva más costosa.

H. Beshr , A.A. Almusallam , M. Maslehuddin (2002) citando a varios autores, menciona que en un concreto convencional, la base agua-cemento será la parte más débil en una mezcla de concreto en comparación con la parte de agregados. Esto se debe principalmente a la relación agua cemento (w/c) con la que se diseñan generalmente este tipo de mezclas esta entre el rango de 0.5-0.7 y que además, en ensayos de resistencia ultima, la base agua-cemento deja de trabajar mientras la mineralogía y resistencia del agregado es la que trabaja hasta el momento de la falla.

3. METODOLOGÍA

3.1 Actividades programadas

El programa de actividades se realiza de la siguiente manera:

-Caracterización del material (EAFS): Se siguió la metodología descrita por la American Society for Testing and Materials (ASTM), y la American Concrete Institute (ACI), ya que la normativa actual mexicana establecida por en el diario oficial de la federación y regulada por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) se basa en la metodología descrita por los las asociaciones mencionadas al inicio. Las pruebas a realizarse se describen a continuación:

1. Muestreo de Agregados (ASTM D75): Este método proporciona material útil en el muestreo de los agregados para el concreto.
2. Método de Prueba para el Peso Unitario y los Vacíos en el Agregado (ASTM C29): Este es un método preciso para determinar el peso unitario de los agregados secos en tres condiciones estándar de compactación: 1) varillado, 2) vibrado y 3) suelto (por paleo).
3. Nomenclatura Descriptiva Estándar para los Componentes de los Agregados Minerales Naturales (ASTM C294): Este método proporciona una breve descripción de los minerales en los agregados y los términos para describirlos.
4. Práctica para la Reducción de las Muestras de Campo del Agregado a la cantidad necesaria para las Pruebas (ASTM C702): Describe las técnicas para

reducir las muestras, con el empleo de divisores o aparatos para cuarteo mecánicos.

5. Gravedad Específica y Absorción (ASTM C127 y ASTM C128): El objetivo es determinar los pesos específicos aparente y absorción en áridos gruesos y finos respectivamente. La absorción es el proceso por el cual el agua se introduce en concreto y tiende a llenar los poros permeables.
6. Determinación de materiales más finos que el Tamiz No. 200 en el Agregado Mineral, mediante Lavado (ASTM C117): En esta prueba se evalúa el contenido de material fino que pasa el tamiz No. 200, el cual queda en suspensión o se disuelve cuando el agregado se agita vigorosamente con agua. También se le ha denominado "prueba de arrastre" o "pérdida por lavado.

-Diseño de mezcla de concreto hidráulico.

El método que usaremos será el método que propone el ACI en su informe 211.1-91 en los que nos describen nueve pasos para determinar una proporción correcta del concreto basándose en el revenimiento y el tamaño máximo del agregado.

De acuerdo con (Cano Licona, Flores Bustamante, González, Rocha, & Vázquez , 2003) los pasos a seguir son los siguientes:

1. Selección del revenimiento. Cuando este no se especifica el informe del ACI incluye una tabla en la que se recomiendan diferentes valores de revenimiento de acuerdo con el tipo de construcción que se requiera. Los valores son aplicables cuando se emplea el vibrado para compactar el

concreto, en caso contrario dichos valores deben ser incrementados en dos y medio centímetros.

2. La elección del tamaño máximo del agregado, segundo paso del método, debe considerar la separación de los costados de la cimbra, el espesor de la losa y el espacio libre entre varillas individuales o paquetes de ellas. Por consideraciones económicas es preferible el mayor tamaño disponible, siempre y cuando se utilice una trabajabilidad adecuada y el procedimiento de compactación permite que el concreto sea colado sin cavidades o huecos. La cantidad de agua que se requiere para producir un determinado revenimiento depende del tamaño máximo, de la forma y granulometría de los agregados, la temperatura del concreto, la cantidad de aire incluido y el uso de aditivos químicos.
3. Como tercer paso, el informe presenta una tabla con los contenidos de agua recomendables en función del revenimiento requerido y el tamaño máximo del agregado, considerando concreto sin y con aire incluido.
4. Como cuarto paso, el ACI proporciona una tabla con los valores de la relación agua/cemento de acuerdo con la resistencia a la compresión a los 28 días que se requiera, por supuesto la resistencia promedio seleccionada debe exceder la resistencia especificada con un margen suficiente para mantener dentro de los límites especificados las pruebas con valores bajos. En una segunda tabla aparecen los valores de la relación agua/cemento para casos de exposición severa.

5. El contenido de cemento se calcula con la cantidad de agua, determinada en el paso tres, y la relación agua cemento, obtenida en el paso cuatro; cuando se requiera un contenido mínimo de cemento o los requisitos de durabilidad lo especifiquen, la mezcla se deberá basar en un criterio que conduzca a una cantidad mayor de cemento, esta parte constituye el quinto paso del método.
6. Para el sexto paso del procedimiento el ACI maneja una tabla con el volumen del agregado grueso por volumen unitario de concreto, los valores dependen del tamaño máximo nominal de la grava y del módulo de finura de la arena. El volumen de agregado se muestra en metros cúbicos con base en varillado en seco para un metro cúbico de concreto, el volumen se convierte a peso seco del agregado grueso requerido en un metro cúbico de concreto, multiplicándolo por el peso volumétrico de varillado en seco.
7. Hasta el paso anterior se tienen estimados todos los componentes del concreto, excepto el agregado fino, cuya cantidad se calcula por diferencia. Para este séptimo paso, es posible emplear cualquiera de los dos procedimientos siguientes: por peso o por volumen absoluto.
8. El octavo paso consiste en ajustar las mezclas por humedad de los agregados, el agua que se añade a la mezcla se debe reducir en cantidad igual a la humedad libre contribuida por el agregado, es decir, humedad total menos absorción.
9. El último paso se refiere a los ajustes a las mezclas de prueba, en las que se debe verificar el peso volumétrico del concreto, su contenido de aire, la

trabajabilidad apropiada mediante el revenimiento y la ausencia de segregación y sangrado, así como las propiedades de acabado. Para correcciones por diferencias en el revenimiento, en el contenido de aire o en el peso unitario del concreto el informe ACI 211.1-91 proporciona una serie de recomendaciones que ajustan la mezcla de prueba hasta lograr las propiedades especificadas en el concreto.

-Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del concreto por medio de las pruebas descritas a continuación:

1. Revenimiento (ASTM C143): muestra la trabajabilidad del concreto, la cual es la capacidad con la que podemos manipular y colocar el concreto.
2. Resistencia a la compresión (ASTM C39): se determina la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas; ya sea moldeado o perforando núcleos de relación b-2h. El método se limita a concreto que tiene una densidad de al menos 800 kg/m^3 (50 lb/ft^3). La resistencia a la compresión a los 28 días ($f'c$) de cilindros moldeados se utiliza normalmente en el diseño estructural.
3. Resistencia a la flexión del concreto con viga carga en el tercio central (ASTM C78): Es el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensaye a la flexión de una viga dividida en tercios iguales.

Se planteó realizar muestras de cuatro probetas de 15x30 para ensayos a compresión en cada mezcla de diseño y prismas de 15x15x60 para el análisis a tensión.

Ubicación del sitio de muestreo de escoria de acero

El material utilizado para esta tesis fue obtenido gracias al apoyo del ingeniero Ricardo Peña Silva y del ingeniero Rafael Hernández Gómez, Ambos pertenecen a la empresa Grupo SAN. Sus instalaciones se ubican en el Eje 114, no. 415, Zona industrial, 78395 San Luis Potosí, San Luis Potosí. Como se puede observar en la figura siguiente, se platicó con el ing. Rafael Hernández para ingresar a la zona de depósito y manejo dentro de las instalaciones para después continuar con las actividades de muestreo.



Figura 3-1 Acuerdo en las instalaciones de grupo San para la extracción y muestreo del material usado para el desarrollo de esta tesis.



Figura 3-2Ubicación de instalaciones Grupo SAN



Figura 3-3 Ingreso a la zona de depósito y manejo temporal de la escoria. Se puede observar un electro magneto para recuperar el metal que no se haya procesado durante el proceso de fundición.



Figura 3-4 Se observa también la zona de cribado y un proceso por el que pasa la escoria



Figura 3-5 Depósito de escoria una vez que ha sido cribada.



Figura 3-6 Montículo de material muestreado.

Actividades de muestreo y descripción física de la escoria (ASTM D75 y C294)

Se procedió a muestrear el material de acuerdo a lo descrito en los estándares ASTM D75 y C294. Cabe resaltar que, a modo de experiencia, se recomienda usar tapabocas ya que el material al ser muy pesado dan síntomas de resequedad en la garganta y las fosas nasales.



Figura 3-7 Muestreo de material para su posterior uso.



Figura 3-8 Proceso de cribado manual para obtener solo la fracción de arena.



Figura 3-9 Cribado de material, aquí se pidió ayuda a compañeros de la carrera para poder lograr estas actividades.

Actividades de cuarteo y análisis granulométrico del material (ASTM C702 ASTM C136 y ASTM C117)

Para las actividades de caracterización física del material, se procedió a realizar un cuarteo para reducir el material muestreado a una cantidad manejable para realizar las pruebas necesarias para su posterior caracterización. Esta actividad se realizó con ayuda de pala, madera y brochas. Se recomienda que cuando las muestras sean más pequeñas estas se reduzcan por medio de un cuarteador mecánico o bien, manualmente.



Figura 3-10 Cuarteo y posterior reducción del mismo. Como se puede observar se realizó también el respectivo análisis granulométrico del mismo.

Determinación de la gravedad Específica y Absorción (ASTM C128):

Dentro de las actividades de determinación de la gravedad específica, cabe resaltar que en la escoria, estas determinaciones se realizaron con muestras por separado a una humedad determinada.



Figura 3-11 muestra para determinación de absorción.



Figura 3-12 Cono para la determinación de la absorción.



Figura 3-13 Se puede observar la tonalidad más oscura al aumentar el contenido de agua.



Figura 3-14 Matraz aforado para la determinación de la densidad de solidos de la arena.

Método de Prueba para el Peso Unitario y los Vacíos en el Agregado (ASTM C29):

Este es un método preciso e histórico (visite la pagina <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C29C29M-07-SP.htm>) para determinar el peso unitario de los agregados secos.



a)



b)

Figura 3-15 a) y b) Pesaje y repetición de la prueba realizada

Determinación de la gravedad Específica y Absorción (ASTM C127)

El objetivo es determinar los pesos específicos aparente y absorción en áridos gruesos y finos respectivamente. La absorción es el proceso por el cual el agua se introduce en concreto y tiende a llenar los poros permeables.



a)



b)

Figura 3-16 a) y b) se determinó la densidad específica de los agregados por medio del picnómetro. Se observa el brillo característico del material usado para la determinación del mismo

Elaboración y curado de cilindros de concreto hidráulico (ASTM C31 C/M)

De acuerdo a lo establecido en los métodos descritos anteriormente, las probetas fueron realizadas de acuerdo con lo determinado en nuestro diseño de mezcla (anexo III).



a)



b)

Figura 3-17 a) y b) Mezclado y elaboración de cilindros de concreto.



Figura 3-18 a) y b) Desmontaje y posterior curado de los cilindros de concreto.

Ensaye a compresión/flexión de probetas de concreto hidráulico (ASTM C31 C/M)

aquí se observa el ensaye y métodos de prueba realizados a todos los especímenes realizados a diferentes edades. Cabe mencionar que se realizaron 32 muestras cilíndricas de concreto (dos muestras de concreto de 4 especímenes por cada me



a)



b)

Figura 3-19 Ensayes realizados en la máquina de compresión

4. RESULTADOS

En este capítulo abordaremos los resultados obtenidos en la etapa de desarrollo de metodología. Para esto estableceremos una comparativa entre los valores de resistencia a la compresión promedio obtenidos en las mezclas de concreto además del valor de módulo de ruptura obtenido en los ensayos.

4.1 Valores característicos de los materiales usados

Tabla 4-1 Características principales determinadas para el diseño de mezclas de concreto hidráulico.

Gravas		
Dry rodded unit weight (M SSD) (peso volumetrico seco de gravas)	1474.20	Kg/m ³
Densidad	2.65	
Absorción	0.89	%
Arenas		
Densidad	2.45	
Absorción	6.27	%
Módulo de finura	3.00	
Escoria		
Densidad	3.295	
Absorción	4.670	%
Módulo de finura	3.9	

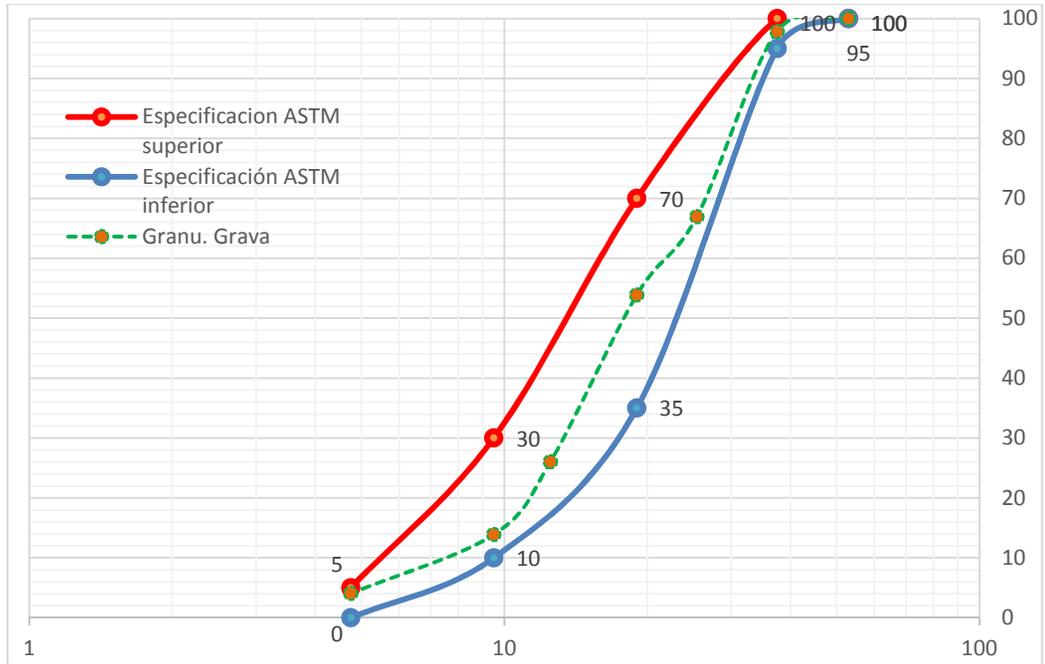


Figura 4-1 Curva granulométrica de la grava

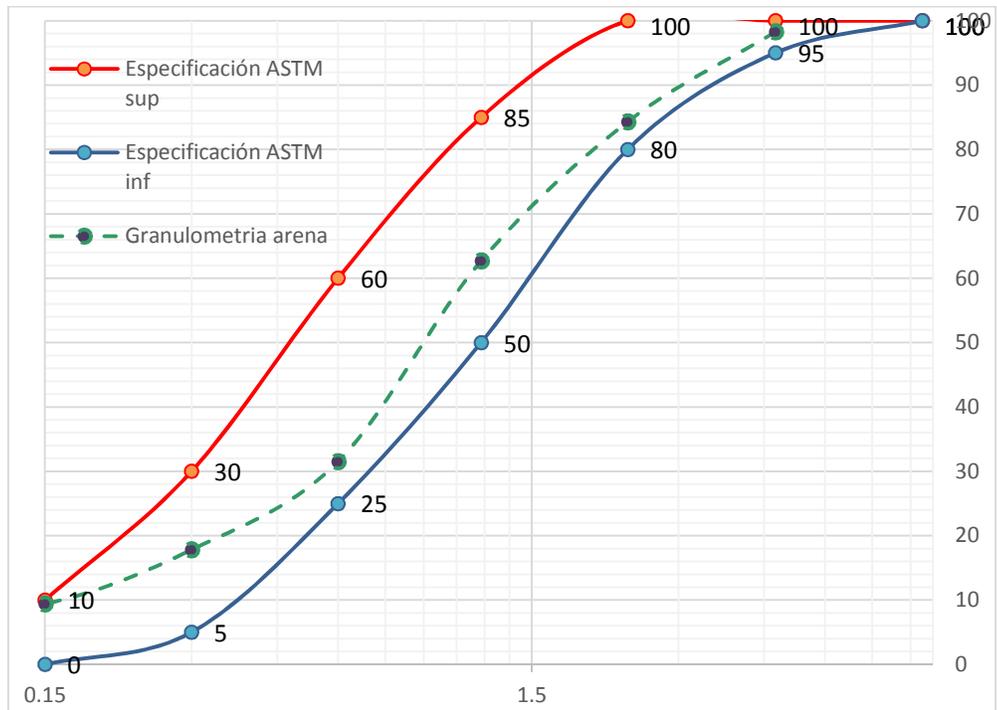


Figura 4-2 Curva granulométrica de la arena

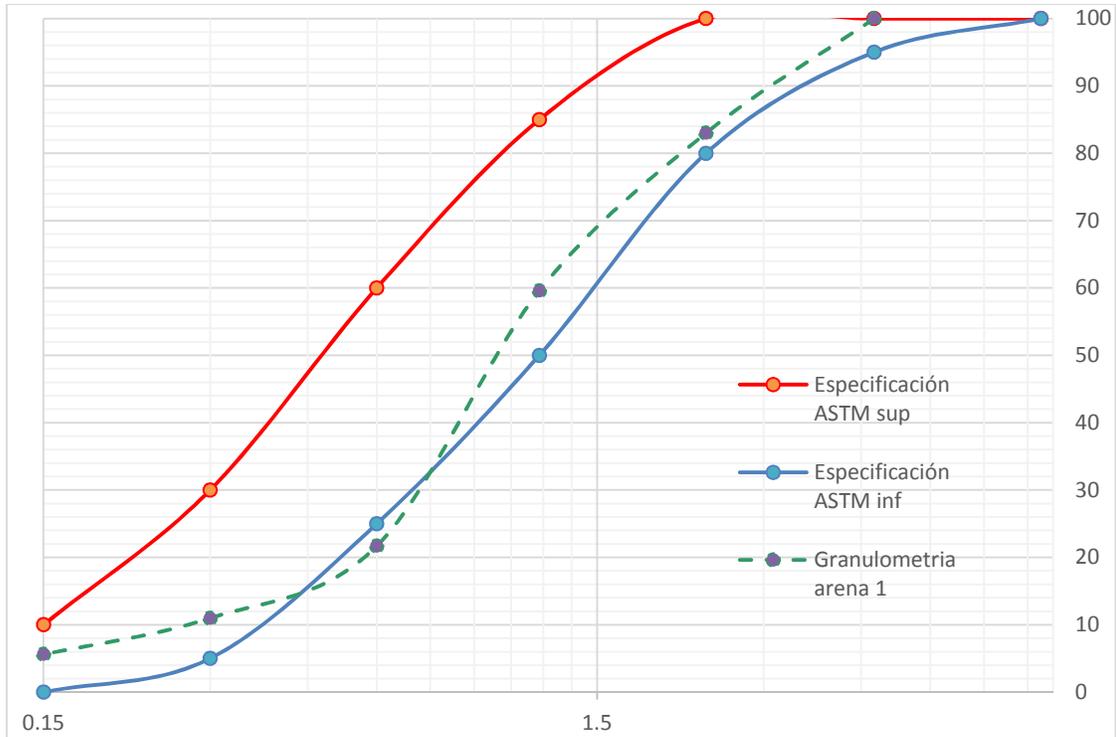


Figura 4-3 Curva granulométrica de la escoria

4.2 Resistencia a la compresión

La propiedad característica del concreto por excelencia es la resistencia a la compresión. Esta es una propiedad mecánica y frecuentemente usada para los cálculos de diseño estructural de cualquier obra civil. Esta característica depende en gran medida en las características físicas de los materiales y de la adherencia entre la pasta y el agregado.

En la tabla siguiente se pueden observar los resultados promedio obtenidos de los cilindros de concreto sometidos a un esfuerzo de compresión simple. Estos cilindros fueron realizados modificando en porcentaje su contenido de arena, sustituyéndola por arena de escoria. De lo anterior, se obtuvieron tres tipos de mezclas; la primera, se sustituyó el 50% de la arena; en la segunda el 75% y en la

tercera el 100%. Además de las mezclas anteriores, se elaboró una mezcla patrón con un $f'c$ de 200 kg/cm^2 , la cual nos ayudara a establecer una comparación entre mezclas de escoria con una mezcla normal.

Tabla 4-2 Tabla de resultados promedio obtenidos en los ensayos a compresión de las probetas de concreto. Resistencia a la compresión (kg/cm^2)

Edad de los cilindros (Días)	Contenido de escoria (%)			
	50	75	100	0
7	159	227	171	199
14	169	229	188	208
28-1	178	245	190	221
28-2	180	249	209	222

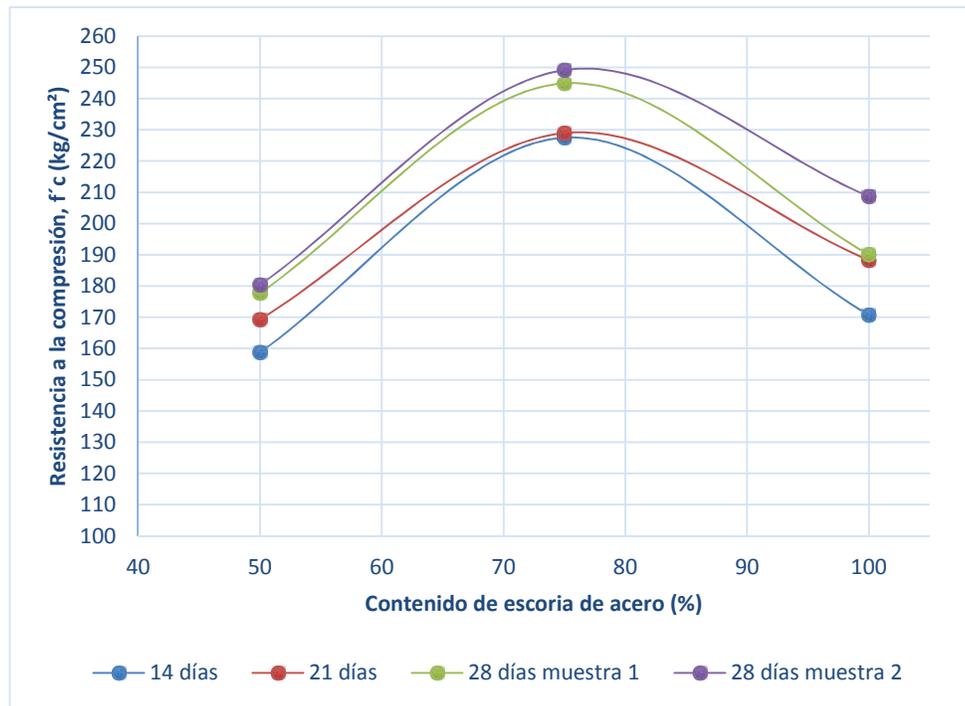


Figura 4-4 Grafica de esfuerzo a la compresión simple vs contenido de escoria de las mezclas realizadas.

Podemos ver también en la figura 4-1, una curva de comportamiento y comparación de los valores obtenidos. Se puede observar un comportamiento de tipo polinomial. Usando un análisis de regresión de tipo polinomial, podemos establecer las ecuaciones de comportamiento mecánico (compresión simple) para cada una de las mezclas a diferentes edades:

$$y = -0.1x^2 + 15.307x - 355.442 \quad \text{Ecuación 4:1 Ecuación de contenido de escoria vs resistencia a la compresión a la edad de 14 días.}$$

$$y = -0.08x^2 + 12.43x - 251.21 \quad \text{Ecuación 4:2 Ecuación de contenido de escoria vs resistencia a la compresión a la edad de 21 días.}$$

$$y = -0.1x^2 + 14.89x - 322.60 \quad \text{Ecuación 4:3 Ecuación de contenido de escoria vs resistencia a la compresión a la edad de 28 días (muestra 1).}$$

$$y = -0.09x^2 + 13.67x - 251.21 \quad \text{Ecuación 4:4 Ecuación de contenido de escoria vs resistencia a la compresión a la edad de 28 días (muestra 2).}$$

Con lo anterior, podemos establecer una tabla de porcentaje de comparación de resistencias, en la cual, la fila de contenido de escoria 0 es la de la mezcla patrón. Se puede observar un aumento del 12% en la mezcla con un 75 % de escoria y una reducción de la resistencia a la compresión en las otras 2 mezclas.

Tabla 4-3 Tabla comparativa de los valores obtenidos. Se observan las diferencias obtenidas entre las diferentes mezclas de concreto.

Edad de los cilindros (Días)	Contenido de escoria (%)			
	50	75	100	0
7	-20%	14%	-14%	0%
14	-19%	10%	-10%	0%

Edad de los cilindros (Días)	Contenido de escoria (%)			
	50	75	100	0
28-1	-19%	11%	-14%	0%
28-2	-19%	12%	-6%	0%

4.3 Módulo de ruptura

Obtuvimos también los resultados de las probetas rectangulares para la determinación del módulo de ruptura. En estos valores podemos ver un comportamiento similar al de las muestras a compresión. Cabe señalar que en el ensayo a compresión, si observamos los valores de la tabla para la mezcla con un 100% de escoria veremos que existe una diferencia de hasta un 6% con nuestra muestra patrón. Ahora que si observamos los valores para la resistencia a flexión veremos que sus valores son casi idénticos. Por demás esta mencionar que los valores que otra vez representan un mejor desempeño son los de la mezcla con un 75% de escoria.

Edad de los cilindros (Días)	Contenido de escoria (%)			
	50	75	100	0
7	18.6	28.4	24.8	24.4
14	20.0	31.5	30.1	30.0
28-1	24.1	32.6	31.5	31.1
28-2	18.6	28.4	24.8	24.4

Tabla 4-4 Valores obtenidos en el ensayo a flexión del concreto.

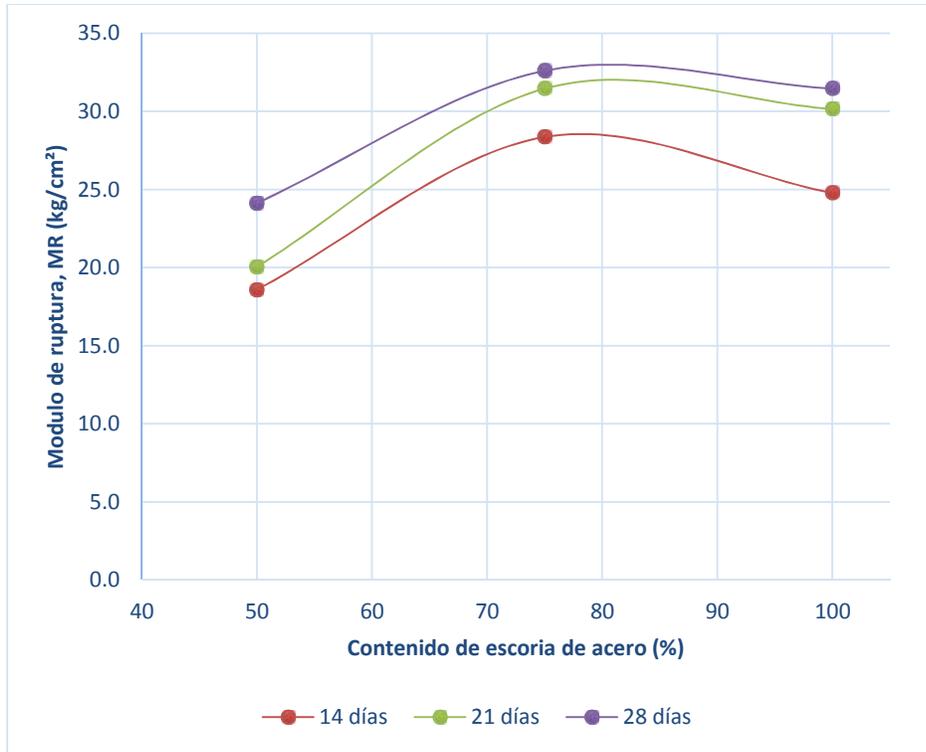


Figura 4-5 Grafica de módulo de ruptura de las mezclas de concreto

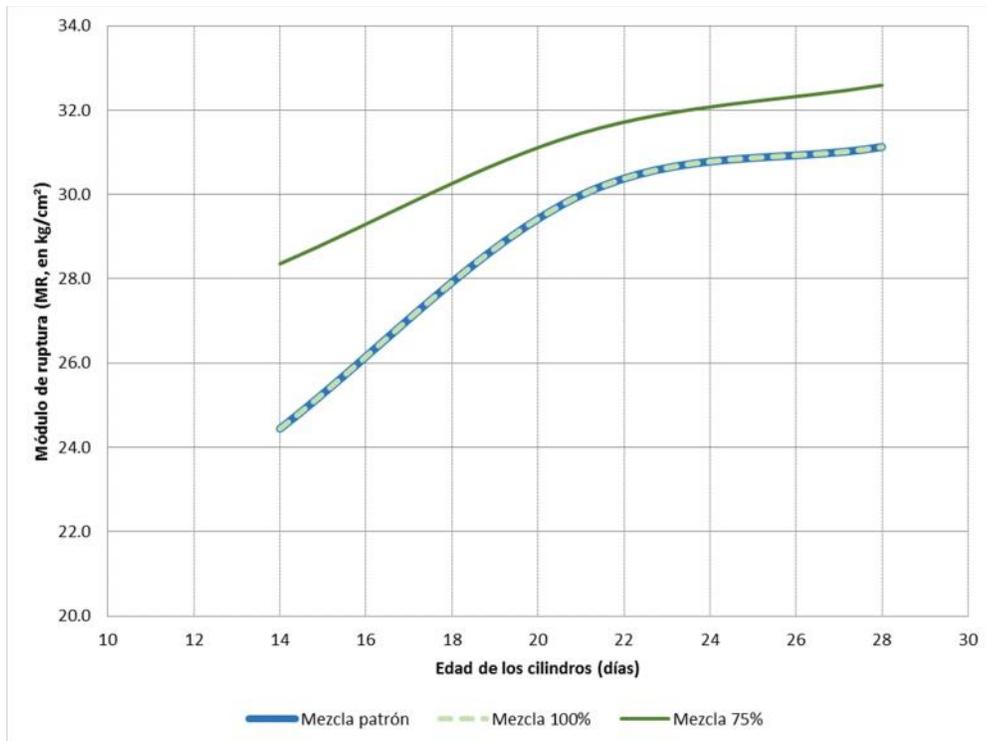


Figura 4-6 Grafica edad vs módulo de ruptura

5. Conclusiones

Podemos resumir los resultados en los siguientes puntos:

1. Se observa una marcada importancia de los agregados en las características mecánicas del concreto. Esto es debido a que los agregados ocupan un 75% del volumen de la masa del mismo y dado que uno de ellos (agregado fino) fue modificado no solo en cantidad sino también por otro agregado también fino pero con características físicas muy diferentes, su comportamiento mecánico fue variando conforme se iba alterando el contenido del mismo.
2. Las mezclas que tuvieron un mejor desempeño en cuanto a su comportamiento mecánico fueron las mezclas en donde se sustituyó el 75 % de la arena común por arena de escoria. Este comportamiento también se vio reflejado en las pruebas de módulo de ruptura llegando a tener una mejora en un 5% en la misma mezcla (75% vs la mezcla patrón).
3. Con los resultados vistos anteriormente, se demuestra que una correcta sustitución de la escoria de acero en proporción controlada por porcentaje en masa, mejora las características mecánicas de una mezcla de concreto normal.
4. Se puede ver que en la sustitución total de escoria de acero, el material sufre una pérdida en sus características mecánicas. Esto puede ser debido a la composición química de la escoria y la granulometría del agregado.

5. Podemos también hacer hincapié que la caracterización de cualquier agregado es una tarea nada sencilla, ya que viéndolo desde el punto de vista comercial, sería impráctico estar realizando pruebas de laboratorio en una frecuencia que garantice una homogeneidad en el material, además que de acuerdo con (Obla, 2015), algunas propiedades físicas de los agregados usados para la fabricación del concreto varían muy poco en comparación con otras propiedades, por lo tanto, es más adecuado realizar continuamente pruebas de control de calidad en propiedades que tiendan a cambiar con más frecuencia. En el mismo libro, se dan recomendaciones de cada cuanto deberán de ser caracterizados los agregados.
6. De la escoria podemos decir que es un material altamente aprovechable en varios ámbitos de la construcción, pero, en nuestro caso, depende de condiciones especiales para su correcto uso. Como se puede observar en los resultados, la variación de este agregado afecto significativamente a la resistencia a la compresión, a la resistencia a la flexión y por ultimo a la trabajabilidad (revenimiento), esto pude ser, originado por una mejor adhesión de la matriz de cemento a este tipo de agregado además de una mayor dureza del mismo.
7. . Debido a lo anterior, para proponer un correcto diseño de mezcla de concreto usando este tipo de materiales, deberán estar correctamente caracterizados cada uno de los componentes ya que con una variación

muy pequeña del tipo cualitativo o cuantitativo, nos afectaría directamente en el resultado esperado.

Tabla 5-1 Control de calidad sugerido para muestreo de agregados

Prueba	Método de prueba	Frecuencia mínima de prueba
En banco de materiales		
<i>Agregado grueso</i>		
Análisis granulométrico	ASTM C136	Una vez al día
Finos menores a 75 µm (No. 200) (lavado)	ASTM C117	Una vez al día
Contenido de vacíos	ASTM C29	Una vez por semana
Densidad relativa y absorción	ASTM C127	Una vez cada 90 días
<i>Agregado fino</i>		
Análisis granulométrico y Modulo de finura	ASTM C136	Una vez al día
Finos menores a 75 µm (No. 200) (lavado)	ASTM C117	Una vez al día
Contenido de vacíos	ASTM C1252 (Método A)	Dos veces a la semana
Densidad relativa y absorción	ASTM C128	Una vez cada 90 días
Equivalente de arena	ASTM D2419	Dos veces a la semana
Concretera		
<i>Agregado grueso</i>		
Análisis granulométrico	ASTM C136	Una vez cada 2 semanas
Finos menores a 75 µm (No. 200) (lavado)	ASTM C117	Una vez a la semana
Contenido de vacíos	ASTM C29	Una vez cada 2 semanas
Densidad relativa y absorción	ASTM C127	Una vez al año
<i>Fine Aggregate</i>		
Análisis granulométrico y Modulo de finura	ASTM C136	Una vez a la semana
Finos menores a 75 µm (No. 200) (lavado)	ASTM C117	Una vez a la semana
Contenido de vacíos	ASTM C1252 (Método A)	Una vez a la semana
Equivalente de arena	ASTM D2419	Una vez a la semana
Densidad relativa y absorción	ASTM C128	Una vez al año

Para futuras investigaciones y/o aplicaciones, se recomienda lo siguiente:

1. Elaborar un correcto calendario de muestreo, ensaye y pruebas, ya que sin un control adecuado, los periodos de prueba puede afectar considerablemente a la entrega de resultados.

2. Además de usar la escoria como agregado fino, se utilice como agregado grueso y con ello, realizar una caracterización más exhaustiva de la escoria de acero.
3. Utilizar cantidades dentro del rango de 60-100% en menores intervalos, con esto, no solo se tendrá un mejor análisis de regresión además se podrá realizar una regresión polinomial multivariable que nos determine el comportamiento mecánico del concreto a través del tiempo con un determinado porcentaje de escoria.
4. Evaluar las características de este tipo de mezclas en ambientes extremos como lo son costas y zonas desérticas.
5. Recordar que la determinación de las características mecánicas del concreto se elaboran en un ambiente meramente controlado, lo cual nos lleva a decir que estas no representan la resistencia final del concreto si no representan un dato comparativo del mismo.

El enfoque principal de este estudio, era el poder mostrar los beneficios y potencial aplicación de un desperdicio como la escoria en un material tan usado por la sociedad como lo es el concreto. Aquí se muestran los resultados obtenidos durante el desarrollo del mismo como una prueba de que, caracterizado y dosificado en cantidades controladas, la escoria puede ser un buen sustituto de la arena de origen natural explotada de banco. Esto nos da como resultado una opción no solo viable por el aspecto teórico, sino también amigable con el ambiente (con beneficios a la sociedad de la zona de San Luis Potosí, ya que sus recursos serían explotados

en menor manera) y económicamente hablando, tendría una oportunidad como nuevo producto para la empresa.

6. Referencias

- Abu-Eishah SI, E.-D. A. (2012). Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. *Constr Build Mater* 34, 249–256.
- Adéglolyé, G., Beaucour, A.-L., & Ortol, S. (2013). High-strength concrete using eaf and aod slags as aggregates. *3rd International Slag Valorisation Symposium*.
- Alenka Rastov an- Mio , T. S. (2009). Application of electric arc furnace slag. *Matrib* 2009, 436-438.
- American Concrete Institute. (2001). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete (ACI 211.1.91). En A. C. 21, *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete (ACI 211.1.91)* (pág. 38). United States of America: American Concrete Institute.
- Cano Licona, J., Flores Bustamante, A., González, F., Rocha, L., & Vázquez , A. (noviembre de 2003). <http://www.imcyc.com>. Obtenido de <http://www.imcyc.com/cyt/noviembre03/computo.htm>
- Carlo Pellegrino, V. G. (October 2009). Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites, Volume 31*(Issue 9), Pages 663–671.
- Geiseler, J. (1999.). Slag-Approved Material for Better Future. *Proceeding of International Symposium on the Utilization of Metallurgical Slag (ISUS 99)*.
- González Cuevas, Ó. M. (2005). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado* (Edition 4 ed.). Editorial Limusa S.A. De C.V.,.
- H Beshr, A. A. (March 2003). Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials, Volume 17*(Issue 2), Pages 97–103.

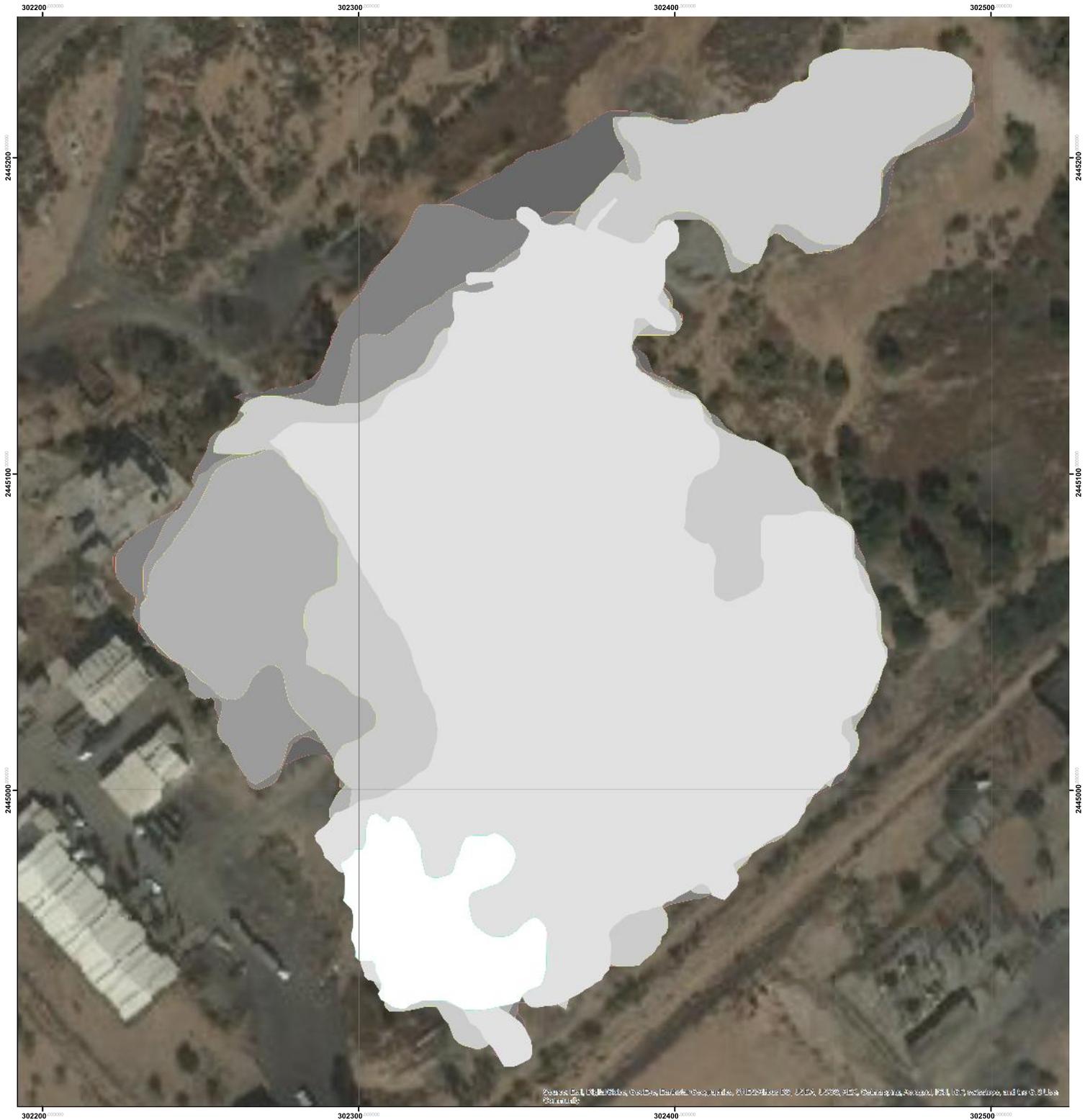
- H. Motz, J. G. (June de 2001). Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Management, Volume 21*(Issue 3), 285–293.
- Kosmatka, S. K. (2002). Design and Control of Concrete Mixture.
- Luckman Muhmood, S. V. (Febrero de 2009). Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags. *Cement and Concrete Research, Volume 39*(Issue 2), 102–109.
- Manso, J., Polanco, J., & Losañez, M. (July 2006). Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites, Volume 28*(Issue 6), 528–534.
- National Slag Association. (2008). *Iron and Steel making Slag Environmentally Responsible Construction Aggregates*. National Slag Association.
- Nicola Faraone, G. T. (Noviembre de 2009). Steelmaking slag as aggregate for mortars: Effects of particle dimension on compression strength. *Chemosphere, Volume 77*(Issue 8), 1152–1156.
- Nilson, A. H. (1994). *Diseño de estructuras de concreto*. Mexico, D.F.: McGraw-Hill.
- Noureldin, A. S., & R. S. McDaniel. (1990). *Evaluation of Steel Slag Asphalt Surface Mixtures*. Washington, D.C.: Presented at Transportation Research Board 69th Annual Meeting.
- Obla, K. H. (2015). *Improving Concrete Quality*. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Ollivier, J.-P., Torrenti, J.-M., & Carcassès, M. (2012). *Physical Properties of Concrete and Concrete Constituents*. John Wiley & Sons, Inc.
- Papayianni, I., & Anastasiou, E. (2010). Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products. *Construction and Building Materials, Volume 24* (Issue 8), 1412–1417.

- Pofale, M. N. (2012). Utilization of Industrial Waste Slag as Aggregate in Concrete Applications by Adopting Taguchi's Approach for Optimization. *Open Journal of Civil Engineering, Vol. 2* (Issue 3), 96-105.
- R. Alizadeh, M. C. (June de 2003). Utilization of Electric Arc Furnace Slag as Aggregates in Concrete. *Environmental Issue 6th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, (págs. 451-464). Bucharest, Romania.
- SEMARNAT. (2003). Convenio Voluntario de Concertación SEMARNAT-CANACERO CVSC-ITN 02-2003. 2004, (pág. 11). México.
- Tu, T., Chen, Y., & Hwang, C. (2006). Properties of HPC with Recycled Aggregates. *Cement and Concrete research*, 943-950.
- Wagaman, T , & W.J.Stanley. (2005). *Slag: The Ultimate Renewable Resource*. Pit and Quarry.

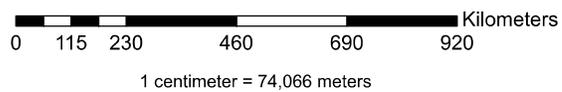
7. APÉNDICES

7.1 Anexo II Mapa anexo al estudio

Crecimiento del área de deposito temporal y manejo dentro de las instalaciones de Grupo San



Simbología	
2007- 2,578 m ²	2013- 38,740 m ²
2008- 27,314 m ²	2014- 41,881 m ²
2010- 34,748 m ²	2015- 43,134 m ²
2012- 37,174 m ²	



Ubicación General

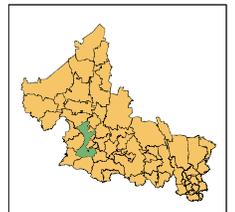


Ilustración 1 Evolución del crecimiento de residuos en la zona de estudio

7.2 Anexo II Diseño de mezcla de concreto.

Una vez determinadas las características físicas de nuestros agregados, para el diseño de mezclas de concreto seguiremos estos 8 pasos:

1. Selección del revenimiento
2. Determinación del tamaño máximo del agredo grueso
3. Cálculo del agua necesaria para el mezclado
4. Determinación de la relación agua/cemento
5. Cálculo de la cantidad de cemento
6. Cálculo de la cantidad de agregado grueso
7. Cálculo de la cantidad de agregado fino
8. Corrección por humedad de los agregados y cálculo final de proporciones

En las tablas siguientes veremos las tablas usadas para el cálculo de la mezcla

Tabla 7-1 Selección del revenimiento

Tabla a.15.3.1- Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción

Tipos de construcción	Revenimiento, mm	
	Máximo	Mínimo
Cimentaciones reforzadas, muros y zapatas	75	25
Zapatas corridas, caissons y muros de desplante	75	25
Vigas y muros reforzados	100	25
Columnas	100	25
Pisos y pavimentos	75	25
Concreto en masa		

Así que el revenimiento es

75

Tabla 7-2 Determinación del tamaño máximo del agredo grueso

El tamaño máximo de agregado no debe exceder un quinto de la menor dimensión entre los lados de la cimbra, ni tres cuartos de la distancia libre entre armaduras.

Dimensión entre cimbra	20	5	cumple
	cm		
Dimensión entre acero	10	7.500	cumple
	cm		

Así que el tamaño máximo de la grava es

37.5

 mm

Tabla 7-3 Cálculo del agua necesaria para el mezclado contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.

Revenimiento, cm	Agua, kg/m ³ concreto para TMG, mm							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
	Concreto sin aire incluido							
De 2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	---
Cantidad aprox. aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
	Concreto con aire incluido							
De 2.5 a 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
De 7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119
De 15 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	---
Promedio recomendado de aire por incluir por exposición								
Exposición ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Del revenimiento seleccionamos los valores de (anotar valores de tabla)

Contenido de agua (de tabla)	181	kg
Contenido de aire (de tabla)	1	%

Tabla 7-4 Correspondencia entre la relación agua / cemento y la resistencia a la compresión del concreto.

Resistencia a la compresión a los 28 días Kg/cm ²	Relación agua / cemento por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	--
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Por medio de interpolación encontramos el valor requerido, entonces el valor sería:

f'c	200
Cs	
(de tabla)	0.60

Tabla 7-5 Cálculo de la relación agua / cemento máxima permisible para el concreto

De el paso 3 y 4

Contenido de agua	181	kg
Relacion agua- cemento (Cs)	0.54	adimensional
Contenido de cemento	333	kg

Tabla 7-6 Cálculo de la cantidad de agregado grueso

Tamaño máximo de agregado, mm	Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60
25 (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2")	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3")	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6")	0.87	0.85	0.83	0.81

Usando los valores del módulo de finura obtendremos de la tabla el valor para la cantidad de grava

Módulo de finura de la arena	<u>3.000</u>	Cs(valor de tabla)	<u>0.69</u>
Peso volumétrico varillado seco (kg/m ³)	<u>1474</u>	Peso de la grava (kg)	<u>1017.20</u>

Tabla 7-7 Cálculo de la cantidad de agregado fino

Tamaño máximo de agregados, mm	Cálculo tentativo del peso del concreto, Kg/m ³	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
9.5 (3/8")	2280	2200
12.5 (1/2")	2310	2230
19 (3/4")	2345	2275
25 (1")	2380	2290
37.5 (1 1/2")	2410	2350
50 (2")	2445	2345
75 (3")	2490	2405
150 (6")	2530	2435

Usando el tamaño máximo de la grava, obtenemos el valor del peso de un metro cubico de concreto. Con eso calcularemos el contenido de arena

Contenido de agua	181	kg
Peso de la grava	1017	kg
Contenido de cemento	333	kg
Peso de 1 m3 de concreto (de tabla)	2410	kg
Peso de la arena	879	kg

Aquí solo calcularemos los pesos de los materiales pero sin considerar la humedad teniendo como resultado lo que se muestra en la tabla 7-8.

Tabla 7-8 Corrección por humedad de los agregados y cálculo final de proporciones

Materiales	Peso en kg
grava (húmeda)	1048
arena (húmeda)	984
agua (corregido)	111