



**Universidad Michoacán
de San Nicolás de Hidalgo**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Comportamiento de un concreto ecológico, elaborado con
agregados producto de la demolición y baja relación
agua/cemento.

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de
INGENIERO CIVIL

PRESENTA

ELIZABETH CONTRERAS MARIN

ASESOR

M. A. ING. Wilfrido Martínez Molina.

COASESORES

ING. Mauricio Arreola Sánchez.

ING. Florencio Moisés González Valdez.

Tesis apoyada por el Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación del
Estado de Michoacán.

Morelia, Michoacán julio de 2013



RESUMEN

Este trabajo muestra el comportamiento del Concreto Reciclado a edades tempranas y medias, ya que la investigación continúa. Se elaboraron dos mezclas diferentes para poder realizar una comparativa, una de ellas con la sustitución parcial del agregado natural de la cual el 100% correspondía a grava reciclada y 40% de arena reciclada, la segunda de la misma forma, pero adicionando, en base a lo experimentado, 0.58% del peso del cemento con un fluidificante para disminuir la relación A/C y aumentar así la trabajabilidad del concreto, provocándose así un aumento de la resistencia mecánica del concreto hidráulico, elaborado con cemento Portland. Se elaboraron cilindros de 10 cm x 20 cm, cilindros de 5 cm x 10 cm y vigas de 15 cm x 60 cm para realizar las pruebas destructivas y no destructivas. Al utilizar el material producto de la demolición de edificaciones a base de concreto armado, puede reducirse, consecuentemente la contaminación ambiental, ya que el cemento Portland reutilizado, inmerso ahora en los agregados sustituyentes de pétreos tradicionales, se reutilizará, generándose menores emisiones de CO₂ a la atmósfera y reduciéndose también costos de explotación de agregados pétreos naturales.

Palabras clave: Ecológico, relación agua/cemento, Resistencia del Concreto.



*A mi familia, amigos y
todas las personas que creyeron en
este proyecto.*



AGRADECIMIENTOS:

A mis padres **Emigdio Contreras Botello** y **Rosa María Marín Ramírez**, por crear una hermosa familia a mis hermanas y hermano **Rosi, Marí, Yaz, Gaby, Andrea, Luis, Viko**, por apoyarme siempre en cada paso de mi vida.

A mis amigas de toda la vida **Luga y Karen**, quienes me han creído en mí, a veces aun más que yo muchas, muchas gracias.

A mi asesor el **M.A. Wilfrido Martínez Molina**, que desde mi llegada al laboratorio, ha impulsado mis ganas de superación, motivándome día con día, para forjar en cierta parte la persona que soy ahora, mil gracias.

A la **Dra. Elia Alonso Mercedes**, a la cual admiro mucho, sin duda un ejemplo a seguir, procurando siempre mi bienestar, alentándome siempre a conseguir mis objetivos.

A la **M.I. Cindy Lara Gómez**, por la dedicación y empeño que ha puesto en este proyecto, por la ayuda incondicional en cada momento.

Al **Dr. Hugo Luis Chávez García**, por su derroche de conocimientos y por todas las lecciones aprendidas, sin su ayuda la experimentación hubiera sido un completo lío.

A la Sección de Resistencia de Materiales del Laboratorio “Ing. Luis Silva Rúelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, a todo el cuerpo que lo conforma, muchas gracias por su ayuda a **Marco, Rosalía, Yudith, Eduardo, Noel** y por sus consejos gracias **Sr. Jesús Zauno Zamudio**. Gracias también a **Mauricio, Edwin, Sandra, Cipriano, Miguel Ángel, Yesenia** por su interés y apoyo en este proyecto.

Al el Instituto de Metalurgias de dicha universidad por su participación al principio del proyecto para la trituración del material.

Al **Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán**, por su gran apoyo para la elaboración de este proyecto.

Y por último pero no menos importante a mis compañeros de camino **Ramón y Arturo**, sin duda alguna, no podría haber tenido mejor compañeros de trabajo, entre risas, peleas, largas platicas, extenuantes trabajos, formaron parte de esta etapa tan fantástica de mi vida, las experiencias vividas las llevare conmigo el resto de mi vida.



Índice:

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVO.	2
3.	JUSTIFICACION.	2
4.	MARCO TEÓRICO.....	3
4.1.	Cemento Portland.	3
4.1.1.	Antecedentes.....	3
4.1.2.	Fabricación del cemento portland.....	4
4.1.3.	Química del cemento.....	5
4.1.4.	Tipos de cemento.....	6
4.2.	Agregados pétreos.	7
4.3.	Densidad.....	8
4.3.1.	Absorción de humedad.....	8
4.3.2.	Resistencia.	9
4.3.3.	Dimensiones, forma y textura.....	9
4.3.4.	sustancias nocivas.....	10
4.4.	Agua para el concreto.....	10
4.5.	Aditivos en el concreto.....	11
4.5.1.	Aditivo Utilizado en esta Investigación.....	13
4.6.	Concreto.	15
4.6.1.	Ventajas del concreto.....	15
4.6.2.	Tipos de Concreto.	15
4.6.3.	Conformación de un concreto.....	16
4.6.4.	Permeabilidad.....	17
4.6.5.	Durabilidad.....	17
4.6.6.	Trabajabilidad.	19
4.6.7.	Relación Agua/ cemento.....	20



4.7.	Concreto reciclado.	21
4.7.1.	Antecedentes del concreto reciclado.....	22
4.7.2.	Obtención del agregado reciclado.	22
4.7.3.	Manejo de residuos sólidos.....	22
4.7.4.	Características de los materiales agregados reciclados.....	23
4.7.5.	Ventajas.....	25
4.7.6.	Desventajas.	25
5.	METODOLOGÍA.	26
5.1.	Obtención del agregado Reciclado.....	26
5.2.	Caracterización del material.....	27
5.3.	Elaboración de especímenes.	28
6.	DESAROLLO EXPERIMENTAL.	29
6.1.1.	Cuarteo en Arenas.....	29
6.1.2.	Humedad actual en arenas.	30
6.1.3.	Humedad Superficial y Humedad de absorción en arenas.....	32
6.1.4.	Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (mvss). 34	
6.1.5.	Determinación de la masa Volumétrica Seca y Varillada de una arena (mvsv). 35	
6.1.6.	Densidad de la Arena.	36
6.1.7.	Granulometría o Análisis Granulométrico en Arena.	38
6.2.	Pruebas realizadas a los agregados Gruesos.....	40
6.2.1.	Cuarteo en Gravas.....	40
6.2.2.	Humedad Actual En Gravas.....	41
6.2.3.	Humedad de Absorción en Gravas.	43
6.2.4.	Masa volumétrica seca y suelta en gravas (mvss).....	44
6.2.5.	Masa Volumétrica Seca y Varillada en Gravas (mvsv).....	46
6.2.6.	Densidad de la grava.....	47
6.2.7.	Granulometría o Análisis Granulométrico en Gravas.	48



6.3. Diseño de mezclas de concreto por el método del ACI (American Concrete Institute.	49
6.4. Pruebas Realizadas al Concreto.	52
6.4.1. Determinación del Revenimiento en Concreto Fresco.	52
6.4.2. Fabricación de Cilindros 10cm x 20cm.	54
6.4.3. Fabricación de Cilindros 5cm x 10 cm.	55
6.4.4. Fabricación de Vigas.	56
6.4.5. Curado de los especímenes	57
6.4.6. Cabeceado de Cilindros de Concreto.	57
6.5. Pruebas no Destructivas.	59
6.5.1. Resistividad Eléctrica.	59
6.5.2. Velocidad de pulso Ultrasónico.	61
6.5.3. Modulo de elasticidad Dinámico.	65
6.6. Pruebas destructivas.	68
6.6.1. Resistencia a la Compresión Simple en Cilindros de Concreto...68	
6.6.2. Resistencia a la Flexión del Concreto.	69
6.6.3. Módulo de elasticidad Estático.	71
6.6.4. Ataque por sulfatos.	73
7. RESULTADOS.	75
7.1. Caracterización de los agregados Reciclados gruesos (grava).	75
7.1.1. Humedad de absorción.	75
7.1.2. Humedad Actual.	75
7.1.3. Masa Volumétrica Seca Suelto.	75
7.1.4. Masa Volumétrica Seca Varillada.	75
7.1.5. Densidad.	75
7.1.6. Análisis Granulométrico.	76
7.2. Caracterización de los agregados Reciclados finos (arena).	77
7.2.1. Humedad de absorción.	77
7.2.2. Humedad Actual.	77



7.2.3.	Masa Volumétrica Seca Suelto.	77
7.2.4.	Masa Volumétrica Seca Varillada.	77
7.2.5.	Densidad.	78
7.2.6.	Análisis Granulométrico.	78
7.3.	Caracterización del agregado Fino (combinación del agregado fino reciclado y agregado fino natural).	79
7.3.1.	Análisis Granulométrico.	79
7.3.2.	Modulo de Finura.	80
7.4.	Caracterización del agregado fino.	80
7.4.1.	Prueba a compresión de las diferentes sustituciones.	81
7.5.	Proporcionamiento de las Mezclas.	82
7.6.	Pruebas realizadas al concreto fresco.	83
7.6.1.	Revenimiento.	83
7.7.	Pruebas No destructivas.	84
7.7.1.	Resistividad Eléctrica.	84
7.7.2.	Módulos de Elasticidad Dinámicos.	84
7.7.3.	Velocidad de Pulso Ultrasónico.	85
7.7.4.	Frecuencia de Resonancia.	86
7.8.	Pruebas Destructivas.	87
7.8.1.	Resistencia a la Compresión.	87
7.8.2.	Módulos de Elasticidad Estáticos.	88
7.8.3.	Modulo de Ruptura.	88
7.8.4.	Ataque por Sulfatos.	89
8.	Análisis de Resultados.	94
8.1.	Agregado Grueso.	94
8.2.	Agregados Finos.	94
8.2.1.	Prueba a compresión de las diferentes sustituciones.	95
8.3.	Pruebas realizadas al concreto fresco.	95
8.3.1.	Revenimiento.	95



8.4. Pruebas no destructivas.....	95
8.4.1 Resistividad Eléctrica.....	95
8.4.2. Velocidad de pulso ultrasónico.	95
8.4.3. Frecuencia de resonancia.....	96
8.4.4. Modulo de elasticidad dinámico.....	96
8.5. Pruebas destructivas.....	96
8.5.1. Compresión simple en cilindros de 10cm x 20cm.....	96
8.5.2. Módulo de elasticidad estático.....	96
8.5.3. Módulo de ruptura en vigas primaticas de 15 cm x 60 cm.	96
8.5.4. Ataque de sulfatos.....	97
9. CONCLUSIONES.....	98
10. BIBLIOGRAFIA.....	99



Índice de Ilustraciones:

<i>Ilustración 1 fluidificante CRISOTAN R-5 homogenizado en el agua para la elaboración de cilindros 10 cm x 20 cm</i>	14
<i>Ilustración 2 Torre Médica principal del Instituto Mexicano del Seguro Social</i>	26
<i>Ilustración 3 Proceso de Trituración.</i>	26
<i>Ilustración 4 Trituradora marca Denver de quijadas fijas.</i>	27
<i>Ilustración 5 Tendido del Material fino.</i>	28
<i>Ilustración 6 Cuarteo en Arenas</i>	30
<i>Ilustración 7 Obtención de la masa seca del material en gramos.</i>	31
<i>Ilustración 8 Secado Superficial del Agregado Fino</i>	33
<i>Ilustración 9 Llenado del Recipiente para la obtención de M.V.S.S del agregado Fino.</i>	35
<i>Ilustración 10 Varillado para la obtención de la M.V.S.V en agregados Finos.</i>	36
<i>Ilustración 11 Muestra de agregados Finos totalmente Saturada.</i>	38
<i>Ilustración 12 Maquina raf-Tap y dimensionamiento del agregado Fino.</i>	40
<i>Ilustración 13 Cuarteo en Agregados Gruesos.</i>	41
<i>Ilustración 14 Secado y pesado de la muestra para la obtención de la Masa seca en gramos.</i>	43
<i>Ilustración 15 Llenado del recipiente para la obtención de M.V.S.S. de agregados gruesos.</i>	45
<i>Ilustración 16 Varillado para la obtención de la M.V.S.V en agregados Gruesos.</i>	47
<i>Ilustración 17 De lado izquierdo se muestra el picnómetro, de lado derecho el secado del agregado fino.</i>	48
<i>Ilustración 18 Revenimiento para la mezcla Tesitgo.</i>	54
<i>Ilustración 19 Llenado y varillado de los cilindros de 10 x 20 cm.</i>	55
<i>Ilustración 20 Moldes prismáticos de 15x60 cm.</i>	57
<i>Ilustración 21 Pila de Curado para los Especímenes.</i>	57
<i>Ilustración 22 Cabeceado en cilindros de 10cm x 20 cm y modos de fallas del mismo cilindro después de que se le aplico una carga axial.</i>	59
<i>Ilustración 23 Toma de la lectura para la prueba de resistividad eléctrica</i>	61
<i>Ilustración 24 Configuraciones para medir la velocidad de pulso (Malhotra and Carino, 2004).</i>	63
<i>Ilustración 25 Aparato para medir la velocidad ultrasónica.</i>	64
<i>Ilustración 26 Sonómetro para determinar la frecuencia de resonancia.</i>	66
<i>Ilustración 28 Aplicación de Carga al espécimen Testigos de 10 x 20 cm.</i>	69
<i>Ilustración 29 Aplicación de la Carga a Vigas de 15x60 cm.</i>	71
<i>Ilustración 30 Prueba para Determinar el Modulo de Elasticidad a especímenes de 10x20 cm.</i>	73
<i>Ilustración 31 Elaboración de la solución de sulfato, Secado de los especímenes a horno.</i>	74
<i>Ilustración 32 Curva Granulométrica del Agregado Fino Reciclado.</i>	78
<i>Ilustración 33 Comportamiento del módulo de finura para los diferentes grados de sustitución.</i>	80



<i>Ilustración 34 Prueba de Compresión a Especímenes con 40% y 60% de sustitución de agregado fino reciclado por agregado natural de río.</i>	81
<i>Ilustración 35 Esfuerzos obtenidos de las diferentes sustituciones de agregados fino reciclado por agregados naturales a Diferentes Edades.</i>	82
<i>Ilustración 36.a Revenimiento de la mezcla realizada con baja relación agua/cemento Ilustración 30.b Revenimiento de la mezcla testigo.</i>	83
<i>Ilustración 37 Resistividad eléctrica en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.</i>	84
<i>Ilustración 38 Resultados de los Módulos de Elasticidad Dinámico (MN) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.</i>	85
<i>Ilustración 39 Resultados de la Velocidad de Pulso Ultrasónico (km/s) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.</i>	86
<i>Ilustración 40 Resultados de la Frecuencia de resonancia (Hertz) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.</i>	86
<i>Ilustración 41 Resultados de la compresión Esfuerzo (kg/cm²) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.</i>	87
<i>Ilustración 42 Prueba a compresión a especímenes Testigos y especímenes con baja relación agua/cemento.</i>	87
<i>Ilustración 43 Resultados de Módulos de Elasticidad Estáticos (kg/cm²) en cilindros de 10 x 20 cm, a 28, 60 y 90 días de edad.</i>	88
<i>Ilustración 44 Resultados de Módulos de Ruptura (kg/cm²) en vigas de 15x15x60 cm, a 28 días de edad.</i>	89
<i>Ilustración 45 Resistencia a la Compresión Simple (kg/cm) en ciclos de Sulfato para cilindros de 5*10 cm.</i>	90
<i>Ilustración 46 Masa al Final de Cada Ciclo (g) para cilindros de 5*10 cm.</i>	90
<i>Ilustración 47 Masa al Final de Cada Ciclo (g) para cilindros de 5*10 cm.</i>	91
<i>Ilustración 48 Comparativa de los especímenes con baja relación agua / cemento (izquierdo) y especímenes testigos (derecho) después de su Primer ciclo en solución de sulfato.</i>	91
<i>Ilustración 49 Comparativa de los especímenes con baja relación agua / cemento (izquierdo) y especímenes testigos (derecho) después de su Segundo ciclo en solución de sulfato.</i>	92
<i>Ilustración 50 Comparativa de los especímenes con baja relación agua / cemento (izquierdo) y especímenes testigos (derecho) después de su Tercer ciclo en solución de sulfato.</i>	92
<i>Ilustración 51 Comparativa de los especímenes con baja relación agua / cemento (izquierdo) y especímenes testigos (derecho) después de su Cuarto ciclo en solución de sulfato.</i>	93
<i>Ilustración 52 Comparativa de los especímenes con baja relación agua / cemento (izquierdo) y especímenes testigos (derecho) después de su Quinto ciclo en solución de sulfato.</i>	93



Índice de Tablas:

Tabla. 1 Composición química del cemento. _____	5
Tabla. 2 Tipos de Aditivos. _____	12
Tabla. 3 Requerimiento de agua, en kg/m ³ concreto para tamaño máximo, mm. _____	51
Tabla. 4 Dependencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto. _____	51
Tabla. 5 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto. _____	51
Tabla. 6 Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (Durar,2000). _____	60
Tabla. 7 Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica. _____	64
Tabla. 8 Rangos aproximados de frecuencia de resonancia para especímenes de concreto cilíndricos y prismáticos (Jones, 1962). _____	67
Tabla. 9 Humedad de Absorción en Agregados Gruesos Reciclados. _____	75
Tabla. 10 Humedad de Actual en Agregados Gruesos Reciclados. _____	75
Tabla. 11 Masa Volumétrica Seca Suelto en agregados Gruesos Reciclados. _____	75
Tabla. 12 Masa Volumétrica Seca y Varillada en agregados Gruesos Reciclados. _____	75
Tabla. 13 Densidad de los agregados gruesos Reciclados. _____	76
Tabla. 14 Granulometría en Agregado Grueso Reciclado. _____	76
Tabla. 15 Límites Granulométricos para agregado máximo de ½ “. _____	76
Tabla. 16 Humedad de Absorción en Agregados Finos Reciclados. _____	77
Tabla. 17 Humedad Actual en Agregados Finos Reciclados. _____	77
Tabla. 18 Masa Volumétrica Seca Suelto en Agregados Finos. _____	77
Tabla. 19 Masa Volumétrica Seca y Varillada en agregados Finos. _____	77
Tabla. 20 Densidad de los agregados Finos. _____	78
Tabla. 21 Granulometría en Agregado Fino Reciclado. _____	78
Tabla. 22 Granulometría en Agregado Fino Natural. _____	79
Tabla. 23 Módulo de finura para los diferentes grados de sustitución. _____	80
Tabla. 24 Caracterización del agregado fino reciclado, con diferentes grados de sustitución de arena natural. _____	81
Tabla. 25 Resultados de la Prueba a la Compresión para las diferentes sustituciones. _____	81
Tabla. 26 Cantidades de materiales para 1 m ³ de concreto Testigo. _____	82
Tabla. 27 Resistividad eléctrica en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad. _____	84
Tabla. 28 Resultados de Módulos de Elasticidad Dinámico (MN) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad. _____	84
Tabla. 29 Resultados de la Velocidad de Pulso Ultrasónico (km/s) cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad. _____	85
Tabla. 30 Resultados de la Frecuencia de resonancia (Hertz) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad. _____	86



Tabla. 31 Resultados de la compresión Esfuerzo (kg/cm^2) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad. _____	87
Tabla. 32 Resultados de Módulos de Elasticidad Estáticos (kg/cm^2) en cilindros de 10 x 20 cm, a 28, 60 y 90 días de edad. _____	88
Tabla. 33 Resultados de Módulos de Ruptura (kg/cm^2) en vigas de 15x15x60 cm, a 28 días de edad. _____	88
Tabla. 34 Resistencia a la Compresión Simple (kg/cm) en ciclos de Sulfato para cilindros de 5*10 cm. _____	89



1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día el crecimiento de la población, en todo el mundo, demanda la construcción de nuevas obras de infraestructura: viviendas, escuelas, hospitales y todo tipo de edificaciones, así como vías de comunicación en general, muchas ellas a base de concreto hidráulico elaborado con cemento Portland, generándose así la necesidad de aumentar la producción de los materiales necesarios para su elaboración, entre ellos el cemento Portland y los agregados pétreos de origen natural necesarios para poder llevar a cabo la construcción de las diversas estructuras, las cuales, muchas veces cumplen su vida útil y/o por diversas razones son demolidas, lo que genera una gran cantidad de material, producto de dichas demoliciones, que no es utilizado, contaminando así el medio ambiente. La propuesta entonces es reutilizar esos desechos producidos, dándoles un sencillo tratamiento de trituración, para reducir sus tamaños, emulando a las partículas de agregados naturales inertes de granulometría controlada. En base a lo antes mencionado es que con materiales desechos de demolición se puede hacer la sustitución parcial, en esta investigación, en la elaboración de un concreto sustentable cuya finalidad es contribuir a resolver la problemática de la contaminación a medio ambiente y la posible reducción de costes, al reutilizar el concreto hidráulico de desecho y ya no tener directamente el consumo de agregados pétreos de origen natural.

La preocupación creciente por los temas ambientales es cada vez mayor; esto se ve reflejado en los crecientes reclamos de la ciudadanía que exige derecho a vivir en un ambiente libre de contaminación. Desde el punto de vista ambiental, el reciclaje de escombros es bastante atractivo ya que evita la degradación de recursos naturales no renovables; desde el punto de vista netamente económico, el concreto reciclado resulta atractivo cuando el producto es competitivo con otros materiales en relación al costo y a la calidad (Bedolla, González 2003). Los materiales reciclados son normalmente competitivos donde existe dificultad para obtener materias primas y lugares de depósitos adecuados. Con el uso de los materiales reciclados, se pueden obtener grandes ahorros en el transporte de materiales de la construcción, donde se pueden reunir la demolición y la construcción de nueva obra.



Con ello los bloques de concreto resultantes de la demolición, al someterse a un proceso de trituración proporciona material granular que puede sustituir a los agregados extraídos en los bancos de materiales (grava y arena) en la elaboración de un nuevo concreto, adicionado con fluidificantes para ayudar a la trabajabilidad de la mezcla.

En este trabajo se propone reducir la relación agua/cemento, con la finalidad de aumentar las propiedades mecánicas del concreto hidráulico, utilizado para esto un fluidificante que permita la adecuada manejabilidad de las mezclas en obra, para poder colar los elementos estructurales adecuadamente.

2. OBJETIVO.

El presente trabajo de investigación pretende dar a conocer el comportamiento físico-mecánico de un concreto ecológico elaborado con agregados parcialmente naturales en comparativa con otro concreto también elaborado con agregados parcialmente naturales pero con bajas relaciones agua/cemento, para conocer las mayores resistencias que se pueden dar en concretos generados con agregados reciclados.

3. JUSTIFICACION.

El concreto es el material más utilizado en la construcción por sus propiedades mecánicas a largo plazo y por los acabados que se pueden lograr cuando las prácticas de colocación son eficientes. Para la preparación de mezclas de concreto convencional se requiere la dosificación de cemento, arena, grava, agua y en ocasiones aditivos. La producción de los agregados naturales se hace, por lo general, mediante la explotación o mediante la extracción mecánica o manual de estos materiales pétreos; actividades que generan un gran impacto en el ambiente por el desgaste del recurso suelo y por la alteración del paisaje y de la calidad del aire y agua, en algunos casos. Por esta razón, surge la iniciativa de proponer mezclas de concreto en las cuales se sustituyan proporciones de los agregados pétreos por residuos de demoliciones o industriales.

Las altas temperaturas necesarias para la manufactura del cemento hacen que sea un proceso de energía muy intensiva. Tanto el combustible para el calentamiento, así como la reacción química derivada de procesar la materia prima,



generan dióxido de carbono (CO₂). Las preocupaciones a nivel mundial por los cambios del clima han llevado a los investigadores y a la industria a encontrar maneras de minimizar la producción de CO₂, el reciclado del concreto es una buena opción para reducir las emisiones de CO₂ a la capa de ozono.

4. MARCO TEÓRICO.

4.1. Cemento Portland.

De acuerdo con kumar y Monterio (1998), el cemento es el más impórtate material para la elaboración del concreto en un sentido monetario, ya que su costo representa aproximadamente 10 veces (en algunos casos hasta 20 veces) mayor que el precio del agregado, cualquier maniobra que ahorre cemento sin reducir la resistencia y la trabajabilidad del concreto puede resultar en significativo beneficio económico.

Una definición generalizada de un cemento puede ser un material con propiedades adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales, la cual engloba una gran variedad de materiales cementantes. El uso de materiales cementantes data de los egipcios los cuales utilizaban yeso impuro calcinado. Los griegos y los romanos utilizaban caliza calcinada para la unión de piedras (neville, 2004).

Según la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004 “el cemento hidráulico es un material inorgánico finamente pulverizado, comúnmente conocido como cemento, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, una vez endurecido, conservara su resistencia y estabilidad.

4.1.1. Antecedentes.

En 1824, Joseph Aspdin elaboró cemento mezclando arcilla y caliza de diferentes canteras y calentándolas en un horno. El concreto obtenido con este aglomerante se asemejaba a las piedras propias de la isla de Portland, al sur de Inglaterra, motivo por el cual se le llamó cemento Portland, material que comenzó a fabricarse con mayor fuerza desde entonces. En ocasiones, la mezcla era calentada en exceso y se endurecía, siendo desechada por considerarse inútil. En 1845, I. C. Johnson descubrió que el mejor cemento provenía de la pulverización de esta sustancia



“inútil” denominada clinker. Este es el cemento que se conoce hoy en día (kumar y Monterio, 1998).

En México a principios del siglo XX se empezó a consumir el cemento importado de Inglaterra, y para 1906 se constituyó la primera compañía de cementos Portland, su primer horno comenzó a trabajar en 1909. Actualmente, la industria mexicana de cemento produce más de 39 millones de toneladas anuales que provienen de 31 plantas distribuidas en todo el país, donde se generan más de 21 mil empleos directos y 120 mil empleos indirectos.

4.1.2. Fabricación del cemento portland.

Los materiales usados para la producción del cemento portland deben de contener cantidades apropiadas de compuestos de calcio que se encuentran dentro de las calizas, sílice, alúmina que los podemos obtener de la arcilla y hierro , dichos materiales se encuentran en casi todos los países, su fabricación es mundial.

La fabricación del cemento se puede llevar a cabo tanto la vía seca como la vía humedad. La elaboración de estos procesos es muy similar, su diferencia radica en que en los procesos de la vía seca, las operaciones de molienda y mezclado se realizan con los materiales secos, a diferencia de los procesos húmedos que los materiales se mezclan con agua para formar una lechada (neville, 2004).

Los pasos a seguir para la elaboración de cemento inician con un proceso de molienda y mezclado de los materiales primas descritos con anterioridad, después del mezclado, se procede alimentar por la parte superior el horno, mientras el horno se encuentra en operación, el material pasa del extremo más al más bajo en un régimen predeterminado y controlado, conducida en una tasa controlada por la inclinación y la velocidad de rotación del horno. La temperatura de la mezcla es elevada al punto de fusión, se conserva esta temperatura de aproximadamente 1,450 °C, donde el material se sintetiza y se funde parcialmente, formado el clinker, pelotitas grises con tamaños que varían de 3 a 25 mm, las cuales cae dentro de enfriadores para continuar con su pulverización. Durante esta operación se adiciona una pequeña cantidad de yeso para controlar o retardar el tiempo de fraguado del cemento y mejoren las propiedades de contracción, por último se lleva a la zona de bóvedas para su almacenamiento y futura distribución (Metha y Monterio, 1998).



4.1.3. Química del cemento.

Se suele considerar cuatro compuestos como los componentes principales del cemento (tabla 1), estos constituyen aproximadamente un 90% de la masa del cemento. Durante la molienda, se añaden yeso (4% hasta 6%) u otra fuente de sulfato de calcio y otros auxiliares de molienda (Kosmatka et al. , 2004).

En realidad los silicatos que se encuentran en el cemento no son compuestos puros, ya que contienen pequeñas cantidades de óxidos en soluciones sólidas. Estos óxidos tienen efectos importantes en los arreglos atómicos, las formas cristalinas y las propiedades hidráulicas de los silicatos.

Tabla. 1 Composición química del cemento.

NOMBRE	COMPOSICIÓN	ABREVIATURA
Silicato Tricálcico ó Alita	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C3S
Silicato Dicálcico ó Belita	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Aluminoferrito Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF

La alita es la fase principal, reacciona rápidamente con el agua y es el más importante en cuanto a desarrollo de propiedades mecánicas hasta los 28 días, constituye del 50% al 70% del clínker. La belita constituye del 15% al 30% y reacciona lentamente con el agua y durante los primeros 28 días contribuye poco a la resistencia mecánica y lo hace substancialmente en etapas posteriores. Los compuestos de aluminato reaccionan rápidamente pudiendo ocasionar el fraguado rápido, los cementos con bajos porcentajes de C3A resisten mejor a suelos y aguas con sulfatos, constituyendo aproximadamente del 5% al 10% del clínker, la mayoría de los efectos de color para la producción del cemento gris se debe a los compuestos de ferrita que constituyen del 5% al 15% del clínker (Taylor 1997).



En presencia con agua, tienen un proceso de hidratación, para formar nuevos compuestos, los cuales son la infraestructura de la pasta de cemento endurecida en el concreto.

4.1.4. Tipos de cemento.

Según la norma NMX-C-414-ONNCCE se especifican seis tipos básicos de cementos:

- CPO- cemento portland ordinario, el cual puede llegar a tener hasta el 5% de adición de materiales tales como escoria, puzolanas, humo de sílice o caliza.
- CPP- cemento portland puzolánico, que posee del 6% al 50% de material puzolánico, con relación a la masa total del cemento.
- CPEG- cemento portland con escoria de alto horno, el cual tiene del 6% al 60% de escoria.
- CPC- cemento portland compuesto, se compone de clinker, yeso y dos o más adiciones. Las adiciones pueden componer del 6% al 35% de escoria, del 6% al 35% de material puzolánico, del 1% al 10% de humo sílice y cantidad de material adicionado, la cantidad de clinker e yeso debe ser del 50% al 94%.
- CPS- cemento portland con humo sílice, que recibe del 1% al 10% de humo de sílice.
- CEG- cemento con escoria de alto horno, el cual tiene una cantidad de escoria que varía del 61% al 80%.

Además, estos cementos pueden presentar características especiales, tales como RS- resistencia a sulfatos; BRA- baja reactividad álcali-agregado; BCH-bajo calor de hidratación; B-blanco.

Los cementos se dividen también de acuerdo a la resistencia: 20Mpa, 30 Mpa, 40 Mpa (200Kg/cm^2 , 300Kg/cm^2 , 400Kg/cm^2) las cuales designan resistencias a compresión mínimas a 28 días respectivamente. Los cementos se designan por uno de los 6 tipos de cementos, seguido por la clase de resistencia máxima a los 28 días y en tal caso que hubiese características especiales.



4.2. Agregados pétreos.

Los agregados en el concreto constituyen de 60 a 80 por ciento de su volumen, es frecuentemente considerado como un relleno inerte y por ende muchas veces no se le da la importancia requerida, sin embargo estudios señalan que los agregados ejercen un gran peso en la resistencia, estabilidad dimensional y durabilidad del concreto, sin mencionar la gran importancia que tienen para determinar el costo y la trabajabilidad de las mezclas de concreto (Metha y Monterio, 1998).

Los agregados naturales para el concreto son una combinación de rocas y minerales. El mineral es una sustancia sólida natural con una estructura interna ordenada y una composición química. Mientras que las rocas, que se clasifican según su origen en ígneas, sedimentarias o metamórficas, generalmente se componen de varios minerales, a manera de ejemplo el granito contiene cuarzo, feldespato, mica y otros pocos minerales.

Los agregados deben cumplir con la normativa para su uso en aplicaciones ingenieriles: deben ser partículas limpias, duras , resistentes, durable y libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcilla u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la hidratación y sobre todo la adherencia de la pasta de cemento (Kosmatka et al. , 2004).

La distribución de las partículas según su tamaño se le llama granulometría, para su clasificación conforme al dimensionamiento se tiene: el agregado fino, no mayor a 5mm y el agregado grueso, que comprende el material mayor a 5mm. La división se hace por medio del tamiz número 4, de 4.75 mm (3/6 de pulg), es el parámetro que se toma en cuenta para determinar si es un agregado fino o de lo contrario un agregado grueso.

Se requiere de un conocimiento de ciertas características del agregado para la elaboración de las mezclas de concreto, se analizan en dos partes sobre la base de los aspectos que afectan: las proporciones de la mezcla y el comportamiento del concreto fresco y endurecido. Debido a la relación entre los dos aspectos, es más apropiado dividir las propiedades en los siguientes grupos:



- Características que dependen de la porosidad: densidad, absorción de humedad, resistencia, dureza, modulo de elasticidad y sanidad.
- Características que dependen de la previa exposición de los factores de procesamiento: dimensión de partículas, forma y textura.
- Características que dependen de la composición química y mineralógica: resistencia, dureza, modulo de elasticidad y sustancias nocivas presentes.

4.3. Densidad.

Chan (2003) menciona que si se emplea un agregado con una buena densidad (≥ 2.25) el concreto resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendría una influencia directa sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión del mismo. El peso volumétrico, que se define como el peso de los fragmentos del agregado que llenarían una unidad de volumen, tomando en cuenta el espacio que se genera entre las partículas ya que no es posible empacar fragmentos juntos de agregado, de manera que no queden espacios vacíos. El volumen que ocupa un agregado según su peso es un indicador de las características del mismo en cuanto a ligereza, porosidad y permeabilidad, propiedades que pueden afectar al concreto en un mayor requerimiento de cemento que repercutirá en una influencia económica de la mezcla.

4.3.1. Absorción de humedad.

La absorción es quizá la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben el agua que está dirigida a la pasta de cemento lo que reduce su trabajabilidad de la mezcla, esta capacidad de absorción se define como la cantidad total de humedad requerida para llevar a un agregado de la condición de secado al horno a la condición de saturado superficialmente seco, esta información puede utilizarse como medida de la porosidad y de la resistencia. (chan Yam ed. al., 2003).

Las condiciones de humedad de los agregados se las puede definir como:

1. Secado al horno – totalmente absorbente.
2. Secado al aire – la superficie de las partículas está seca, pero su interior contiene humedad y, por lo tanto, aún es ligeramente absorbente.



3. Saturado con superficie seca (SSS) – no absorben ni ceden agua al concreto.
4. Húmedos – Contiene un exceso de humedad sobre la superficie (agua libre).

4.3.2. Resistencia.

La resistencia a la trituración, la resistencia a la abrasión y modulo de elasticidad del agregado son propiedades interrelacionadas, en las que influye grandemente la porosidad, composición, textura y estructura. Por lo que una baja resistencia puede deberse a la debilidad de los granos que lo constituyen, o bien, a que siendo éstos suficientemente resistentes no están bien unidos y el uno con el otro y por eso falló el concreto.

4.3.3. Dimensiones, forma y textura.

Las variaciones en la granulometría pueden afectar seriamente la uniformidad del concreto de una mezcla a otra. Si partimos de la idea de que la pasta de cemento tiene que cubrir todo el perímetro de los agregados, las arenas muy finas serían antieconómicas, mientras que arenas y gravas gruesas pueden producir mezclas sin trabajabilidad, los agregados que contenga una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño y presentan una curva granulométrica suave, producirán los resultados más satisfactorios. Una adecuada combinación de estos agregados podrá reducir la cantidad de vacíos que repercutirán en el espacio a llenar por pasta, ya que la demanda de pasta de cemento para el concreto se relaciona con la cantidad de vacíos de la combinación de agregados, hay varias razones para especificar los límites de granulometría y el tamaño máximo del agregado, bien como la demanda de agua y de cemento, trabajabilidad, bombeabilidad, economía, porosidad, contracción (retracción) y durabilidad del concreto. Siendo lo más importante su influencia en la trabajabilidad y en el costo (Kosmatka et al. , 2004).

La forma y la textura de la superficie de las partículas del agregado influyen en las propiedades de las mezclas de concreto las partículas con textura áspera, angulares o elongadas requieren más agua para producir un concreto trabajable que agregados lisos, redondeados y compactos. Las partículas planas y elongadas se deben evitar o, por lo menos, limitar a cerca del 15% de la masa total del agregado (kumar y Monterio, 1998).



4.3.4. sustancias nocivas.

Son aquellas que están presentes como constituyentes menores, pero son capaces de afectar adversamente la trabajabilidad, el fraguado y endurecimiento y las características de la durabilidad del concreto, algunas de estas sustancias son: materiales que reaccionan con los álcalis del cemento, sulfuros de hierro, ambas se han encontrado causando una expansión, sulfato de magnesio, sulfato de sodio o sulfato de potasio, también originan ataque por sulfatos (kumar y Monterio, 1998). Los agregados pueden eventualmente contener partículas de óxido de hierro y sulfuro de hierro que resultan en manchas antiestéticas sobre las superficies expuestas del concreto.

4.4. Agua para el concreto.

Como componente del concreto convencional, el agua suele representar aproximadamente entre 10 y 25 por ciento del volumen del concreto recién mezclado, dependiendo del tamaño máximo de agregado que se utilice y del revenimiento que se requiera.

En relación con su empleo en el concreto, el agua tiene dos diferentes aplicaciones: como ingrediente en la elaboración de las mezclas y como forma de curado de las estructuras recién construidas, las cuales deberán de ser del mismo origen, o similar, para evitar que se subestime esta segunda aplicación y se emplee agua de curado con características inadecuadas.

De acuerdo con las características físico-químicas del agua para concreto, no parece haber limitaciones que deben imponerse a las sustancias e impurezas cuya presencia es relativamente frecuente, como puede ser el caso de algunas sales inorgánicas (cloruros, sulfatos), sólidos en suspensión, materia orgánica, dióxido de carbono disuelto, etc. Sin embargo, en lo que sí parece haber acuerdo es que no debe tolerarse la presencia de sustancias que son francamente dañinas, como grasas, aceites, azúcares y ácidos, por ejemplo. La presencia de alguna de estas sustancias, debe tomarse como un síntoma de contaminación que requiere eliminarse antes de considerar la posibilidad de emplear el agua (vicuña, 2011).

El agua para el mezclado se adiciona junto con los agregados y el cemento. Se necesita éste último para producir una pasta hidratada con fluidez tal, que



permita la lubricación adecuada de la mezcla de concreto cuando se encuentre en estado plástico. Dependiendo de la cantidad de agua adicionada, la fluidez de la pasta será mayor o menor, y al endurecerse una cantidad del agua quedará fija como parte de la estructura y otra permanecerá como agua libre.

Los efectos indeseables que el agua de calidad inadecuada que se utiliza para el mezclado de puede producir en el concreto, son a corto, mediano y largo plazo. Los efectos a corto plazo normalmente se relacionan con el tiempo de fraguado y las resistencias iniciales, los de mediano plazo con las resistencias posteriores (a 28 días o más) y los de largo plazo pueden consistir en el ataque de sulfatos, la reacción álcali-agregado y la corrosión del acero de refuerzo (vicuña, 2011).

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y las resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencias, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad (Kosmatka et al. , 2004).

4.5. Aditivos en el concreto.

Según neville (2004) un aditivo es un producto químico, que excepto en casos especiales, se agrega a la mezcla de concreto en cantidades no mayores al 5 por ciento de la masa del cemento durante el mezclado o durante una operación adicional de mezclado antes de la colocación del concreto, con el propósito de realizar una modificación específica, o modificaciones, a las propiedades normales del concreto.

El concreto debe ser trabajable, fuerte, durable, resistente al desgaste. Estas calidades se las puede obtener fácil y económicamente con la selección de los materiales adecuados, sin embargo muchas veces es necesario agregar un aditivo para compensar las necesidades que carecen gracias a los materiales.

Las razones principales para el uso de aditivos son:

- Reducir el costo de la construcción de concreto.
- Obtener ciertas propiedades en el concreto de manera más efectiva que otras.



- Mantener la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colado y curado en condiciones de clima adverso.
- Superación de ciertas emergencias durante las operaciones de mezclado, transporte, colocación y curado.
- Mejorar la trabajabilidad del concreto.
- Reducir el agrietamiento por el calor de hidratación
- Reducir su potencial de corrosión.

A continuación en la Tabla 1 se muestra de acuerdo con la norma NMX-C-255-ONNCCE-2006 los aditivos se pueden clasificar en:

Tabla. 2 Tipos de Aditivos.

Tipo	Nomenclatura	Propiedad
A	Reductor de agua	Disminuir la cantidad de agua de la mezcla, requerida para producir un concreto de una consistencia dada.
B	Retardante	Prolongar el tiempo de fraguado del concreto.
C	Acelerante de fraguado inicial	Acortar el tiempo de fraguado del concreto.
C2	Acelerante de resistencia	Acelerar la resistencia mecánica del concreto, a edades tempranas.
D	Reductor de agua y retardante	Prolongar el tiempo de fraguado del concreto.
E	Reductor de agua y acelerante	Disminuir la cantidad de agua de la mezcla, entre 5% y 11% requerida para producir un concreto de una consistencia dada, además de acotar el tiempo de fraguado del concreto.
F	Reductor de agua de alto rango	Disminuir la cantidad de agua de la mezcla.
G	Reductor de agua de alto rango y retardante	Disminuir la cantidad de agua de la mezcla, en 12% o más, requerida para producir un concreto, además de prolongar el tiempo de fraguado del concreto.
F2	Superplastificante	Incrementar el revenimiento del concreto en 90mm como mínimo, con respecto al testigo, para producir un concreto que fluye, con revenimiento mayor a 190 mm, sin presentar segregación ni sangrado.
G2	Superplastificante y retardante	Incrementar el revenimiento del concreto en 90mm como mínimo, con respecto al testigo, para producir un concreto que fluye, con revenimiento mayor a 190 mm, sin que



		pierda su cohesión y retardando su tiempo de fraguado.
AA	Inclutor de aire	Desarrollar un sistema disperso de burbujas microscópicas de aire, que mejoran la Trabajabilidad de las mezclas e incrementan su resistencia al congelamiento y deshielo.

Para las mezclas en donde se requiere tener una relación agua cemento baja será necesario hacer uso de algún aditivo fluidificante o en su defecto de un aditivo reductor de agua, los cuales permiten una reducción en la relación agua/cemento mientras se conserva la trabajabilidad de las mezclas.

Los aditivos reductores de agua se usan por lo regular para concretos los cuales serán bombeados, Estos aditivos proporcionan una reducción significativa de la cantidad de agua (entre 6 y 12%) para concretos con revenimiento de 125 a 200 mm (5 a 8 pulg.). La efectividad de estos aditivos con respecto a la resistencia varía considerablemente dependiendo de la composición química del cemento, la temperatura del concreto, la finura y composición del cemento, del contenido de cemento y de la presencia de otros aditivos. Kosmatka et al. (2004), Mencionan que los aditivos reductores de agua puede llegar a modificarse para obtener varios grados de retraso en lo que corresponde a su fraguado, mientras que otros no afectan considerablemente el tiempo de fraguado, por ejemplo los aditivos tipo A pueden tener un pequeño efecto sobre el tiempo de fraguado, el tipo E lo acerca y el tipo de D normalmente lo retarda 1 a 3 horas. Tal es el caso de

Los aditivos superfluidificantes son también llamados aditivos reductores de agua de alto rango, un tipo F y cuando los superfluidificantes son también retardantes, son llamados aditivos del tipo G, debido a que son capaces de reducir tres a cuatro veces el agua en una mezcla dada de concreto en comparación a los reductores de agua normales (neville 2004). El incremento de las propiedades mecánicas (como compresión y tensión) se atribuye a la disminución de la relación agua/cemento, frecuentemente, debido a una velocidad mayor de hidratación.

4.5.1. Aditivo Utilizado en esta Investigación.

El aditivo utilizado en esta investigación, fue el fluidificante CRISOTAN R-5 el cual es una agente dispersante que promueve la separación de las partículas de



cemento, venciendo las fuerzas cohesivas que las atraen unas a otras, causa que las mezclas de concreto fluyan con más facilidad que las mezclas convencionales.

Beneficios de CRISOTAN R-5:

- Permite reducir la relación agua –cemento
- Ayuda a tener una mejor y más rápida colocación del concreto.
- Permite disminuir el contenido de cemento, manteniendo la resistencia a la compresión.
- Mejora el acabado en concretos premoldeados.
- No afecta al calor de hidratación del concreto.
- No contribuye a la corrosión del acero.

El porcentaje de adición se hace con respecto a su peso, al momento de elaborar las mezclas se adiciona al agua con que se elaborará el concreto para tener la mayor distribución entre toda la mezcla.



Ilustración 1 fluidificante CRISOTAN R-5 homogenizado en el agua para la elaboración de cilindros 10 cm x 20 cm



4.6. Concreto.

Inicialmente estos conglomerados eran usados sin grandes exigencias de resistencia estructurales ya que eran utilizados como una especie de morteros de los cuales su función era ligar bloques rocosos para el trabajo armonioso de la estructura (O'Reillym, 2007). Se tiene indicios de que el concreto fue usado por primera vez en Roma alrededor de la tercera centuaria antes de Cristo. Estaba constituido por agregados unidos mediante un aglomerante conformado por una mezcla de cal y ceniza volcánica. El primer registro del uso de concreto en los tiempos modernos, se remonta a 1760 cuando, en Inglaterra, John Smeaton descubrió, mientras proyectaba el faro Eddystone, que una mezcla de caliza calcinada y arcilla daba lugar a un conglomerante hidráulico resistente al agua.

Según la norma NMX-C-403-ONNCCE-1999. El Concreto hidráulico. Es una mezcla de agregados, naturales, procesados o artificiales, cementante y agua, a la que además se le pueden agregar algunos aditivos; debe ser dosificada en masa o en volumen.

4.6.1. Ventajas del concreto.

De acuerdo con O'Reilly (2007), El concreto elaborado con cemento Portland es actualmente el material manufacturado más utilizado por el hombre, que de acuerdo con las tendencias mundiales, su futuro tiende a ser más significativo e importante, esto resulta gracias a todas las posibilidades de su uso, bajo costos, debido a su carácter plástico en estado fresco, tiene la posibilidad de lograr elementos estructurales de diversas formas, posee una magnífica resistencia al agua, a diferencia del acero y la madera, pero si duda alguna la más significativa ventaja, es, que está constituido por materiales que se encuentran en abundancia en el mundo.

4.6.2. Tipos de Concreto.

Hay numerosas formas de elaborar un concreto de ellas se designa su nombre y tipo por mencionar algunos ejemplos: concreto reforzado, concreto adicionado para la modificación de su comportamiento y concreto con sustitución parcial de los agregados que comúnmente lo conforman.



De los diferentes modos de clasificar un concreto, 2 son los más utilizados, estos son por su peso unitario y por la resistencia que tienen ante una carga de compresión.

De acuerdo a su peso unitario pueden ser:

- Concretos de peso normal: Es el concreto más comúnmente utilizado para propósitos estructurales, El cual está contenido por arena natural y grava o agregados de roca triturada, que pesa aproximadamente $2,400 \text{ kg/m}^3$.
- Concreto ligero: Para aplicaciones en donde se desea una relación más alta de la resistencia comparada con su peso, su peso es inferior a 1800 kg/m^3 .
- Concreto pesado: Es un concreto elaborado con agregados de alta densidad por ende pesan más, su peso es mayor a los $3,200 \text{ kg/m}^3$.

De acuerdo a la resistencia a la compresión que logran soportar pueden clasificarse:

- Concreto de baja resistencia: menos de 20 Mpa (204 kgf/cm^2) de resistencia a la compresión.
- Concreto de moderada resistencia: toma un rango de 20 a 40 Mpa (204 kgf/cm^2 a 408 kgf/cm^2) de resistencia a la compresión.
- Concreto de alta resistencia: más de 40 Mpa (408 kgf/cm^2) de resistencia a la compresión.

4.6.3. Conformación de un concreto.

Generalmente los agregados (áridos) se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos pueden ser arena natural o artificial (manufacturadas) con partículas de hasta 9.5 mm ($3/8$ pulg.); agregados gruesos son las partículas retenidas en la malla 1.18 mm (tamiz no.16) y pueden llegar hasta 150 mm (6 pulg.). El tamaño máximo del agregado grueso comúnmente empleado es 19 mm o 25 mm ($3/4$ pulg. o 1 pulg.). Un agregado de tamaño intermedio, cerca de 9.5 mm ($3/8$ pulg.) es, algunas veces, adicionado para mejorar la granulometría general del agregado. La pasta se compone de materiales cementantes, agua y aire atrapado o aire incluido (intencionalmente incorporado). La pasta constituye aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del concreto. La Figura 1-2 muestra que el



volumen absoluto del cemento está normalmente entre 7% y 15% y el volumen del agua está entre 14% y 21%. El contenido de aire atrapado varía del 4% hasta 8% del volumen. Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es muy importante. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar deterioro del concreto. La granulometría continua de tamaños de partículas es deseable para el uso eficiente de la pasta. A lo largo de este texto, se asumirá que se usan agregados apropiados, a menos que se señale de otra manera.

4.6.4. Permeabilidad.

La permeabilidad es la facilidad con la cual los líquidos y los gases pueden viajar a través del concreto. Esta propiedad es importante en relación a la velocidad del flujo de un fluido en un sólido poroso como también está relacionado con la hermeticidad de las estructuras retenedoras de líquidos y con el ataque químico al concreto. Desde el punto de vista de la durabilidad puede ser importante lograr concretos con una baja permeabilidad. Para una relación agua/cemento dada, la permeabilidad disminuye al continuar el proceso de hidratamiento del cemento y llenando algunos de los espacio que originalmente era de agua; para tales casos la reducción en permeabilidad es más rápida mientras más baja es la relación agua/cemento (neville y Brooks, 1998).

4.6.5. Durabilidad.

Según ACI 201 la durabilidad de un concreto se puede definir como la habilidad que tienen para resistir la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades de ingeniería es decir el concreto durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio, cuando se exponga al medio ambiente. Esta habilidad es de máxima importancia ya que es esencial que sea capaz de resistir las condiciones para las cuales ha sido diseñado.

La falta de durabilidad puede ser causada por agentes externos en el ambiente o por agentes internos dentro del concreto. Según kumar y paulo (1998), Los agentes principales de la durabilidad que pudiera tener un concreto están dados primeramente por el agua esta generalmente involucrada en cada uno de los



problemas de deterioro es la causa de los procesos de degradación física. En segundo lugar, los fenómenos físico-químicos asociados con los movimientos del agua en los sólidos porosos, los cuales son controlados por la permeabilidad del sólido. Tercero, la velocidad de deterioro es afectada por el tipo de concentración de iones en el agua y por la composición química del sólido.

De acuerdo con kumar y paulo (1998), La falta de durabilidad puede ser causada por agentes externos en el ambiente o por agentes internos dentro del concreto. Los agentes principales de la durabilidad que pudiera tener un concreto están dados primeramente por el agua esta generalmente involucrada en cada uno de los problemas de deterioro es la causa de los procesos de degradación física. En segundo lugar, los fenómenos físico-químicos asociados con los movimientos del agua en los sólidos porosos, los cuales son controlados por la permeabilidad del sólido. Tercero, la velocidad de deterioro es afectada por el tipo de concentración de iones en el agua y por la composición química del sólido.

Neville (2004) comenta que los principales ataque que puede sufrir el concreto son:

- Ataque de sulfatos. El concreto que es atacado por sulfatos tiene una apariencia blanquizca característica. El daño por lo regular, comienza en los bordes y las esquinas, seguido por grietas y astillamientos del concreto. Una solución de sulfato es el agua subterránea de algunas arcillas que contienen sulfatos de sodio, calcio o magnesio, estos reaccionan ocasionando un sulfato de calcio (yeso) y sulfoaluminato de calcio (estringita) ambos productos ocupan un mayor volumen que los componentes que reemplazan, por lo que tiene lugar la expansión y la fractura. Tener en cuenta que este ataque solo se puede dar cuando las sales sulfatadas se encuentran en solución ya que se necesita una cierta concentración para que provoque ataque.
- Ataque por agua de mar. El agua de mar contiene sulfatos y podría describirse de la misma manera que el ataque por sulfatos, sin embargo, también hay una fuerte cantidad de cloruros en el agua de mar, el ataque del agua del mar por lo general no produce expansión del concreto, lo que significa que no hay fractura sino solo un pequeño incremento en la porosidad y, por tanto, una disminución en la resistencia.



- Carbonatación. Es el proceso por el cual el dióxido de carbono que posee el aire penetra en el concreto y reacciona con los hidróxidos para formar carbonatos provocando una reducción en su alcalinidad la cual es necesaria para la protección de la armadura contra la corrosión.
- Resistencia l congelamiento y deshielo. El deterioro puede tomar formas variadas la más común es el agrietamiento y el descascaramiento del concreto, causado por la congelación del agua y su posterior expansión en la pasta, agregado o ambos. la inclusión de aire ha demostrado ser un medio efectivo para mitigar estos daños ya que al momento de ocurrir una expansión por congelamiento estos poros de aire podrían ayudar a la mitigación de presiones las cuales provocan la expansión del concreto.

4.6.6. Trabajabilidad.

De acuerdo con ASTM C 125, la Trabajabilidad de un concreto se define como la propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una cantidad mezclada de concreto fresco con una pérdida mínima de homogeneidad. kumar y paulo (1998) indican que la Trabajabilidad se podría decir que es una propiedad compuesta de por lo menos 2 componentes: (1) la consistencia, que describe la facilidad de fluir; (2) la cohesividad, que describe la tendencia a sangrar o a segregarse , Kosmatka et al. (2004) añade que también está relacionada con la segregación, movilidad, bombeabilidad, sangrado y facilidad de acabado.

El revenimiento se usa como medida de la consistencia y de la humedad del concreto que implícitamente da la trabajabilidad de las mezclas, cuando se evalúan mezclas similares. Sin embargo, no se debe utilizar para comprar mezclas de proporciones diferentes ya que el revenimiento no sería un indicador. Un concreto con bajo revenimiento tiene consistencia rígida o seca, de la cual su colocación y compactación serán difíciles. Sin embargo una mezcla más húmeda y fluida no garantiza una buena consistencia ya que, pueden ocurrir segregación y formación de poros vacíos, por lo que la consistencia tendrá ser lo más seca posible para que aún se permita la colocación y su trabajabilidad.

De acuerdo con kumar y paulo (1998) los factores que afectan la trabajabilidad están referenciadas a la cantidad de agua de las mezclas por ejemplo



cuando se aumenta el contenido de agua al reducir la relación agregado/ cemento, aumenta la consistencia, al contenido de cemento, una disminución considerable del contenido de cemento tiende a producir mezclas ásperas, con acababilidad pobre, a las características del agregado, las partículas de agregados gruesos influyen en los requerimientos de agua para una consistencia solicitada, a los aditivos utilizados que ayudaran a la buena consistencia de las mezclas.

4.6.7. Relación Agua/ cemento.

La relación agua cemento (a/c) de un concreto es simplemente la masa del agua dividida por la masa del material cementante, cuando la durabilidad no es el primordial factor, la elección de la relación a/c se debe basar en los requisitos de resistencia a la compresión. Con relaciones a/c bajas y un procedimiento adecuado de curado se minimiza la red de poros capilares y se obtiene una pasta de cemento de buena calidad lo que ayudaría a la durabilidad del concreto (Neville y Brook, 1998).

Muchas veces se toma la resistencia a la compresión como un indicador de la calidad del concreto, la resistencia es inversamente proporcional a la relación a/c, a medida que la relación a/c disminuye, la resistencia aumenta, esto parámetros se utilizan para concretos totalmente compactados y producidos con agregados limpios y sanos (Kosmatka et al. 2004).

Kaplan (1959) estudió el efecto de la relación a/c en la velocidad de pulso. El mostró que al incrementar la relación a/c, la resistencia a la compresión, flexión y la correspondiente velocidad de pulso disminuyen, asumiendo que no hay otros cambios en la composición del concreto.

La relación a/c crece cuando aumenta la cantidad de agua y decrece cuando aumenta el contenido de cemento. En todos los casos, cuanto más baja es la relación a/c más favorables son las propiedades de la pasta de cemento endurecida. La norma ACI 301-72 sugiere que, para ser hermético, el concreto debe tener una relación agua/cemento de no más de 0.48 para agua normal y 0.44 para exposición en agua de mar.

Un cambio en la resistencia del concreto para una dada relación agua / cemento puede estar dado por diversos factores, los principales son:



- Cambios del tamaño, granulometría, textura superficial, forma, resistencia y rigidez del agregado.
- Diferencias en los tipos y fuentes de material cementante.
- Contenido de aire incluido.
- La presencia de aditivos.
- Duración del curado.

La relación agua / cemento elegida para un diseño de mezcla debe ser el menor valor necesario para resistir a las condiciones de exposición anticipadas. En la Tabla 3 se presentan las relaciones máximas que se pueden dar para diferentes condiciones de exposición de los concretos (ACI 318, 2002).

Tabla 1 Relación Agua / cemento máxima y Resistencia de Diseño para condiciones de exposición.

Condición de Exposición.	Relación agua / cemento máxima por masa de concreto.	Resistencia a la compresión de diseño mínima F'_c Kg/cm ² (Mpa) [lb. /pulg ²].
Concreto protegido a la congelación-deshielo, de la aplicación de sales o sustancia agresivas	Para su elección se basará en la resistencia, trabajabilidad y acabados.	Se elije basándose en los requisitos estructurales.
Concretos con baja permeabilidad.	0.50	280 (28) [4000]
Concreto protegido a la congelación-deshielo en condiciones de humedad.	0.45	320 (31) [4500]
Concretos protegidos contra la corrosión.	0.40	350(35) [5000]

4.7. Concreto reciclado.

Desde el punto de vista ambiental, el concreto reciclado se puede definir como un concreto sustentable elaborado con la sustitución parcial o total de agregados pétreos por agregados producto de la demolición, cemento, agua y en algunas ocasiones adiciones de aditivos. El agregado reciclado tiene una mayor absorción y una masa específica relativamente menor que el agregado natural.



4.7.1. Antecedentes del concreto reciclado.

Después de la Segunda Guerra Mundial se llevaron a cabo los primeros usos de los materiales provenientes de la demolición de edificios, utilizándolos como agregados para la elaboración de nuevos concretos. En esa época los escombros producidos por los bombardeos a las ciudades se utilizaron para la elaboración de nuevo concreto para su reconstrucción, particularmente en Gran Bretaña y Alemania. En Rusia, en 1946 Gluzhge investigo el uso de desechos de concreto como agregado. Encontró que el agregado de concreto demolido tenía un peso específico menor que el agregado natural, y que el concreto elaborado con agregados producto de demoliciones tenía baja resistencia a la compresión. (Cruz y Velázquez, 2004).

4.7.2. Obtención del agregado reciclado.

- Demolición de la obra civil, la cual ya ha cumplido su vida útil.
- Recolección del material, su dimensionamiento estará limitado por las dimensiones de la máquina trituradora.
- Remoción del material no deseado como es acero, madera, tabique y otros artículos embebidos.
- Proceso de trituración para la obtención del agregado reciclado.
- Caracterización del agregado reciclado.
- Clasificación del agregado grueso y fino.
- Elaboración del concreto reciclado.

4.7.3. Manejo de residuos sólidos.

La norma NADF-007-RNAT-2004 menciona que la composición de los residuos generados por la industria de la construcción varía mucho dependiendo del tipo de actividad ya sea demolición o construcción, además de los métodos utilizados para ello. Los residuos generados durante estas actividades consisten generalmente en pedacería de materiales utilizados para construir tales como madera, tabla roca, residuos de albañilería, metales, vidrio, plásticos, asfalto, concretos, ladrillos, bloques, cerámicos entre otros.



Las cifras de INEGI (instituto nacional de estadística y geografía) en el censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegaciones 2011, arrojaron que la recolección nacional diaria de residuos sólidos urbanos en el 2010 fue 86, 342,420 kg de los cuales 2,286, 779 kg fueron recolectados del estado de Michoacán. El estado que más residuos sólidos urbanos producen es el distritito Federal con 17, 043, 000 a pesar de que su limitación territorial, ya que es el estado con menor extensión territorial con 1, 495 km².

4.7.4. Características de los materiales agregados reciclados.

Se recopilará información de los agregados reciclados (finos y Gruesos), como también se les tendrá que hacer pruebas para determinar la factibilidad de su utilización. Oikonomou (2005) los agrupa en las siguientes 4 categorías:

- Recopilación de todos los datos históricos del agregado reciclado, características petrográficas como son su aspecto descriptivo, su composición mineralógica y su estructura. De no poseer tal información se tendrá que basar en el estudio de los agregados triturados.
- Características físicas: absorción de agua, densidad, tal fuera el caso de estar expuestos a ataque de cloruros y sulfatos saber su afectación.
- Características mecánicas: su resistencia a la compresión simple, desgaste, flexión.
- Características ambientales: especial cuidado donde el agregado de concreto reciclado tiende a crear lixiviados.

A continuación analizaremos algunas propiedades importantes:

Porosidad. Los agregados reciclados son mas porosos en comparación con los agregados naturales, este incremento baja la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado, con lo cual se genera una reducción en la resistencia a la compresión, como también puede generar una reducción en la resistencia a la corrosión. Al tener alta porosidad indica que hay una red de poros por los cuales viajaran agentes agresivos dentro del concreto, fácil acceso al oxígeno y al agua, los que provocaran la aceleración de la corrosión. Por lo tanto no es aconsejable usar



agregados reciclados en concretos expuestos a ambientes corrosivos, por ejemplo el ambiente marino (Ann ed al., 2008).

Absorción. El agua trabaja como vehículo de transporte para los iones agresivos, los cuales entre más alta absorción tengan los agregados indica un riesgo mayor para la durabilidad. Wirquin et al. (2000) realizó estudios comparativos entre la absorción de agregados reciclados y agregados naturales reportando una similitud entre ambos y afirmó que los dos agregados obedecen las mismas leyes. Cruz y Velázquez (2004) referencian a Malhotra, quien mediante microscopia óptica y electrónica. Encontró que las partículas de concreto demolido tendían a adoptar formas más redondas y texturas de superficie mas uniformes que la de los agregados naturales. Observando grietas en la pasta de cemento adherida a la partículas. Concluyen que estas grietas podían ser las causantes del grado de absorción. Los valores de absorción típicamente varían del 3% al 10%, dependiendo del concreto que se recicla, los valores aumentan a medida que el tamaño del agregado grueso disminuye.

Trabajabilidad. Cruz y Velázquez (2004) observaron en el estudio de Buck, que las mezclas que contienen concreto demolido, como agregado grueso y fino, presentaban un revenimiento menor y un contenido de cemento mayor que el de las mezclas convencionales. Sin embargo cuando se utilizo arena natural como agregado fino y concreto demolido como agregado grueso hubo poca diferencia en el revenimiento, al igual que en el contenido de aire o de cemento. Buck también encontró posible lograr una trabajabilidad equivalente con una relación agua / cemento, mediante el uso de un aditivo reductor de agua.

Aditivos. Levy y Helene (2004) en sus investigación de un concreto con agregados finos y gruesos de concreto reciclado, cemento Portland y 35% de escoria del alto horno, concluyeron que la profundidad de carbonatación disminuyó cuando la cantidad de agregado reciclado aumento, presentando un mejor comportamiento cuando este fue remplazado por un 20% o un 50% de agregados reciclados por naturales.



4.7.5. Ventajas.

La producción de los agregados naturales se lleva a cabo por medio de la explotación o extracción de materiales pétreos, lo que conlleva un gran impacto en el ambiente por el desgaste del suelo, alteración del paisaje, deterioro de la calidad del aire y agua. La construcción, como actividad económica, produce un volumen significativo de residuos conocidos como escombros los cuales al ser reciclados aumentan la vida útil de los rellenos sanitarios. El concreto reciclado resulta atractivo cuando el producto es competitivo con otros materiales en relación al costo y a la calidad. Por ejemplo cuando existe dificultad para obtener agregados naturales donde se pueden reunir la demolición y la nueva obra.

4.7.6. Desventajas.

Uno de los problemas potenciales del uso del concreto reciclado es la variabilidad en las propiedades del concreto viejo, que, a su vez, puede afectar las propiedades del concreto nuevo. Se tiene que hacer el ajuste de las proporciones por cada mezcla. Por otro lado a generación de polvo, ruido, vibraciones y aguas residuales que pudieran provocar las plantas de reciclado, el costo de la mano de obra para la trituración y recursos de la actividad de recolección podrían generar una desventaja sobre los concretos convencionales.



5. METODOLOGÍA.

5.1. Obtención del agregado Reciclado.

Por cuestiones técnicas de seguridad para las personas, tuvo que ser demolida la torre médica principal del Instituto Mexicano del Seguro Social, ubicado en la avenida Madero Poniente No. 1200, C.P. 58000, de la ciudad de Morelia, Michoacán, México. De dicho lugar se extrajeron bloques de concreto recolectados de diferentes zonas de la demolición, para poder lograr obtener una muestra representativa de toda la torre demolida (Ilustración 1).



Ilustración 2 Torre Médica principal del Instituto Mexicano del Seguro Social

Una vez recolectado el material se llevó a cabo el proceso de trituración, en el cual se obtuvo agregado con dimensionamientos apropiados para la elaboración de una mezcla de concreto (Ilustración 2).



Ilustración 3 Proceso de Trituración.



Dicho proceso se llevo a cabo con una trituradora marca Denver de quijadas fijas tiene 5 cm por 10 cm de separación entre quijadas (Figura 3) en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, el dimensionamiento de las quijadas nos dio el parámetro para la elección de bloques en el lugar de la demolición. Una vez triturado el material se realizó una clasificación con respecto a sus diámetro, por medio de la malla numero 4, material que pasa la malla número 4, es decir material con dimensiones menores a 4.76 mm correspondían a material que podría sustituirse por arena, material que se retenía en la malla número 4 se podría sustituir por la grava. Se logró triturar 825.64 kg de los cuales el 67.67% correspondía a arena y 32.33% correspondía a gravas, aproximadamente un tercio del material era arena con ello se observó la carencia de finos que se tenían en materiales reciclados a utilizar.



Ilustración 4 Trituradora marca Denver de quijadas fijas.

5.2. Caracterización del material.

La caracterización de los materiales a utilizar en la elaboración de la mezcla se llevó a cabo en el laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Rúelas” de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Antes de iniciar con ésta caracterización fue necesario realizar un tendido del material ya que el material tenía que estar totalmente seco para las pruebas (Ilustración 4) La caracterización se hizo en base a las Normas Mexicanas (NMX) vigentes. Las pruebas que se llevaron a cabo en los agregados finos y gruesos resultantes de la trituración fueron: densidad, porcentaje de absorción, humedad actual, peso volumétrico seco suelto, peso volumétrico seco varillado, granulometría, modulo de finura (arenas) y tamaño máximo (gravas).



Ilustración 5 Tendido del Material fino.

5.3. Elaboración de especímenes.

Los especímenes de concreto se elaboraron de acuerdo a las Normas Mexicanas (NMX) vigentes, siguiendo el método del ACI (American Concrete Institute) para el cálculo del proporcionamiento. Con un cemento Portland compuesto de 30 MPa de resistencia (CPC-30R) de fabricación mexicana, equivalente al Portland tipo I con adición de caliza (NMX-C-414-ONNCCE, 1999), Para una comparativa se realizaron 2 mezclas distintas: (1) Cilindros testigos, tomando un f'_c de 350 kg/cm², relación agua/cemento de 0.48. (2) Cilindros de baja relación, en ellos se mantuvo constante el cemento, grava y agua, adicionando en base a lo experimentado 0.58% del peso del cemento en fluidificante, tomando un f'_c de 420 kg/cm², relación agua/cemento de 0.41 que corresponde a la relación más baja que se podía tener una buena trabajabilidad, fluidez, mayor resistencia, en la mezcla.

Ya que el agregado fino reciclado no cumplía con las especificaciones requeridas, por lo cual se tuvo que hacer una combinación de este con arena del río Lerma, se elaboraron cilindros para la mezcla de grava, agua, cemento y 60% de arena reciclada con 40% de arena de río, también para mezclas de 50% de arena de reciclada y 50% de arena río, como también para mezclas de 70% de arena reciclada y 30% de arena de río, para poder comparar su resistencia a edades 7, 14 y 28 días de edad, esto porque respecto a su modulo de finura eran las mezclas más adecuadas.



De la experimentación anterior se procedió a la elaboración de cilindros para las pruebas tales como : resistencia a la compresión axial en cilindros de 10 centímetros de diámetro por 20 centímetros de altura, a los cuales también se les realizaron pruebas no destructivas: Resistividad eléctrica, Frecuencia de resonancia, Velocidad de pulso ultrasónico y módulos de elasticidad dinámica para 14, 28, 60 y 90 días de edad, elaborándose 4 especímenes por edad, para mezclas con baja relación a/c , como también para mezclas para cilindros testigos.

Para la prueba de sulfatos se elaboraron 36 cilindros de 5 centímetros de diámetro por 10 centímetros de altura, de los cuales 18 especímenes eran con baja relación a/c y 18 especímenes testigos.

Para la prueba de Módulos de ruptura se elaboraron vigas de 15 x 60 centímetros para probarse a 28 días de edad, 3 vigas testigo y 3 vigas de baja relación a/c .

6. DESAROLLO EXPERIMENTAL.

Las pruebas de esta experimentación fueron realizadas conforme a las normas mexicanas, dichas pruebas se encuentran en el manual análisis de materiales (2000).

6.1. Pruebas realizadas a los agregados finos.

6.1.1. Cuarteo en Arenas.

Para las muestras de arena existen 3 métodos para realizar un cuarteo de la muestra, los cuales son: cuarteo por mecánico, cuarteo manual, cuarteo con la utilización de un trozo de plástico, este último se lleva a cabo cuando la muestra que requerimos es de una cantidad muy pequeña.

Para fines de practicidad la recolección de las muestras requeridas de esta experimentación se llevaron a cabo con el método de cuarteo manual.

EQUIPO.

- Charolas grandes de lámina.
- Palas de boca recta.
- Escoba.



PROCEDIMIENTO.

1. Se vacía la muestra de material en uno de los extremos de la charola grande.

2. Se cambia el material al extremo opuesto, este cambio deberá hacerse por medio del paleado, tratando de revolver todo el material, además se procurará apilar el material en forma cónica. Este procedimiento se repite tres veces.

3. El material se apila en forma cónica, se aplana la parte superior por medio de la cara posterior de la pala y después se divide el material trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie horizontal aplana del material, eliminando las dos porciones opuestas, el material sobrante nos servirá para realizar las pruebas correspondientes. Si se desea disminuir el tamaño de la muestra se repite el procedimiento anteriormente señalado.



Ilustración 6 Cuarteo en Arenas

6.1.2. Humedad actual en arenas.

El objetivo es determinar el porcentaje de humedad que contiene una arena en el momento que se va a utilizar para elaborar una mezcla, para así poder realizar la corrección correspondiente por humedad, esta prueba se lleva unas pocas horas antes de la elaboración de concreto para que sea más significativa.

EQUIPO.

- Muestra representativa de arena de 500 gramos aproximadamente.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.



- Parrilla eléctrica.
- Charolas metálicas.
- Espátulas.
- Cristal.

PROCEDIMIENTO.

De la muestra representativa se pesan 300 gramos registrando este valor como masa inicial de la muestra o masa húmeda actual (Mh), posteriormente, esta muestra se coloca en una charola metálica sobre la parrilla eléctrica para hacer el secado del material moviéndolo esta con la espátula en forma constante para que el secado sea homogéneo hasta eliminar completamente la humedad del material. Para saber cuándo el material ya está seco, se coloca el cristal sobre el material y en el momento que ya no se empañe esto significa que el material ya está seco. Procediendo a dejar enfriar el material a temperatura ambiente y pesarlo. Este peso se registrará como masa final o masa seca de la muestra (Ms).

CÁLCULOS.

$$\% \text{ humedad actual} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Dónde:

Mh= masa de la muestra en gramos.

Ms = masa seca del material en gramos.



Ilustración 7 Obtención de la masa seca del material en gramos.



6.1.3. Humedad Superficial y Humedad de absorción en arenas.

El objetivo es determinar la capacidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje.

EQUIPO.

- Muestra representativa de aproximadamente 2 kilogramos.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Parrilla eléctrica.
- Charolas metálicas.
- Cono metálico (truncocónico).
- Pizón.
- Espátula.

PROCEDIMIENTO.

1. La muestra de 2 kg se pone a saturar durante 24 horas, como mínimo, antes de realizar la prueba.

2. Al término de este tiempo se seca superficialmente, la arena por medio del molde truncocónico como se describe a continuación:

- Se coloca la arena en la charola, después se procede hacer el secado de la arena solo en forma superficial para realizar la eliminación de agua que tiene en exceso. Para saber cuándo la arena está seca superficialmente se coloca el molde truncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena en tres capas distribuyendo 25 golpes dados con el pizón, dando 12 a la primera, 8 a la segunda y 5 a la tercera. Inmediatamente después se retira el cono y si la arena trata de disgregarse quiere decir, que ya está seca superficialmente y si la arena mantiene la forma del cono significa que todavía tiene agua en exceso por lo tanto hay que seguir secando el material hasta que se obtenga el secado superficial.

3. Cuando la arena está seca superficialmente hay que pesar una muestra de 300 gramos, registrando este peso como masa saturada y superficialmente seca (Mh).



4. La muestra de 300 gramos, se coloca en una charola para secarla hasta peso constante, o sea, hasta eliminar completamente el agua.

5. Para saber cuándo el material está seco se coloca el cristal sobre el material, si no lo empaña retiramos el material del fuego y lo dejamos enfriar un poco, procediendo a pesarlo y registramos el peso como masa seca (Ms), si todavía se empaña el cristal hay que seguir secando el material para secarlo completamente.

CÁLCULOS.

$$\% \text{ Humedad de Absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Dónde:

% Humedad de Absorción= % que absorbe la muestra.

Mh = masa saturada y superficialmente seca (gramos).

Ms = masa seca del material (gramos).



Ilustración 8 Secado Superficial del Agregado Fino



6.1.4. Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (mvss).

Esta prueba se lleva a cabo para determinar la masa por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural.

EQUIPO.

- Muestra de arena completamente seca.
- Recipiente de masa y volumen conocido.
- Varilla lisa punta de bala de 5/8” de diámetro.
- Balanza o báscula.
- Cucharón.
- Pala.

PROCEDIMIENTO.

Se vacía la arena dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros, distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono. Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo. La masa obtenida anteriormente se le resta el peso del recipiente para obtener la masa de la arena.

CÁLCULOS.

$$M.V.S.S. = \frac{M}{V}$$

Dónde:

M.V.S.S. = Masa volumétrica seca y suelta (gramos/cm³).

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm³).



Ilustración 9 Llenado del Recipiente para la obtención de M.V.S.S del agregado Fino.

6.1.5. Determinación de la masa Volumétrica Seca y Varillada de una arena (mvsv).

El objetivo de esta prueba es obtener la masa por unidad de volumen de una muestra de arena, cuando el material tiene una determinada compactación.

EQUIPO.

- Muestra de arena completamente seca.
- Recipiente de peso y volumen conocido.
- Varilla lisa punta de bala de 5/8” de diámetro.
- Balanza o báscula.
- Cucharón
- Pala.

PROCEDIMIENTO.

Se procede a llenar el recipiente con arena a volteo, dejándola caer a una altura aproximada de 5 centímetros, el llenado del recipiente debe de hacerse en tres capas dando a cada capa de arena 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material. Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes. Se enrasa el recipiente con la varilla

punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores. Después de haber realizado los pasos anteriores se pesa el recipiente con el material y se le resta el peso del recipiente para así obtener la masa neta del material.

CÁLCULOS.

$$M.V.S.V. = \frac{M}{V}$$

Dónde:

M.V.S.V.= Masa volumétrica seca y varillada (gramos/cm³).

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm³).



Ilustración 10 Varillado para la obtención de la M.V.S.V en agregados Finos.

6.1.6. Densidad de la Arena.

El objetivo es determinar el volumen obstáculo de las partículas de arena, es decir, el volumen efectivo excluyendo los vacíos que se forman entre las partículas de arena cuando se acomodan una sobre la otra.

EQUIPO.

- Muestra representativa de arena de aproximadamente 1000 gramos.
- Charolas.
- Espátulas.
- Parrilla eléctrica.



- Molde tronco cónico.
- Pizón.
- Vidrio.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Probeta.

PROCEDIMIENTO.

1. Se pone a saturar la arena en una charola durante 24 horas al término de este tiempo se seca superficialmente utilizando el procedimiento descrito con anterioridad.

2. En la probeta se coloca un volumen de agua conocido, registrándolo como volumen inicial V_i (cm^3). Enseguida se pesa una muestra de arena superficialmente seca anotando este valor como masa de la arena (M_a) que aproximadamente sea entre 200 y 300 gramos.

3. Posteriormente se coloca la arena dentro de la probeta, procurando que no salpique agua porque esto nos ocasionaría un error en la prueba, agitando un poco la probeta para expulsar el aire atrapado, esta operación va a provocar un aumento en el volumen de agua que se registrará como volumen final V_f .

CÁLCULOS.

La densidad de la arena se calcula de la siguiente manera:

$$DA = \frac{M_a}{V_f - V_i}$$

Dónde:

DA = densidad de la arena en g/cm^3 .

M_a = masa de la arena saturada y superficialmente seca en gramos en gr.

$V_f - V_i$ = volumen colocado dentro de la probeta en cm^3 .



Ilustración 11 Muestra de agregados Finos totalmente Saturada.

6.1.7. Granulometría o Análisis Granulométrico en Arena.

El objetivo es Pasar por una serie de mallas o tamices la muestra representativa de arena, para conocer la distribución de los diámetros de las partículas y el módulo de finura.

EQUIPO.

- Juego de mallas con abertura rectangular o circular del N° 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola con su respectiva tapa.
- Balanza con capacidad de 2160 gramos y aproximación al décimo de gramo.
- Charolas, espátulas y parrillas eléctricas.
- Cepillos de cerdas y alambre.
- Hojas de papel.

PROCEDIMIENTO.

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos.
2. Se seca la muestra hasta peso constante, a una temperatura de no mayor de 110°C.
3. Cuando el material este seco y frío, se toman 500 gramos, pesados al décimo de gramo.
4. Se colocan las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola), se coloca la muestra de 500 gramos y se tapa.



5. Se agita el juego de mallas durante un tiempo de 10 minutos como mínimo, el agitado puede ser a mano o mecánicamente (Raf-tap).

6. Se procede a pesar el material retenido en cada una de las mallas con aproximación al décimo de gramo, anotando los pesos en el registro correspondiente. Para lo cual se invertirán las mallas con todo cuidado y utilizando cepillo de alambre las mallas 4, 8, 16 y 30 para desalojar el material que se encuentra entre los espacios de la malla, mientras que las mallas 50, 100 y 200 se limpiarán con cepillo de cerdas.

7. En una superficie horizontal y limpia se colocan siete hojas de papel y sobre ellas se coloca el material retenido en cada una de las mallas previamente pesado, esto para tenerlo como testigo si es que surge algún error.

CÁLCULOS.

1. Se anotan los pesos en las respectivas mallas en la columna (1).

2. El retenido de la columna (2) se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{Peso Retenido}}{\text{Suma del peso Retenido}} * 100$$

3. El % acumulativo se calcula a partir de los datos de la columna (2) como sigue:

$$\% \text{ acumulativo de la malla} = \% \text{ retenido malla} + \% \text{ acumulativo malla anterior}$$

4. El % que pasa se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Que pasa de la malla} = 100 - \% \text{ acumulativo de la malla}$$

5. Módulo de finura:

$$MF = \frac{\sum \text{de la malla \#8 hasta la malla\# 100}}{100}$$

RECOMENDACIONES Y ESPECIFICACIONES.

Para fines de calidad se recomienda que el Modulo de finura este entre 2.5 y 3.0, de acuerdo a la NMX-C-111-ONNCCE-2004 puede quedar entre 2.3 y 3.2.



Especificaciones de granulometrías según Bureau Of Reclamation A.S.T.M.

<i>malla</i>	<i>% Que pasa</i>
3/8	100
4	95-100
8	80-100
16	50-85
30	25-60
50	10-30
100	2-10

El porcentaje referido de dos mallas sucesivas no debe de ser mayor a 45%.



Ilustración 12 Maquina raf-Tap y dimensionamiento del agregado Fino.

6.2. Pruebas realizadas a los agregados Gruesos.

6.2.1. Cuarteo en Gravas.

El objetivo de esta prueba es obtener una muestra representativa y del tamaño adecuado para realizar la prueba correspondiente al material de estudio.

EQUIPO.

- Charolas grandes de lámina.
- Palas de boca recta.
- Escoba.

PROCEDIMIENTO.

Existen dos formas de efectuar el cuarteo de material pétreo, estas dependiendo de la cantidad de material que se va a reducir en partes iguales



menores. Para todas las muestras que se requirieron en esta experimentación se llevo a cabo el método manual.

Procedimiento por cuarteo con palas.

1. Se vacía la muestra de material en uno de los extremos de la charola grande.

2. Se cambia el material al extremo opuesto, este cambio deberá hacerse por medio del paleado, tratando de revolver todo el material, además se procurará apilar el material en forma cónica. Este procedimiento se repite tres veces.

3. Una vez terminado el paso anterior el material apilado en forma cónica se aplanar la parte superior por medio de la cara posterior de la pala y después se divide el material trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie horizontal aplanada del material, eliminando las dos porciones opuestas, el material sobrante nos servirá para realizar las pruebas correspondientes. Si se desea disminuir el tamaño de la muestra se repite el procedimiento anterior señalado.



Ilustración 13 Cuarteo en Agregados Gruesos.

6.2.2. Humedad Actual En Gravas.

El objetivo es determinar la cantidad de agua que contiene una grava, en estado natural, es decir, en el momento que va a ser utilizada para la elaboración del concreto.



EQUIPO.

- Muestra representativa de 1000 gramos de aproximación.
- Charola metálica.
- Espátula.
- Parrilla eléctrica.
- Vidrio.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.

PROCEDIMIENTO.

1. Se toma una muestra representativa de 400 a 500 grs, se pesa y se registra como masa húmeda Mh.

2. Enseguida se coloca en la charola para exponerla en la fuente de calor para eliminar el agua que contiene la grava, moviéndola constantemente con la espátula para que el secado sea uniforme. Cuando aparentemente este seca colocamos el cristal sobre ella para hacer la verificación del secado, si se empaña el cristal o se le forman gotas de agua quiere decir que el material todavía está húmedo y por lo tanto debemos seguir moviéndolo hasta que se seque completamente, para darnos cuenta de esto repetimos la operación con el vidrio.

3. Cuando está seca la grava la retiramos de la fuente de calor y la dejamos enfriar un poco, posteriormente la pesamos para determinar la masa seca (Ms) en gramos.

CALCULO.

$$\% \text{ Humedad Actual} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Dónde:

% Humedad Actual = Porcentaje de humedad.

Mh = Masa húmeda de la grava en gramos.

Ms = Masa seca en gramos.



Ilustración 14 Secado y pesado de la muestra para la obtención de la Masa seca en gramos.

6.2.3. Humedad de Absorción en Gravas.

El objetivo es determinar la capacidad máxima de absorción de una grava expresándola en porcentaje respecto a su peso seco.

EQUIPO.

- Muestra de grava de aproximadamente un kilogramo.
- Franela.
- Charolas metálicas.
- Parrilla eléctrica.
- Espátula.
- Vidrio.
- Mallas 3/4" y 3/8".
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.

PROCEDIMIENTO.

1. De la muestra que se trae de campo se criba a través de las mallas 3/4 y 3/8 y del material que pasa la 3/4 y se retiene en 3/8 se pone a saturar en una charola un muestra de 0.5 a 1.0 kilogramo durante 24 horas.

2. Enseguida con una franela se seca superficialmente una muestra de grava de aproximadamente 300 gramos anotando este valor como (Mh) masa saturada y superficialmente seca.



3. Se procede a colocar este material en una charola para secarlo en la parrilla eléctrica, para saber cuándo se ha eliminado completamente la humedad se coloca el vidrio sobre el material y si no se empaña o se forman gotas de agua se retira, se deja enfriar un poco y se procede a pesarlo registrando como masa seca (Ms).

CÁLCULOS.

$$\% \text{ humedad de absorción} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

Dónde:

% Humedad de Absorción= % que absorbe la muestra.

Mh = Masa saturada y superficialmente seca de la grava en gramos.

Ms = Masa seca de la grava en gramos.

6.2.4. Masa volumétrica seca y suelta en gravas (mvss).

El objetivo es determinar la masa por unidad de volumen cuando la grava se encuentra en estado natural seco y suelto.

EQUIPO.

- Muestra representativa de grava de aproximadamente 15 kilogramos.
- Recipiente con un volumen de 10 litros.
- Balanza con aproximación al gramo.
- Cucharón.
- Pala.
- Rastrillo.

PROCEDIMIENTO.

1. Se seca la muestra hasta masa constante, esto se puede realizar extendiendo el material con el rastrillo al sol para lograr el secado.



2. Cuando el material está completamente seco, se determina la masa y el volumen del recipiente que vamos a utilizar. Enseguida con el cucharón se va llenado el recipiente, dejando caer la grava, a la altura de 5 cm del borde superior del molde, cuidando el acomodo de las partículas sea por caída libre, esto es sin que el recipiente se someta a vibraciones hasta que quede completamente lleno y forme un cono el material.

3. Enseguida se procede a enrasarlo con la varilla punta de bala o con la mano que es más práctico. Una vez enrasado el recipiente se pesa obteniendo así la masa del recipiente más la masa del material.

CÁLCULOS.

$$M.V.S.S. = \frac{M}{V}$$

Donde:

M.V.S.S. = Masa Volumétrica seca suelta (g/cm³).

M = Masa de la grava en gramos.

V = Volumen del recipiente en cm³.



Ilustración 15 Llenado del recipiente para la obtención de M.V.S.S. de agregados gruesos.



6.2.5. Masa Volumétrica Seca y Varillada en Gravas (mvsv).

El objetivo es obtener la masa de la grava por unidad de volumen cuando es sometida a cierto grado de compactación.

EQUIPO.

- Muestra representativa de grava de aproximadamente 15 kilogramos.
- Recipiente de 10 litros de volumen.
- Balanza con aproximación al gramo.
- Cucharón.
- Pala.
- Varilla punta de bala.

PROCEDIMIENTO.

1. La muestra de grava se coloca donde quede expuesta a los rayos del sol.
2. Se obtiene la masa y el volumen exacto del recipiente que se va a utilizar.
3. Enseguida con el cucharón se llena el recipiente en tres capas, cada capa deberá ser aproximadamente una tercera parte del volumen del recipiente.
4. Con la varilla punta de bala se le da a cada capa 25 golpes distribuyéndolo en toda la superficie, al término se enrasa el recipiente y determina su masa.

CÁLCULOS.

$$M.V.S.V. = \frac{M}{V}$$

Donde:

M.V.S.V = Masa Volumétrica Seca y Varillada en Gravas (g/cm³)

M = Masa de la grava compactada en gramos.

V = Volumen del recipiente en cm³.



Ilustración 16 Varillado para la obtención de la M.V.S.V en agregados Grueso.

6.2.6. Densidad de la grava.

El objetivo es determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en masa por unidad de volumen.

EQUIPO.

- Muestra representativa de grava.
- Probeta graduada.
- Picnómetro.
- Franela.
- Charola.

PROCEDIMIENTO.

1. Se toma una muestra de grava saturada y superficialmente seca de 300 gramos, para obtenerla se deja saturando la grava retenida en la malla 3/8 y que pasa la 3/4 durante 24 horas, secándola superficialmente con una franela, esta masa se registra como el masa de la muestra (M).

2. Se llena el picnómetro hasta el nivel del orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar la muestra de grava dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada. Cuando se haya terminado de colocar la grava dentro del picnómetro esperamos a que escurra el agua desalojada y

tendremos en la probeta el volumen del agua que corresponde al volumen (V) de las partículas de grava.

CÁLCULOS:

$$D = \frac{M}{V}$$

Dónde:

D=densidad en (g/cm³)

M= masa de la grava en (g)

V= volumen de la grava (cm³)



Ilustración 17 De lado izquierdo se muestra el picnómetro, de lado derecho el secado del agregado fino.

6.2.7. Granulometría o Análisis Granulométrico en Gravas.

Para esta prueba el objetivo es obtener la distribución de los tamaños de las partículas de la grava así, como el tamaño máximo (T.M.) de la grava, valor que se utiliza para el cálculo del diseño de mezclas.

EQUIPO.

- Muestra aproximadamente 15 kilogramos en estado suelto.
- Juego de mallas: 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2 ",3/8",1/4", y N° 4.



- Juego de charolas para recibir el material que se retiene en cada una de la mallas.
- Balanza con aproximación al gramo.
- Recipiente de 10 litros.

PROCEDIMIENTO.

1. Se seca previamente la muestra de grava, enseguida se llena el recipiente de 10 litros, previamente destarado, se pesan y se obtiene la masa de la muestra registrándose como masa de la muestra (Mm).

2. Enseguida se pasa la grava a través de las mallas colocándolas de la mayor a la menor, agitándolas con la mano para que las partículas de menor tamaño pasen a la malla siguiente, cuando se haya terminado con la muestra de grava, al realizarle este procedimiento se elabora una tabla, registrando las masas retenidas en cada una de las mallas correspondientes.

CÁLCULOS:

Al realizar la suma de las masas parciales retenidas debe ser igual al peso de la muestra inicial, teniendo una tolerancia de ± 1 % del peso de la muestra.

El porcentaje retenido se calcula con:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{Masa retenida en la malla}}{\text{Masa de la muestra}} * 100$$

El porcentaje acumulativo se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ acumulativo malla} = \% \text{ acumulado} + \% \text{ retenido malla}$$

El porcentaje de la malla que pasa:

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \% \text{ acumulativo de la malla}$$

El tamaño máximo de la grava se obtiene observando la columna de los % retenidos y el tamaño máximo será el tamaño de la malla que retenga el 5% o más de la masa de la muestra.

6.3. Diseño de mezclas de concreto por el método del ACI (American Concrete Institute).



El método ACI consiste en seguir en forma adecuada una secuencia de pasos y determinar la cantidad de cada material tanto en masa como en volumen. Para 1 m³ de concreto.

El proporcionamiento (dosificación) de las mezclas se refiere al proceso de determinación de las cantidades de ingredientes del concreto, usando materiales locales, para que se logren las características especificadas, el cual debe cumplir con las siguientes cualidades: (1) Trabajabilidad aceptable, (2) Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto y (3) Economía:

Los mencionados pasos se describen a continuación:

1. De acuerdo con las especificaciones de proyecto, se determina el esfuerzo de diseño (f'_c) y el revenimiento, mediante el análisis granulométrico de la grava se obtiene el tamaño máximo
2. Mediante la Tabla 3. Se obtienen los requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire, los cuales dependen del revenimiento y el tamaño máximo nominal del agregado grueso.

Agua, kg/m ³ concreto para tamaño máximo, mm.							
Revenimiento cm. 9.5	12. 5	19	25	38	50	75	150
Concreto sin aire incluido							
De 2.5 a 5.0 207	19 9	190	179	166	154	130	113
De 7.5 a 10 228	21 6	205	193	181	169	145	124
De 15 a 17.5 243	22 8	216	202	190	178	160	---
Cantidad aprox. de 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	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0



6.0							
Exposición severa 7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Tabla. 3 Requerimiento de agua, en kg/m³ concreto para tamaño máximo, mm.

3. Para la obtención de la relación agua / cemento se entra a la tabla 4, de acuerdo con el $f'c$ de proyecto.

Tabla. 4 Dependencia 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	
	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

4. Se calcula el consumo de cemento al despejar éste de la fórmula $a/c =$ relación agua – cemento, como los datos obtenidos con anterioridad.
5. Mediante la tabla 5 se obtiene el volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto, mediante la utilización de los datos de tamaño máximo y módulo de finura.

Tabla. 5 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

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



6. Para la obtención de la masa de la grava requerida, se multiplica lo obtenido en la tabla anterior por su densidad; ya que $\text{Peso} = \text{volumen} / \text{Densidad}$.
7. Una vez conocido los consumos de agua, cemento y grava, el material restante que completa un metro cúbico de concreto debe consistir en arena y aire que pueda quedar incluido.
8. Por último se lleva a cabo una corrección por absorción y humedad actual de los materiales pétreos. Una vez conocidos los porcentajes que absorben estos agregados y la humedad que tiene que hace un ajuste con respecto a la cantidad de agua que se requiere para la mezcla.

6.4. Pruebas Realizadas al Concreto.

6.4.1. Determinación del Revenimiento en Concreto Fresco.

Esta prueba sirve para medir la consistencia, plasticidad y Trabajabilidad del concreto fresco en término de la disminución de altura.

EQUIPO.

- Cono de revenimiento.
- Charola.
- Cucharón.
- Varilla punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Pala.
- Flexómetro.

PROCEDIMIENTO.

1. Se obtiene una muestra representativa en una charola.
2. Se humedece el molde de revenimiento y el cucharón.
3. Se coloca el molde en una superficie horizontal, plana, rígida, húmeda y no absorbente y se sujeta colocando los pies en las orejas que tienen especialmente para ello.



4. Se mezcla el concreto y se vierte usando el cucharón, se llena aproximadamente el molde con 3 capas aproximadamente de igual volumen, la primera capa corresponde a una altura aproximadamente de 7 cm, se le dan 25 golpes con la varilla punta de bala, la mitad se hará en forma inclinada, (esto por la forma del molde), por la periferia del molde, los demás en forma vertical.

5. La segunda capa debe de llegar a una altura de aproximadamente 15 cm, dando de la misma manera 25 golpes, pero con el cuidado de no pasar a la primer capa, esto es porque la primer capa tendría más de 25 golpes lo que da un mayor acomodo y como resultado un mayor revenimiento.

6. Y la tercera capa se llena al extremo del molde calculando que quede sobrado, es decir, que sobrepase un nivel para que al varillar 25 veces la tercera capa el nivel sobre pase ligeramente el nivel de enrase del mismo. Si quedará por debajo del nivel se le agrega más concreto hasta llegar al nivel de enrase del molde.

7. Se enrasa el molde rodando la varilla sobre la superficie superior del molde.

8. Inmediatamente después levantar el molde con cuidado en dirección vertical. La operación para levantar completamente el molde de 30 cm de altura debe hacerse en 5 ± 2 s, alzándolo verticalmente sin movimiento lateral o torsional. La operación desde el comienzo del llenado hasta que levanta el molde debe hacerse sin interrupción y en un tiempo no mayor de 2.5 min, debido a la fluidez del concreto este tenderá a derrumbarse de la forma del cono hasta incluso quedar extendido sobre la superficie horizontal.

9. Se medirá con un flexómetro ese derrumbe, colocando el molde usado en la prueba cerca de la mezcla, colocando la varilla sobre el molde, se medirá del nivel de enrase del molde y la altura promedio del cono que forme la mezcla al soltarla.



Ilustración 18 Revenimiento para la mezcla Testigo.

6.4.2. Fabricación de Cilindros 10cm x 20cm.

Poder realizar cilindros que deberán ser probados a la edad requerida aplicando pruebas destructivas y no destructivas. La mezcla para estos cilindros se elaboró en una revolvedora mecánica con capacidad para un bulto de cemento, la cual se encuentra en el laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

EQUIPO.

- Varilla punta de bala de 5/8” de diámetro.
- Charola.
- Pala.
- Cucharón.
- Mazo de goma
- Moldes de cilindros.

PROCEDIMIENTO.

1. Se toma una mezcla representativa en una charola se mezcla.
2. Se mide el revenimiento de la mezcla.

3. Deberán ser moldes metálicos para que no se adhiera el concreto y no expanda respectivamente, se coloca en forma vertical y en un lugar donde no haya vibraciones. Con el cucharón se llena el cilindro en 3 capas, compactadas con una varilla punta de bala con 25 golpes por capa.

4. Tendremos que tener mucho cuidando:

Llenar cada capa un poco más del nivel fijado para que la varilla penetre 25 golpes quede el nivel de capa y al final sobre pasar su volumen para poder enrasar.

Cada capa debe de ser compacta solo en su espesor sin sobre pasar a las capas inferiores. Después de compactar cada capa se debe golpear ligeramente con el mazo de goma las paredes del molde para eliminar hasta donde sea posible las oquedades que deja la varilla.

5. Se coloca la etiqueta de identificación a cada cilindro.

La elaboración del cilindro debe de hacerse en un tiempo no mayor a 15 minutos desde su muestreo. El colado del cilindro debe de hacerse cerca de donde se va almacenar o transportarse de ahí inmediatamente después de colarlos teniendo cuidado de no inclinarlos o vibrarlos con el objeto de que no pierdan sus propiedades de acomodo.



Ilustración 19 Llenado y varillado de los cilindros de 10 x 20 cm.

6.4.3. Fabricación de Cilindros 5cm x 10 cm.

Estos cilindros se elaboraron para llevar a cabo la prueba de ataque por sulfatos.

EQUIPO.

- Varilla punta de bala de 3/8” de diámetro.
- Moldes de cilindros.



PROCEDIMIENTO.

Los moldes se llenan manualmente en dos capas, las cuales se compactan con 25 golpes cada una con la varilla punta de bala. Para eliminar las burbujas de aire de la mezcla se golpea el exterior de los moldes con la misma varilla, se le dan de 10 a 15 golpes exteriores por capa. Una vez finalizada la segunda capa se procede a enrasar la muestra con la varilla punta de bala, haciéndola girar del centro hacia los extremos.

6.4.4. Fabricación de Vigas.

El objetivo es la fabricación de vigas para la prueba de módulo de ruptura.

EQUIPO.

- Varilla punta de bala de 5/8” de diámetro.
- Moldes prismáticos de acero de 15 cm x 60 cm.
- Cucharón.
- Mazo de goma

PROCEDIMIENTO.

1. Se engrasan los moldes antes del colado para facilitar el desmolde de las muestras.

2. El llenado de los moldes se debe de realizar en dos capas con ayuda del cucharón. Al llenar la primera capa se golpea 90 veces sobre todo el volumen del concreto colocado en el interior del molde, esto para compactar la mezcla, al cabo de esto se golpea con el mazo de goma en 15 ocasiones sobre el perímetro exterior del molde y así eliminar considerablemente la cantidad de aire atrapado. Posteriormente se hace lo mismo con la siguiente capa restante, procurando que quede enrazada.



Ilustración 20 Moldes prismáticos de 15x60 cm.

6.4.5. Curado de los especímenes

Todos los especímenes, cilíndricos y prismáticos, permanecieron en la pila de curado hasta el momento de llevar a cabo las pruebas en las diferentes edades. Cabe señalar que el descimbrado de los especímenes fue a las 48 horas de haberse colado, esto debido a que el aditivo de nopal retrasó el fraguado.



Ilustración 21 Pila de Curado para los Especímenes.

6.4.6. Cabeceado de Cilindros de Concreto.

La finalidad es aplicar una capa de material con resistencia igual o mayor al F'_c del concreto que puede ser de azufre o neopreno para que la carga aplicada por la máquina de pruebas se distribuya uniformemente en toda el área del cilindro y que las 2 caras queden paralelas entre si y a la vez perpendicular.



La base de los especímenes de concreto endurecido tiene la opción de prepararse para su ensaye puliendo su superficie, omitiendo el cabeceo, también se puede usar placas o almohadillas de neopreno u otro material similar que sustituya el cabeceo.

Para los especímenes de esta experimentación se utilizo cabeceado de azufre en todas las pruebas.

EQUIPO.

- Moldes de cabeceo con guías para asegurar la verticalidad.
- Aceite.
- Estopa.
- Azufre.
- Estufa.

PROCEDIMIENTO.

1. Se sacan los cilindros a probar del proceso de curado, se anotan los datos de registro.

2. Se pone a calentar el azufre en una olla hasta lograr que se convierta de estado sólido a estado líquido.

3. Se aceitan el molde de cabeceo cuyo diámetro es mayor que el del cilindro, hacemos lo mismo con la cara del cilindro a cabecear, esto para que no se pegue el azufre al molde ni al cilindro.

4. Una vez líquido el azufre se vierte en el molde de cabeceo a un nivel adecuado inmediatamente, se toma el cilindro y se desliza por las guías hasta sumergir su cara en el molde, se golpea suavemente en la otra cara para eliminar cualquier burbuja de aire que pueda quedar atrapado, se ajusta con las manos hacia las guías, para mantener la verticalidad y nivelar el cilindro.

5. Se espera un momento a que se solidifique el azufre, se retira el molde, se limpia y se repite la operación para cabecear la otra cara del cilindro.



Ilustración 22 Cabeceado en cilindros de 10cm x 20 cm y modos de fallas del mismo cilindro después de que se le aplico una carga axial.

6.5. Pruebas no Destructivas.

6.5.1. Resistividad Eléctrica.

Es una propiedad de cada material, esta corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables como el tipo de cemento, adiciones inorgánicas, relación agua/cemento, porosidad de la estructura, etc. La unidad de medida para representar la resistividad eléctrica es el ohm-cm u ohm-m. Se puede utilizar en el laboratorio sobre testigos extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo (Chávez, 2011).

EQUIPO.

- Especímenes a prueba (Cilindros o Vigas).
- Resistometro.
- Gel.
- Esponjas.

PROCEDIMIENTO.

1. Se determinaron las dimensiones de la muestra: diámetro y longitud.
2. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.



3. Se monta la muestra en el equipo Nilsson.
4. Se colocan las caras laterales del cilindro entre dos placas de cobre y entre éstas esponjas húmedas.
5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el cilindro a una corriente dada, (I) y voltaje (E).
6. La resistencia eléctrica (R) se calcula como E/I y se expresa en Ohm.

CÁLCULO.

La resistividad eléctrica está dada por:

$$\rho = R_e \left[\frac{A}{L} \right]$$

Dónde:

ρ = Resistividad eléctrica en $K\Omega\text{-cm}$ (ohm-m).

R_e = Resistencia eléctrica que el equipo proporciona, en $K\Omega$.

A = Área transversal del espécimen en cm^2 .

L = Longitud del espécimen en cm.

De esta manera la resistividad eléctrica está dada por:

<i>Resistividad del concreto (ρ) $K\Omega\text{-cm}$</i>	<i>Pronostico de corrosión</i>
$\rho > 200$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10$	Riesgo moderado
$\rho > 10$	Alto riesgo

Tabla. 6 Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (Durar, 2000).



Ilustración 23 Toma de la lectura para la prueba de resistividad eléctrica

6.5.2. Velocidad de pulso Ultrasónico.

El propósito de este ensayo es determinar la velocidad de propagación de ondas de compresión longitudinales a través del concreto. Este método se ha utilizado para evaluar la calidad del concreto por más de 60 años. Este método puede ser utilizado para evaluar grietas internas y otros defectos como: cambios en el concreto por deterioro debido a agresiones químicas del medio ambiente como congelación y deshielo. Utiliza ondas mecánicas que no ocasionan daño alguno al elemento de prueba (chaves, 2011).

Las primeras ondas en llegar del primer al segundo transductor son las ondas longitudinales (ondas de compresión) y son convertidas en una señal eléctrica que registra tiempo "T" de viaje de onda entre un receptor y otro.

Aplicación.

La determinación de la velocidad de transmisión de una onda longitudinal en concreto tiene entre otras las siguientes aplicaciones:

- Determinación de la uniformidad del concreto en una zona, así como encontrar defectos en el mismo.
- Estimación de espesores de concreto mediante el método indirecto.
- Correlación entre la velocidad y la resistencia, como medida de aseguramiento de calidad.



- Estimación del modulo de elasticidad y el módulo de elasticidad, modulo de Poisson para el concreto.
- Determinación de la resistencia residual después de daño por incendio, entre otros.

EQUIPO.

Consta de un generador de pulso eléctrico, un par de transductores, un amplificado, un dispositivo de medición de tiempo, una pantalla de proyección del tiempo y cables de conexión.

El generador de pulso consiste en un circuito que produce pulsos de voltaje entre 500 y 1000 voltios, esto debe producir 3 pulsos por segundo. Los transductores transforman los pulsos en ondas cuya frecuencia de resonancia depende del transductor que se utilice; las frecuencias bajas se utilizan para grandes distancias ("L") mientras que altas frecuencias son para distancias pequeñas desde 10cm. Esto se debe a que los pulsos de alta frecuencia se atenúan más rápido que los de baja frecuencia al paso por el concreto.

PROCEDIMIENTO.

Inicialmente se coloca el copulante o elemento de unión entre el concreto y el transductor (grasa, vaselina, jabón líquido o algún otro tipo de sustancia recomendada en el instructivo del equipo). Una vez calibrado el equipo se escoge el arreglo o colocación de los receptores según sean las características del elemento que se ensayaría en campo y se obtienen las medidas de tiempo.

Se pueden utilizar las siguientes configuraciones:

- a) Transmisión directa (caras opuestas).
- b) Transmisión semi indirecta (caras adyacentes).
- c) Transmisión indirecta o de superficie (la misma cara).

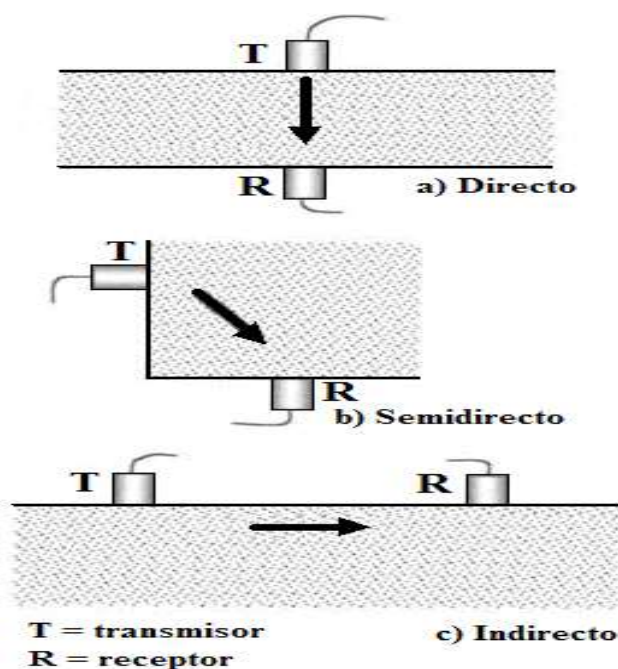


Ilustración 24 Configuraciones para medir la velocidad de pulso (Malhotra and Carino, 2004).

Según la norma ACI 228 es recomendado que se realicen 5 lecturas de velocidad en el análisis, sin embargo, por efectos de calibración se pueden realizar 3 lecturas para cada lectura para cada cilindro poco antes de que estos sean sometidos a alguna prueba destructiva. Se debe determinar el promedio de la velocidad, si se tiene para el espécimen más de una lectura.

Dentro del concreto se pueden encontrar algunos factores que afecten la lectura de la velocidad entre ellos tenemos:

- Humedad y temperatura del concreto.
- Distancia.
- Forma y tamaño del espécimen.
- Efectos de las barras de refuerzo (en caso de tener barras embebidas).

Chávez (2011) cita a Malhotra (1985) sobre la base de la medición de la velocidad ultrasónica la cual se clasifica en categorías con base a intervalos de velocidad presentada en la tabla 7.



Tabla. 7 Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica.

Velocidad ultrasónica, v (m/s)	Clasificación del concreto
$V > 4\,575$	Excelente
$4\,575 > V > 3\,660$	Bueno
$3\,660 > V > 3\,050$	Cuestionable
$3\,050 > V > 2\,135$	Pobre
$V < 2\,135$	Muy pobre



Ilustración 25 Aparato para medir la velocidad ultrasónica.

Para determinar la velocidad de pulso ultrasónico se tiene la siguiente ecuación.

CALCULO

$$V = \frac{L}{T}$$

Donde:

V= Velocidad del pulso ultrasónico. (m/s)

L= Longitud del camino. (cm)

T= Tiempo transcurrido a través del espécimen (μ s).



6.5.3. Modulo de elasticidad Dinámico.

Con los valores resultantes de velocidad de pulso ultrasónico, se puede determinar el Modulo de Elasticidad Dinámico.

CALCULO

$$E = V^2 Q \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Donde:

E = Modulo de elasticidad Dinámico.

V = Velocidad de pulso ultrasónico. (Km/s)

ν = Relación de Poisson. Para concretos de alta resistencia $\nu = 0.15$, para concretos de baja resistencia $\nu = 0.30$.

6.5.3 Frecuencia de Resonancia.

El método se utiliza para determinar el módulo de elasticidad dinámico, el modulo dinámico de rigidez y el valor dinámico de Poisson en especímenes prismáticos y cilíndricos de concreto. Por medio del método se detectan cambios significativos en el módulo de elasticidad dinámica de las muestras de laboratorio así como las de campo que se han expuesto a la intemperie o a algún contacto de deterioro.

Durante la prueba los especímenes son sometidos a una fuerza vibratoria. La resonancia es indicada por las vibraciones que tienen una amplitud máxima hasta que la frecuencia inducida cambia (Moreno ,2012).

El equipo utilizado para realizar esta prueba es conocido como sonómetro, y ha sido usado para medir módulos dinámicos del concreto. Este equipo es el requerido por la STM C 215-85, titulada Método de prueba para frecuencias longitudinales, transversales y torsionales de especímenes de concreto. El aparato consiste en dos secciones: una genera vibraciones mecánicas y otra las detecta.



Ilustración 26 Sonómetro para determinar la frecuencia de resonancia.

Las vibraciones mecánicas son detectadas por un transductor piezoeléctrico. El transductor convierte dichas vibraciones en voltaje de corriente alterna de las mismas frecuencias. Estos voltajes son amplificados para la operación del panel medidor el cual indica la amplitud del transductor de salida. Como la frecuencia de manejo del oscilador es variado, un máximo en la aguja del medidor indica cuando es alcanzada la resonancia.

Para llevar a cabo esta prueba se requiere de ciertas habilidades por el medidor tipo indicador que el aparato posee, este medidor nos puede arrojar varias frecuencias de resonancia correspondientes a diferentes modos de vibración. Los especímenes con relaciones muy grandes o pequeñas en dimensión longitudinal con respecto a la transversal, son comúnmente difíciles de excitar en cuanto a la vibración transversal se refiere (Chávez, 2011).

La vibración transversal de un espécimen tiene dos puntos modales, a una distancia de 0.224 veces la longitud, medida a cada uno de los extremos del espécimen. La amplitud de vibración es mayor en los extremos cerca de tres quintos de la máxima en el centro y de cero en los puntos nodales. Por lo que el movimiento del receptor a lo largo de la muestra está vibrando en su frecuencia fundamental (Chávez, 2011).

Chávez (2011) cita a Jones (1962) para presentarnos los rangos aproximados de resonancias fundamentales longitudinales y transversales de concreto (tabla 7).



Tabla. 8 Rangos aproximados de frecuencia de resonancia para especímenes de concreto cilíndricos y prismáticos (Jones, 1962).

<i>Tamaño de especímenes (mm)</i>	<i>Rango aproximado de frecuencia de resonancia (Hz)</i>	
	<i>Transversal</i>	<i>Longitudinal</i>
152x152x710 prisma	550-1150	1800-3200
102x102x510 prisma	900-1600	2500-4500
152x302 cilindro	2500-4500	4000-7500



6.6. Pruebas destructivas.

6.6.1. Resistencia a la Compresión Simple en Cilindros de Concreto.

El objetivo de esta prueba, es determinar la resistencia que presenta el concreto al ser sujeto a una carga de compresión simple.

Compresión simple. Significa que se le aplicará una carga axial concéntrica al cilindro de concreto.

EQUIPO

- Vernier.
- Máquinas hidráulicas (máquina universal Forney o prensas).

PROCEDIMIENTO.

1. Se determina el diámetro del cilindro, el cual se obtiene del promedio de las medidas de 2 diámetros perpendiculares entre sí.

2. Una vez obtenido el diámetro del espécimen, se coloca en la máquina de prueba, la cual tiene que tener las placas de apoyo totalmente limpias, se centrará el eje vertical del cilindro al centro de la placa de apoyo.

3. Se ajusta la platina superior a la cara del espécimen de manera que la carga se aplique constante.

4. Se nivela y se pone en ceros la máquina. Se aplica la carga a una velocidad constante de 1.4 a 3.1 kg/cm²/seg. Esta velocidad puede ser un poco mayor en la primera mitad de la carga total del espécimen, tomar en cuenta que por ningún motivo se suspenda la aplicación de la carga, cuando el espécimen ya se aproxime a la carga de falla.

5. Se continúa la carga del espécimen hasta la falla registrándola y observando su tipo de falla y la apariencia del material.

CÁLCULO.

$$E = \frac{P}{A}$$

Dónde:



P = es la carga de ruptura en kg.

A = Área de la sección transversal del espécimen en cm^2 .

E = Esfuerzo que resiste el espécimen en kg/cm^2 .

Conociendo y registrando su edad se determina su porcentaje de resistencia respecto a la resistencia de proyecto de la forma siguiente:

$$\% \text{Resistencia} = \frac{R}{R_p}$$

Dónde:

% Resistencia = Por ciento de Resistencia.

R = resistencia real a cierta edad en días y en kg/cm^2 .

R_p = resistencia de proyecto en kg/cm^2 .



Ilustración 27 Aplicación de Carga al espécimen Testigos de 10 x 20 cm.

6.6.2. Resistencia a la Flexión del Concreto.

Se lleva a cabo con la finalidad de conocer la resistencia a flexión del concreto en vigas moldeadas en el laboratorio.

EQUIPO.

- Máquina de prueba.



- Accesorios para la flexión.
- flexómetro.

PROCEDIMIENTO.

1. El espécimen debe de voltearse sobre uno de sus lados, respecto a la posición original en la que fue colado, con ello aseguraremos que la carga se reciba en un área lisa.
2. Se centran los apoyos inferiores y posteriormente los superiores, quedando así un tercio central en el espécimen, entre los apoyos.
3. Si no se tiene un buen contacto con los apoyos interiores será necesario pulir, cabecear o calzar el espécimen con tiras de madera o acero las superficies de contacto.
4. Se aplica la carga, la cual deberá aplicarse en forma uniforme de modo que no produzca impacto, puede aplicarse rápidamente hasta poco menos del 50 % de carga de ruptura, después se aplicara de manera que el esfuerzo en la fibra externa no exceda de 10 kg/cm²/min.

2. Se determinaran las dimensiones del espécimen, ancho y peralte promedio del espécimen en la sección de falla, deberá hacerse mediciones redondeando al 0.25 cm.

CÁLCULOS.

Si la fractura ocurre en tercio medio del claro el módulo de ruptura se calculará con:

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en no más del 5 % del claro, el módulo de ruptura se calculará:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

Dónde:

R = Módulo de ruptura en kg/cm².



P = Carga de ruptura en kg.

L = Claro en cm.

b = Ancho promedio en cm.

d = Peralte promedio en cm.

a = Distancia entre la línea de falla y el apoyo más cercano.

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en más del 5 % del claro, los resultados deben de descartarse.



Ilustración 28 Aplicación de la Carga a Vigas de 15x60 cm.

6.6.3. Módulo de elasticidad Estático.

Para llevar a cabo esta prueba es necesario contar como mínimo con dos especímenes de las mismas características de elaboración, ya que se requiere llevar uno de ellos a la falla mediante la prueba de compresión simple, esto para poder calcular el 60% del esfuerzo final, lo cual nos servirá para la obtención del módulo de elasticidad del segundo espécimen.

Modulo de elasticidad. Es la relación que existe entre los esfuerzos y las deformaciones unitarias del concreto.

EQUIPO.

- Maquina de prueba.
- Medidor de deformaciones longitudinales.



- Nivel de burbuja.

PROCEDIMIENTO.

1. Se determina las dimensiones del cilindro, altura y diámetro.
2. Se cabecean los cilindros con mortero de azufre de acuerdo a la norma NMX-C-109-ONNCCE-2010.
3. Se monta el cilindro en la máquina de prueba, para esta experimentación se hizo uso de una prensa de 120 toneladas marca Denver, la cual se encuentra en el laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”. El espécimen designado para la compresión se prueba y se registra su carga de ruptura.
4. Se determina el 60% de la carga de ruptura, esto para que al momento de medir las deformaciones aseguremos que se encuentra en un estado elástico.
5. Se determina también del 10% al 15% de la carga de ruptura para la aplicación de dos precargas. En la primera precarga se debe revisar que el micrómetro regrese a ceros, y en la segunda precarga, además de revisar la posición final del micrómetro, se toman lecturas para verificar que se aplique bien la carga.
6. Una vez hechas las pruebas preliminares se procede a aplicar carga a velocidad constante hasta el 60% de la carga de falla, conjuntamente se registran las deformaciones y las cargas correspondientes.
7. Se determina el Módulo de Elasticidad Estático.

Cálculos.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005}$$

Donde:

E= módulo de elasticidad en kg/cm².

σ_1 = Esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas en kg/cm².

σ_2 = Esfuerzo correspondiente al 40% de la resistencia en kg/cm².

ε = deformación unitaria longitudinal producida por σ_2 , en cm.



Ilustración 29 Prueba para Determinar el Modulo de Elasticidad a especímenes de 10x20 cm.

6.6.4. Ataque por sulfatos.

Este método está diseñado para conocer las propiedades de los agregados cuando están sujetos a acciones de intemperismo en el concreto u otras aplicaciones. Esto se logra al sumergir repetidamente los especímenes a probar en soluciones saturadas de sodio o sulfato de magnesio, seguido por el secado en horno de las muestras, con lo cual se logra la deshidratación parcial o completa de la sal precipitada en los poros de espacio permeable.

La fuerza expansiva interna derivada de la rehidratación de la sal en la re-inmersión, simula la expansión de agua en congelación. Este método proporciona información útil cuando no se tiene una base de datos del material que se encuentra expuesto a las condiciones del clima.

- Solución de sulfato de sodio:

Se prepara una solución saturada de sulfato de sodio por disolución de un USP o igual grado de sal en agua a una temperatura de 36°, adicionando 350g/litro de sulfato de sodio en un tiempo de 20 minutos, posterior a eso se agita la mezcla por 20 minutos más.

Se deja la solución a una temperatura de 21°-16° durante al menos 48 horas antes de su uso.

Antes de cada uso se rompen los cristales formados en el recipiente y se agita la solución a fondo, la solución tendrá una gravedad específica no menor de 1.151 y no más de 1.174.



PROCEDIMIENTO

1. Una vez curados los especímenes se meten a secar al horno a temperatura de $110 \pm 5^\circ$ durante un tiempo de 24 horas.
2. Se sacan del horno y se dejan enfriar las muestras en un tiempo aproximado de 15 minutos para posteriormente ser pesadas.
3. Después de ser pesadas 3 de las muestras se prueban a compresión simple mientras que las sobrantes son sumergidas en la solución por un tiempo de 16 a 18 horas, a una profundidad de al menos $1/2''$ con respecto a la superficie libre de la solución, con ello inicia el primer ciclo.
4. Se tapa el recipiente de manera hermética para reducir la evaporación y evitar la contaminación de la prueba.
5. Una vez transcurrido el tiempo de inmersión en la solución se retiran las muestras dejando reposar por un tiempo de 15 ± 5 minutos para permitir que se drenen.

Después de realizar lo dictado en el punto cinco el proceso se repite desde el punto uno hasta completar los cinco ciclos.

Una vez concluidos los ciclos se comparan los pesos finales de cada ciclo para observar la pérdida de masa en cada ciclo. Además de analizar el comportamiento de la resistencia a la compresión simple con el paso de los ciclos.



Ilustración 30 Elaboración de la solución de sulfato, Secado de los especímenes a horno.



7. RESULTADOS.

7.1. Caracterización de los agregados Reciclados gruesos (grava).

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados gruesos reciclados.

7.1.1. Humedad de absorción.

Tabla. 9 Humedad de Absorción en Agregados Gruesos Reciclados.

<i>Muestra.</i>	<i>Masa Saturada (gr).</i>	<i>Masa seca (gr).</i>	<i>% H. Absorción.</i>
M ₁	368.00	335.00	9.8507
M ₂	318.70	290.90	9.5565
		promedio	9.7036

7.1.2. Humedad Actual.

Tabla. 10 Humedad de Actual en Agregados Gruesos Reciclados.

<i>Muestra</i>	<i>Masa (gr).</i>	<i>Masa Seca (gr).</i>	<i>% H. Actual.</i>
M ₁	350	335.57	4.30

7.1.3. Masa Volumétrica Seca Suelto.

Tabla. 11 Masa Volumétrica Seca Suelto en agregados Gruesos Reciclados.

<i>Muestra</i>	<i>Masa de la grava (gr)</i>	<i>Volumen del recipiente (cm³).</i>	<i>Masa volumétrica seca y suelta (gr/ cm³)</i>
M ₁	12400.00	10600.00	1.1689

7.1.4. Masa Volumétrica Seca Varillada.

Tabla. 12 Masa Volumétrica Seca y Varillada en agregados Gruesos Reciclados.

<i>Muestra</i>	<i>Masa de la grava (gr).</i>	<i>Volumen del recipiente (cm³).</i>	<i>Masa volumétrica seca y varillada (gr/ cm³).</i>
M ₁	13356.00	10600.00	1.2600

7.1.5. Densidad.



Tabla. 13 Densidad de los agregados gruesos Recicladados.

<i>Muestra</i>	<i>Masa de la grava (gr)</i>	<i>Volumen del recipiente (cm³).</i>	<i>% Densidad (gr/ cm³).</i>
M ₁	301.00	130.00	2.31
M ₂	300.00	131.00	2.29
		promedio	2.31

7.1.6. Análisis Granulométrico.

Tabla. 14 Granulometría en Agregado Grueso Reciclado.

<i>Malla</i>	<i>Masa Retenida (gr)</i>	<i>% retenido</i>	<i>% acumulativo</i>	<i>% que pasa</i>
1'	0	0	0	100
3/4'	36	0.32	0.32	99.68
1/2'	816	7.32	7.64	92.36
3/8'	2697	24.19	31.84	68.16
No. 4	7598	68.16	100.00	0.00
Pasa No. 4	0	0.00	100.00	0.00
Suma	11147	100.00		

A continuación se presentan, para un tamaño máximo de ½', los límites granulométricos del agregado grueso, en masa, en porcentaje que pasa de acuerdo la norma Mexicana NMX-C-111-ONNCEE-2004:

Tabla. 15 Límites Granulométricos para agregado máximo de ½ “.

<i>Tamaño nominal, mm (pulg)</i>	<i>19 ¾”</i>	<i>12.5 ½”</i>	<i>9.5 3/8”</i>	<i>No. 4 4.75</i>	<i>No. 16 1.18</i>
12.5 a 4.75 mm (1/2 a No.4)	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5



7.2. Caracterización de los agregados Reciclados finos (arena).

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados finos reciclados.

7.2.1. Humedad de absorción.

Tabla. 16 Humedad de Absorción en Agregados Finos Reciclados.

Muestra.	Masa Saturada (gr).	Masa seca (gr).	% H. Absorción.
M ₁	194.60	164.70	18.15
M ₂	181.60	153.40	18.38
		promedio	18.27

7.2.2. Humedad Actual.

Tabla. 17 Humedad Actual en Agregados Finos Reciclados.

Muestra	Masa (gr).	Masa Seca (gr).	% H. Actual.
1	300	289.21	3.73

7.2.3. Masa Volumétrica Seca Suelto.

Tabla. 18 Masa Volumétrica Seca Suelto en Agregados Finos.

Muestra	Masa de la Arena (gr)	Volumen del recipiente (cm ³).	Masa volumétrica seca y suelta (gr/cm ³)
M ₁	3155	2783	1.13
M ₂	3205	2783	1.15
		Promedio	1.14

7.2.4. Masa Volumétrica Seca Varillada.

Tabla. 19 Masa Volumétrica Seca y Varillada en agregados Finos.

Muestra	Masa de la Arena (gr)	Volumen del recipiente (cm ³).	Masa volumétrica seca y varillada (gr/cm ³).
M ₁	3555	2783	1.28
M ₂	3655	2783	1.31
		Promedio	1.30



7.2.5. Densidad.

Tabla. 20 Densidad de los agregados Finos.

Muestra	Masa de la grava (gr)	Volumen del recipiente (cm ³).	% Densidad (gr/ cm ³).
M ₁	302.00	140.00	2.1571
M ₂	301.10	130.00	2.3162
		promedio	2.2366

7.2.6. Análisis Granulométrico.

Tabla. 21 Granulometría en Agregado Fino Reciclado.

Malla	Masa Retenida (gr)	% retenido	% acumulativo	% que pasa
4	0	0	0	100
8	213.30	42.65	42.65	57.35
16	127.60	25.51	68.17	31.83
30	85.10	17.02	85.18	14.82
50	30.00	6.00	91.18	8.82
100	23.80	4.76	95.94	4.06
200	9.70	1.94	97.88	2.12
Charola	10.60	2.12		
Suma	500.10	100	M.F.	3.83

A continuación se presenta la gráfica correspondiente a la Granulometría de agregado grueso reciclado:

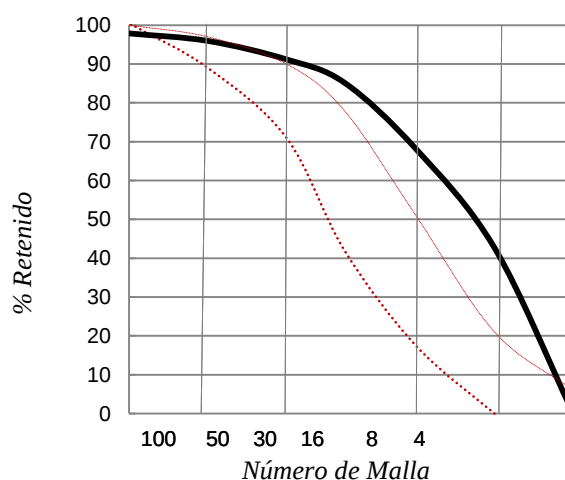


Ilustración 31 Curva Granulométrica del Agregado Fino Reciclado.



Las líneas de color rojo indican los límites permisibles de una adecuada granulometría, la línea de color negro es la correspondiente a la granulometría del agregado fino reciclado.

7.3. Caracterización del agregado Fino (combinación del agregado fino reciclado y agregado fino natural).

Se tuvieron dos aspectos muy importantes por los cuales se decidió hacer una combinación entre agregados reciclados y agregados naturales: (1) al momento de realizar la trituración del material, se observó que tan solo una tercera parte del material se podría utilizar como sustituto de arena, (2) se observó en el análisis granulométrico que el agregado fino reciclado no se encontraba dentro de los límites de una adecuada granulometría, por lo cual, Se realizaron combinaciones en las cuales se iba aumentando la cantidad de agregado natural y disminuyendo la cantidad de agregado reciclado, hasta llegar a la combinación más óptima para utilizar.

7.3.1. Análisis Granulométrico.

La combinación de agregados reciclados y naturales se llevó a cabo con la arena procedente del Río Lerma ya que su módulo de finura pequeño, lo que indica que tiene una mayor cantidad de finos, por lo que la combinación sería buena ya que el agregado fino reciclado carecía de finos.

Tabla. 22 Granulometría en Agregado Fino Natural.

Malla	Masa Retenida (gr)	% retenido	% acumulativo	% que pasa
4	9.50	1.900	1.90	98.10
8	19.30	3.86	5.76	94.24
16	24.00	4.80	10.56	89.44
30	113.30	22.67	33.23	66.77
50	261.80	52.38	85.61	14.39
100	63.50	12.71	98.31	1.68
200	6.00	1.20	99.51	0.48
Charola	2.40	0.048	100	0
Suma	499.80		M.F.	2.33



7.3.2. Modulo de Finura.

Se llevaron a cabo 9 sustituciones que iban desde el 10 % de arena natural hasta 90% de arena natural.

Tabla. 23 Módulo de finura para los diferentes grados de sustitución.

Sustitución	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
M.F.	3.47	3.08	3.25	2.96	2.67	2.85	2.50	2.06

A continuación se presenta el comportamiento del modulo de finura para las diferentes sustituciones:

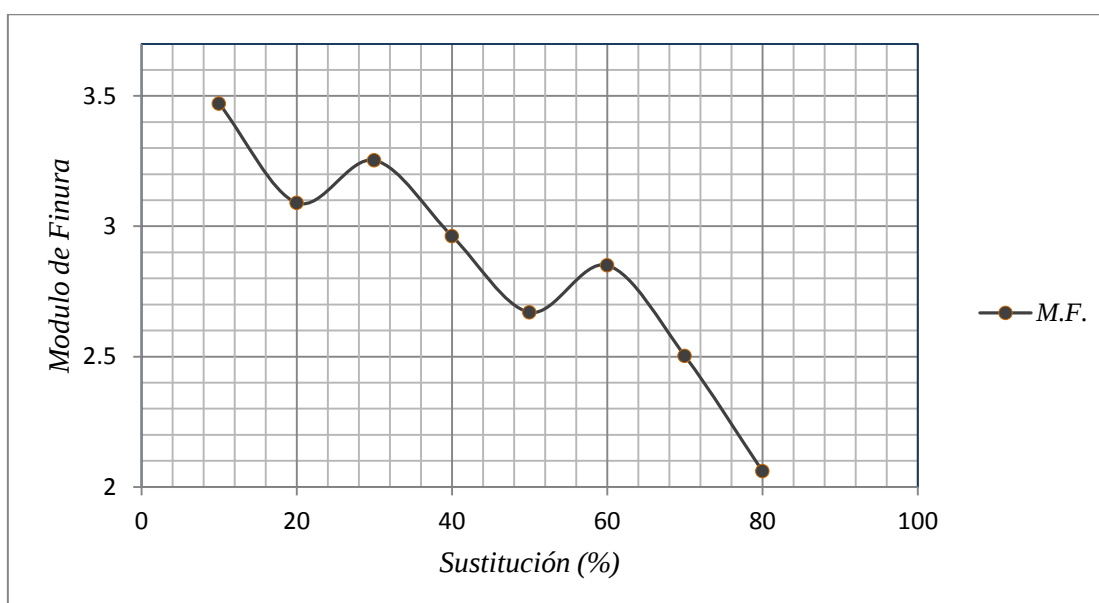


Ilustración 32 Comportamiento del módulo de finura para los diferentes grados de sustitución.

7.4. Caracterización del agregado fino.

Para continuar haciendo la caracterización se despreciaron las combinaciones por debajo del 40% y por arriba del 80% ya que según la norma el NMX-C-111-ONNCCE-2005 el modulo de finura debe de estar en el rango de 2.30 a 3.10.

Tabla. 24 Caracterización del agregado fino reciclado, con diferentes grados de sustitución de arena natural.

% de sustitución	Densidad arena (g/cm ³)	% de absorción.	M.V.S.V. (g/cm ³)	M.V.S.S. (g/cm ³)	M.F.
40	2.31	10.93	1.41	1.28	2.96
50	2.31	8.88	1.43	1.32	2.67
60	2.29	6.12	1.44	1.34	2.85
70	2.27	6.08	1.45	1.34	2.50
80	2.40	6.04	1.39	1.29	2.06

7.4.1. Prueba a compresión de las diferentes sustituciones.

A continuación se presentan los esfuerzos a 7, 14, 28 días de edad para las diferentes sustituciones como también el esfuerzo esperado en el diseño.

Tabla. 25 Resultados de la Prueba a la Compresión para las diferentes sustituciones.

% de sustitución	Esfuerzo (kg/cm ²) 7 días	Esfuerzo (kg/cm ²) 14 días	Esfuerzo (kg/cm ²) 28 días
40.000	216.451	226.000	256.239
50.000	259.104	289.025	381.972
60.000	271.837	307.806	382.768
70.000	204.992	302.394	369.239
80.000	224.249	264.197	304.782
Diseño	227.500	280.000	350.000



Ilustración 33 Prueba de Compresión a Especímenes con 40% y 60% de sustitución de agregado fino reciclado por agregado natural de río.

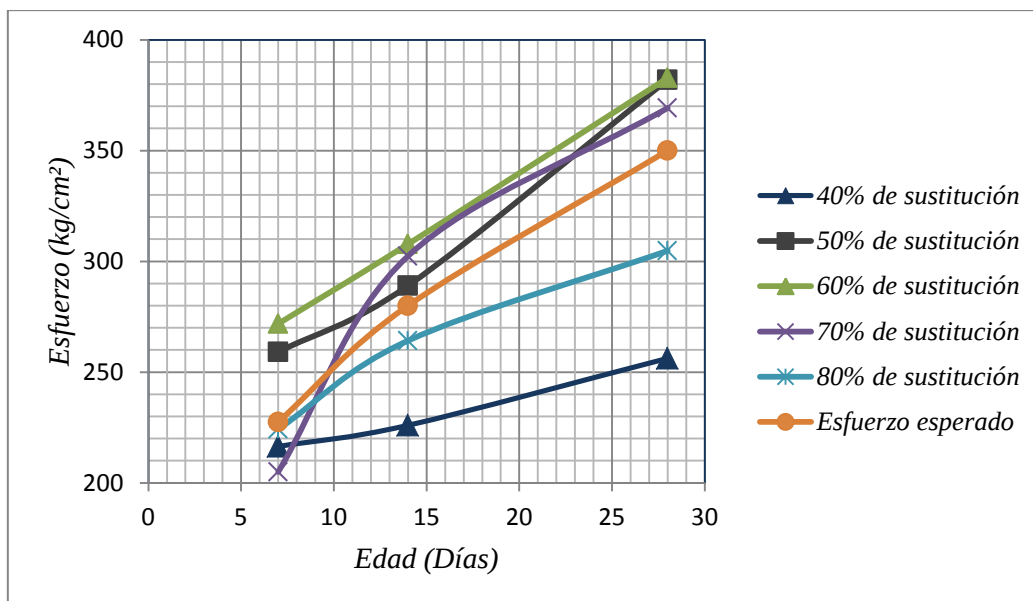


Ilustración 34 Esfuerzos obtenidos de las diferentes sustituciones de agregados fino reciclado por agregados naturales a Diferentes Edades.

7.5. Proporcionamiento de las Mezclas.

En base a los datos anteriores se optó por hacer mezclas de concreto en donde, el 100% fuera agregado grueso reciclado, 40% agregado fino reciclado y 60% agregado fino natural. Para el proporcionamiento se utilizaron los datos siguientes:

<i>Material</i>	<i>Humedad de absorción %</i>	<i>Humedad actual %</i>	<i>M.V.S.S. (kg/m³)</i>	<i>M.V.S.V. (kg/m³)</i>	<i>Densidad (kg/m³)</i>
Cemento					3.15
Arena	6.12	3.73	1341	1450	2.29
Grava	9.71	4.3	1168	1260	2.31
Revenimiento	10 cm	T.M.	1/2"	M.F.	2.85

Se elaboraron dos mezclas para su comparación:

1. Mezclas testigo: Tomando un $f'c$ de 350 kg/cm^2 , relación agua/cemento de 0.48, las cantidades para un metro cúbico fueron:

Tabla. 26 Cantidades de materiales para 1 m³ de concreto Testigo.

<i>Material</i>	<i>Masa (Kg)</i>	<i>Volumen (lts)</i>	<i>Masas Corregidas por el porcentaje de absorción y humedad actual (kg)</i>
Cemento	450.00	142.86	450.00
Arena	730.21	318.87	712.76

Grava	686.70	297.27	649.59
Agua	216.00	216.00	270.56

2. Mezclas con baja relación a/c: En ellas se adiciono en base a lo experimentado 0.58% del peso del cemento en fluidificante, tomando un f'c de 420 kg/cm², relación agua/cemento de 0.41 que corresponde a la relación más baja que se podía tener una buena trabajabilidad, fluidez, mayor resistencia, en la mezcla.

<i>Materiales</i>	<i>Masa (Kg)</i>	<i>Volumen (lts)</i>	<i>Masas Corregidas por el porcentaje de absorción y humedad actual (kg)</i>
Cemento	450.00	142.86	450.00
Arena	802.35	350.370	843.52
Grava	686.70	297.27	649.59
Agua	184.5	184.5	215.26

Cabe mencionar que a dichas mezclas se les considero el 2.5 % de volumen de aire incluido en las mezclas.

7.6. Pruebas realizadas al concreto fresco.

7.6.1. Revenimiento.

Las mezclas que hechas con baja relación agua cemento y adicionadas con el 0.58% de fluidificante con respecto al peso del cemento tuvieron un revenimiento de 7.0 cm (Ilustración 30.a), las mezclas testigos tuvieron revenimiento de 5 cm (Ilustración 30.b). De acuerdo a la norma NMX-C-156-1997-ONNCCE se tiene una tolerancia de ± 2.5 mm, para revenimientos de 10 cm.



Ilustración 35.a Revenimiento de la mezcla realizada con baja relación agua/cemento
Ilustración 30.b Revenimiento de la mezcla testigo.



7.7. Pruebas No destructivas.

7.7.1. Resistividad Eléctrica.

Tabla. 27 Resistividad eléctrica en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.

Edad	Baja Relación A/C		Testigo	
	Lectura Promedio ($k\Omega$)	Resistividad Eléctrica (ohm/cm)	Lectura Promedio ($k\Omega$)	Resistividad Eléctrica (ohm/cm)
14	1.36	5321.09	1.23	4830.21
28	1.88	7363.13	1.27	4974.20
60	2.30	9032.10	1.73	6806.80
90	2.30	9032.10	1.77	6937.70

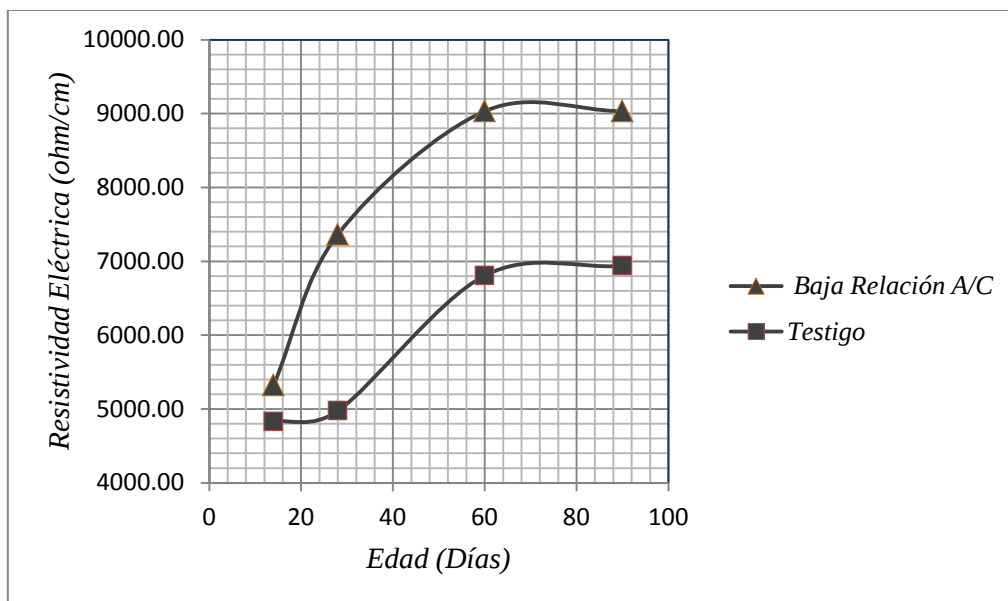


Ilustración 36 Resistividad eléctrica en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.

7.7.2. Módulos de Elasticidad Dinámicos.

Tabla. 28 Resultados de Módulos de Elasticidad Dinámico (MN) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.

Edad	Baja Relación A/C			Testigo		
	Velocidad de pulso ultrasónico (μs)	densidad (kg/m^3)	Módulo de Elasticidad Dinámico (kg/cm^2)	Velocidad de pulso ultrasónico (μs)	densidad (kg/m^3)	Módulo de Elasticidad Dinámico (kg/cm^2)
14	3.83	2184.24	308561.83	3.66	2145.41	277902.62
28	3.76	2156.55	294934.17	3.75	2143.82	291772.65



60	3.84	2191.72	311602.01	3.77	2145.57	293662.51
90	3.85	2202.70	315175.91	3.75	2152.57	292597.69

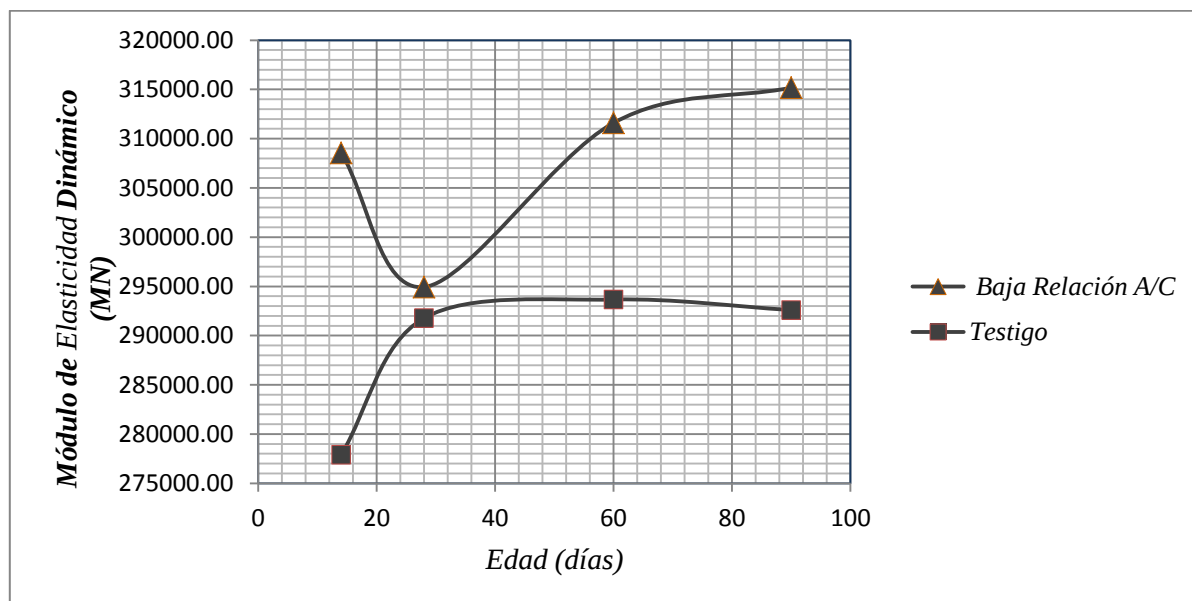


Ilustración 37 Resultados de los Módulos de Elasticidad Dinámico (MN) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.

7.7.3. Velocidad de Pulso Ultrasónico.

Tabla. 29 Resultados de la Velocidad de Pulso Ultrasónico (km/s) cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.

Edad	Baja Relación A/C		Testigo	
	Lectura Promedio (μ s)	Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	Lectura Promedio (μ s)	Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)
14	52.28	3825.31	54.60	3663.00
28	53.14	3763.82	53.27	3754.69
60	52.12	3837.54	53.12	3765.30
90	51.95	3849.86	53.30	3752.35

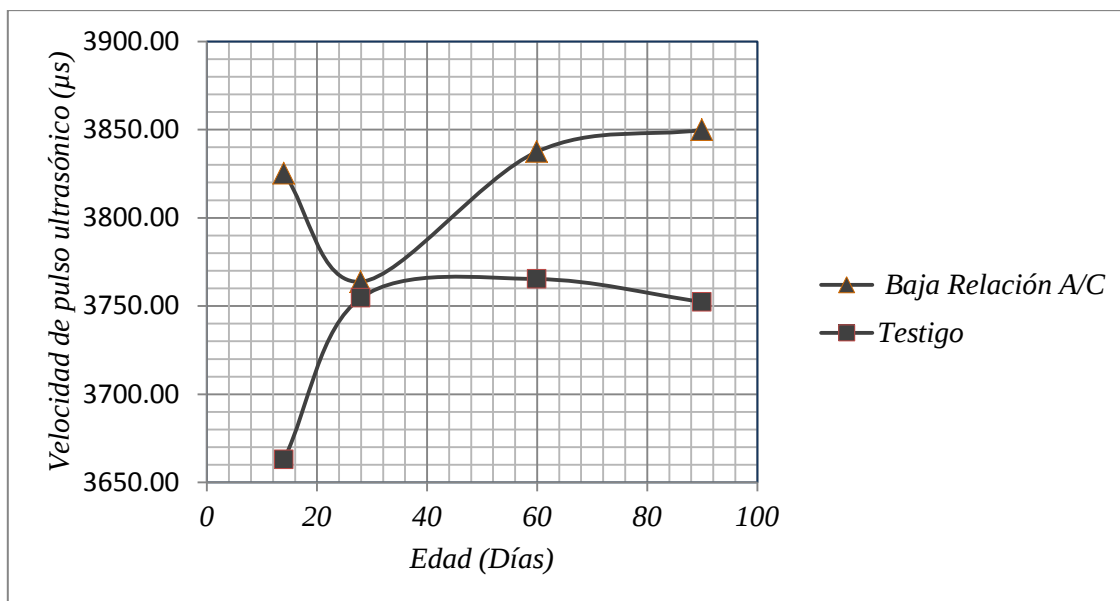


Ilustración 38 Resultados de la Velocidad de Pulso Ultrasónico (km/s) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.

7.7.4. Frecuencia de Resonancia.

Tabla. 30 Resultados de la Frecuencia de resonancia (Hertz) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.

Edad	Frecuencia de resonancia (Hertz)	
	Baja Relación A/C	Testigos
14	1317.50	1351.50
28	1327.25	1788.00
60	1438.50	1826.75
90	1523.50	1409.25

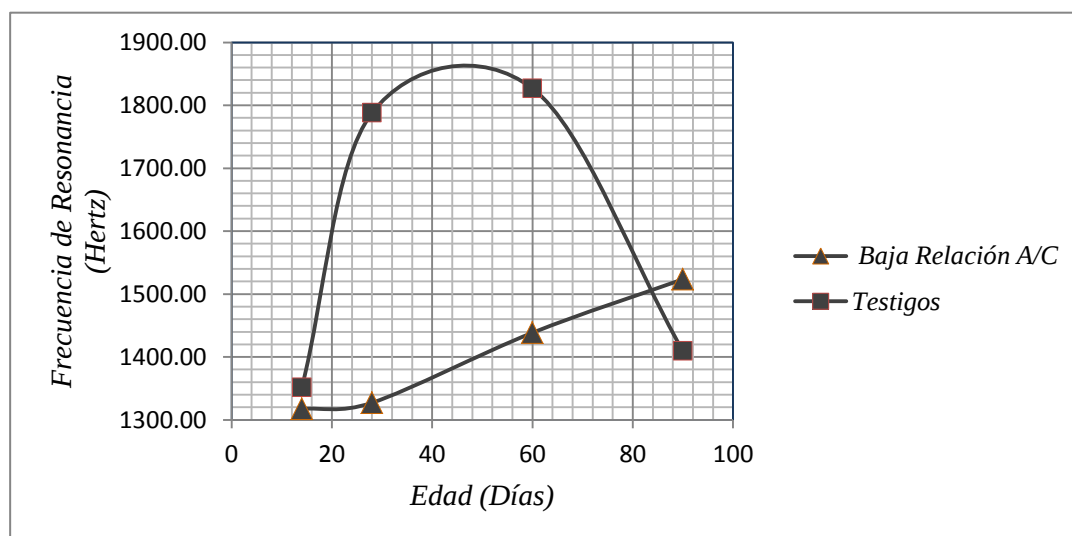


Ilustración 39 Resultados de la Frecuencia de resonancia (Hertz) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.

7.8. Pruebas Destructivas.

7.8.1. Resistencia a la Compresión.

Tabla. 31 Resultados de la compresión Esfuerzo (kg/cm^2) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.

Especímen	Esfuerzo (kg/cm^2) en Días			
	14	28	60	90
Baja Relación A/C	399.26	407.60	522.38	509.77
Testigo	298.81	338.17	408.17	420.26

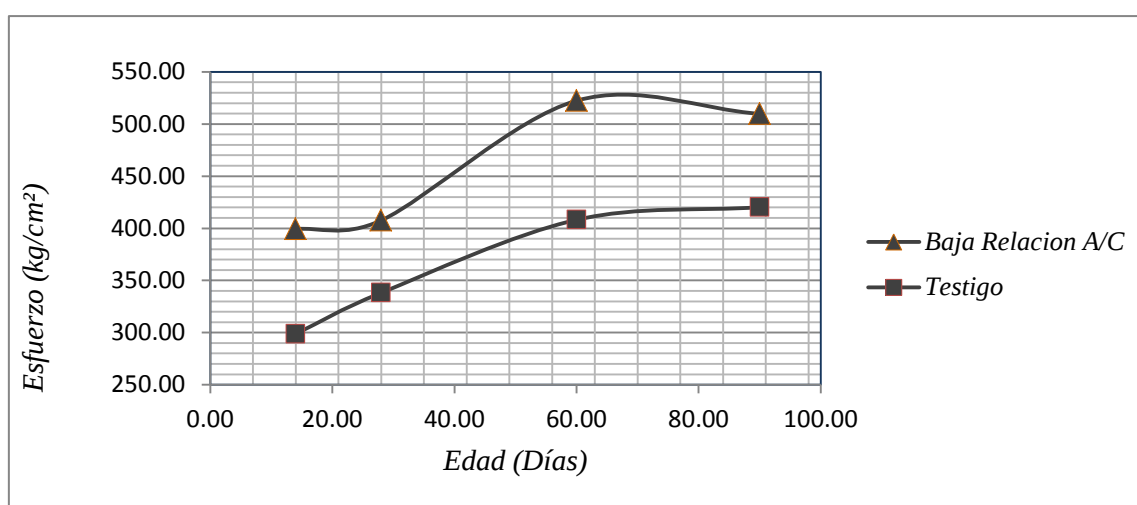


Ilustración 40 Resultados de la compresión Esfuerzo (kg/cm^2) en cilindros de 10 x 20 cm, a 14, 28, 60 y 90 días de edad.



Ilustración 41 Prueba a compresión a especímenes Testigos y especímenes con baja relación agua/cemento.



7.8.2. Módulos de Elasticidad Estáticos.

Tabla. 32 Resultados de Módulos de Elasticidad Estáticos (kg/cm^2) en cilindros de 10 x 20 cm, a 28, 60 y 90 días de edad.

Especímen	Módulos de Elasticidad Estáticos (kg/cm^2)		
	28	60	90
Baja Relación A/C	424332.18	490145.69	520457.22
Testigo	422113.23	426502.82	507429.84

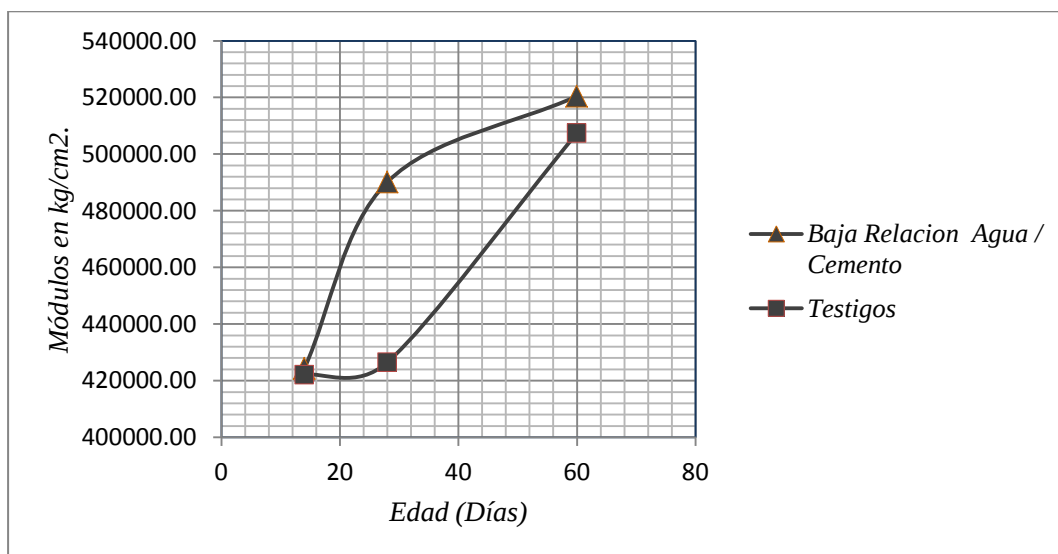


Ilustración 42 Resultados de Módulos de Elasticidad Estáticos (kg/cm^2) en cilindros de 10 x 20 cm, a 28, 60 y 90 días de edad.

7.8.3. Modulo de Ruptura.

Tabla. 33 Resultados de Módulos de Ruptura (kg/cm^2) en vigas de 15x15x60 cm, a 28 días de edad.

Especímen	M. de Ruptura (kg/cm^2)	
	Baja Relación A/C	Testigos
1	59.73	56.27
2	61.73	56.67
3	60.53	58.53

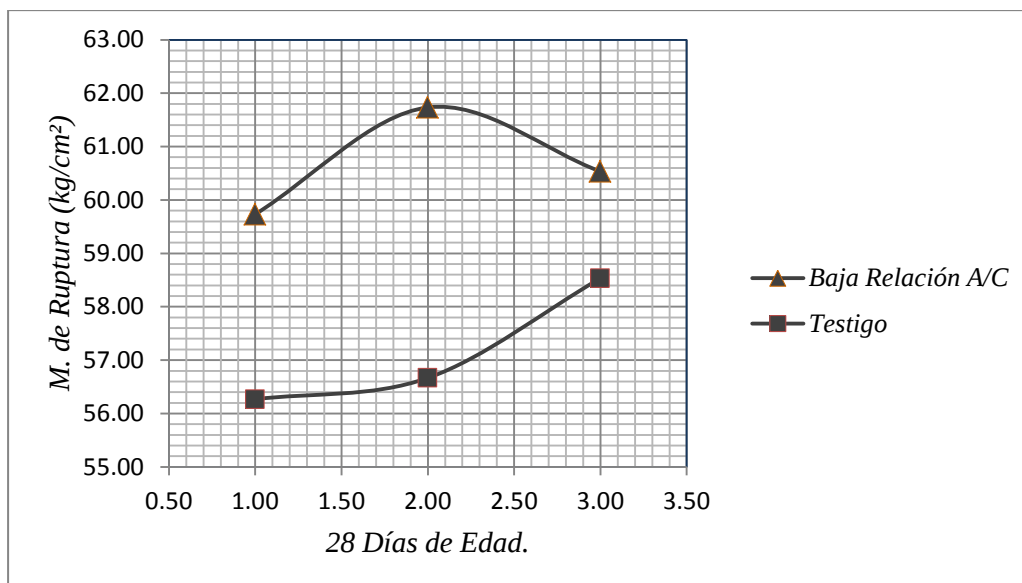


Ilustración 43 Resultados de Módulos de Ruptura (kg/cm^2) en vigas de 15x15x60 cm, a 28 días de edad.

7.8.4. Ataque por Sulfatos.

Tabla. 34 Resistencia a la Compresión Simple (kg/cm) en ciclos de Sulfato para cilindros de 5*10 cm.

		Resistencia a la Compresión Simple (kg/cm) en ciclos					
	Especímen	Inicio del ciclo	1	2	3	4	5
Testigos	1	362.11	440.03	370.77	235.80	138.53	69.26
	2	334.10	425.26	409.98	217.47	110.52	27.50
	3	374.33	381.46	319.33	311.69	197.10	66.21
Baja Relación Agua/Cemento.	1	424.24	511.33	414.06	170.10	127.32	91.67
	2	404.89	500.64	368.22	156.86	234.28	96.77
	3	425.41	507.26	377.39	146.68	331.04	91.67

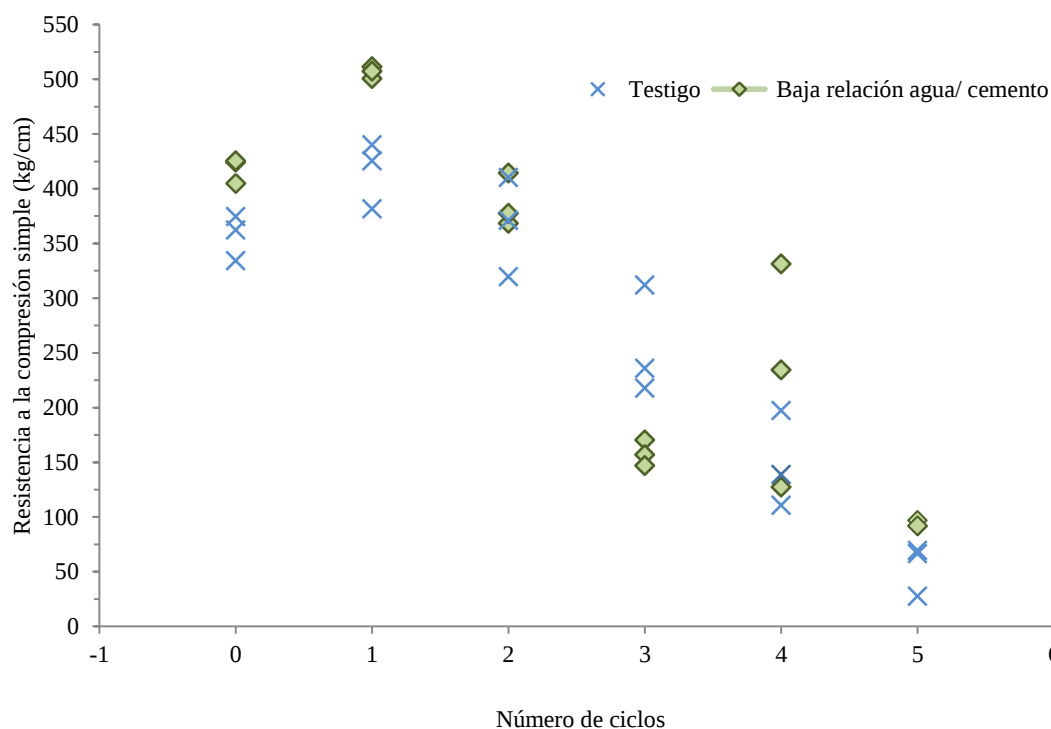
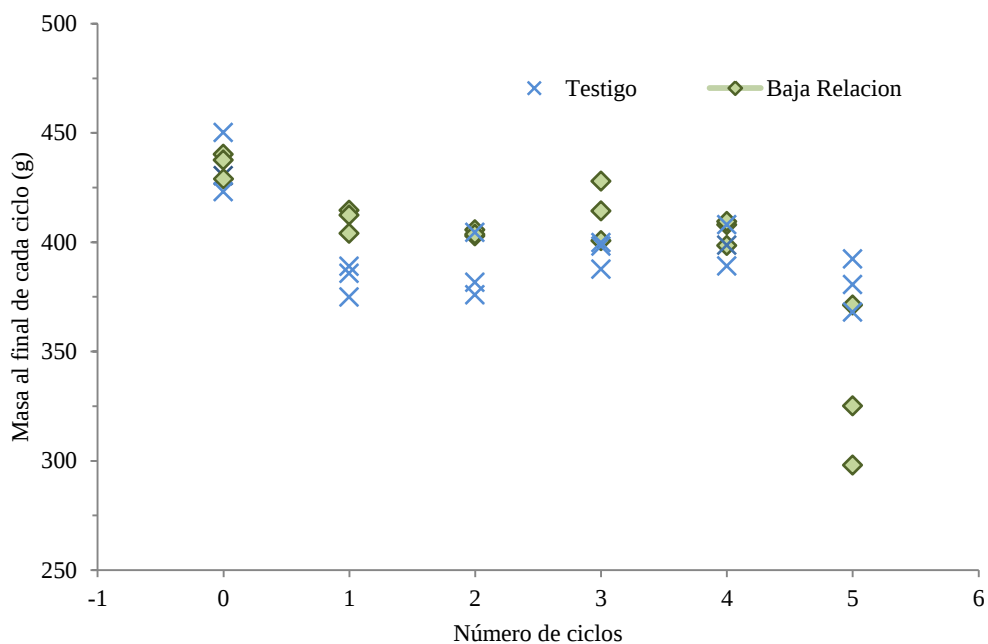


Ilustración 44 Resistencia a la Compresión Simple (kg/cm) en ciclos de Sulfato para cilindros de 5*10 cm.

Ilustración 45 Masa al Final de Cada Ciclo (g) para cilindros de 5*10 cm.

		Masa al Final de Cada Ciclo (g)					
	Especímen	Inicio del ciclo	1	2	3	4	5
Testigos	1	7110	8640	7280	4630	2720	1360
	2	6560	8350	8050	4270	2170	540
	3	7350	7490	6270	6120	3870	130
Baja Relación Agua/Cemento.	1	8330	10040	8130	3340	2500	1800
	2	7950	9830	7230	3080	4600	1900
	3	8353	9960	7410	2880	6500	1800



*Ilustración 46 Masa al Final de Cada Ciclo (g) para cilindros de 5*10 cm.*



Ilustración 47 Comparativa de los especímenes con baja relación agua / cemento (izquierdo) y especímenes testigos (derecho) después de su Primer ciclo en solución de sulfato.



Ilustración 48 Comparativa de los especímenes con baja relación agua / cemento (izquierdo) y especímenes testigos (derecho) después de su Segundo ciclo en solución de sulfato.



Ilustración 49 Comparativa de los especímenes con baja relación agua / cemento (izquierdo) y especímenes testigos (derecho) después de su Tercer ciclo en solución de sulfato.



Ilustración 50 Comparativa de los especímenes con baja relación agua / cemento (izquierdo) y especímenes testigos (derecho) después de su Cuarto ciclo en solución de sulfato.



Ilustración 51 Comparativa de los especímenes con baja relación agua / cemento (izquierdo) y especímenes testigos (derecho) después de su Quinto ciclo en solución de sulfato.



8. Análisis de Resultados.

8.1. Agregado Grueso.

En los resultados obtenidos del agregado grueso reciclado, se observó que se tenía un alto contenido de absorción del 9.70%, se consideró alto ya que Kosmatka et al. (2004), proponen límites de 0.2% al 4% para agregados gruesos naturales, los agregados con alta absorción, indica una reducción en la cantidad de agua hidratada en la elaboración de una mezcla de concreto, si no se hicieran las correcciones pertinentes al momento de la elaboración, en cuanto a las masas volumétricas secas sueltas y secas varilladas, se observó que se encontraban cerca de los límites permisibles (1.2 kg/cm^3 - 1.75 kg/cm^3) con resultados de 1.17 kg/cm^3 y 1.26 kg/cm^3 respectivamente, valores que se tomaron admisibles. La densidad de 2.31 gr/cm^3 fue muy cercana a los límites de 2.4 gr/cm^3 a 2.9 gr/cm^3 , este resultado tampoco ocasionaría ningún problema (Komastra, 2004). El análisis granulométrico resultó satisfactorio al compararse con los límites para un tamaño máximo de $\frac{1}{2}$ “, dichos límites se encuentran en la norma Mexicana NMX-C-111-ONNCEE-2004. Con todos estos resultados congruentemente satisfactorios se decidió utilizar el agregado grueso reciclado como sustituto total de agregado grueso natural.

8.2. Agregados Finos.

Al momento de elaborar las pruebas para la caracterización del los agregados finos reciclados, se observó una absorción del 18.27% este valor es muy alto con respecto a la humedad de absorción del 0.2% al 2% que tienen la mayoría de los agregados finos naturales. Tanto las masas volumétricas secas sueltas y las masas volumétricas secas varilladas estuvieron también muy cercanas a los límites tolerables al igual que el agregado grueso, sus valores fueron 1.14 kg/cm^3 y 1.3 kg/cm^3 respectivamente. La densidad de 2.24 gr/cm^3 fue aun más baja que el agregado grueso la cual no cumplía con los límites. (komastra et al., 2004). El análisis granulométrico reflejó un exceso de partículas gruesas de modo que, el modulo de finura resultó ser alto también de 3.83, estado muy por arriba de recomendado en la norma NMX-C-111 de 3.3.

Haciendo un análisis general del agregado fino, era inapropiado utilizarse, por lo cual se realizó una sustitución parcial de agregados reciclados por agregados



naturales, en diferentes porcentajes (10%-80%) se observó que a medida que aumentaba la cantidad de arena natural en las mezclas, el modulo de finura disminuía, de la misma manera se comporto el porcentaje de absorción, disminuyendo al aumentar la cantidad de arena natural.

8.2.1. Prueba a compresión de las diferentes sustituciones.

La combinación que correspondía al 40% de arena reciclada y 60% de arena de río, fue la mezcla que mejor comportamiento tuvo en las diferentes edades de prueba, a 14 días logro estar un 14% por arriba del esfuerzo de diseño esperado, se observo también que las resistencias, después y antes, del 60 % de arena de río fueron disminuyendo, esto se suscito debido a el acomodo de sus partículas, la sustitución del 60% fue la mezcla con mejor distribución en granulometrías.

8.3. Pruebas realizadas al concreto fresco.

8.3.1. Revenimiento.

Con respecto a la norma NMX-C-156-1997-ONNCCE el revenimiento de las mezclas fue bajo, ya que la norma da una tolerancia de ± 2.5 mm, para revenimientos de 10 cm. El revenimiento de las mezclas de baja relación y testigos fueron de 7cm y 5 cm respectivamente, a pesar de que se adiciono 0.58% de un aditivo fluidificante en relación al peso del cemento a la mezcla de baja relación agua / cemento, por ende las mezclas presentaron baja trabajabilidad, esto se debe en cierta parte por la alta absorción que tienen los materiales reciclados.

8.4. Pruebas no destructivas.

8.4.1 Resistividad Eléctrica.

La resistividad eléctrica de la mezcla testigo se mostró ascendentemente con respecto a los días de prueba, la mezcla de baja relación a/c mostró una tendencia a mantenerse constante en los 60 y 90 días de prueba, se observaron mejores resultados en la segunda mezcla.

Ambas mezclas se consideraron de alto riesgo conforme a los datos que Duran (2000) propone.

8.4.2. Velocidad de pulso ultrasónico.



Los resultados de las mezclas testigo predisposición al aumento a medida que se aumenta la edad, sin embargo en las mezclas de baja relación a/c se produce un cambio descendente a 28 días de edad, esto pudiera deberse a que los cilindros de prueba de esta mezcla se elaboraron en diferente día que la mezcla de los otros días.

8.4.3. Frecuencia de resonancia.

Se observa que los especímenes con baja relación agua / cemento se encuentra en el rango de 1300-1500 Hertz mientras que los testigos se encuentran en el rango de 1350-1410 Hertz.

8.4.4. Modulo de elasticidad dinámico.

Los resultados del módulo elasticidad realizados a los cilindros, se comportaron del mismo modo que en la prueba de Velocidad de pulso ultrasónico, esto se debe a que el modulo elasticidad se obtienen a partir de los resultados obtenidos velocidad, resultando mayores los valores de la mezcla de baja relación a/c .

8.5. Pruebas destructivas.

8.5.1. Compresión simple en cilindros de 10cm x 20cm.

Gracias a él fluidificante adicionado a la mezcla de baja relación a/c se pudieron obtener resistencias muy por arriba de la resistencias que arrojó el testigo, y este a su vez superó a la resistencia de diseño de 350 Kg/cm^2 , observándose que a la edad de 60 días, la mezcla de baja relación a/c superó a la mezcla testigo con un 28% más.

8.5.2. Módulo de elasticidad estático.

En ambas mezclas se observó una tendencia al alta, al comparar los resultados de las dos mezclas a 60 días se observa que la mezcla de baja relación a/c dista con un 15% de la mezcla testigo, indicando un mayor soporte a de cargas con pequeñas deformaciones.

8.5.3. Módulo de ruptura en vigas primaticas de 15 cm x 60 cm.



Komastka (2004), propone rangos de 37 kg/cm^2 a 50 kg/cm^2 para un $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días de edad, se observa que los valores resultantes de esta prueba fueron superiores a los rangos propuestos.

8.5.4. Ataque de sulfatos.

Se observó un mayor deterioro en los especímenes elaborados con baja relación agua / cemento, esto se vio en las mayores pérdidas de masa, al paso del cuarto al quinto ciclo se observó una grande disminución en sus masas lo que se vio reflejado en los esfuerzos obtenidos.



9. CONCLUSIONES.

El objetivo planteado en esta investigación era conocer las características de un concreto de alta resistencia elaborado con agregados generados del desecho de viejas construcciones, en base a los resultados de esta experimentación, se logra concluir que el reuso de concreto hidráulico que ya cumplió con su vida útil para la generación de un nuevo concreto, puede considerarse una solución factible para contribuir a solucionar parcialmente los problemas de contaminación ambiental; sin embargo es necesario tomar en cuenta las propiedades del agregado reciclado al momento de utilizarlos ya que cambiarán en función del tipo de construcción. En algunos casos se requerirá agregar aditivos; tal es el caso de esta investigación, que se le agregó fluidificante para aumentar la trabajabilidad de concreto, al disminuir considerablemente la relación a/c, para mejorar las propiedades mecánicas y físicas del concreto hidráulico producido de esta forma.

Al momento de elaborar la caracterización de los agregados reciclados se observó que se podía sustituir el 100% de agregado grueso natural por agregados gruesos reciclados, en los agregados finos fue conveniente hacer una combinación del 60% de arena de río y 40% arena reciclada. Las pruebas destructivas arrojaron resultados favorables en las cuatro edades analizadas en especímenes elaborados con concreto reciclado y aún más con la baja relación agua/cemento, produciendo en esta última valores muy por arriba de lo esperado de modo que se propone para investigaciones futuras una reducción en la cantidad de cemento lo que traería ahorros en los costos de producción de los cuales el cemento constituye el más costoso de ellos.

El fluidificante utilizado, resultó ser de gran ayuda para poder realizar mezclas con buena trabajabilidad y cumplir con nuestro objetivo de crear concreto de alta resistencia, con trabajabilidad y durables, con tan solo 0.58% en base al peso del cemento, si se requiriera que este fuera un concreto lanzado, sería cuestión de aumentar este porcentaje de adicción para hacer las mezclas más fluidas.



10. BIBLIOGRAFIA.

- Almaral J.L., Almeraya F., Arredondo S.P., Castorena J.H., Corral R., Gómez J.M. y Neri M.A. (2011). *Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Concrete with Recycled Concrete Aggregates and Supplementary Cementing Materials*. Int. J. Electrochem. Sci., 613 – 621
- ACI Committee 228, (1998), *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*, ACI 228.2R-98, American Concrete Institute, Farmington Hills MI.
- ASTM C 215-02, (2003), *Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens*, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA.
- ASTM Test Designation C 597-02, (2003), *Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete*, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, West Conshohocken, PA.
- Babu G., Martínez S. (2008). *Evolución reciente de la industria de cemento: un estudio comparativo entre México y la India*, PORTES, revista mexicana de estudios sobre la Cuenca del Pacífico, Volumen 2, Número 3, 165-202.
- Chávez H. L. (2012), *Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a la caracterización del concreto hidráulico elaborado con agregados volcánicos y cemento CPC 30R RS*. Tesis de doctorado, Centro de Investigaciones y desarrollo del estado de Michoacán, Morelia.
- Corinaldesi V., Moriconi G. (2009). *Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete*. Constructions and Buildings Material.
- Cruz J., Velázquez R. (2004). *Concreto reciclado*, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Instituto Politécnico Nacional, México D. F.
- Chan J., Solís R., Moreno E. (2003). *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*. Ingeniería, vol. 7, núm. 2, mayo-agosto, pp. 39-46, Universidad Autónoma de Yucatán México.
- Díaz N. (2011), *Efecto del agregado grueso pétreo triturado en solicitaciones mecánicas dinámicas y estáticas. Caso de concreto hidráulico simple adicionado con fibras deshidratadas de cactus opuntia blanco*, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia.
- Espinoza, J. A.; Martínez, W & Navarro, L. M. (2001). *Análisis de materiales, Resistencia de materiales (3ed)*. Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.
- Gambhir M. (2004). *Concrete Technology*, Ed. McGraw-Hill, tercera edición, New Delhi.
- Gómez-Soberón J. (2002). *Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate, an experimental study*. Cement and Concrete Research 32, 1301– 1311.
- Levy S., Helene P. (2004). *Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development*. Cement and Concrete Research 34 (2004) 1975 - 1980.
- Martínez I., Mendoza C. (2006). *Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados*. INGENIERÍA investigación y Tecnología VII. 3. 151 – 164.



- Medina E. (2007). *Construcción de estructuras de hormigón armado: edificación*. Ed. Delta, Publicaciones Universitarias, 2da edición. Madrid, España.
- Neville, A. M. (1999), *Tecnología del Concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. México, Distrito Federal.
- NMX-C-030ONNCCE-2004. Industria de la construcción – Agregados – *Muestreo*.
- NMX-C-083-ONNCCE-2002. Industria de la construcción – Concreto – *Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto – Método de prueba*.
- NMX-C-109-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – Concreto – *Cabeceo de especímenes cilíndricos*.
- NMX-C-073-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – Agregados – *Masa Volumétrica – Método de prueba*.
- NMX-C-077-ONNCCE-1997. Industria de la construcción – Agregados para concreto – *Análisis granulométrico – Método de prueba*.
- NMX-C-109-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – Concreto hidráulico – *Determinación del cabeceo de especímenes*.
- NMX-C-111-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – *Agregados para concreto hidráulico* – Especificaciones y métodos de prueba.
- NMX-C-122-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – *Agua para concreto* – Especificaciones.
- NMX-C-156-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – Concreto – *Determinación del revenimiento en el concreto fresco*.
- NMX-C-159-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – Concreto – *Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio*.
- NMX-C-164-ONNCCE-2002. Industria de la construcción – Agregados – *Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso*.
- NMX-C-165-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – Agregados – *Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino – Método de prueba*.
- NMX-C-170-ONNCCE-1997. Industria de la construcción – Agregados – *Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas*.
- NMX-C-199-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – *Aditivos para concreto* – Terminología y clasificación en concreto hidráulico y mortero.
- NMX-C-303-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – Concreto hidráulico – *Determinación de la resistencia a la flexión estática usando una viga simple con carga en el centro del claro*.
- Norma ambiental para el Distrito Federal NADF-007-RNAT-2004, que establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción en el distrito federal.
- Kosmatka S., Kerkhoff B., Panarese W., Tanesi J. (2004), *Diseño y Control de Mezclas de Concreto (1ed)*. Portland Cement Association.
- Kumar P., Monteiro P. (1998), *CONCRETO, Estructura, propiedades y materiales*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. México, Distrito Federal.



- Pierre-Claude A. (2008). *Binders for Durable and Sustainable Concrete*, Ed. Taylor & Francis, New York, E.U.A.
- Red Durar (2000), *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*, 2a ed., Río de Janeiro: CYTED.