



UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN
LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES.

“Diseño por Durabilidad de Mezclas
de Concreto Hidráulico variando los
agregados pétreos. Evaluación de
Resultados mediante Pruebas
Destructivas y no Destructivas”.

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA

Tesista:

Ing. Gibrán Antonio Moreno Reyes.

Asesor:

M. A. Wilfrido Martínez Molina.

Co asesor:

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán.



Morelia Michoacán México 2012.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación es producto del esfuerzo de Investigadores, Maestros, Ingenieros y porque no decirlo de todas las personas que de manera directa o indirecta apoyaron en el desarrollo de ésta, les agradezco ya que sin su apoyo la investigación y consecuente redacción de este documento no sería posible.

A Dios le agradezco, porque ha estado conmigo en momentos difíciles en los cuales creía que no era posible seguir adelante; gracias a él ahora veo de manera más clara y entiendo que para poder ser grande se necesita pasar por las adversidades que la vida nos pone en el camino, mismas que nos hacen crecer y madurar para poder enfrentar los problemas y solucionarlos en la forma más adecuada posible.

A la Universidad Autónoma de Barcelona, a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Instituto Mexicano del Transporte por las facilidades prestadas en sus laboratorios.

A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán; por el apoyo brindado para la realización de la micro caracterización de los agregados en la ciudad de Barcelona España; por sus consejos morales y científicos.

A mi asesor el M. A. Wilfrido Martínez Molina por su apoyo durante la realización de esta tesis, por su apoyo y entereza mostrados durante el desarrollo de la investigación, por sus consejos profesionales y morales.

Al Dr. Hugo Luis Chávez por su apoyo durante la elaboración y prueba de los especímenes y por sus opiniones y consejos durante el análisis de ésta investigación.

Al laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Rúelas y todo el personal administrativo, técnico y de servicio social por la disponibilidad de uso de los equipos.

Al Dr. José Carlos Rubio Avalos por los consejos profesionales, y por el apoyo brindado.

A mis compañeros de maestría por compartir momentos inolvidables durante el transcurso de esta; especialmente al M.I. Emmanuel Alejandro Martínez Hernández, por su apoyo durante el desarrollo de esta investigación por sus comentarios y sugerencias.

DEDICATORIAS

A mis padres: Baltazar Moreno Montúfar, Elodia Reyes Herrera; por enseñarme el valor de la humildad y por su aliento para seguir adelante en las empresas que me propongo, gracias por su apoyo moral y económico; palabras no bastan para agradecerles, ya que les debo la vida y lo que ahora soy.

A mis hermanos Baltazar, Adriana, Brayan y Victor, que aunque estoy lejos de ellos son motivo para ser una persona más preparada y ejemplo de superación.

A mi novia Mariela Roque, le agradezco por estar siempre conmigo y por alentarme y motivarme día a día para culminar esta investigación, por sus consejos profesionales y por todo el apoyo que me ha brindado.

Al Dr. Jorge Alarcón Ibarra que fue quien me motivó a realizar mis estudios de posgrado, por las facilidades prestadas, por sus consejos, por su apoyo moral y profesional le agradezco.

RESUMEN

La presente investigación se enfoca en evaluar la durabilidad en mezclas de concreto realizadas con agregados pétreos de granulometría gruesa: de origen basáltico (Mina AGC) y calcáreo (Mina Piedras de Lumbre); de granulometría fina: arena de mina volcánica (Mina El Tigre) y una arena blanca de río (Mina Zinapécuaro). Empleando como aglutinante cemento Apasco CPO 30R, así como agua potable.

Se realizó la caracterización micro estructural de los agregados mediante una serie de estudios: SEM, FRx, DRX y Microscopía óptica, con el apoyo del laboratorio de geología de la Universidad Autónoma de Barcelona.

Se diseñaron ocho tipos de concreto con 4 combinaciones de agregados; cuatro mezclas con relaciones agua/cemento 0.50 (Criterio de Durabilidad ACI) y cuatro mezclas con relación agua/cemento 0.65. Elaborándose especímenes cilíndricos de 10x20cm, 15x30cm y vigas de 15x15x60cm.

Los ensayos realizados para obtener las propiedades mecánicas del concreto fueron mediante pruebas no destructivas y destructivas; también se realizaron pruebas por ataque químico de sulfatos, desgaste por abrasión (Ensayo Cántabro), congelamiento y deshielo, pruebas de carbonatación y pruebas de absorción capilar.

Las pruebas no destructivas empleadas son: Frecuencia de resonancia, resistividad, esclerométricas y velocidad de pulso ultrasónico.

Durante el ensayo del módulo de elasticidad se tomaron fotografías termográficas para determinar la variación de temperatura en el espécimen sometido a una carga axial, con el fin de observar la parte donde se concentran los esfuerzos que producen el cambio de temperatura en el espécimen.

ABSTRACT

This research focuses on assessing the durability of concrete mixtures made with coarse-grained rock aggregates: of basaltic origin (Mina AGC) and limestone (Mina Piedras de Lumbre) Fine grain: volcanic sand mine (Mina El Tigre) and a white sandy river (Mina Zinapécuaro). Using cement as a binder Apasco CPO 30R and drinking water.

A characterization of micro structural aggregates through a series of studies: SEM, XRF, XRD and optical microscopy, supported the laboratory of geology at the Autonomous University of Barcelona.

We designed eight types of concrete with 4 combinations of aggregates, four mixtures with water / cement ratio 0.50 (ACI Durability Criteria) and four mixtures with water / cement ratio 0.65.

We made cylindrical specimens: 10x20cm, 15x30cm and beams: 15x15x60cm.

The testing to obtain the mechanical properties of concrete were using non-destructive testing and destructive tests were also carried out by etching of sulfates, abrasion (Cantabro Test), freezing and thawing, carbonation tests and capillary absorption tests. Nondestructive testing used are: resonance frequency, resistivity, sclerometrics and ultrasonic pulse velocity.

During the test the modulus of elasticity thermographic photographs were taken to determine the temperature variation in the specimen under an axial load, in order to observe the portion where stress concentration that produces the temperature change in the specimen.

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es el de Diseñar por Durabilidad y Resistencia, Mezclas de Concreto, ya que el criterio de Durabilidad juega en papel importante en la vida útil de una Estructura de Concreto; Analizar y supeditar las características micro estructurales y macro estructurales del concreto con su desempeño mecánico enfocado al concepto de durabilidad mediante pruebas destructivas y no destructivas así como la correlación entre ellas.

Las mezclas se realizarán con Agregados de 4 Bancos de Materiales del Estado, los cuales son comúnmente empleados en la construcción de obras diversas y principalmente en obras relacionadas con las vías terrestres.

Los Bancos son los siguientes:

- Banco de Origen Calcáreo “Piedras de Lumbre”, ubicado en la ciudad de Zitácuaro.
- Banco de Origen Volcánico (Basalto) “AGC”, ubicado en la salida Morelia-Salamanca.
- Banco de Origen Volcánico “El Tigre”, ubicado en la salida Morelia-Quiroga.
- Banco de Origen Volcánico “Zinapécuaro”, ubicado en Zinapécuaro.

Con este trabajo se pretende difundir y aplicar los criterios de Diseño por Durabilidad que se encuentran en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal en sus Normas Técnicas Complementarias; ya que en la actualidad pocos son los diseños que toman en cuenta este Criterio de Diseño. Encontrar el proporcionamiento adecuado de los materiales que garantice un óptimo desempeño en cuanto a Resistencia y Durabilidad se refiere.

La Correlación entre pruebas destructivas y no destructivas, son fundamentales ya que con ella se podrán evaluar desde el punto de vista de la durabilidad estructuras existentes sin necesidad de alterar o destruir parte de ellas.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente seguimos teniendo una gran fascinación por los resultados de la resistencia a la compresión. Y nada, o poco, se efectúa en lo que respecta al criterio de durabilidad, ya que la mayoría de los proyectistas continúan con la creencia de que el concreto resistente es concreto durable, cosa que muy poco tiene de cierto.

Los países en la actualidad se encuentran preocupados por que las obras civiles que se realizan no cumplen con lo proyectado de vida útil, ya esta se acorta debido a los daños provocados por los agentes ambientales, lo cual produce un alto costo de mantenimiento en ellas; sin embargo si desde un inicio estas se realizan tomando en cuenta el criterio de diseño por DURABILIDAD, la vida útil de estas estructuras sería mayor.

Por lo que esta investigación se justifica ya que mediante esta investigación se puede hacer conciencia a los constructores en las ventajas que se tienen de diseñar de manera correcta (con los criterios de Resistencia y Durabilidad), las obras y las ventajas económicas que a futuro esto les puede generar; así como orientarles en la selección de los materiales adecuados a emplear en determinada obra

INDICE

DEDICATORIAS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
OBJETIVO	V
JUSTIFICACIÓN	VI
1 INTRODUCCIÓN	1
2 ESTADO DEL ARTE	2
2.1 ANTECEDENTES DEL CONCRETO.	2
2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL CONCRETO.	5
2.3 DURABILIDAD.	6
2.3.1 Factores que afectan la Durabilidad del Concreto.	7
2.3.2 Conceptos Básicos de Durabilidad.	17
2.3.3 Modelo de Durabilidad de Tuutti.	18
2.4 ESTADÍSTICAS DEL CONCRETO Y CEMENTO EN MÉXICO Y EL MUNDO.	19
2.5 CONCRETO Y SUS COMPONENTES.	25
2.5.1 Cemento	25
2.5.1.1 Propiedades Físicas y Mecánicas del Cemento.	26
2.5.2 Agua	28
2.5.2.1 Empleo del Agua para la Fabricación del Concreto.	29
2.5.2.2 Especificaciones.	29
2.5.3 Agregados	31
2.5.3.1 Propiedades de los Agregados.	31
2.5.4 Aditivos para Concreto	35
2.5.4.1 Usos de los Aditivos	36
2.6 DISEÑO DE MEZCLAS CON CRITERIO DE DURABILIDAD, MÉTODO ACI.	37
2.6.1 Generalidades	37
2.6.2 Método de American Concrete Institute (A.C.I.) 211.	41
2.7 PRUEBAS REALIZADAS AL CONCRETO.	50
2.7.1 Pruebas del concreto en estado fresco.	50
2.7.1.1 Muestreo del Concreto.	50
2.7.1.2 Ensayos de Consistencia y Trabajabilidad.	51
2.7.1.3 Determinación del Peso Volumétrico del Concreto y Contenido de Aire.	53
2.7.1.4 Curado del Concreto.	55
2.7.2 Pruebas realizadas al concreto en estado endurecido.	55
2.7.2.1 Pruebas Destructivas.	56
2.7.2.1.1 Resistencia a Compresión en Cilindros de Concreto.	56
2.7.2.1.2 Resistencia a Flexión del Concreto.	60
2.7.2.1.3 Resistencia a Tensión del Concreto.	64
2.7.2.1.4 Módulo de Elasticidad del Concreto.	67
2.7.2.2 Pruebas No Destructivas.	69
2.7.2.2.1 Rebote Esclerométrico ó Martillo de Rebote.	70

2.7.2.2.2	Método de prueba estándar para determinar la velocidad de propagación de pulso a través del concreto (ASTM C 597).....	73
2.7.2.2.3	Prueba de Infrarrojo.....	77
2.7.2.2.4	Prueba Estándar para las Frecuencias de Resonancia fundamentales longitudinales de especímenes de Concreto	79
2.7.2.2.5	Prueba de Resistividad Eléctrica	81
2.7.3	<i>Pruebas de durabilidad.</i>	82
2.7.3.1	Prueba de Absorción Capilar.....	82
2.7.3.2	Prueba de Carbonatación.....	84
2.7.3.3	Prueba de Ataque por Sulfatos y Cristalización.....	86
2.7.3.4	Ensayo Cántabro.....	86
2.7.3.5	Prueba de Congelamiento y Deshielo.	87
3	DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN	89
4	EXPERIMENTACIÓN.....	90
4.1	SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.	90
4.1.1	<i>Selección de los Bancos de Materiales.</i>	90
4.1.2	<i>Muestreo de los Bancos de Materiales.</i>	91
4.1.3	<i>Caracterización Macroestructural.</i>	95
4.1.3.1	Granulometría, Pesos Volumétricos, Densidad, Absorción y Colorimetría de los Agregados. 96	
4.1.3.2	Límites de Consistencia o de Atterberg en Finos de Arenas.....	99
4.2	CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL.....	101
4.2.1	<i>Preparación de Muestras para Análisis Microestructural.</i>	101
4.2.1.1	Preparación de Muestras para Microscopía Electrónica de Barrido.	103
4.2.1.2	Preparación de Muestras para Elaboración de Láminas Delgadas.	104
4.2.2	<i>Prueba de Difracción de Rayos X.</i>	104
4.2.3	<i>Prueba de Microscopía Electrónica de Barrido.</i>	106
4.2.4	<i>Prueba de Fluorescencia de Rayos X.</i>	107
4.2.5	<i>Mineralogía Óptica de Láminas Delgadas.</i>	108
4.3	PRUEBAS REALIZADAS AL CEMENTO Y AGUA EMPLEADOS PARA LA FABRICACIÓN DE CONCRETO.....	110
4.3.1	<i>Método de Prueba Estándar para la determinación de la Consistencia Normal del Cemento Hidráulico.</i>	110
4.3.2	<i>Método de Prueba Estándar para la determinación del Tiempo de Fraguado del Cemento Hidráulico.</i>	114
4.3.3	<i>Método de Prueba Estándar para la Determinación de la Densidad Aparente del Cemento Hidráulico.</i>	117
4.3.4	<i>Determinación de la Calidad del Agua para elaborar Concreto Hidráulico.</i>	120
4.4	DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON CRITERIO DE DURABILIDAD ACI	121
4.4.1	<i>Método de Prueba Estándar para determinar el Revenimiento del Concreto Hidráulico</i> 122	
4.4.2	<i>Método de Prueba Estándar para de determinar la Masa Unitaria del concreto..</i> 124	
4.4.3	<i>Método de Prueba Estándar para la Elaboración de Especímenes de Prueba en el Laboratorio.</i>	126
4.4.4	<i>Método de Prueba Estándar para el Curado de Especímenes de Prueba en el Laboratorio.</i>	128
4.5	ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL CONCRETO.	130
4.5.1	<i>Prueba de Fluorescencia de Rayos X.</i>	130
4.5.2	<i>Prueba de Microscopía Electrónica de Barrido en Muestras de Concreto.</i>	133
4.6	PRUEBAS DESTRUCTIVAS, NO DESTRUCTIVAS Y DE DURABILIDAD.	135

4.6.1	Método de prueba Estándar para el Cabeceo de Especímenes Cilíndricos de Concreto	135
4.6.2	Método de Prueba Estándar para la Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto	138
4.6.3	Método de Prueba Estándar para la determinación del Módulo de Elasticidad del Concreto	141
4.6.4	Método de Prueba Estándar para determinar la Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto	145
4.6.5	Método de Prueba Estándar para la determinación del Módulo de Ruptura del Concreto.	148
4.6.6	Método de prueba estándar para determinar la velocidad de pulso a través del concreto.	151
4.6.7	Método de prueba estándar para determinar la resistencia de especímenes de concreto mediante Rebote Esclerométrico.	154
4.6.8	Método de prueba estándar para determinar las frecuencias de resonancia fundamentales longitudinales de especímenes de concreto.	156
4.6.9	Método de prueba para determinar la Resistividad Eléctrica en el concreto hidráulico.	158
4.6.10	Método de Prueba Estándar para la determinación de la Profundidad de Carbonatación	160
4.6.11	Método de Prueba Estándar para la determinación de la Absorción Capilar de Especímenes Cilíndricos de Concreto	162
4.6.12	Método de Prueba estándar para determinar la Abrasión del Concreto (Ensayo Cántabro)	166
4.6.13	Prueba de Congelamiento y Deshielo.	169
4.6.14	Prueba de Ataque Químico por Sulfatos.	172
4.6.15	Prueba de Infrarrojo.	177
5	RESULTADOS.	178
5.1	RESULTADOS DE MACROCARACTERIZACIÓN	178
5.1.1	Resultados de Granulometría, Pesos Volumétricos, Densidad y Absorción de los Agregados.	178
5.1.1.1	Polvo de Trituración AGC.	178
5.1.1.2	Arena Zitácuaro.	179
5.1.1.3	Arena del Tigre.	180
5.1.1.4	Arena de Valle.	181
5.1.1.5	Polvo de Caliza.	182
5.1.1.6	Grava AGC.	183
5.1.1.7	Grava Caliza.	184
5.1.2	Resultados de Límites de Consistencia o de Atterberg en Finos de Arenas.	185
5.2	RESULTADOS DE MICROCARACTERIZACIÓN	186
5.2.1	Resultados Obtenidos en Difracción.	186
5.2.2	Resultados Obtenidos en Prueba de Microscopía Electrónica de Barrido.	189
5.2.3	Resultados de la Prueba de Fluorescencia de Rayos X.	199
5.2.4	Resultados obtenidos en Mineralogía Óptica de Láminas Delgadas.	200
5.3	RESULTADOS DE PRUEBAS REALIZADAS AL CEMENTO Y AGUA PARA LA FABRICACIÓN DE CONCRETO HIDRÁULICO.	204
5.3.1	Resultados del Método de Prueba Estándar para la determinación de la Consistencia Normal del Cemento Hidráulico.	204

5.3.2	<i>Resultados del Método de Prueba Estándar para la determinación del Tiempo de Fraguado del Cemento Hidráulico.</i>	204
5.3.3	<i>Resultados del Método de Prueba Estándar para la Determinación de la Densidad Aparente del Cemento Hidráulico.</i>	205
5.3.4	<i>Determinación de los valores característicos del Agua para elaborar Concreto Hidráulico.</i>	206
5.4	RESULTADOS OBTENIDOS DEL DISEÑO DE MEZCLAS CON METODOLOGÍA ACI.	208
5.4.1	<i>Proporcionamientos obtenidos para cada Mezcla.</i>	208
5.5	RESULTADOS DE LA MICROCARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO.	217
5.5.1	<i>Resultados de la prueba de Fluorescencia de Rayos X realizada al concreto.</i>	217
5.5.2	<i>Resultados de la prueba de Microscopía Electrónica de Barrido realizada al concreto.</i>	219
5.5.2.1	<i>Resultados de la mezcla AT050</i>	219
5.5.2.2	<i>Resultados de la mezcla AT065</i>	223
5.5.2.3	<i>Resultados de la mezcla AZ050</i>	226
5.5.2.4	<i>Resultados de la mezcla AZ065</i>	233
5.5.2.5	<i>Resultados de la mezcla CT050</i>	236
5.5.2.6	<i>Resultados de la mezcla CT065</i>	246
5.5.2.7	<i>Resultados de la mezcla CZ050</i>	251
5.5.2.8	<i>Resultados de la mezcla CZ065</i>	256
5.6	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DESTRUCTIVAS REALIZADAS A LOS ESPECIMENES.	263
5.6.1	<i>Resultados de la prueba de Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto.</i>	263
5.6.2	<i>Resultados de la prueba de Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto.</i>	264
5.6.3	<i>Resultados de la prueba de Resistencia a la Flexión del Concreto.</i>	266
5.6.4	<i>Resultados de la prueba de Módulo de Elasticidad del Concreto.</i>	267
5.7	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS REALIZADAS A LOS ESPECIMENES.	281
5.7.1	<i>Resultados de la prueba de Resistividad Eléctrica.</i>	281
5.7.2	<i>Resultados de la prueba para determinar la resistencia de especímenes de concreto mediante Rebote Esclerométrico.</i>	282
5.7.3	<i>Resultados de la prueba para determinar la velocidad de pulso a través del concreto.</i>	283
5.7.4	<i>Resultados de la prueba para determinar las frecuencias de Resonancia de especímenes de concreto.</i>	285
5.7.5	<i>Resultados de la prueba de Infrarrojo.</i>	287
5.8	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE DURABILIDAD.	288
5.8.1	<i>Resultados del Método de Prueba Estándar para la Determinación del Coeficiente de Capilaridad Faguerlund.</i>	288
5.8.2	<i>Resultados de la prueba de Carbonatación.</i>	298
5.8.3	<i>Resultados de Ataque por Sulfatos y Cristalización.</i>	299
5.8.4	<i>Resultados de Ensayo Cántabro.</i>	302
5.8.5	<i>Resultados de la prueba de Congelamiento y deshielo.</i>	304
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	306
7	BIBLIOGRAFÍA	309

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la infraestructura en nuestro país ha tenido un constante aumento en los últimos años, debido a las necesidades de comunicación, vivienda, centros de recreación, entre otros; en donde el concreto hidráulico juega un papel fundamental ya que ha sido por muchos años el principal material de construcción a nivel mundial debido a sus características de comportamiento, aunado a la economía en su fabricación y mantenimiento que lo hacen líder en el ámbito de la infraestructura civil.

Si bien en un inicio se pensaba que este material tenía características que lo hacían tener una vida interminable; después de diferentes estudios se llegó a la conclusión de que éste material se veía fuertemente afectado por los agentes atmosféricos mismos que disminuían considerablemente la vida útil del concreto, y por lo mismo los costos de mantenimiento a estas estructuras se habían vuelto muy costosas; es por ello que se hace necesaria la implementación de una nueva característica para el diseño de estas estructuras conocida como *Durabilidad*, con la cual se pretende lograr que las estructuras cumplan con su vida útil.

La durabilidad de una estructura de concreto es la capacidad de soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que estará expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en su análisis.

Es por ello que para conseguir que una estructura de concreto sea durable se debe seguir una estrategia que considere los posibles factores de degradación, para prevenirlos al máximo, durante la elaboración, colocación y durante la vida útil del concreto.

El motivo de esta investigación es precisamente evaluar las características del concreto realizado con diferentes agregados pétreos, diseñado mediante el concepto de durabilidad y resistencia a fin de lograr vincular las características micro estructurales y macro estructurales con su desempeño mecánico mediante pruebas destructivas y no destructivas; para poder definir los agregados y las relaciones agua cemento que mejores resultados y mejor desempeño nos arrojen.

2 ESTADO DEL ARTE

El concreto es un material durable y resistente, si se diseña de manera adecuada, dado que se trabaja en su forma plástica prácticamente puede adquirir cualquier forma.

Esta combinación de características es la razón principal por la que es un material de construcción tan popular a nivel mundial.

Sin embargo en las ultimas 3 décadas en el ámbito mundial se ha observado un incremento en agrietamientos y delaminaciones de elementos de concreto, lo que disminuye su durabilidad y por consiguiente la vida útil de diseño se ve minimizada. [Andrés Torres et Al, 2001].

2.1 Antecedentes del Concreto.

- **Antigua Roma.**

Los Romanos utilizaron con frecuencia el agregado quebrado del ladrillo embutido en una mezcla de la masilla de la cal con polvo del ladrillo o la ceniza volcánica. Construyeron una variedad amplia de estructuras que incorporaron la piedra y concreto, incluyendo los caminos, los acueductos, los templos y los palacios.



Figura1. Teatro Flavio.

- **El Faro de Smeaton.**

John Smeaton había encontrado que combinar la cal viva con otros materiales creaba un material extremadamente duro que se podría utilizar para unir juntos otros materiales. Él utilizó este conocimiento para construir la primera estructura de concreto desde la Roma antigua. ["Historia del concreto" www.monografias.com/trabajos/histoconcreto]



Figura 2. Faro de Smeaton.

- **Cronología del Cemento Portland.**

- ✓ Smeaton comparó en el año 1756 el aspecto y dureza con la piedra de Portland al sur de Inglaterra. 40 años más tarde, Parker fabricó cemento natural aplicándose entonces el vocablo "cemento" (anteriormente se interpretaba como "caement" a toda sustancia capaz de mejorar las propiedades de otras).

Vicat explicó en 1818 de manera científica el comportamiento de estos "conglomerantes".

- ✓ En 1824, Aspdin patentó el cemento portland dándole este nombre por motivos comerciales, en razón de su color y dureza que le recordaban a las piedras de Portland. ["Historia del cemento". www.cessa.com.sv].

- ✓ En 1845, Isaac Johnson obtiene el prototipo del cemento moderno quemado, alta temperatura, una mezcla de caliza y arcilla hasta la formación del "clinker".
 - ✓ En 1868, Se realiza el primer embarque de cemento Portland de Inglaterra a los Estados Unidos.
 - ✓ En 1871, La compañía Coplay Cement produce el primer cemento Portland en los Estados Unidos.
 - ✓ En 1904, La American Standard for Testing Materials (ASTM), publica por primera vez sus estándares de calidad para el cemento Portland.
 - ✓ En 1906, En C.D. Hidalgo Nuevo León se instala la primera fábrica para la producción de cemento en México, con una capacidad de 20,000 toneladas por año.
- **Concreto Actualmente.**

El concreto convencional en la actualidad, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo.

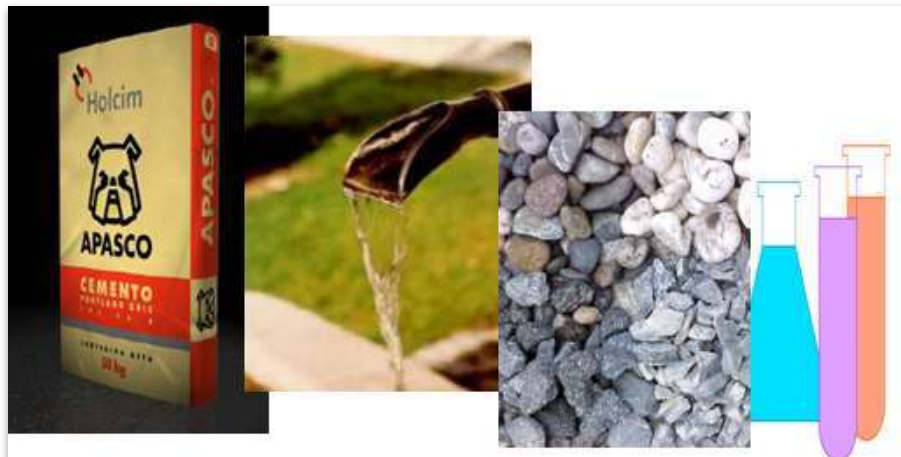


Figura 3. Componentes del Concreto.

2.2 Ventajas y Desventajas del Concreto.

El concreto de cemento Portland es actualmente el material manufacturado más extensamente utilizado por el hombre, que de acuerdo con tendencias mundiales, su futuro tiende a ser más significativo e importante, porque para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería de construcción, ofrece propiedades adecuadas a bajo costo, combinada con el ahorro de energía y ventajas ecológicas. [Vitervo A, O'Reilly Díaz,2007].

Son muchas las razones por la que el concreto juega un papel tan protagónico en el desarrollo de la humanidad y motivo por el cual se le considere hoy como rey universal de los materiales de construcción, se debe a sus indiscutibles ventajas:

- Es el material de construcción más empleado en la construcción debido a que ofrece propiedades a bajo costo.
- Es un material que permite conseguir elementos estructurales de cualquier forma, debido al carácter plástico que posee en estado fresco.
- Posee una magnífica resistencia al agua sin un serio deterioro a diferencia de la madera y el acero.
- Posee elevada resistencia mecánica a la compresión y, aunque posea menor resistencia a la tracción, permite aumentarla embebiendo acero en su interior.
- Proporciona piezas de gran monolitismo, prescindiendo de juntas de uniones, que suelen ser zonas débiles.
- Está formado por materiales abundantes y baratos mismos que podemos encontrar en cualquier parte del globo terráqueo.

Pero no todo son ventajas en el concreto, pues a este material se le pueden poner serios inconvenientes:

- Es un material pesado con una relación peso/resistencia elevada.
- Presenta anisotropía (por ejemplo, en su resistencia mecánica).
- Es sensible a determinados agentes agresivos, tanto de tipo Físico como Químico.
- Es un material que ofrece baja resistencia a Flexión, es decir es un material muy frágil.
- Es sensible a cambios volumétricos por contracción debidos a acciones térmicas, hidráulicas o mecánicas, lo que pueden generar fisuramiento en el concreto.

Motivo por el cual es importante conocer o determinar mediante ensayos la durabilidad del concreto.

2.3 Durabilidad.

El ACI define la durabilidad del concreto de cemento Portland, como la habilidad para resistir la acción del intemperismo, el ataque químico, la abrasión, o cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras, que produzca deterioro del concreto.

La durabilidad de una estructura de concreto a menudo viene determinada por la velocidad a la que el concreto se descompone como resultado de una reacción química.

En todas estas reacciones, las sustancias agresivas (iones y moléculas) se trasladan de algún lugar, principalmente desde el ambiente, hasta encontrar la correspondiente sustancia reactiva en el concreto. No obstante, incluso si la sustancia agresiva ya está presente en el concreto, tal sustancia ha de ser transportada hasta donde se encuentra el producto reactivo para que puedan combinarse; es decir, si no hay transporte, no hay reacción [GEHO, 1993].

Por lo tanto la durabilidad no es un concepto absoluto que dependa solo del diseño de mezcla, sino que está en función del ambiente de exposición y las condiciones de trabajo a las cuales lo sometamos.

En la figura siguiente se observan valores estadísticos [J. Calavera, 1996] donde un 37% de las fallas en estructuras de concreto se producen por problemas de proyecto, es por ello que resulta fundamental conocer y comprender los mecanismos de deterioro más frecuentes en el concreto para establecer las especificaciones adecuadas para cada estructura en particular [E. Becker,2000].

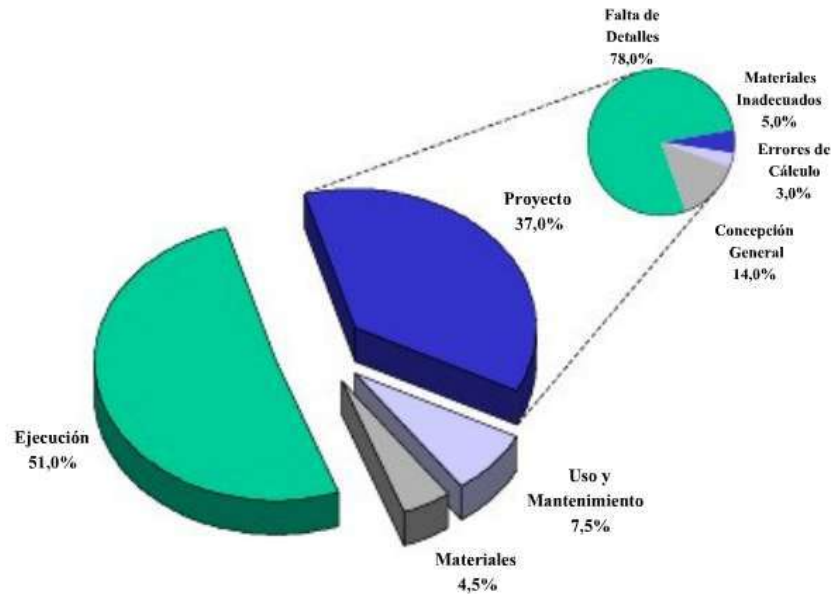


Figura4. Distribución de Fallas según la etapa del proceso constructivo por el cual se produjo.

Fuente: J. Calavera 1996. "Patología de Hormigón Armado y Pretensado", INTEMAC, Madrid España.

En este sentido, no existe un concreto “durable” por si mismo, ya que las características físicas, químicas y mecánicas que pudieran ser adecuadas para ciertas circunstancias no necesariamente lo habilitan para seguir siendo “durable” bajo condiciones diferentes.[ACI, “Durabilidad del Concreto”]

2.3.1 Factores que afectan la Durabilidad del Concreto.

Los factores que afectan la durabilidad del concreto, son aquellos que producen el deterioro del mismo.

Estos factores se clasifican en los siguientes grupos:

- 1) Fisuras, Grietas y otros defectos.
- 2) Ataque Físico.
- 3) Ambiente químicamente agresivo
- 4) Corrosión de metales en el concreto.
- 5) Reacciones químicas en los agregados.

1) Fisuras Grietas y otros defectos en el concreto fresco.

Entre los defectos más frecuentes se encuentran las fisuras por retracción plástica y de asentamiento plástico.

Las fisuras de Retracción plástica [E. Becker,2000] son cortas y poco profundas, y son debidas a la baja humedad, alta temperatura del aire y a la acción del viento.

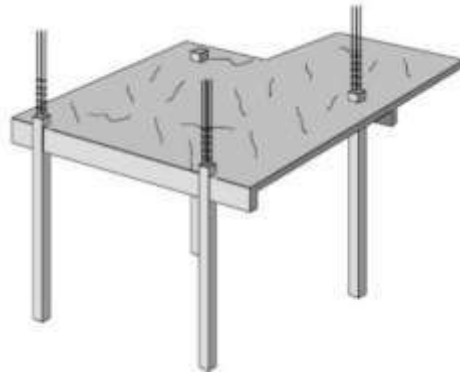


Figura 5. Fisuras de retracción plástica en losa de estructura.

Fuente: E. Becker, 2002, Seminario sobre Patologías Habituales en el Hormigón.

Es por ello indispensable contar con condiciones adecuadas de protección, ya que la superficie del concreto tiende a perder humedad por evaporación conforme la temperatura ambiente y del concreto aumenta y la humedad relativa disminuye; actualmente existen ábacos que permiten calcular la tasa de evaporación en el concreto; esta tasa suele variar entre 0.50 y 1.0 kg/m²/hr.

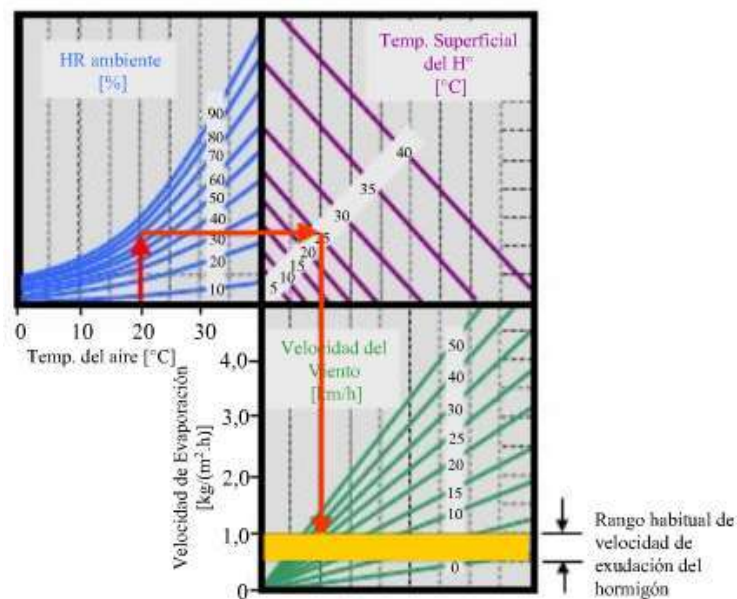


Figura 6. Abaco para la determinación de la tasa de evaporación superficial del concreto.

Fuente: ACI Committee 305, “Hot Weather Concreting” Manual of concrete Practice, part 2, American concrete institute.

El asentamiento Plástico se presenta por un exceso de exudación la que produce una reducción de volumen y fisuras en la estructura de concreto; estas fisuras afectan la durabilidad del concreto debido a que disminuyen la adherencia entre el

concreto-acero de refuerzo y un producen un espesor de recubrimiento inadecuado.

Otro defecto constructivo que afecta la durabilidad del concreto en pavimentos son el calentamiento y el bombeo de las losas.

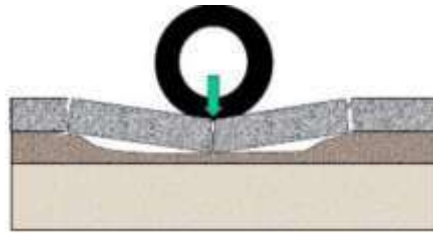


Figura 7. Falla en losas de pavimentos por el bombeo del material fino.

Fuente: E. Becker, 2002, Seminario sobre Patologías Habituales en el Hormigón.

2) Ataque Físico.

Es el conjunto de acciones del medio ambiente causantes del deterioro del concreto debidos por ejemplo a la acción del congelamiento y deshielo, al fuego, la abrasión y la erosión.

La acción de las bajas temperaturas cercanas a la de congelación del agua puede afectar la durabilidad del concreto tanto en estado fresco como endurecido.

Cuando el concreto se somete a estas temperaturas, el agua en el sufre una expansión debida a su congelamiento, generando vacíos y microfisuras que afectan la resistencia del concreto.

La siguiente figura muestra el efecto de la congelación sobre especímenes de mortero con relación $A/C=0.50$, sometidas a -5°C y a diferentes edades tempranas.

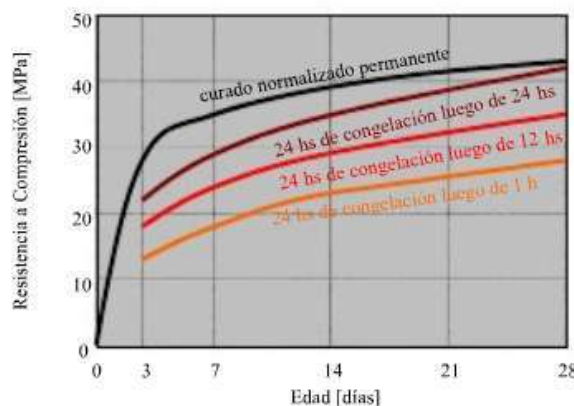


Figura 8. Efecto de la congelación en especímenes de mortero a diferentes edades.

Fuente: M. Klaric, 2001, “Fisuración y ataques físicos al hormigón, AATH- Durabilidad del Hormigón estructural.

La acción del congelamiento y deshielo a edades maduras afecta al concreto en su matriz cementicia ya que se generan tensiones y contracciones lo que provoca

fatiga del elemento después de varios ciclos o por fractura del agregado grueso, el riesgo de este deterioro aumenta cuanto mayor es el tamaño del agregado y con su contenido de humedad.

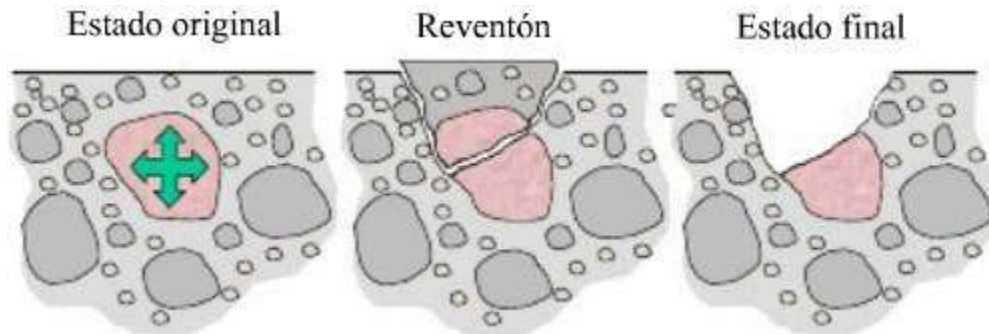


Figura.9 Degradación del concreto debido al congelamiento del agregado.

Fuente: E. Becker, 2002, Seminario sobre Patologías Habituales en el Hormigón.

En términos generales el fenómeno se caracteriza por provocar esfuerzos internos en el concreto que pueden provocar su fisuración reiterada y la consiguiente desintegración.



Figura 10. Estructura deteriorada por la Acción del congelamiento y deshielo.

Acciones que se pueden llevar a cabo para evitar el deterioro debido a congelamiento y deshielo son las siguientes:

- Adicionar un aditivo inclusor de Aire.
- Se debe curar como mínimo a 13°.
- El ACI recomienda relaciones A/C entre 0.45 y 0.50.

Acción de las altas temperaturas.

De acuerdo con J. Calavera 1996, los hormigones más densos, de menor relación agua-cemento y mayor resistencia, presentan menor durabilidad ante el ataque del fuego debido a la mayor dificultad para eliminar el agua interna evaporada.

También resulta habitual que el concreto sometido a altas temperaturas cambie de coloración en función de la temperatura adquirida y sufra un descascaramiento superficial provocado por el aumento de la presión de vapor generada por el desprendimiento de vapor hacia la atmosfera [M. Klaric, 2001].

Después de sufrir este ataque el concreto se vuelve poroso, con una elevada penetración de la carbonatación y de baja resistencia.

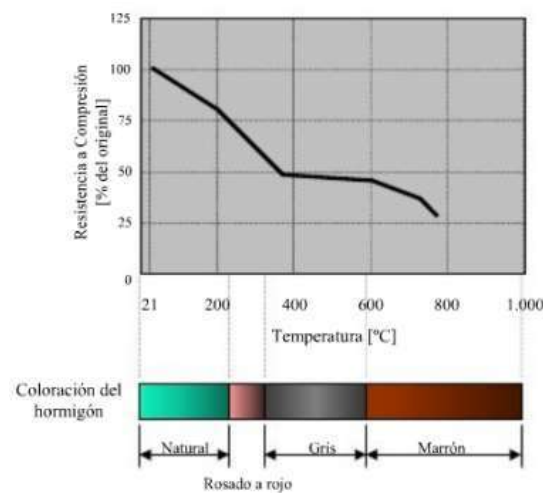


Figura 11. Efecto de la temperatura sobre la resistencia y coloración de concreto elaborados con agregados calizos.

Fuente: E. Becker, 2003, .Seminario sobre Durabilidad del Hormigón.

Resistencia a la Abrasión y Erosión.

Consiste desde el punto de vista estructural o mecánico en que tan resistente es la superficie expuesta al desgaste.

Se estima que la superficie debe tener una resistencia en compresión mínima de 280 kg/cm² para garantizar una durabilidad permanente.

La resistencia a la abrasión y erosión resulta fundamental para la durabilidad y funcionalidad de pisos, pavimentos y todas las estructuras sometidas a la fricción o al roce de las partículas solidas sobre la superficie del concreto, a este desgaste se le conoce como abrasión y se conoce como erosión al desgaste debido al transporte de un elemento en agua e incluye el efecto de cavitación, abrasión y acción química.

Algunos trabajos muestran que se puede mejorar la resistencia a la abrasión mediante la utilización de polímeros o un curado casi perfecto, en pisos se puede mejorar con el uso de endurecedores de superficie.

En la siguiente figura se observa la relación entre la resistencia a compresión del concreto respecto de su resistencia al desgaste, solo que es variable debido a los agregados que se utilicen.

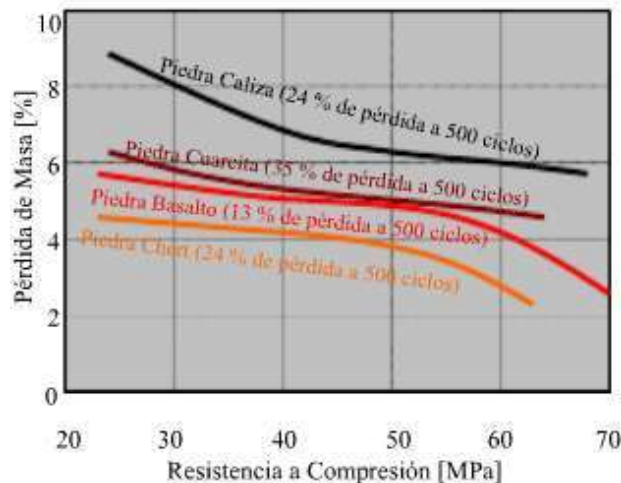


Figura 12. Influencia de la resistencia del concreto, y del tipo de agregado en la resistencia a la abrasión.

Fuente: T Liu, 1994. Abrasion Resistance, ASTM STP 169C, American Society for testing and materials.

3) Ambiente Químicamente Agresivo.

Existen agentes que incrementan la posibilidad de deterioro como son: las temperaturas elevadas, mucha absorción y permeabilidad, el curado deficiente y los ciclos de humedecimiento y secado.

Los compuestos que producen la mayoría de casos de ataque químico al concreto están constituidos por cloruros y sulfatos.

Cloruros. Se hallan en el ambiente, en las zonas cercanas al mar, en el agua marina, y en ciertos suelos y aguas contaminadas de manera natural o artificial.

Sulfatos. Se encuentran usualmente en el suelo en contacto con el concreto, consisten en Sulfatos de Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio.

Tabla 1. Efecto de las sustancias químicas en el concreto.

VELOCIDAD DE ATAQUE A TEMPERATURA AMBIENTE	ÁCIDOS INORGÁNICOS	ÁCIDOS ORGÁNICOS	SOLUCIONES ALCALINAS	SOLUCIONES SALINAS
Rápida	Clorhídrico Fluorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Láctico	—	Cloruro de aluminio
Moderada	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de Sodio >20%	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de magnesio Sulfato de calcio
Lenta	Carbónico	—	Hidróxido de Sodio 10% a 20% Hipoclorito de sodio	Cloruro de amonio Cloruro de magnesio Cloruro de sodio
Insignificante	—	Oxálico Tartárico	Hidróxido de Sodio <10% Hidróxido de amonio	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de zinc Cromato de Sodio

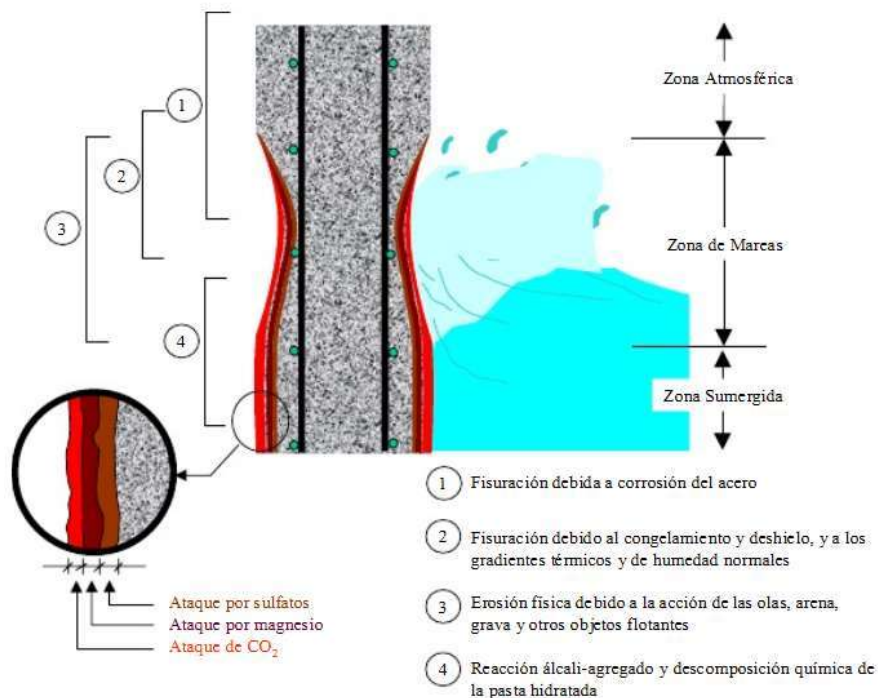


Figura 13. Esquema del ataque típico del agua de mar sobre un pilar sumergido.

Fuente: E. F. Irassar, 2001, “Ataque Químico al hormigón”. AATH-Durabilidad del Hormigón Estructural

Una forma de evitar el avance del ataque químico por cloruros es mediante La Extracción Electroquímica de Cloruros (EEC) que es una técnica utilizada para la eliminación de los iones cloruro. Los Cl⁻ contribuyen a acelerar el proceso de corrosión en las estructuras de Concreto Armado (ECA). La EEC ha demostrado ser eficiente para extraer una gran cantidad de cloruros contenidos en el concreto; sin embargo la eficiencia del método depende de varios factores como son: relación agua / cemento, densidad de corriente aplicada, tiempo de la EEC, etc. [Rodríguez Reyna S.L., Miranda Vidales J.M., et al, 2008].

4) Corrosión de metales en el concreto.

El concreto por ser un material con alcalinidad muy elevada y alta resistividad eléctrica, es ideal para proteger al acero de refuerzo; solo que si se produce el proceso electroquímico de la corrosión se generan compuestos de óxidos de hierro.

Una forma de mitigar el avance de la corrosión de metales en el concreto es mediante la realcalinización electroquímica (REA) es un método utilizado para detener la corrosión de concreto reforzado carbonatado. Resultados experimentales muestran que la conductividad de los electrolitos tiene influencia en las mediciones de los parámetros electroquímicos en el sistema acero-concreto. La repasivación del acero de refuerzo con moderada corrosión ($0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ - $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) no puede ser alcanzada aún con periodos largos de aplicación de la técnica. En relación con el pH alrededor del acero, se alcanza un valor promedio de 12.5, y en la superficie de los especímenes de 11, esto indica condiciones favorables para que el fenómeno de la corrosión no se incremente. También se observa que en especímenes fabricados con cemento puzolánico y realcalinizados con electrolito de Na_2CO_3 , la velocidad de depolarización es mayor y los valores del potencial de corrosión tienden a ser menos negativos. [F. González, G. Fajardo, G. Arliguie, et al, 2008].

5) Reacciones químicas en los Agregados.

Estudios realizados en los EE. UU., Europa y Japón han demostrado que el biodeterioro del concreto en sistemas de alcantarillado es un problema grave ya que las bacterias que producen ácido sulfúrico a partir de azufre reducido pueden disminuir el PH del Concreto de 9 a 2; por lo que se genera una acidificación del concreto; los productos típicos encontrados en el concreto son el yeso y la etringita los cuales se asocian al deterioro del concreto. [Le Borgne, Velásquez-Mejía, et al 2008].

Las reacciones químicas que se presentan en estos agregados están constituidos por la llamada reacción Sílice-Álcalis y la reacción Carbonatos-Álcalis.

Reacción sílice-álcalis.

Se produce con algunos agregados del tipo ópalo, calcedonia, ciertas formas de cuarzo, andesita, dacita que reaccionan con los hidratos de calcio del cemento ocasionando compuestos expansivos.

La reacción propicia el desarrollo de un gel expansivo en la interfase agregado-pasta, que rompe la estructura interna del concreto provocando fisuración y desintegración.

Reacción carbonatos-álcalis.

Se produce en algunas piedras calcáreas dolomíticas con un mecanismo aún no perfectamente definido pero que aparentemente difiere del anterior pues no se produce ataque a la sílice siendo el patrón de fisuración similar.

Mediante el análisis petrográfico y rayos X es posible establecer en cierto modo el riesgo de reactividad. [ACI, “Durabilidad del Concreto”].

Las siguientes tablas nos muestran algunos de las Rocas y los minerales potencialmente reactivos frente a los álcalis del cemento.

Tabla 2. Rocas con Minerales Constituyentes Potencialmente reactivos frente a los Álcalis del Cemento.

<i>Tipo de roca (tipos de roca similares o asociadas)</i>	Definición	Constituyentes minerales potencialmente reactivos frente a los álcalis
<i>Andresita</i>	Roca volcánica de grano fino y de composición intermedia	Vidrio, o vidrio desvitrificado. Venación opalina o calcedónica, o “vugh-fillings”
<i>Argilina (pizarra / arcillita, flita)</i>	Roca sedimentaria diagenética, o roca argilácea débilmente metamorfoseada, con o sin clivaje	Cuarzo microcristalino o criptocristalino
<i>Basalta (dolerita)</i>	Roca volcánica básica, de grano fino	Vidrio, o vidrio desvitrificado. Venación opalina o calcedónica, o “vugh-fillings”
<i>Ftanita (pedernal)</i>	Roca sedimentaria que aparece en –o deriva de– la creta. El pedernal es la creta del cretáceo	Sílice calcedónica y cuarzo micro o criptocristalino. Algunas variedades pueden contener sílice opalina
<i>Dolomía</i>	Roca sedimentaria de carbonato, que contiene más dolomita mineral de calcio	Cuarzo finamente diseminado, ópalo o calcedonia. Cristales finos de dolomita (pueden causar RAC)
<i>Gneiss (granulita, esquisto)</i>	Roca metamórfica de alto grado, que exhibe bandeado	Cuarzo altamente tensionado y/o límites escasamente cristalinos entre los granos de cuarzo. Cuarzo micro o criptocristalino. Venas opalinas o calcedónicas
<i>Granito (grano-diorita)</i>	Roca ígnea ácida, de grano grueso o mediano	Cuarzo altamente tensionado, o cuarzo microcristalino. Venación opalina o calcedónica, o “vugh-fillings”
<i>Grauvaca (“gritstone”, posible sub-wacke cuarzosa)</i>	Roca sedimentaria detrítica, no calcárea, que contiene característicamente fragmentos de roca y granos minerales en una matriz de grano muy fino	Cuarzo micro o criptocristalino. No todas las grauvacas son álcálicamente reactivas
<i>Hornfels</i>	Roca térmicamente metamorfoseada, de grano fino	Cuarzo micro o criptocristalino. Vidrio, o vidrio desvitrificado
<i>Piedra caliza (marga, creta)</i>	Roca sedimentaria de carbonato, que contiene calcita como mineral predominante. La marga tiene un alto contenido de arcilla	Cuarzo finamente diseminado, ópalo, o calcedonia. “Ftanita” o “pedernal” asociados
<i>Milonita (cataclasita, brecha)</i>	Roca con metamorfismo dinámico, con tamaños de grano de cuarzo fracturados y reducidos (debido a la cataclasis). La milonita tiene textura foliada. La cataclasita y la brecha tienen texturas macizas	Cuarzo tensionado, recristalizado, cuarzo criptocristalino y microcristalino, material vítreo

Tabla 3. Minerales Componentes Potencialmente reactivos frente a los Álcalis del Cemento.

<i>Tipo de mineral</i>	Definición	Componentes reactivos frente a los álcalis
<i>Calcedonia, Sílice calcedónica</i>	Cuarzo de grano muy fino, con una microestructura fibrosa distintiva	La calcedonia es reactiva
Cristobalita	Forma de sílice (no cuarzo) de muy alta temperatura, que aparece como constituyente metaestable en algunas rocas volcánicas ácidas, y como forma de baja temperatura en algunas piedras areniscas que contienen fósiles silíceos, y en algunos pedernales con densidad menor que la del cuarzo	La cristobalita es altamente reactiva
Feldespatos	Un grupo común de minerales de silicato	No reactivos
Ópalo o sílice opalina	Sílice amorfa esencialmente hidratada, y formas desordenadas de la cristobalita	La sílice opalina es altamente reactiva
<i>Cuarzo</i>	La forma cristalina más común de la sílice	El cuarzo altamente tensionado es, posiblemente, reactivo. Algunas formas micro o criptocristalinas son reactivas
<i>Vidrio volcánico</i>	Fase no cristalina dentro de algunas rocas volcánicas, puede ser “desvitrificado” para dar cristales muy finos o incipientes	Algunos vidrios volcánicos desvitrificados son reactivos. La tridimita o la cristobalita podrán estar presentes cuando se desvitrifica
<i>Tridimita</i>	Forma de sílice de alta temperatura, que aparece como constituyente metaestable en algunas rocas ácidas, y como forma de baja temperatura en algunas piedras areniscas que contienen fósiles silíceos, y en algunos pedernales con densidad menor que la del cuarzo	La tridimita es altamente reactiva

2.3.2 Conceptos Básicos de Durabilidad.

A. Funcionalidad y Durabilidad.

La funcionalidad es una cantidad cuantificable que está en la función de la capacidad de carga de la estructura.

B. Degradación.

El concepto de degradación es, por definición el decremento gradual de la funcionalidad de la estructura con el tiempo, y se puede cuantificar como el inverso de la funcionalidad.

C. Vida Útil.

Es el periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad, y estética, sin costos inesperados de mantenimiento.

La vida de servicio en estructuras de concreto ha sido clasificada en 2 etapas: la de iniciación y la de propagación. A pesar de la utilidad del modelo de Tuutti [K. Tuutti, 1982]; la predicción del rendimiento de las estructuras es compleja debido a la influencia de diferentes factores etapas y los nuevos materiales[P. Castro-Borges, P. Helene, 2007].

D. Vida Residual.

Es el tiempo a partir del momento que la estructura alcanza al anterior limite aceptable (fin de la vida útil).

Es decir es el tiempo que se tiene para reparar o rehabilitar la estructura antes que la degradación avance al límite de posible colapso.

E. Estado Límite de Servicio y Estado de Limite Último.

El primero ELS, correspondería al tiempo en el cual la estructura ha llegado a su vida útil.

El segundo ELU, es el tiempo en el cual la estructura llega a un estado de degradación inaceptable antes de que sufra un colapso inminente.

F. Probabilidad de Falla.

Es la probabilidad de exceder cierto estado límite ELS o ELU. Esta se da cuando existe una falla por degradación del material en una estructura o elemento estructural, en comparación con la falla mecánica la cual es causada por cargas mecánicas externas; cabe mencionar que la falla por durabilidad podría ocasionar una falla mecánica.[1]

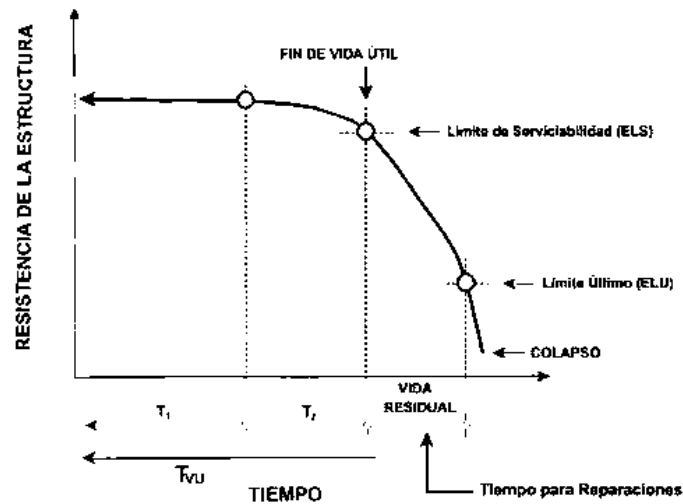


Figura 14. Modelo de Durabilidad.

Fuente: Andrés A. Torres Acosta, Miguel Martínez Madrid. 2001, "Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad"

2.3.3 Modelo de Durabilidad de Tuutti.

Se entiende vida útil, al período en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad, y estética, sin costos inesperados de mantenimiento.

Estos conceptos básicos se han extendido, también, a la consideración de la durabilidad, de tal forma que se incluyen las acciones del medio ambiente entre las posibles solicitaciones a las que estará sometida la estructura.

Así, Tuutti (Tuutti, K, 1982), estableció su modelo (figura) que está desarrollado específicamente para el caso de la corrosión en armaduras pasivas. En el modelo se distinguen dos períodos:

- a) Período de iniciación de la corrosión (t_i): tiempo que tardan los cloruros o la carbonatación en llegar a la armadura y despasivarla.
- b) Período de propagación (t_p): tiempo en que la armadura se corroe libremente, hasta que llega a un grado de deterioro inaceptable desde el punto de vista de la seguridad y funcionalidad o estética.

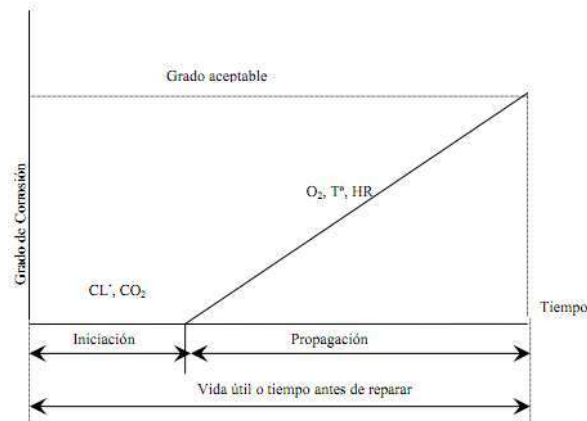


Figura 15. Modelo de Vida Útil de Tuutti.

Fuente: Andrés A. Torres Acosta, Miguel Martínez Madrid. 2001, “Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad”

Se considera, pues, que la estructura mantiene las características definidas en el proyecto mientras el deterioro no alcance un cierto valor límite, que dependerá de muchos factores: tipo de elemento estructural (viga, pilar, etc.), consideraciones estéticas, riesgo de desprendimiento de trozos de concreto que puedan dañar a las personas, etc. Este valor límite puede ser diferente para cada elemento estructural.

Se entiende por vida residual el tiempo a partir del momento que la estructura alcanza el anterior límite inaceptable. Durante este período residual se suele acometer la reparación de la estructura o se interviene en ella para restituir unas condiciones de seguridad, funcionalidad o estética lo más similares, incluso superiores al proyecto. Así pues, la aceptación de “residual” se aplica mientras la estructura no sea intervenida, e implica por tanto la idea de que la estructura se degrada progresivamente a una determinada velocidad.

Dependiendo de las condiciones de exposición del concreto y su contenido de humedad, prevalecerá un mecanismo u otro, cambiando la velocidad de ingreso del fluido en el material y alterando la duración del período de “incubación” del deterioro (Fernández Luco, 2000).

2.4 Estadísticas del Concreto y Cemento en México y el Mundo.

En este apartado hablaremos de las estadísticas en el consumo del cemento a nivel nacional e internacional así como los principales productores del mismo, apoyándonos mediante tablas, gráficas y mapas.

Se analizará también el comportamiento del consumo de Concreto en el país y el mundo.

La producción mundial de cemento Portland que en el año de 1920 fue de 32,300,000 TM para un consumo per cápita de 19 Kg; en el año 2002 a 1,750,000,000 TM para un consumo per cápita de 289 Kg, pronosticándose un crecimiento vertiginoso de su producción y empleo en los próximos años.

Ahora bien de acuerdo con Kumar Metha, 2002, se tiene que después del año 2050 el consumo de concreto disminuirá de manera considerable, respecto del crecimiento de la población a nivel mundial la cual teniendo en cuenta la gráfica siguiente en 100 años a partir del año 2000 se duplicará.

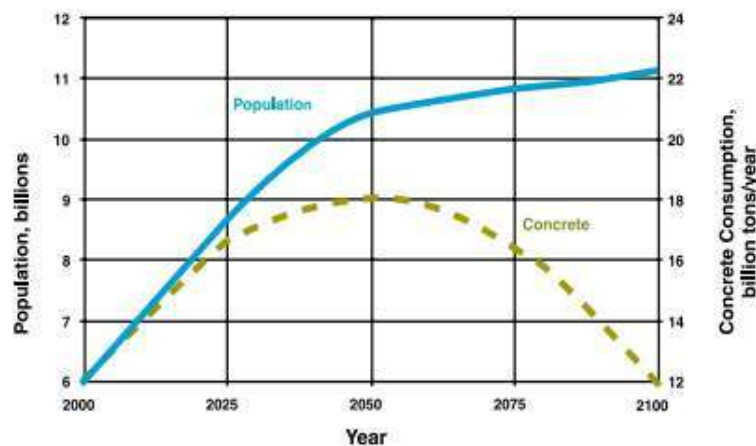


Figura 5 .Pronostico a futuro sobre el consumo de concreto y el crecimiento de la población.

Fuente: Kumar Metha, 2002, Greening of the Concrete Industry for sustainable development.

Mientras que el departamento de Estudios en Geología de los Estados Unidos USGS por sus siglas en ingles en su libro anual sobre minerales constitutivos del cemento, nos explica mediante la siguiente figura que las estadísticas mundiales de la producción de concreto aumentaron 10 veces en el 2008 respecto de la producción mundial del año 1946, y en la cual se asume que el concreto requirió un 12% de cemento en promedio para su producción; se observa también un aumento en la producción de cemento solo que con un crecimiento menor en esos años.

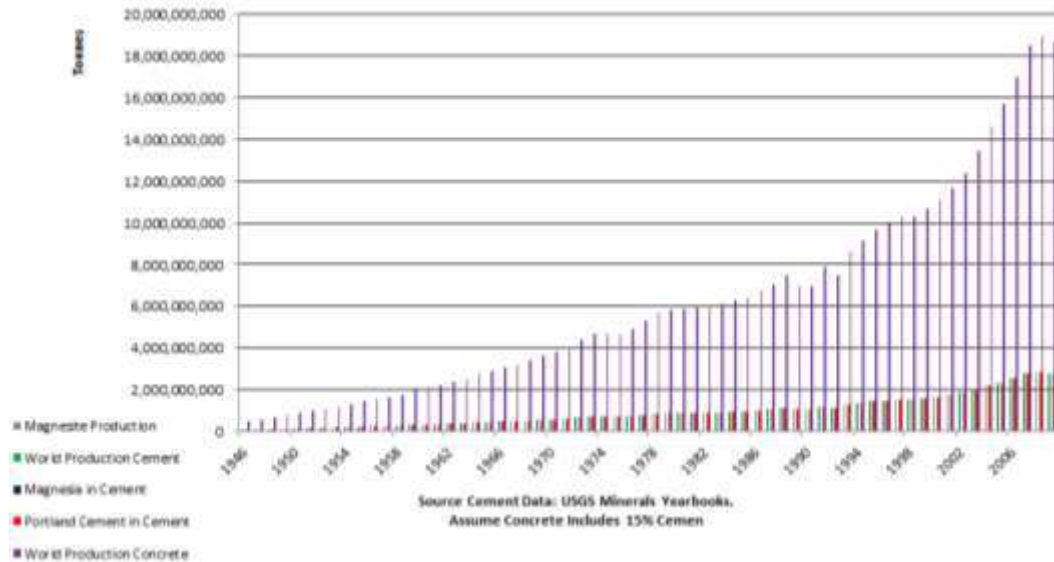


Figura 6 .Producción de cemento y concreto mundial de los años 1946 al año 2008.

Fuente: United States Geological Survey (USGS), Minerals Information, Minerals Yearbooks and Mineral Commodity Summaries for cement at <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>

La siguiente figura nos muestra el desarrollo de la producción del cemento a nivel mundial regionalizado en 8 grupos entre 1930 a 2004 donde se observa claramente que desde el año 1985 al 2004 la región Asia -pacífico es la que tuvo un desarrollo muy interesante respecto de las otras regiones y nos establece también que en los años 2002 al 2004 China dominó la industria de producción de cemento en esa región, mientras que nuestro continente tuvo un desarrollo muy estable durante esos años.

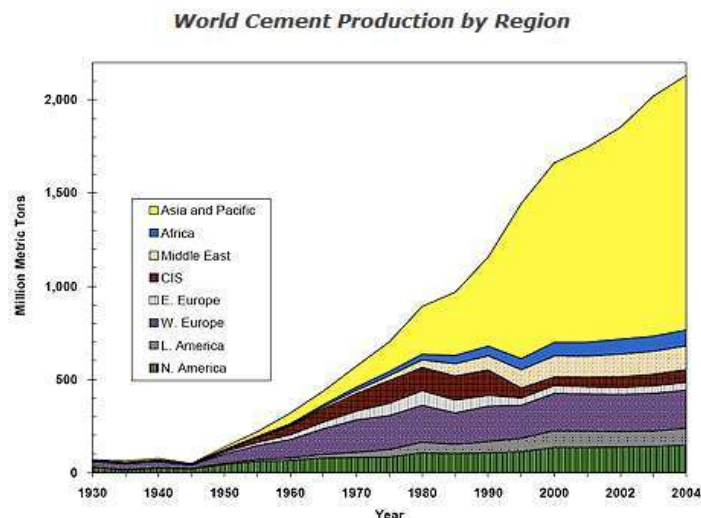


Figura 7 .Producción mundial de cemento por Regiones desde el año 1930 al año 2004.

Fuente: United States Geological Survey (USGS), Minerals Information, Minerals Yearbooks and Mineral Commodity Summaries for cement at <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>

Durante los años 2006 y 2007, México se encontró dentro de los 10 países más importantes en la producción de cemento, recalcando que los Estados Unidos fue el país del continente americano que obtuvo el mayor crecimiento en su producción partiendo de que en el año 1900 este país producía 1.96 millones de toneladas métricas de cemento promedio por año, respecto de las más de 95 millones de toneladas métricas producidas en el año 2007.

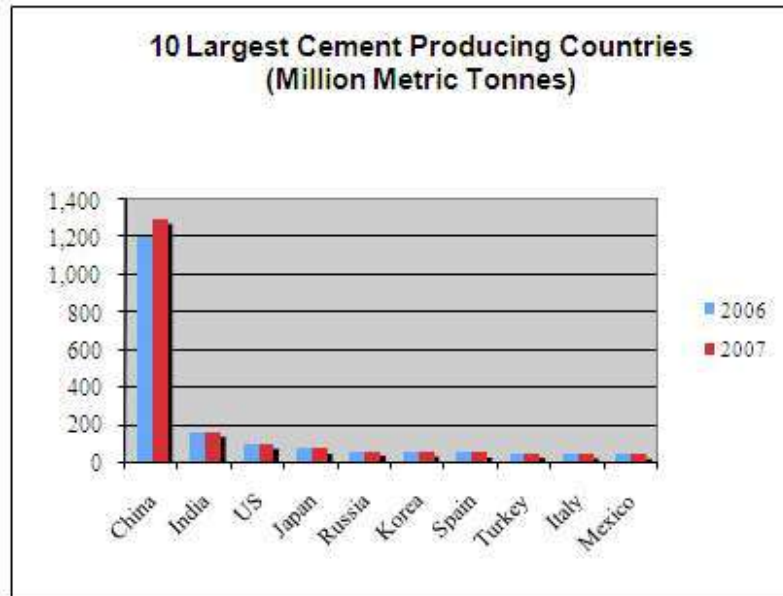


Figura 8 Principales países productores de Cemento a nivel mundial en años 2006-2007.

Fuente: United States Geological Survey (USGS), Minerals Information, Minerals Yearbooks and Mineral Commodity Summaries for cement at <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>

De acuerdo con el compendio estadístico del cemento tenemos la siguiente gráfica que nos muestra el desarrollo en producción de cemento y clinker, respecto del consumo de cemento en los Estados Unidos la cual nos indica de manera muy clara el déficit de cemento que empezó a tener ese país en el año 2000; es decir que consumía más cemento del que podía producir.

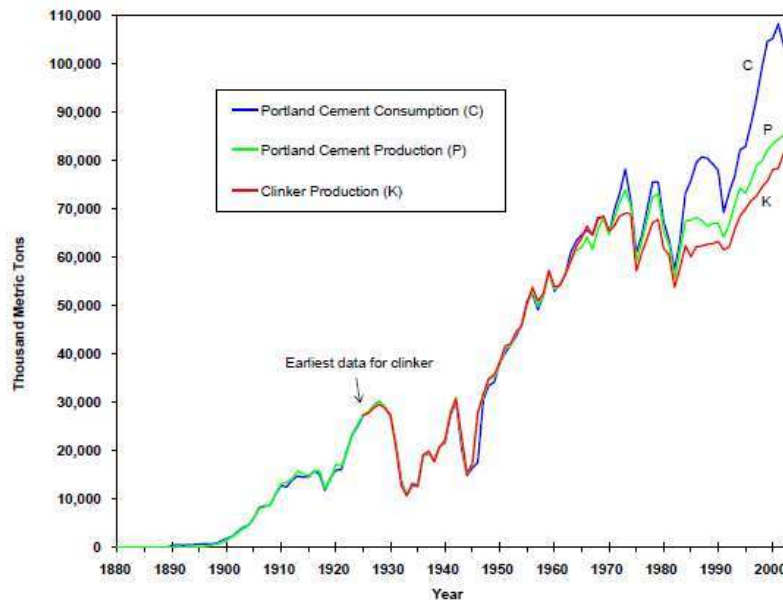


Figura 9 Tendencia de producción de Cemento respecto de su Consumo en los E.U.

Fuente: Cheryl M. Solomon, Cement Statistical Compendium.

La Asociación del Cemento Portland mostró que el Mercado del cemento Portland en los Estados Unidos fue principalmente para la construcción de edificios residenciales y para la construcción de calles y avenidas, seguido de la construcción de edificios comerciales.

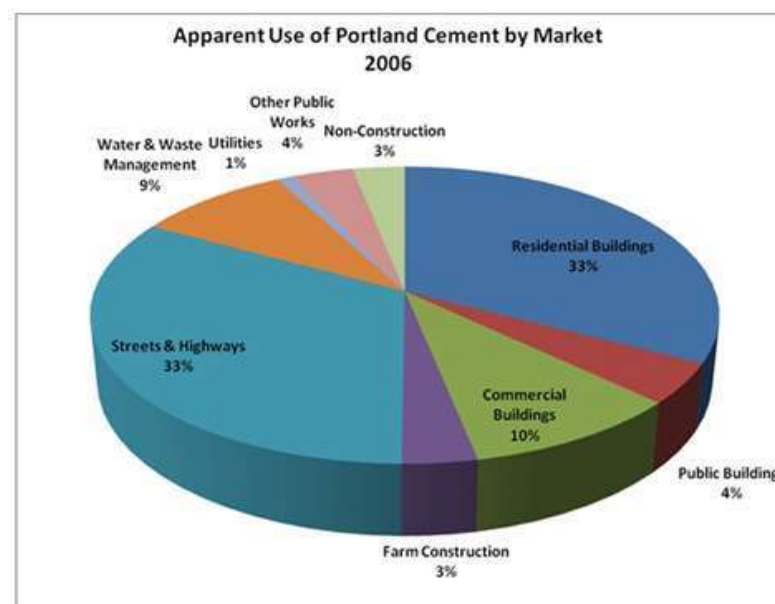


Figura10 Consumo aparente de Cemento de acuerdo a su mercado de compra en los E.U.

Fuente: Cheryl M. Solomon, Cement Statistical Compendium.

En México la Cámara Nacional del Cemento nos muestra cifras relevantes de la industria en el año 2008. En la que nos dice que la inversión hacia esta industria es variable ya que depende de los programas de infraestructura y vivienda. Teniéndose un consumo anual de 35.1 millones de toneladas, así como un consumo anual per cápita de 329kgs.

Nuestro país en 2008 produjo 37.1 millones de toneladas, cuenta con una capacidad instalada de 51 millones de toneladas en sus 32 plantas distribuidas en el país, esta industria genera más de 20 mil empleos directos y 110 mil empleos indirectos, aportando cerca del uno por ciento del producto interno bruto del país, teniendo un valor de reposición de alrededor de 13 mil millones de dólares anuales.[Cámara Nacional del Cemento (CANACEM) “Cifras Relevantes de la Industria del Cemento en México].

En la siguiente imagen la CANACEM nos reporta la distribución del consumo de cemento en México en el año 2008, de la cual el Mercado de la auto construcción es el que más consume cemento.

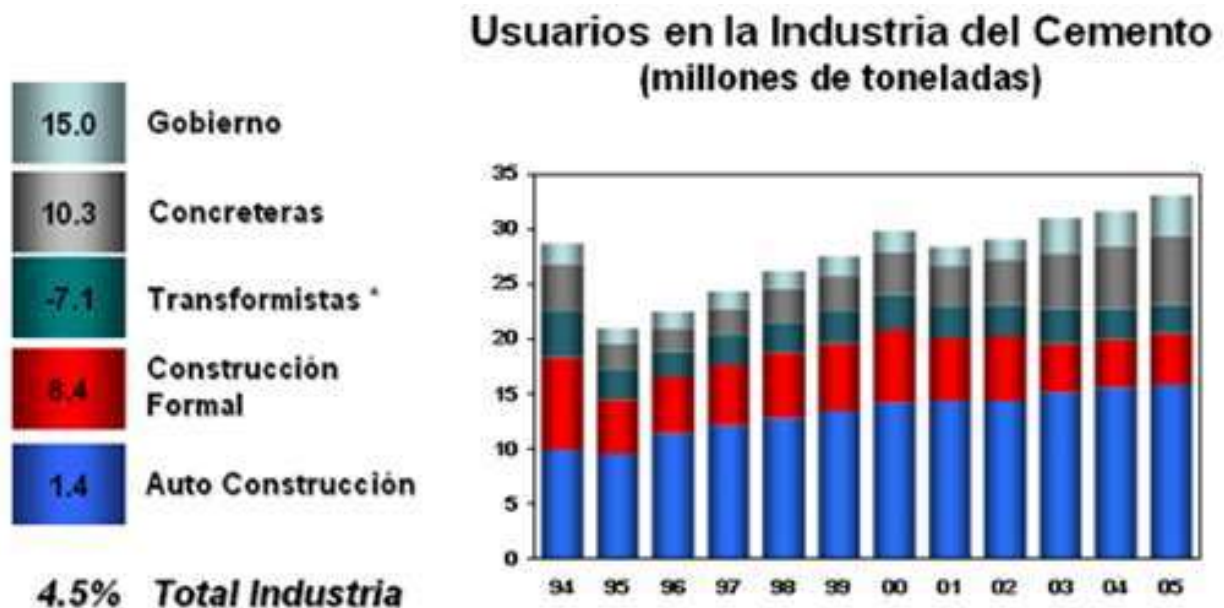


Figura 11 Gráfica de usuarios en la industria del cemento en México.

Fuente: Cámara Nacional del Cemento (CANACEM) “Cifras Relevantes de la Industria del Cemento en México.

2.5 Concreto y sus Componentes.

Según diversas fuentes, el concreto se puede definir de la forma siguiente:

El concreto puede ser definido como la mezcla de un material aglutinante (normalmente cemento Portland Hidráulico), un material de relleno (agregados), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un sólido compacto y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión [Instituto del Concreto, 1997].

El concreto es una roca artificial hecha por el hombre. Está elaborado con cemento, agregados pétreos grueso y fino, agua y en ocasiones aditivos [Martínez, 2007].

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento Portland y agua, une a los agregados (arena y grava o piedra triturada) para formar una masa semejante a una roca pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua [Kosmatha y Panarese, 1992].

2.5.1 Cemento

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, formando un todo compacto. En la construcción se ha generalizado la utilización de la palabra cemento para designar un tipo de aglutinante específico que se denomina Cemento Portland, debido a que es el más común. El cemento Portland es la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia del agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación [Instituto del Concreto, 1997].

2.5.1.1 Propiedades Físicas y Mecánicas del Cemento.

Las propiedades físicas más importantes del cemento son: densidad, finura, consistencia normal, tiempos de fraguado y expansión; mientras que las mecánicas son: resistencia a la compresión, tensión y flexión.

Densidad.

Es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco, y en un cemento Portland normal, suele estar muy cercano a 3.15 g/cm^3 . En el caso de cementos adicionados, es menor porque el contenido de clínker por tonelada de cemento es inferior dando valores del orden de 2.9 g/cm^3 , dependiendo del porcentaje de adiciones. La densidad no indica directamente la calidad del cemento pero analizándola en conjunto con otras propiedades, puede determinar si el cemento tiene adiciones.

Finura.

Es el proceso de molienda de clínker y yeso el que determina la finura del cemento, que es el tamaño de las partículas de cemento. Está íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia. Un cemento de alta finura, endurece con mayor velocidad (mayor rapidez de hidratación) y tiene un desarrollo rápido de resistencia.

Consistencia normal.

Es la propiedad que indica el grado de fluidez o dificultad con que la pasta puede ser manejada. Cuando los cementos tienen adiciones, los requerimientos de agua son mayores que en los cementos normales. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 23 y 33% [Instituto del Concreto, 1997].

Tiempos de fraguado.

- **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que la pasta plástica que se forma cuando el cemento se mezcla con agua va perdiendo su fluidez, hasta llegar a un momento en que ya no tiene toda su viscosidad y se eleva su temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra parcialmente hidratado.
- **Fraguado final:** tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta ya esta dura.
- **Fraguado rápido o relámpago:** es una reacción violenta que lleva a un inmediato endurecimiento de la pasta, se caracteriza por su velocidad de desarrollo de calor.
- **Fraguado falso:** fenómeno que ocurre cuando la pasta de cemento adquiere una rigidez prematura y anormal, dentro de los primeros minutos después de mezclar el cemento y el agua. No despiden calor en forma apreciable y si la pasta se remezcla sin adicionar agua, se restablece su plasticidad sin afectar el fraguado y la resistencia.

Tabla . Normativas Mexicanas y Estadounidenses para realizar pruebas al cemento.

PRUEBA	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico.	NMX-C-057-1997-ONNCCE	ASTM-C-187-98
Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico por la aguja de Vicat.	NMX-C-059-ONNCCE-2006	ASTM-C-191-01a
Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico.	NMX-C-152-1997-ONNCCE	ASTM-C-188-95

Expansión en autoclave.

Para que un cemento sea estable es necesario que ninguno de sus componentes, una vez hidratados, sufra expansión perjudicial o destructiva. Las normas NMX-C-062 y ASTM-C-151, limitan la expansión potencial de un cemento por medio del ensayo de autoclave. Este consiste en medir el cambio de longitud de barras de 2.5cm x 2.5cm x 25.4cm hechas de pasta de cemento

y sometidas durante tres horas a alta temperatura y presión. El cambio de longitud en porcentaje es la expansión.

Resistencia a la compresión.

Este ensayo se realiza de acuerdo a las normas NMX-C-061 y ASTM-C-109 sobre cubos de mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada) de 5.08 cm de arista.

Resistencia a la flexión.

Con este ensayo se realiza de acuerdo a la norma ASTM-C-348 en la que se pretende conocer el comportamiento del mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada) cuando es sometido a esfuerzos de flexión en prismas de 40x40x160 mm [Instituto del Concreto, 1997].

Las especificaciones físicas de la resistencia mecánica a la compresión a los 28 días, resistencia mecánica a la compresión a los 3 días para los cementos 30 R y 40 R, tiempo de fraguado y expansión/contracción del cemento, están indicadas en la siguiente tabla.

Tabla . Especificaciones físicas [NMX-C-414-ONNCCE-2004].

Clase Resistente	Resistencia a compresión (N/mm ²)			Tiempo de fraguado (min)		Estabilidad de volumen en autoclave (%)	
	3 días Mínimo	28 días Mínimo	Máximo	Inicial Mínimo	Final Máximo	Expansión Máximo	Contracción Máximo
20	-	20	40	45	600	0.80	0.20
30	-	30	50	45	600	0.80	0.20
30 R	20	30	50	45	600	0.80	0.20
40	-	40	-	45	600	0.80	0.20
40 R	30	40	-	45	600	0.80	0.20

2.5.2 Agua

El agua es un ingrediente fundamental en la elaboración de concreto y mortero debido a que desempeña una función importante en estado fresco y endurecido. Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto la cantidad para proveer

una relación agua/cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero es evidente, que para usarla en el lavado de agregados, en la preparación de la mezcla o durante el curado del concreto, no solamente su cantidad es importante, sino también su calidad química y física.

2.5.2.1 Empleo del Agua para la Fabricación del Concreto.

- **Agua para lavado de Agregados.**

Es la utilizada durante el proceso de trituración, para retirar impurezas y exceso de finos presentes en los conglomerados de los que provienen, así como las partículas muy finas formadas durante la trituración. Debe ser lo suficientemente limpia como para no introducir contaminación a los materiales procesados, como puede ser exceso de partículas en suspensión, especialmente materia orgánica o sales, que posteriormente afectan la calidad del concreto producido con éstos.

- **Agua de 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. Si la medida de agua de mezclado aumenta, la parte fija es la misma y por consiguiente el agua libre aumenta, con lo cual se aumenta la porosidad, debido a que con el tiempo, esta agua libre se evapora dejando unos conductos dentro del concreto endurecido.

- **Agua de Curado.**

Una vez que el concreto ha fraguado, es necesario el suministro de agua para garantizar la completa hidratación del grano de cemento. El objeto del curado es mantener el concreto saturado, a lo más próximo posible a la saturación, hasta que los espacios que inicialmente estaban saturados de agua se llenen hasta un nivel deseado con los productos de la hidratación del cemento [Instituto del Concreto, 1997].

2.5.2.2 Especificaciones.

La norma NMX-C-122-ONNCCE-2004, es la normativa vigente para determinar la calidad del agua que se pretenda usar para la elaboración y curado del concreto hidráulico, excluyendo el agua de mar, deben cumplir los requisitos que aparecen en la siguiente tabla.

El agua de mar cuando sea imprescindible su empleo, se debe usar únicamente para la fabricación y curado de concretos sin acero de refuerzo. El agua cuyo análisis muestre que excede alguno o algunos de los límites descritos en la tabla, se puede utilizar si se demuestra que en concretos de características semejantes elaborados con esta agua han acusado un comportamiento satisfactorio a través del tiempo en condiciones similares de exposición.

Tabla . Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas [NMX-C-122-ONNCCE-2004]

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m.	Cementos sulfatesistentes Límites en p.p.m.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2 000	2 000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50 000	35 000
Cloruros como CL (a)		
Para concreto con acero de pre esfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1 000 (c)
Sulfato como $SO_4=$ (a)	3 000	3 500
Magnesio como Mg^{++} (a)	100	150
Carbonatos como CO_3	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO_2	5	3
Álcalis totales como Na^+	300	450
Total de impurezas en solución	3 500	4 000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 6.5

(a) Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.

(b) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX -C-088.

(c) Cuando se use cloruro de calcio ($CaCl_2$) como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.

2.5.3 Agregados

Los agregados son los componentes importantes en el concreto. Ellos dan cuerpo al concreto, reducen pérdidas y afectan la economía. Anteriormente, los agregados fueron considerados como materiales químicamente inertes, pero ahora se ha reconocido que algunos de los agregados son químicamente activos y ciertos agregados muestran enlaces químicos agregados en la interfaz del agregado y la pasta de cemento.

El sólo hecho de que los agregados ocupan del 70 al 80% del volumen del concreto, su impacto en diversas características y propiedades del concreto es, sin duda, considerable. Para saber más sobre el concreto es muy importante que uno aprenda más acerca de los agregados que constituyen el mayor volumen del concreto. La profundidad y el alcance de los estudios que se requieren para entender sus efectos variables y su influencia en las propiedades del concreto no pueden ser subestimados [Shetty, 2005].

La fuente de materiales debe ser localizada a una distancia razonable del sitio de trabajo y para su selección hay que tener presente que sus propiedades difieren considerablemente de una a otra. Cada una puede variar en la mineralogía de sus componentes o de las condiciones físicas de sus partículas, tales como, la distribución de tamaños, la forma y la textura [Instituto del Concreto, 1997].

2.5.3.1 *Propiedades de los Agregados*

Químicas.

Las exigencias químicas que se deben solicitar a los agregados para evitar su reacción en la masa del concreto, son las de evitar sustancias presentes agresivas y componentes geológicos o mineralógicos agresivos, entre los cuales el más frecuente parece ser la sílice activa.

- **Epitaxia:** esta es la única reacción química favorable de los agregados conocidos hasta el momento. Da mejor adherencia entre ciertos agregados calizos y la pasta de cemento, a medida que transcurre el tiempo.
- **Reacción álcali-agregado:** la sílice activa, presente en algunos agregados, reacciona con los álcalis del cemento produciendo expansiones, destrucción de la masa y pérdida de características resistentes [Instituto del Concreto, 1997].

Físicas.

Las propiedades físicas que tienen mayor importancia en el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto son: granulometría, porosidad, masa unitaria, forma y textura de las partículas.

- **Granulometría.** Es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregados en una muestra. Esta proporción se suele indicar, de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en masa, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición.
- **Porosidad y absorción.** Cuanto más poroso es, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad.
- **Masa unitaria.** La relación entre la masa del material que cabe en un determinado recipiente y el volumen de éste, da una cifra llamada masa unitaria. La masa unitaria compacta es otro buen índice para conocer la calidad del agregado, puesto que cuanto mejor sea la granulometría mayor es el valor numérico de la masa [Instituto del Concreto, 1997].
- **Forma.** La forma de los agregados es una característica importante ya que afecta a la trabajabilidad del concreto, esta forma depende del tipo de roca que lo originó, ya que para ciertas piedras resulta determinante el sistema de clivaje, las posibles instrucciones en la roca y su estado de meteorización.

La forma del agregado influye directa o indirectamente en el comportamiento del concreto, ya que se relaciona con la trabajabilidad, la resistencia y otras propiedades. Las formas perjudiciales son las muy alargadas y/o escamosas ya que tendrán una influencia objetable en la trabajabilidad, los porcentajes de cemento, la resistencia y la durabilidad. En general, los agregados excesivamente alargados hacen al concreto muy pobre.

Desde el punto de vista de la economía en el requisito de la relación agua/cemento, los agregados redondeados son preferibles a los agregados angulares. Por el otro lado, el cemento adicional requerido para los agregados angulares es contrarrestado en cierta medida por las

resistencias superiores del agregado y, en ocasiones por una mayor durabilidad, como resultado de la trabazón del concreto endurecido, es decir, uniones más fuertes entre los agregados y la pasta de cemento.

- **Textura.** Reviste especial importancia por su influencia en la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento fraguado, así como también, por su efecto sobre las propiedades del concreto o mortero endurecido, tales como, densidad, resistencia a la compresión y a la flexión, cantidad requerida de agua, etc. En términos generales, se puede decir que la textura superficial es áspera en las piedras obtenidas por trituración y lisa en los cantos rodados, de río, quebrada o mar.

Mecánicas.

- **Dureza.** Esta propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado. En la elaboración de concretos sometidos a elevadas tasas de desgaste por roce o abrasión, como aplicaciones en pavimentos o revestimientos de canales, la dureza del agregado grueso es una propiedad decisiva para la selección de los materiales.
- **Resistencia.** El agregado grueso, en mayor medida que el fino, va a resultar relacionado con el comportamiento de las resistencias del concreto, por su aporte en tamaños de grano dentro de la masa de la mezcla. En tal sentido, una de las posibilidades de ruptura de la masa es por medio del agregado grueso (las otras son por la pasta y por la interface de contacto entre pasta y agregado). De esta manera, la resistencia de los agregados cobra importancia y se debe buscar que éste nunca falle antes que la pasta de cemento endurezca. La falla a través del agregado grueso se produce bien sea porque tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque previamente se le han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (especialmente cuando éste se hace por voladura) o por un inadecuado proceso de trituración. Adicionalmente, cuando se aumenta la adherencia por la forma o textura superficial del agregado al buscar una alta

resistencia del concreto, también aumenta el riesgo de que las partículas del agregado fallen antes de la pasta de cemento endurecida.

- **Tenacidad o resistencia a la falla por impacto.** Es una propiedad que depende de la roca de origen y se debe tener en cuenta ya que tiene mucho que ver con el manejo de los agregados, porque si estos son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría y también disminuir la calidad del concreto que con ellos se elabore.
- **Adherencia.** Es la interacción que existe en la zona de contacto agregado-pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto. La adherencia depende de la calidad de la pasta de cemento y en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión. Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas [Instituto del Concreto, 1997].

PRUEBA	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Práctica estándar para el muestreo de agregados.	NMX-C-030-ONNCCE	ASTM-D-75-03
Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba.	NMX-C-170-ONNCCE	ASTM-C-702-03
Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporado por secado.	NMX-C-166-ONNCCE	ASTM-C-566-97
Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados.	NMX-C-073-ONNCCE	ASTM-C-29-97
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino.	NMX-C-165-ONNCCE	ASTM-C-128-04
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso.	NMX-C-164-ONNCCE	ASTM-C-127-04
Método de prueba estándar para materiales finos que pasan la malla No. 200 en agregados por lavado.	NMX-C-084-ONNCCE	ASTM-C-117
Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.	NMX-C-071-ONNCCE	ASTM-C-142-97
Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino	NMX-C-088-ONNCCE	ASTM-C-40-99

para concretos.		
Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.	NMX-C-077-ONNCCE	ASTM-C-136-04
Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregado fino.	NMX-C-416-ONNCCE-2003	ASTM-D-2419-02

2.5.4 Aditivos para Concreto

Actualmente una parte muy importante para la fabricación del concreto es el empleo de los aditivos, debido a que los componentes básicos del concreto hidráulico son el cemento, el agua y los agregados, cualquier otro ingrediente que se incluya en su elaboración puede ser considerado, literalmente hablando, como un aditivo.

Actualmente la norma ASTM C 125-02 define al Aditivo de la siguiente manera: “Es un material diferente al agua, agregados, cemento hidráulico y fibras de refuerzo que se utiliza como un ingrediente del concreto o mortero y que se añade a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado”.

Sin embargo, en la práctica del concreto hidráulico convencional, no se consideran aditivos las puzolanas y las escorias cuando forman parte de un cemento portland-puzolana. portland-escoria, ni tampoco las fibras de refuerzo porque dan origen a concretos que no se consideran convencionales.

Con estas salvedades, resulta válida la definición propuesta por el Comité ACI 116(26), según la cual un aditivo es un material distinto del agua, los agregados, el cemento hidráulico y las fibras de refuerzo, que se utiliza como ingrediente del mortero o del concreto, y que se añade a la revoltura inmediatamente antes o durante el mezclado.

La interpretación que puede darse a esta definición es que un material sólo puede considerarse como aditivo cuando se incorpora individualmente al concreto, es decir, que se puede ejercer control sobre su dosificación. De esta manera, las puzolanas y las escorias solamente son aditivos si se les maneja y administra por separado del cemento portland. Lo cual no deja de ser más bien una cuestión de forma, ya que cualitativamente sus efectos son los mismos que si se administran por conducto del cemento.

Para complementar la definición anterior, tal vez cabría añadir que los aditivos para concreto se utilizan con el propósito fundamental de modificar

convenientemente el comportamiento del concreto en estado fresco, y/o de inducir o mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto endurecido.

2.5.4.1 Usos de los Aditivos

El comportamiento y las propiedades del concreto hidráulico, en sus estados fresco y endurecido, suelen ser influidos y modificados por diversos factores intrínsecos y extrínsecos. Los intrínsecos se relacionan esencialmente con las características los componentes y las cantidades en que éstos se proporcionan para laborar el concreto. En cuanto a los extrínsecos, pueden citarse principalmente las condiciones ambientales que prevalecen durante la elaboración y colocación del concreto, las prácticas constructivas que se emplean en todo el proceso desde su elaboración hasta el curado, y las condiciones de exposición y servicio a que permanece sujeta la estructura durante su vida útil.

Algunos de estos factores pueden ser objeto de maniobra por parte del usuario del concreto, pero otros no. Por ejemplo, los aspectos relativos a la composición del concreto ya las prácticas constructivas son factores susceptibles de ajuste y adaptación, en tanto los que corresponden al medio ambiente ya las condiciones de exposición y servicio, por lo general son factores fuera del control del usuario.

De acuerdo con este planteamiento, para influir en el comportamiento y las propiedades del concreto, a fin de adaptarlos a las condiciones externas, se dispone principalmente de dos recursos:

- 1) La selección y uso de componentes idóneos en el concreto, combinados en proporciones convenientes.
- 2) El empleo de equipos, procedimientos, y prácticas constructivas en general, de eficacia comprobada y acordes con la obra que se construye.

El uso de aditivos queda comprendido dentro del primer recurso y normalmente representa una medida opcional, para cuando las otras medidas no alcanzan a producir los efectos requeridos, en función de las condiciones externas actuales o futuras. Es decir, la práctica recomendable para el uso de los aditivos en el concreto, consiste en considerarlos como un medio complementario y no como un sustituto de otras medidas primordiales, tales como el uso de un cemento apropiado, una mezcla de concreto bien diseñada, o prácticas constructivas satisfactorias.

Según los informes del Comité ACI 212(76), (77), (78), los aditivos suelen emplearse en la elaboración de concretos, morteros o mezclas de inyección, no sólo para modificar sus propiedades en los estados fresco y endurecido, sino también por economía, para ahorrar energía y porque hay casos en que el uso de un aditivo puede ser el único medio factible para obtener el resultado requerido, citando como ejemplos la defensa contra la congelación y el deshielo, el retardo o la aceleración en el tiempo de fraguado y la obtención de muy alta resistencia. Asimismo, señalan que los principales efectos que se persiguen con el uso de los aditivos, son los que a continuación se mencionan para ambos estados del concreto [Fundación ICA, 2000].

2.6 Diseño de Mezclas con criterio de durabilidad, Método ACI.

2.6.1 Generalidades

El diseño de las mezclas de concreto, es un tema de vital interés para todos los ingenieros y constructores que manejan el concreto. Las principales interrogantes con las que tiene que lidiar son principalmente las siguientes [Abrams, 1919]:

- ¿Cuál es la mezcla necesaria para producir un concreto con resistencia adecuada para un determinado trabajo?
- ¿Con determinados materiales, qué proporciones darán el mejor concreto al menor costo?
- ¿Con diferentes bancos de materiales de diferentes características, cuáles son los más adecuados para el diseño?
- ¿Cuál es el efecto produce en la resistencia del concreto los cambios en la mezcla, la consistencia y la clasificación de los agregados?

El proporcionamiento de un concreto frecuentemente involucra la selección de los materiales y su combinación [Abrams, 1919]. El conocimiento de las propiedades del concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido tiene como finalidad primordial la de determinar el diseño de la mezcla [Instituto del Concreto, 1997].

El **Diseño de Mezclas** puede ser definido como el proceso de selección de los ingredientes adecuados para concreto (cemento, agregados, agua y ocasionalmente aditivos) y la determinación de sus proporciones relativas con el

objeto de producir un concreto de cierta resistencia, consistencia y durabilidad de la forma más económica posible [Shetty, 2005].

Al diseñar una mezcla de concreto se tienen principalmente dos objetivos:

El primer objetivo consiste en determinar la combinación más práctica y económica de los materiales con los que se dispone, para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de uso. Para lograr tal objetivo, una mezcla de concreto bien proporcionada debe poseer las propiedades siguientes [Kosmatha y Panarese, 1992]:

En el concreto fresco: trabajabilidad aceptable, que engloba cinco características:

- Homogeneidad y uniformidad,
- Consistencia (cohesión y viscosidad),
- Estabilidad (oposición a la segregación y sangrado),
- Aptitud para la compactación ("compactibilidad")
- Disposición para el acabado (condiciones de textura superficial).

De tales características, sólo es factible especificar aquellas que pueden evaluarse de manera cuantitativa, como es el caso de la consistencia y el sangrado, para cuya medición existen procedimientos normalizados [Neville, 1998].

El concreto debe ser fabricado para tener siempre una trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuadas a las condiciones de trabajo. La trabajabilidad es una medida de lo fácil o difícil que resulta colocar, consolidar y darle acabado al concreto. La consistencia es la facultad del concreto fresco para fluir. La plasticidad determina la facilidad de moldear al concreto. Si se usa más agregado en una mezcla de concreto o si se agrega menos agua, la mezcla se vuelve más rígida, (menos plástica y menos trabajable) y difícil de moldear. No se pueden considerar plásticas a las mezclas muy secas o muy desmoronables ni a las muy aguadas o fluidas. El concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar ni sangrar excesivamente. El sangrado es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos –cemento, arena y piedra- dentro de la masa. El

asentamiento es consecuencia del efecto combinado de la vibración y de la gravedad.

Un sangrado excesivo aumenta la relación agua/cemento cerca de la superficie superior, pudiendo dar como resultado una capa superior débil de baja durabilidad, particularmente si se llevan a cabo las operaciones de acabado mientras está presente el agua de sangrado. La segregación es la separación de los distintos componentes de una mezcla de concreto o mortero fresco durante su transporte o colocación [Kosmatha y Panarese, 1992].

En el concreto endurecido: durabilidad, resistencia y presentación uniforme.

La resistencia a la compresión se define como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos fuerza por centímetro cuadrado (Kgf/cm^2) a una edad de 28 días y se le asigna con el símbolo f'_c [Kosmatha y Panarese, 1992]. Por lo común las propiedades del concreto fresco se rigen por el tipo de estructura a construir (vigas, muros, zapatas, etc.) y por las técnicas de colocación y transporte (bomba, banda transportadora, carretilla, etc.); así mismo, las propiedades del concreto en estado endurecido quedan especificadas por el ingeniero calculista ya que él proporciona datos tales como la resistencia a los esfuerzos, durabilidad y otros, para que respondan a las condiciones de los proyectos o de los reglamentos [Instituto del Concreto, 1997].

El segundo objetivo es hacer el concreto de la manera más económica, es decir, todos los concretos dependen principalmente de dos factores [Shetty, 2005]:

Costo de la elaboración de una mezcla de concreto: este costo está constituido básicamente por la variación en el costo de los materiales. Esta variación se debe a que el precio del cemento, por kilo, es varias veces mayor que el de los agregados, es decir, el cemento constituye alrededor de 10% del volumen absoluto total del concreto pero puede llegar a representar más de 70% del costo del mismo [Neville, 1998]. Es por ello que el proporcionamiento debe minimizar la cantidad de cemento sin sacrificar la resistencia, durabilidad y demás propiedades del concreto.

La diferencia en costo entre los agregados generalmente es secundaria; sin embargo, en algunas localidades o con algún tipo de agregado especial, puede ser suficiente para que influya en la selección y dosificación. El costo del agua usualmente no tiene ninguna influencia, mientras que el de los aditivos puede ser importante por su efecto potencial en la dosificación del cemento y los agregados [Instituto del Concreto, 1997].

Costo de la mano de obra: este costo depende de la trabajabilidad de la mezcla y de los métodos de colocación y compactación. Una mezcla poco trabajable con un equipo de compactación deficiente aumenta los costos de mano de obra y aún, con un equipo de colocación eficiente, el costo de la colocación de mezclas muy secas es alto [Instituto del Concreto, 1997].

La comprensión de los principios básicos del diseño de mezclas es tan importante como la realización de los cálculos mismos. Solamente con la selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla así como con un proporcionamiento adecuado se pueden obtener las propiedades anteriores al producir un concreto [Kosmatha y Panarese, 1992].

Antes de efectuar el proporcionamiento de una mezcla, se seleccionan sus características en base al uso que se propone dar al concreto, a las condiciones de exposición, al tamaño y forma de los miembros y a las propiedades físicas del concreto (tales como la resistencia), que se requieran para la estructura. Una vez que estas características se han elegido, la mezcla se puede proporcionar a partir de datos de campo o de laboratorio [Kosmatha y Panarese, 1992].

Teniendo los materiales para la realización del concreto, los tres factores variantes que tienen que ser considerados especificando una determinada mezcla de concreto son [Shetty, 2005]:

Relación agua-cemento acorde con la durabilidad y resistencia requerida: esta relación es sencillamente la masa del agua, dividido entre la masa del cemento. La relación agua/cemento que se elija para el diseño de la mezcla, debe ser el menor valor requerido para cubrir las consideraciones de exposición de diseño. Cuando la durabilidad no sea el factor que rija en el diseño, la relación agua/cemento deberá elegirse con base en la resistencia a compresión del concreto [Kosmatha y Panarese, 1992].

Graduación de los Agregados: esta graduación está controlada sólo por la variación del contenido de agregado fino y grueso [Shetty, 2005].

Consistencia: la consistencia es la facultad del concreto fresco para fluir, la prueba de revenimiento es una medida de la consistencia de la pasta.

En general, estos factores no pueden ser elegidos o manipulados arbitrariamente. Por lo general, dos o tres factores se especifican, y los otros se ajustan para dar trabajabilidad y buena economía aunque las mezcla de concreto deberán mantenerse lo más sencillas posible, pues un número excesivo de ingredientes, a menudo provocan que la mezcla de concreto sea difícil de controlar [Kosmatha y Panarese, 1992].

En resumen, el esfuerzo en la dosificación es utilizar una cantidad mínima de pasta (y por lo tanto de cemento) que lubrique la masa en estado fresco y que después del endurecimiento, una las partículas del agregado y cemento y se llenarán los espacios entre ellos. Cualquier exceso de pasta implica mayor costo, mayor contracción por secado, una mayor susceptibilidad a la filtración del agua y por lo tanto el ataque de aguas agresivas y acción de la meteorización. Esto se consigue reduciendo al mínimo los huecos con una buena graduación de los agregados [Shetty, 2005].

2.6.2 Método de American Concrete Institute (A.C.I.) 211.

El método desarrollado en esta tesis tiene como base el procedimiento del *American Concrete Institute* elaborado por el Comité ACI 211. Este método es el más conocido y ampliamente usado. Se fundamenta en el principio básico de la relación agua/cemento desarrollado por Abrams [1918].

Consiste en seguir en forma adecuada una secuencia de pasos y determinar la cantidad de cada material en masa y volumen, para 1 m³ de concreto. Sin embargo, el método del ACI ha sido concebido de tal manera que el proporcionamiento de los agregados se hace teniendo en cuenta que estos cumplen con las recomendaciones granulométricas de la Norma ASTM C-33 [Instituto del Concreto, 1997].

Este método volumétrico es más exacto que otros métodos ya que involucra los valores de densidades de todos los ingredientes para calcular el volumen absoluto que cada ingrediente ocupará en la unidad de volumen de concreto. [Kosmatha y Panarese, 1992]. El procedimiento siguiente es aplicable al concreto normal.

Independientemente de que las características del concreto estén prescritas en las especificaciones o de que se deje la dosificación de la persona que la va a hacer, la determinación de los pesos de las mezclas por metro cúbico de concreto se lleva a cabo más satisfactoriamente de acuerdo con la siguiente secuencia:

Primer Paso.

Elección del revenimiento. Cuando no especifica el revenimiento, puede seleccionarse un valor apropiado para la obra de los que aparecen en la tabla siguiente. Las variaciones de revenimiento que se muestran son aplicables cuando se emplea el vibrador para compactar concreto. Deben emplearse mezclas de consistencia más densa, que pueden colocarse con buen rendimiento

Tabla . Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción [ACI 211].

Tipos de Construcción	Revenimiento en milímetros	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas	75	25
Zapatas, cajones de cimentación y muros de sub-estructura	75	25
Vigas y muros reforzados	100	25
Columnas para edificios	100	25
Pavimentos y losas	75	25
Concreto Masivo	75	25

El revenimiento se puede incrementar cuando se empleen aditivos químicos, siempre que la mezcla de concreto tenga la misma o más baja relación Agua/Cemento y no exhiba segregación o sangrado excesivo. También se puede incrementar 2.5 cm, cuando los métodos de compactación no sean por vibrado.

El revenimiento se puede incrementar cuando se emplean aditivos químicos, se debe de tener en cuenta que el concreto tratado con aditivo tiene una relación Agua/ Cemento o Agua /Materiales cementantes igual o menor sin que potencialmente tengan segregación o sangrado excesivo se puede incrementar en 2.5 cm. Cuando los métodos de compactación no sean mediante vibrado.

Segundo paso.

Elección del tamaño máximo del agregado. Por lo general, el tamaño máximo del agregado debe ser el mayor disponible económicamente y guardar las relaciones con las dimensiones de la estructura. En ningún caso el tamaño máximo debe exceder de 1/5 de la menor dimensión entre los costados de las cimbras, 1/3 del espesor de las lozas, ni $\frac{3}{4}$ del espacio mínimo entre varillas de refuerzo individuales, paquetes de varillas, o torones de pretensado. A veces estas

limitaciones se pasan por alto si la trabajabilidad y los métodos de compactación permiten que el concreto sea colado sin cavidades o huecos cuando se requiere concreto de alta resistencia, se pueden obtener mejores resultados con agregados de tamaño máximo reducido, ya que estos producen resistencias superiores con una relación Agua/Cemento determinada.

Tercer paso.

Cálculo del agua de mezclado y el contenido del aire. La cantidad de agua por volumen unitario de concreto requerida para producir determinado revenimiento, depende del tamaño máximo, de la forma de la partícula y granulometría de los agregados, así como de la cantidad de aire incluido. En la tabla siguiente aparecen valores estimados del agua de mezclado requerida para concretos hechos con diversos tamaños máximos de agregado, con o sin aire incluido, sin aire incluido implica que sólo contendrá el % de aire atrapado de manera accidental. Según sea la textura y forma del agregado, los requerimientos de agua de mezclado pueden estar por encima o por debajo de los valores tabulados, pero son suficientemente precisos para el primer cálculo. Estas diferencias en el requerimiento de agua no se reflejan necesariamente en la resistencia, ya que pueden estar implicados otros factores de compresión.

En la parte superior de la tabla, se indica la cantidad aproximada de aire atrapado que puede esperarse en concretos sin inclusión del aire, y en la parte inferior, el promedio de contenido de aire recomendado para concretos con inclusión de aire. Para el caso de que sea necesario o deseable incluir aire, se señalan tres niveles de contenido de aire para cada tamaño de agregado, los que dependen del propósito de la inclusión de aire y de la severidad de la exposición, si la inclusión del aire está en función de la durabilidad.

Tabla . Requerimientos de Agua aproximada de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado [ACI 211].

Revenimiento, mm	Agua, Kg/m ³ de concreto para tamaño máximo nominal de agregado indicado							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
Concreto Sin Aire Incluido								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
% aire atrapado	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
Concreto Con Aire Incluido								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-
Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo al nivel de exposición								
Exposición Ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0

Exposición Moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición Severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

*Estas cantidades de agua de mezclado se emplean para calcular factores de cemento en mezclas de prueba. Son cantidades máximas de agregados angulares, razonablemente bien formados y con granulometría dentro de los límites de especificaciones aceptadas.

* Los valores de revenimiento para concreto con agregado mayor de 40 mm. Están basados en pruebas de revenimiento después de la remoción de partículas mayores de 40 mm mediante tamizado húmedo.

*Estas cantidades de agua de mezclado se emplean para calcular factores de cemento para mezclas de prueba, cuando se utilizan agregados de tamaño máximo nominal de 60 ó 150 mm son promedios para agregados gruesos razonablemente bien formados con buena granulometría de agregado fino.

** En varios documentos del A.C.I. aparecen recomendaciones con respecto al contenido de aire y a las tolerancias necesarias del contenido de aire para el control en el campo. Entre los documentos están: A.C.I. 201, 345, 301, y 302. la norma ASTM C 94 para concretos premezclados también proporciona los límites del contenido de aire. Los requerimientos que aparecen en otros documentos no siempre pueden concordar exactamente, por lo que al proporcionar concreto debe prestarse atención a la selección de un contenido de aire que se ajuste a las necesidades de obra, así como a las especificaciones aplicables.

*** Para concretos que contienen agregados que serán utilizados en humedad a través de una malla de 1 ½” antes de someterse a la prueba de contenido de aire, el contenido de aire esperado en el material de un tamaño inferior a 40 mm sin embargo, los cálculos iniciales de proporción deben incluir el contenido de aire como un porcentaje del total.

xx Cuando se emplea agregado grande en el concreto con bajo factor de cemento, la inclusión de aire no debe de ir en detrimento de la resistencia. En la mayoría de los casos este requerimiento de agua de mezclado se reduce lo suficiente para mejorar la relación Agua/Cemento y, de esta manera, compensar el efecto reductor de resistencia del concreto con reducción de aire. Generalmente, sin embargo para dichos tamaños máximos grandes de agregado los contenidos de aire recomendados en caso de exposición severa, deben tomarse en consideración aunque pueda haber poca o ninguna exposición a la humedad o al congelamiento.

++ Estos valores se basan en el criterio de que es necesario un 9 % de aire en la fase de mortero del concreto. Si el volumen de mortero va a ser substancialmente diferente del determinado en esta obra, puede ser conveniente calcular el contenido de aire necesario tomando un 9 % del volumen real del mortero.

Exposición ligera.- Cuando se desee la inclusión de aire por otros efectos benéficos que no sean la durabilidad, por ejemplo, para la cohesión o trabajabilidad, o para aumentar la resistencia del concreto con bajo factor de cemento, pueden emplearse contenidos de aire inferiores a los necesarios para la durabilidad.

Esta exposición incluye servicio interior o exterior en climas en los que el concreto no estará expuesto a agentes de congelación y deshielo.

Exposición moderada.- Implica el Servicio en climas en donde es probable la congelación, pero en los que el concreto no estará expuesto continuamente a la humedad o al agua corriente durante largos períodos antes de la congelación, ni agentes descongelantes u otros productos químicos agresivos.

Exposición severa.- El concreto expuesto a productos químicos descongelantes u otros agentes agresivos, o bien, cuando el concreto pueda resultar altamente saturado por el contacto continuo con humedad o agua corriente antes de la congelación.

Ejemplos de lo anterior son: pavimentos, pisos de puentes, guarniciones, desagües, aceras, revestimiento de canales, tanques exteriores para agua o resumideros.

Cuarto paso.

Selección de la relación Agua/Cemento. La relación agua/cemento requerida se determina no solo por los requisitos de resistencia, sino también por otros factores como la durabilidad y las propiedades de acabado.

Puesto que diferentes agregados y cementos producen, generalmente, distintas resistencias empleando la misma relación agua/cemento, es muy deseable establecer una relación entre la resistencia y la relación agua/cemento para los materiales que de hecho van emplearse. En ausencia de estos datos, pueden tomarse de la tabla 9a valores aproximados y relativamente

conservadores para concretos que contengan cemento Portland Tipo I. Con materiales comunes, las relaciones tabuladas de agua/cemento deben producir las resistencias indicadas, con base en pruebas a los 28 días de muestras curadas en condiciones normales de laboratorio.

La resistencia promedio seleccionada debe, por supuesto, exceder de la resistencia especificada por un margen suficiente para mantener dentro de los límites especificados las pruebas con bajos valores.

Tabla . Relaciones entre la relación Agua/Cemento y la resistencia a la compresión del concreto [ACI 211].

Resistencia a la Compresión a los 28 días		Relación Agua/Cemento en masa	
MPa	Kg/cm ²	Sin aire incluido	Con aire incluido
40	408	0.42	-
35	357	0.47	0.39
30	306	0.54	0.45
25	255	0.61	0.52
20	204	0.69	0.60
15	153	0.79	0.70

*Los valores son resistencias promedio estimadas para concretos que no contienen más del porcentaje de aire que se indica en la Tabla 8, para una relación A/C constante se reduce la resistencia del concreto conforme se incrementa el contenido de aire.

La resistencia se basa en cilindros de 15 x 30 cm, curados con humedad a los 28 días, a 23 ± 1.7 °C, de acuerdo con la norma ASTM C 31.

La relación supone un tamaño máximo de agregado de $\frac{3}{4}$ a 1", para un banco dado, la resistencia producida por una relación A/C dada se incrementará conforme se reduce el tamaño máximo del agregado.

NOTA: Para resistencias no especificadas es válida la interpolación

Para condiciones de exposición severas la relación agua/cemento debe mantenerse baja, aún cuando los requerimientos de resistencia puedan cumplirse con valores mayores.

En la Tabla siguiente aparecen los valores límite:

CORRESPONDENCIA ENTRE LA RELACIÓN A/C Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO		
TIPO DE ESTRUCTURA	RELACIÓN A/C POR PESO	
	Estructura continua o frecuentemente mojada y	Estructura expuesta al agua de mar o a sulfatos

	expuesta a congelación y deshielo*	
Secciones esbeltas (barandales, guarniciones, umbrales, ménsulas, trabajos ornamentales) y secciones con menos de 3 cm de recubrimiento sobre el acero de refuerzo ^x	0.45	0.40 ⁺⁺
Todas las demás estructuras	0.50	0.45 ⁺⁺

* Basado en el informe del comité ACI 201, “Durability of Concrete in Service”.

x El concreto también debe de tener aire incluido.

++ Si se emplea cemento resistente a los sulfatos, la relación A/C permisible puede incrementarse en 0.05

Quinto paso.

Cálculo del contenido de cemento. La cantidad de cemento por volumen unitario de concreto rige por las determinaciones expuestas en el tercero y cuarto pasos anteriores. El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado, dividido entre la relación A/C. Si, no obstante, la especificación incluye un límite mínimo separado sobre el cemento, además de los requerimientos de resistencia y durabilidad, la mezcla debe basarse en el criterio que produzca a una cantidad mayor de cemento.

Sexto paso.

Estimación del contenido de agregado grueso. Los agregados con tamaño máximo y granulometría esencialmente iguales producen concretos de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplea un volumen dado de agregado grueso por volumen unitario de concreto, con base en varillado seco. En la Tabla 10 se muestra el volumen de agregado, en metros cúbicos, con base en varillado seco, para un metro cúbico de concreto. Este volumen se convierte a peso seco del agregado grueso requerido en un metro cúbico de concreto, multiplicándolo por el peso unitario de varillado en seco por metro cúbico de agregado grueso.

Tabla . Volumen de agregado grueso por unidad de volumen del concreto [ACI 211].

Tamaño Máximo Nominal del agregado		Volumen del agregado grueso varillado en seco por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura del agregado fino.			
Plg.	mm.	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8	9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2	12.5	0.59	0.57	0.55	0.53

¾	19	0.66	0.64	0.62	0.60
1	25	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2	37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
2	50	0.78	0.76	0.74	0.72
3	75	0.82	0.80	0.78	0.76
6	150	0.87	0.85	0.83	0.81

* Los volúmenes están basados en agregados en condiciones de varillado en seco, como se describe en la norma ASTM C 29. Estos volúmenes se han seleccionado a partir de relaciones empíricas para producir concretos con un grado de trabajabilidad adecuado a la construcción reforzada común. Para concretos menos trabajables, como los requeridos en la construcción de pavimentos de concreto, pueden incrementarse en un 10 % aproximado

Séptimo paso.

Estimación del contenido del agregado fino. Al término del sexto paso se han estimado todos los componentes del concreto, excepto el agregado fino, cuya cantidad se determina por diferencia. Utilizaremos el método del volumen absoluto, el cual implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes conocidos -agua, aire, cemento y agregado grueso- se restan del volumen unitario de concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen ocupado por cualquier componente en el concreto es igual a su peso dividido entre la densidad de ese material -siendo ésta el producto del peso unitario del agua por el peso específico del material-.

$$\text{Contenido de arena} = 1 \text{ m}^3 - (\text{Sv-a})$$

Octavo paso.

Ajustes por humedad del agregado. Las cantidades de agregado que realmente deben pesarse para el concreto deben considerar la humedad del agregado. Los agregados están generalmente húmedos, y sus pesos secos deben incrementarse con el porcentaje de agua, tanto absorbida como superficial, que contienen. El agua de mezclado que se añade al lote debe de reducirse en cantidad igual a la humedad total menos la absorción.

Noveno paso.

Ajustes en las mezclas de prueba. Las proporciones calculadas de la mezcla deben verificarse mediante mezclas de prueba, preparadas y probadas de acuerdo con la ASTM C 129 “Making and Curing Concrete Compresión and Flexure Test Specimens in the Laboratory”, o por medio de mezcla reales en el

campo, sólo debe usarse el agua suficiente para producir el revenimiento requerido, independientemente de la cantidad supuesta al dosificar los componentes de la prueba. Deben verificarse el peso unitario y la fluencia (ASTM C 138), así como el contenido del aire (ASTM C 138, C 173, C 231) del concreto. También debe tenerse cuidado de lograr la trabajabilidad apropiada, ausencia de segregación, así como las propiedades de acabado. Deben de efectuarse los ajustes necesarios en las proporciones de las mezclas subsecuentes, de acuerdo con los siguientes procedimientos:

- La cantidad estimada de agua de mezclado para producir el mismo revenimiento que el de la mezcla de prueba, sería igual a la cantidad neta de agua de mezclado empleada, dividida por la fluencia de la mezcla de prueba en metros cúbicos. Si el revenimiento de la mezcla de prueba no es el correcto, increméntese o redúzcase el contenido nuevamente estimado de agua a 2 kg por metro cúbico de concreto para cada centímetro de incremento o reducción del revenimiento.
- Si no se obtiene el contenido de aire deseado (para concreto de aire incluido), debe estimarse de nuevo el contenido requerido de aditivo para lograr el contenido apropiado de aire, y reducirse o incrementarse el contenido de agua de mezclado que se indica en el párrafo anterior, en 3 kg por cada 1 % en que se debe reducirse o incrementarse el contenido de aire respecto al de la mezcla de prueba previa.
- El peso unitario de concreto fresco estimado nuevamente para el ajuste de las proporciones de la mezcla de prueba, es igual al peso unitario en kg/m^3 medido en la mezcla de prueba, reducido o incrementado por el porcentaje de incremento o reducción del contenido de aire en la mezcla ajustada respecto a la primera mezcla de prueba.
- Deben calcularse nuevos pesos de mezcla, comenzando con el cuarto paso; si es necesario, se modificará el volumen de agregado grueso de la Tabla 10, para obtener una trabajabilidad adecuada.
- Las muestras para el laboratorio con las que se realizarían los especímenes de prueba se diseñaron bajo las siguientes condiciones:

El concreto para las cinco proporciones analizadas de agregados de Joyitas como para agregados triturados, se diseñó con el método del American Concrete Institute (A.C.I.), debido a que este permite mayores relaciones de agua/cemento reflejándose en mezclas muy manejables y con menores consumos de cemento que el método de las Curvas de Abrams [ACI 211].

2.7 Pruebas realizadas al concreto

Una vez elaborada la mezcla de concreto, siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM C192, se procede a elaborar los especímenes. El moldeo debe ser realizado en un sitio debidamente acondicionado, libre de vibraciones externas, y donde puedan ser almacenadas hasta su desmolde.

Las pruebas del concreto se realizan en sus dos estados; fresco para conocer sus características y endurecido para determinar sus cualidades y resistencia. El comportamiento de un concreto frente a los distintos esfuerzos es variable y complejo.

Estas pruebas se dividen de acuerdo a su clasificación:

✓ **Según su finalidad:**

- **Ensayos previos:** determinan la dosificación del material de acuerdo con las condiciones de ejecución. Se realizan antes de comenzar las obras.
- **Ensayos característicos:** comprueban que la resistencia y dispersión del hormigón en obra se encuentran dentro de los límites del proyecto.
- **Ensayos de control:** con probetas moldeadas en obra para comprobar que la resistencia del hormigón se mantiene igual o mayor que la exigida.
- **Ensayos de información:** pretenden conocer la resistencia del hormigón correspondiente a una parte de la obra y a una edad determinada.

✓ **Según su naturaleza:**

- **Destructivos:** determinan la resistencia mediante la rotura de probetas o piezas de hormigón.
- **No destructivos:** Determinan la calidad del concreto sin destruir la estructura y se realizan directamente sobre el elemento que se evalúa.

2.7.1 Pruebas del concreto en estado fresco.

2.7.1.1 Muestreo del Concreto.

Esta prueba se realiza de acuerdo con la norma NMX-C-161-1997 ONNCCE.

- Las muestras han de ser representativas y de volumen 1.25 – 1.50 veces el volumen de las probetas.
- La muestra debe protegerse del sol, lluvia, viento y desecación, y no exceder los 15 min antes de su utilización.



Figura . Secuencia de Muestreo de Camión Mezclador.

2.7.1.2 Ensayos de Consistencia y Trabajabilidad.

La consistencia y trabajabilidad en el concreto es una medida de que tan fácil resulta manejar, colocar y compactar el concreto.

La consistencia es la capacidad que tiene el concreto para fluir, sin que se presente segregación en la mezcla ni sangrado excesivo.

Se puede medir mediante las siguientes pruebas:

- **Prueba de Revenimiento.**

Esta prueba se desarrolla de acuerdo con la norma NMX-C- 157-1987; también nos ayuda a medir que tan fácil resulta colocar, manejar y compactar el concreto.

Para su determinación se utiliza un molde sin fondo de forma troncocónica, provisto de dos asas para manipularlo, con unas dimensiones interiores específicas.



Figura . Equipo para ejecutar la prueba de revenimiento.

Se coloca el molde sobre una superficie plana, rígida e impermeable. Se humedece el interior del molde y la superficie. Se introduce el concreto en 3 capas varillando con 25 penetraciones cada capa y enrasa la superficie.

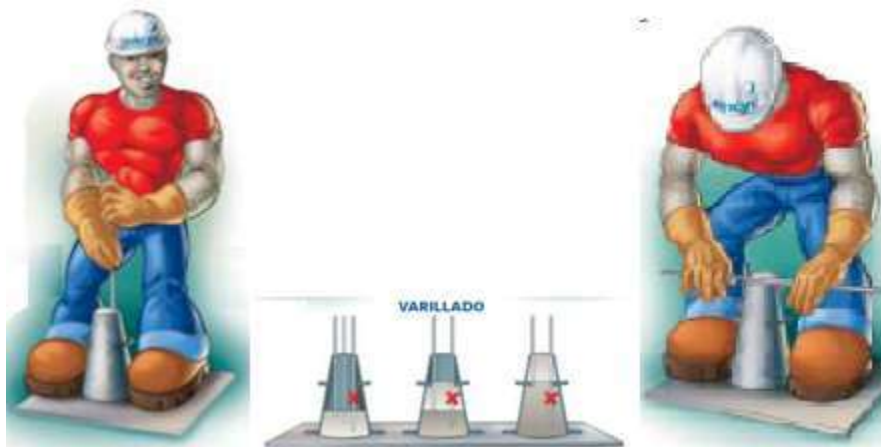


Figura . Secuencia de Llenado del Cono de Abrams.

Se desmolda inmediatamente, levantando el cono despacio entre 3 y 5 segundos en dirección vertical sin sacudidas, se coloca el cono al revés y medimos el punto medio de la masa asentada.

El ensayo no se aplica con áridos > 40 mm.



Imagen 4. Secuencia de determinación del revenimiento.

Si la muestra falla por estar fuera de la tolerancia, debe tomarse otra muestra, si esta también falla la cantidad restante debe ser rechazada.



Imagen 5. Fallas en el Revenimiento.

A continuación se presenta información acerca de los revenimientos más comunes y de sus respectivas tolerancias.

Tabla 1. Revenimientos especificados.

Revenimiento (cm)	Características
10	Poco trabajable y no bombeable
12	Trabajable en grado medio y no bombeable
14	Trabajable y no bombeable
14 Bombeable	Trabajable y bombeable
18 Bombeable	Muy trabajable y bombeable

Tabla 2. Tolerancias del Revenimiento.

Revenimiento Especificado	Tolerancia (cm)
Menor de 5 cm	+/- 1.5
De 5 a 10 cm	+/- 2.5
Mayor de 10 cm	+/- 3.5

2.7.1.3 Determinación del Peso Volumétrico del Concreto y Contenido de Aire.

La obtención del peso volumétrico del concreto, se utiliza para conocer o determinar el peso del concreto por metro cubico y se realiza de acuerdo a la norma NMX-C-162 ó a la ASTM C 29, ASTM C 138, dividiendo el peso neto del concreto fresco entre el volumen del recipiente que lo contiene.

El equipo es básicamente un recipiente de volumen y peso debidamente calibrados, y de dimensiones establecidas que responde al tamaño máximo del agregado, según lo establecido por la normativa aplicada. Así mismo, se utiliza

una barra de 16 milímetros de diámetro y 60 centímetros de largo para la compactación de la muestra, sumado a la utilización de un mazo de 600 ± 200 gramos cuando la muestra sea menor a $0,014 \text{ m}^3$, y la utilización de un mazo de 1000 ± 200 gramos cuando la muestra sea mayor a $0,014 \text{ m}^3$.

El concreto convencional, empleado normalmente en pavimentos, edificios y en otras estructuras tiene un peso unitario dentro del rango de 2,240 y 2,400 kg por metro cúbico (kg/m^3). El peso unitario (densidad) del concreto varia, dependiendo de la cantidad y de la densidad relativa del agregado, de la cantidad del aire atrapado o intencionalmente incluido, y de los contenidos de agua y de cemento, mismos que a su vez se ven influenciados por el tamaño máximo del agregado.

Para el diseño de estructuras de concreto, comúnmente se supone que la combinación del concreto convencional y de las barras de refuerzo pesa 2400 kg/m^3 .

De acuerdo a la Norma NMX-C-162 tenemos lo siguiente:

El procedimiento para desarrollar el ensayo consiste en:

Para recipientes cilíndricos menores a 10 L se utilizará compactación de la muestra con varilla y para recipientes de 10 L o mayores el método de colocación se seleccionarán de acuerdo al revenimiento.

Se varillan los concretos con revenimientos mayores a 8 cm, para revenimientos entre 3 y 8 cm puedes utilizar el método de varillado o vibrado y para concretos menores a 3 cm utiliza el método de compactación por vibrado.

El concreto se coloca en el recipiente en 3 capas de 25 golpes cada una y cuidando de no golpear la base del recipiente en la primer capa y no introducir la varilla más de 20mm de la capa inferior, cuando el recipiente es menor de 14 litros.



Figura . Recipiente de Masa Unitaria.

Con esta prueba también se puede determinar el rendimiento del concreto, y el contenido de aire con las siguientes fórmulas:

$$\text{Masa neta del concreto (kg) = masa (recipiente + concreto) - masa recipiente}$$

$$\text{Masa unitaria real (kg/m}^3\text{) = } \frac{\text{Masa neta del concreto (kg)}}{\text{Factor del recipiente}}$$

Determinación del Rendimiento:

Esta prueba es importante ya que con ella determinamos cuantos litros realmente son los que se están obteniendo por metro cúbico, que lo ideal sería tener un rendimiento de 1,000 litros por metro cúbico.

$$\text{Rendimiento volumétrico} = \frac{\text{Masa total de todos los materiales incluidos en una revoltura}}{\text{Masa unitaria real}}$$

Determinación del contenido de Aire:

El contenido de aire en el concreto compactado es muy importante para conocer el comportamiento del concreto a la intemperie y para verificar su variación debido al uso de aditivos que incrementan la trabajabilidad.

Esta prueba proporciona el porcentaje de contenido de aire en el concreto fresco, con respecto al volumen del concreto, la medición se basa en un cambio de volumen sometido a presión como lo establece la NMX-C- 157 ó la ASTM C 231.

2.7.1.4 Curado del Concreto.

De acuerdo la norma ASTM C192; el almacenaje inicial corresponde básicamente al lugar donde fueron elaborados los especímenes, para lo cual, una vez realizado el acabado a la superficie, se debe cubrir el concreto con algún elemento que no absorba agua, con el fin de no permitir la pérdida de agua en el concreto fresco. La remoción de los moldes debe efectuarse a 24 ± 8 horas luego de elaborado el elemento, procediendo a el almacenaje en un medio que permita el adecuado curado del concreto, en este caso la temperatura de curado debe ser 23 ± 2 °C desde el momento del desmolde hasta el día de falla.

2.7.2 Pruebas realizadas al concreto en estado endurecido.

Las pruebas realizadas al concreto en estado endurecido se pueden clasificar en destructivas y no destructivas.

2.7.2.1 Pruebas Destructivas.

Las pruebas destructivas son aquellas que evalúan la resistencia mecánica del concreto, es decir se refiere básicamente a la capacidad de soportar toda clase de esfuerzos, esta capacidad depende de la resistencia de los agregados y la pasta del cemento hidratado así como de la integración que se genere entre ellos.

2.7.2.1.1 Resistencia a Compresión en Cilindros de Concreto.

La resistencia a compresión del concreto es la medida más común de desempeño empleada por los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras.

Esta resistencia se mide fracturando probetas cilíndricas de concreto en una maquina de ensayos de compresión; esta resistencia se calcula a partir de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste la carga.

El objetivo de esta prueba es la determinación de la capacidad de carga del concreto a una edad establecida, mediante la aplicación de fuerza axial a un elemento de dimensiones conocidas, basándose en la norma ASTM-C39-01.

Fundamento teórico

Este método consiste en la aplicación de una carga axial en compresión de sobre cilindros o bien en núcleos de concreto extraídos de las obras, a una velocidad de carga que permita que la falla sea significativa y controlada. El esfuerzo a compresión del espécimen, es calculado mediante la división de la carga máxima alcanzada durante la prueba entre el área de la sección perpendicular a la carga.

Aplicación

Se debe tener cuidado al momento de la interpretación de los resultados generados en esta prueba, pues los valores obtenidos están expuestos a una serie de variables como lo son el área de la sección, la dosificación de los materiales, procedimiento de mezclado, la metodología de muestreo, moldeo y fabricación de los especímenes, sumado a la edad, temperatura y condiciones generales de curado de los especímenes.

Equipo

El equipo utilizado en la ejecución de este proyecto consiste en una máquina universal hidráulica marca Forney, que cumple con los requerimientos para la ejecución de este tipo de prácticas. En general, el equipo de carga por utilizar en la prueba tiene la suficiente capacidad para hacer frente a las proyecciones de carga esperadas.

Procedimiento

Una vez desmoldados los cilindros o bien, extraídos los núcleos de concreto, se procede a dar un curado adecuado, bajo condiciones controladas de humedad. Todos los especímenes que quieran someter a prueba deben haber tenido un curado correcto con el fin de eliminar variables al ensayo.

Para efectos de la prueba, los elementos son secados superficialmente, y se les coloca una capa completamente lisa y de alta rigidez de mortero de azufre que se amolde a la superficie de cada una de las caras, con el propósito de realizar una distribución de la carga en toda el área descrita por la cara del elemento, este procedimiento de cabeceo de superficies está descrito en la norma ASTM-C617. Una vez colocada la capa correspondiente en cada una de las caras se inicia el proceso de falla de los elementos, para lo cual la tasa de aplicación de carga debe ser debidamente calibrada, con una aplicación continua libre de impactos. Para equipo hidráulico el rango en el cual la carga puede ser aplicada corresponde a 0,15 a 0,35 MPa/s. Esta tasa designada de movimiento, debe ser mantenida durante la ejecución de la prueba. Por último se aplica la carga hasta la falla del espécimen, anotando la carga máxima alcanzada y el tipo de fractura generada.

Cálculos

Las operaciones matemáticas para el cálculo del esfuerzo a compresión en este caso, son pocas, basta con dividir la carga máxima aplicada entre el área de la sección.

Las siguientes imágenes nos muestran algunas fallas de rotura del concreto después de sometido a la pruebas de compresión simple.



Figura . Falla por compresión en Cilindros de Concreto.

Los resultados de esta prueba se emplean fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto cumpla con los requerimientos de resistencia especificada f'_c .

Las probetas cilíndricas para pruebas de aceptación deben de tener un tamaño de:

- 6 x 12 pulgadas o 15cm x 30cm.
- 4 x 8 pulgadas o 10 cm x 20 cm.

El diámetro del cilindro debe de ser como mínimo 3 veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso que se emplee en el concreto.

Se deben de probar por lo menos 2 cilindros de la misma edad y se reporta la resistencia promedio como el resultado de la prueba.

En México la SCT propone el procedimiento de prueba de acuerdo con su libro M-MMP-2-02-058/04 “Métodos de muestreo y prueba de materiales para estructuras de Concreto Hidráulico, Resistencia a compresión simple de Cilindros de Concreto”.

A continuación se presentan las fallas más comunes después de realizada la prueba:

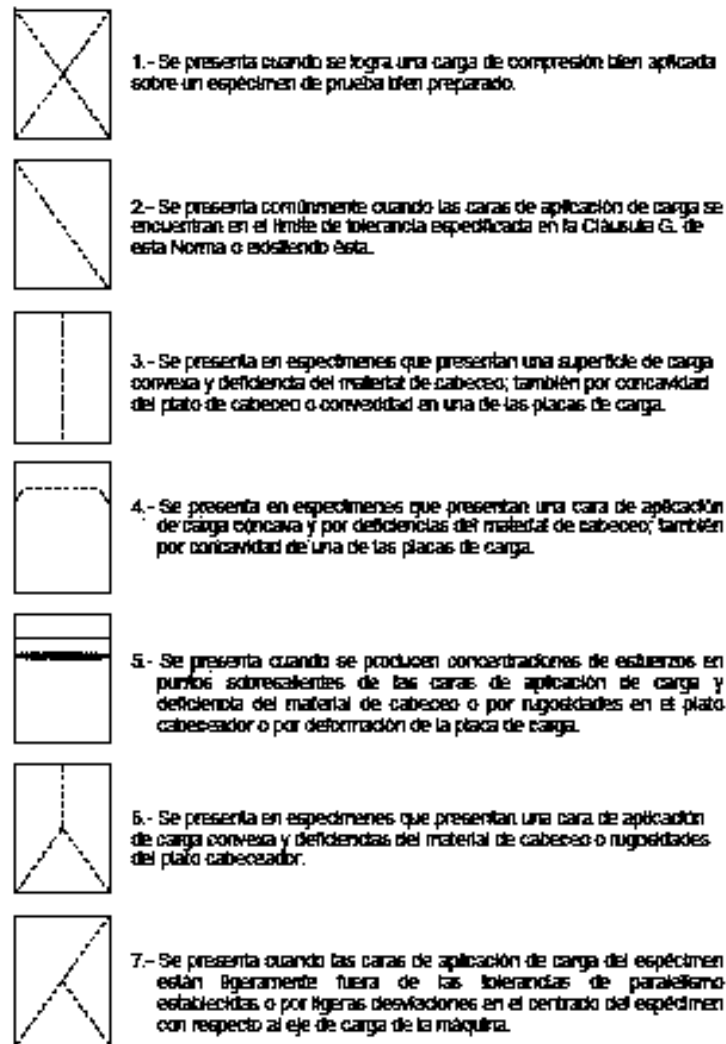


Figura . Fallas comunes por compresión en Cilindros de Concreto M-MMP-2-02-058/04.

De acuerdo con las normas técnicas complementarias del Distrito Federal del año 2004, para la prueba de compresión simple se tiene lo siguiente:

El concreto de resistencia normal empleado para fines estructurales puede ser de dos clases: clase 1, con peso volumétrico en estado fresco superior a 22 kN/m³ (2.2t/m³) y clase 2 con peso volumétrico en estado fresco comprendido entre 19 y 22 kN/m³ (1.9 y 2.2 t/m³).

Los concretos clase 1 tendrán una resistencia especificada, $f'c'$, igual o mayor que 25 MPa (250 kg/cm²). La resistencia especificada de los concretos clase 2 será inferior a 25 MPa (250 kg/cm²) pero no menor que 20MPa (200 kg/cm²).

2.7.2.1.2 Resistencia a Flexión del Concreto.

El objetivo de la prueba es determinar el esfuerzo a flexión del concreto mediante la utilización de una viga con apoyos simples, y cargas en los tercios de la separación entre apoyos, según se establece en la norma ASTM-C78-00.

Fundamento teórico

Este método es utilizado para determinar el esfuerzo a flexión de especímenes preparados y curados de acuerdo con el método de prueba ASTM-C42 o las prácticas ASTM-C31o ASTM C192. Los resultados calculados son reportados como módulo de ruptura. El esfuerzo determinado puede variar por diferencias de tamaño, preparación, condiciones de moldeo y curado de los especímenes.

Aplicación

Una característica del concreto en estado endurecido, de gran relevancia, es la resistencia a la flexión, especialmente en estructuras de concreto simple, tales como pavimentos, en donde adicionalmente aparecen esfuerzos de tracción ocasionados por la flexión de las placas al paso de los vehículos.

Por tanto, los datos obtenidos en éste ensayo pueden ser utilizados en el diseño de las especificaciones técnicas de las mezclas de concreto por utilizar en la construcción de losas o bien de pavimentos, sumado a los proporcionamientos óptimos de materiales para la elaboración de concreto con características establecidas.

Equipo

El equipo consta básicamente de un sistema de apoyos simples sobre los cuales se coloca el elemento por ensayar, éste último debe estar ubicado de forma tal que la distancia mínima entre la cara de sección cuadrada y el punto de apoyo, sea 2,54 cm, asimismo, la separación entre apoyos será igual a tres veces el peralte de la viga que se somete a prueba. Por otra parte el sistema de puntos de carga deberá ser capaz de transmitir la totalidad de la carga aplicada, sin deformarse y sin generar excentricidades de carga, además, la ubicación de los puntos de carga será en los tercios de la longitud existente entre los apoyos de la viga.

El equipo requerido para la realización de la prueba por flexión en concreto debe tener la capacidad de mantener las separaciones especificadas con una dispersión máxima de $\pm 1,3\text{mm}$. Asimismo, los puntos de reacción deben ser completamente paralelos a la dirección de los elementos de carga.

Procedimiento

Una vez que los elementos han sido desmoldados, son llevados a la cámara o pila de curado en donde permanecerán hasta que sean requeridos para la prueba de flexión.

En un lapso de tiempo determinado el elemento será llevado para prepararse con el fin de ser ensayado, para lo cual, en una primera instancia se eliminará el

exceso de agua de la superficie hasta que el prisma tenga condiciones de superficie seca, luego, se coloca la viga sobre los puntos de apoyo, evitando generar excentricidades tanto en la carga como en las bloques de soporte. La carga será aplicada a una tasa constante hasta el punto de falla, esta tasa de aplicación estará entre 0,86 y 1,21 MPa/min.

Cálculos

En caso que la fractura se ubique en el tercio medio de la separación entre apoyos, el cálculo del módulo de ruptura corresponderá a:

$$R = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^2}$$

Donde:

R: Módulo de Reacción, MPa.

P: Carga aplicada, N.

L: longitud libre entre apoyos, mm.

b: ancho de la sección, mm.

d: peralte de la sección, mm.

Ahora bien, si la fractura ocurre en la cara de tensión fuera del tercio medio de la separación entre apoyos, a una longitud no mayor al 5% de la longitud libre, el módulo de ruptura corresponderá a:

$$R = \frac{3 \cdot P \cdot a}{b \cdot d^2}$$

Donde:

a: distancia entre la línea de fractura y el apoyo más cercano en la cara de tensión de la viga, mm.

Por último, en caso que la fractura se ubique fuera del tercio medio de la separación entre apoyos, a una longitud mayor al 5% de la longitud libre, el resultado de la prueba debe ser descartado.

La resistencia a la flexión del concreto se utiliza generalmente al diseñar pavimentos y otras losas sobre el terreno.

La resistencia a flexión del concreto, denominada **Módulo de Ruptura (f_R)** se evalúa mediante el ensayo a flexión de viguetas de concreto simple de 50 cm de longitud y sección cuadrada de 15 cm de lado, con cargas aplicadas en los tercios de la luz. Este parámetro es usado para controlar el diseño de pavimentos de concreto.

La resistencia a la compresión se puede utilizar como índice de la resistencia a la flexión, una vez que entre ellas se ha establecido la relación empírica para los materiales y el tamaño del elemento en cuestión.

Esta resistencia, para un concreto de peso normal se aproxima a menudo de 1.99 a 2.65 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión.

El módulo de rotura es cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión, variando con las características de los agregados.

Esta resistencia es una medida de la resistencia a la tracción del concreto, y es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto de 6 x 6 pulgadas (15 x 15 cm) de sección transversal y largo mínimo de 3 veces el espesor es decir 18 pulgadas o 45cm.

Se puede determinar por medio de 2 pruebas ya sea cargando la probeta en los puntos tercios o cargando únicamente en el punto medio.

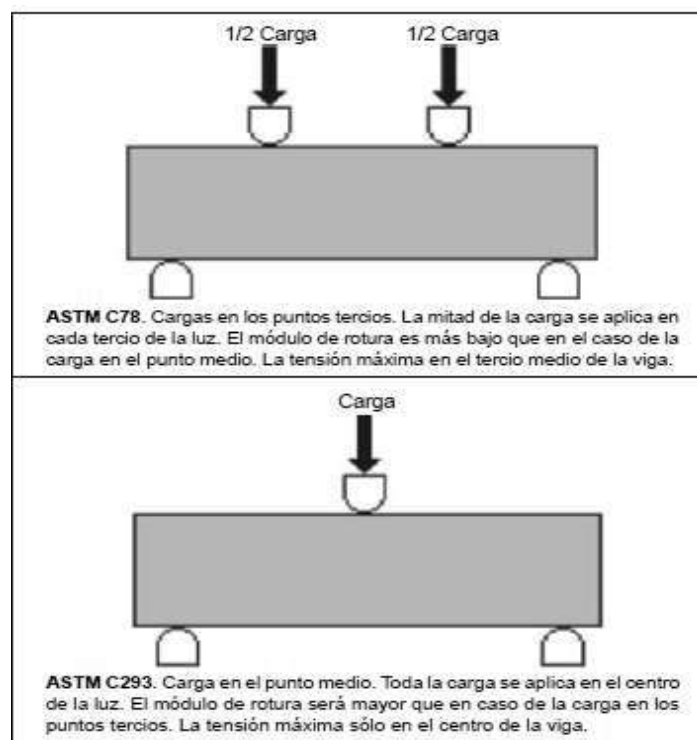


Figura . Fallas comunes por compresión en Cilindros de Concreto M-MMP-2-02-058/04.

Imagen de Prueba de Flexotracción: UNE 83.305:86

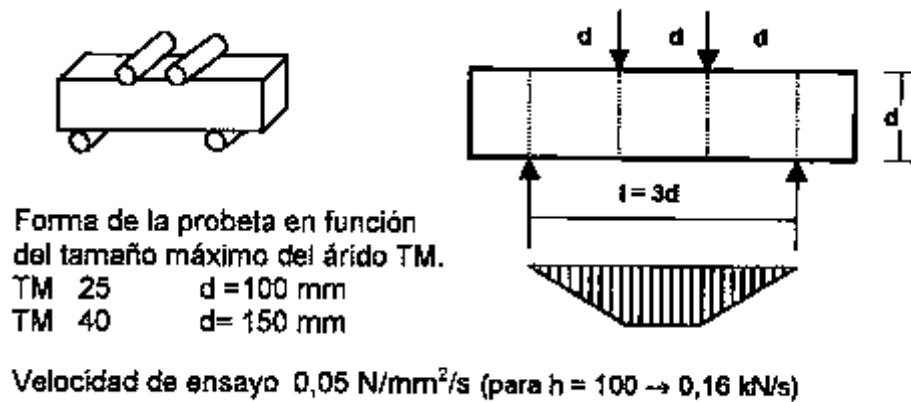


Figura . Fallas comunes por compresión en Cilindros de Concreto M-MMP-2-02-058/04.

Esta prueba se puede realizar en laboratorio o directamente en campo mediante un equipo móvil de prueba, como se muestra en las fotografías:



Figura . Fallas comunes por compresión en Cilindros de Concreto M-MMP-2-02-058/04.

Determinación del módulo de Ruptura en laboratorio.

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal 2004 se tiene:

La resistencia media a tensión por flexión o módulo de rotura, f se puede suponer igual a:

a) concreto clase 1

$$0.63\sqrt{f'c'}, \text{ en MPa } (2\sqrt{f'c'}, \text{ en kg/cm}^2)$$

b) concreto clase 2

$$0.44\sqrt{f'c'}, \text{ en MPa } (1.4\sqrt{f'c'}, \text{ en kg/cm}^2)$$

2.7.2.1.3 Resistencia a Tensión del Concreto.

El valor de la resistencia a la tensión del concreto es aproximadamente de 8% a 12% de su resistencia a compresión y a menudo se estima como 1.33 a 1.99 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

Esta resistencia se mide mediante el ensayo de los cilindros apoyados en su arista, denominado "ensayo brasileño".

La siguiente imagen nos muestra la falla por tensión diagonal de vigas a escala reducida de un micro concreto reforzado.



La SCT para esta prueba nos propone el siguiente método de ensayo para esta prueba en su libro M-MMP-2-02-059/04 “Resistencia a la Tensión de Cilindros de Concreto”.

En él se describe el procedimiento de prueba para determinar la resistencia a la tensión por compresión diametral del concreto.

Las siguientes imágenes nos muestran el dispositivo para marcar líneas diametrales para ejecutar la prueba.

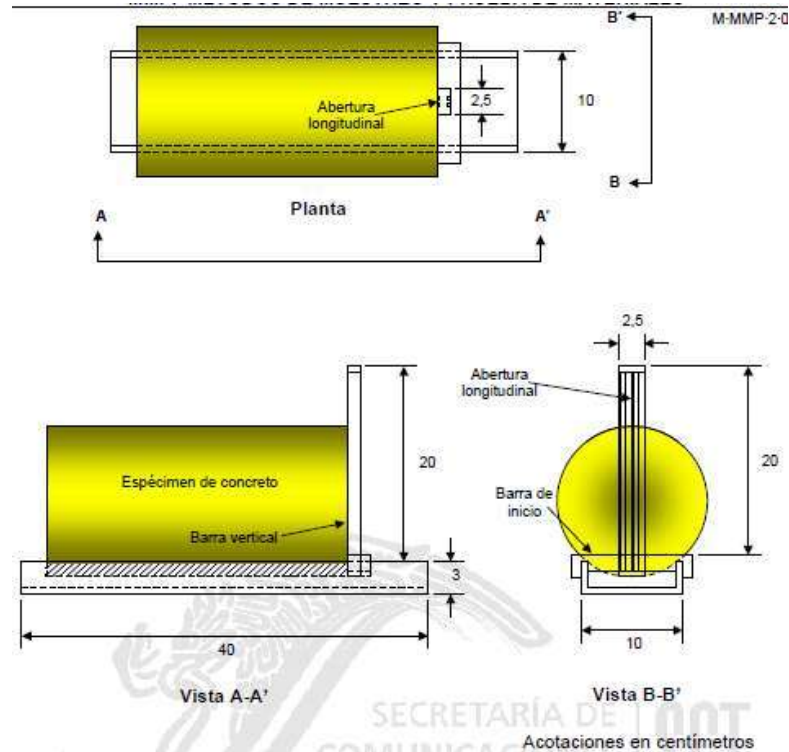


Figura . Fallas comunes por compresión en Cilindros de Concreto M-MMP-2-02-058/04
Imagen de la prueba de Tracción indirecta: (Ensayo Brasileño) UNE 83.306:85

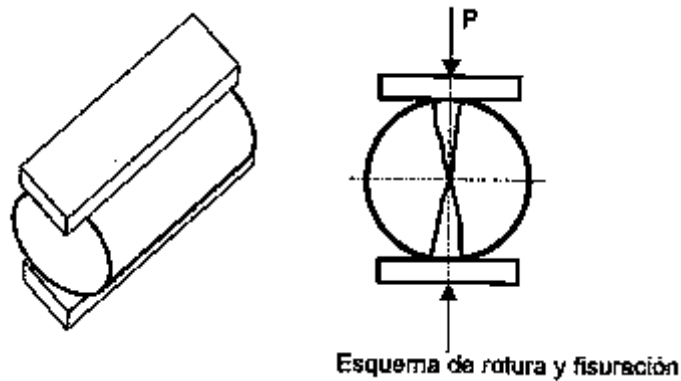


Figura . Fallas comunes por compresión en Cilindros de Concreto M-MMP-2-02-058/04

El resultado de la prueba se calcula con ayuda de la siguiente fórmula:

$$T = \frac{20 P}{\pi l d}$$

Donde:

- T = Resistencia a la tensión por compresión diametral, (MPa)
- P = Carga máxima aplicada, (kN)
- l = Longitud promedio del espécimen, (cm)
- d = Diámetro promedio del espécimen, (cm)

Es importante observar y registrar el tipo de falla y la apariencia del concreto.

Las siguientes imágenes son curvas características de esfuerzo deformación del concreto sometido a carga de compresión uniaxial y carga de tensión uniaxial; de la grafica se observa que la resistencia a tensión es aproximadamente un 10% de la resistencia a compresión.

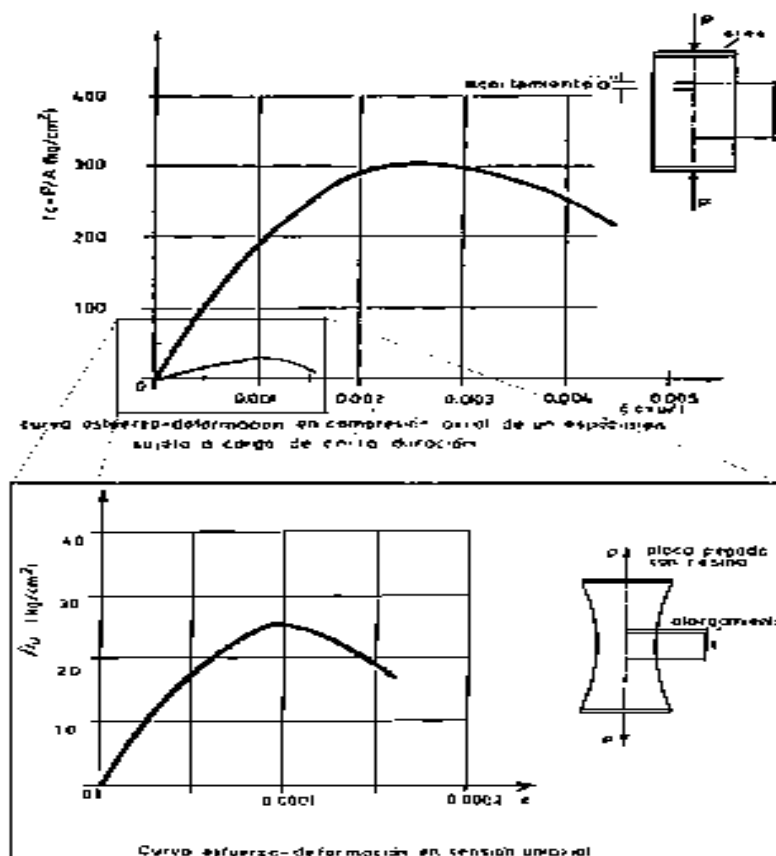


Figura . Fallas comunes por compresión en Cilindros de Concreto M-MMP-2-02-058/04

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal 2004 se tiene:

Se considera como resistencia media a tensión, f_t , de un concreto el promedio de los esfuerzos resistentes obtenidos a partir de no menos de cinco ensayos en cilindros de 150×300 mm cargados diametralmente, ensayados de acuerdo con la norma NMX-C-163.

A falta de información experimental, f_t , se puede estimar igual a:

a) concreto clase 1

$$0.47 \sqrt{f'c'}, \text{ en MPa } (1.5 \sqrt{f'c'}, \text{ en kg/cm}^2)$$

b) concreto clase 2

$$0.38 \sqrt{f'c'}, \text{ en MPa } (1.2 \sqrt{f'c'}, \text{ en kg/cm}^2)$$

2.7.2.1.4 Módulo de Elasticidad del Concreto.

Esta prueba se realiza de acuerdo con la norma oficial NMXC 128 y ASTM C 469.

El módulo de elasticidad, denotando por medio del símbolo E, se puede definir como la relación del esfuerzo normal la deformación correspondiente para esfuerzos de tensión o de compresión por debajo del límite de proporcionalidad de un material. Para concretos de peso normal, E fluctúa entre 140,600 y 422,000 kg/cm cuadrado, y se puede aproximar como 15,100 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

Las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal, establecen lo siguiente:

Para concretos clase 1, el módulo de elasticidad, E_c , se supondrá igual a:

$$4\,400 \sqrt{f'c'}, \text{ en MPa } (14\,000 \sqrt{f'c'}, \text{ en kg/cm}^2) \text{ para concretos con agregado grueso calizo.}$$

$$3\,500 \sqrt{f'c'}, \text{ en MPa } (11\,000 \sqrt{f'c'}, \text{ en kg/cm}^2) \text{ para concretos con agregado grueso basáltico.}$$

Para concretos clase 2 se supondrán igual a:

$$2\,500 \sqrt{f'c'}, \text{ en MPa } (8\,000 \sqrt{f'c'}, \text{ en kg/cm}^2)$$



Figura . Colocación del dispositivo para medición del Módulo de Elasticidad del Concreto.

Cuando los especímenes están sujetos a fuerzas de compresión, estas fuerzas producen deformaciones en el concreto y a partir de ellas se obtiene la gráfica esfuerzo-deformación unitaria, de donde el módulo de elasticidad estático es obtenido. Este tipo de gráficos dependen fundamentalmente de la resistencia a la compresión del material, como se muestra a continuación:

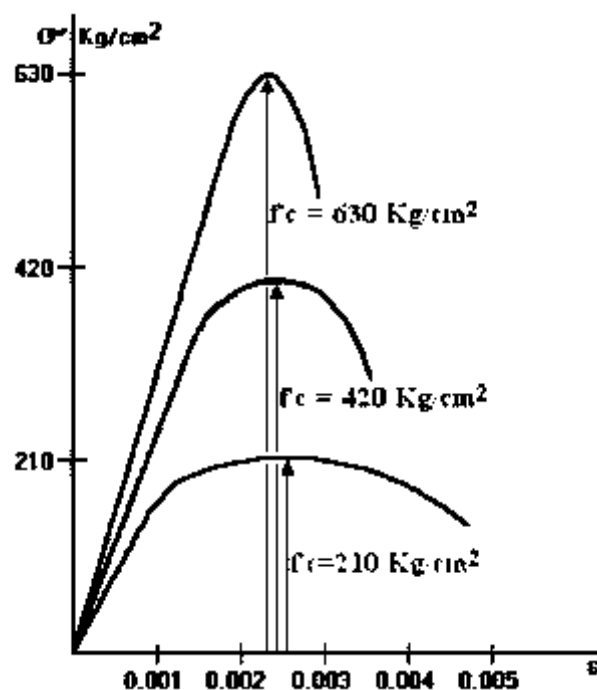


Figura . Gráfica Esfuerzo-Deformación Unitaria para diferentes resistencias del concreto [Romo, 2009].

Todos los concretos presentan un primer rango de comportamiento relativamente lineal (similar a una línea recta en la curva esfuerzo - deformación) y elástico (en la descarga recupera la geometría previa a la carga) ante la presencia incremental de esfuerzos de compresión, cuando las cargas son comparativamente bajas

(menores al 70% de la carga de rotura), y un segundo rango de comportamiento no lineal e inelástico (con una geometría curva en la curva esfuerzo – deformación) cuando las cargas son altas [Romo, 2009].

La pendiente de la curva en el rango de comportamiento lineal recibe la denominación de Módulo de Elasticidad del material o Módulo de Young, que se simboliza “Ec”, que puede calcularse mediante la siguiente expresión a partir de la gráfica esfuerzo-deformación:

$$Ec = \frac{\sigma_{c,1}}{\epsilon_{c,1}}$$

Y cuando no es posible obtener deformaciones a falta del equipo necesario, el ACI (American Concrete Institute) como forma aproximada de calcular el módulo de elasticidad estático del concreto, en función de la resistencia a la compresión del mismo, propone la siguiente expresión, obtenida experimentalmente:

$$Ec = 15,000\sqrt{f'c}$$

Donde:

Ec = Módulo de elasticidad estático del concreto, en Kgf/cm²

f'c = Resistencia a la compresión del concreto, en Kgf/cm²

La expresión anterior es válida para concretos con agregados de masa normal y resistencias normales y medias. En la tabla siguiente se relaciona la resistencia de los concretos utilizados con más frecuencia con su módulo de elasticidad.

Tabla . Módulos de Elasticidad dependiendo de la resistencia del concreto [Romo, 2009]

Resistencia (Kgf/cm ²)	Módulo de Elasticidad Estático (Kgf/cm ²)
210	217,000
280	251,000
350	281,000
420	307,000

2.7.2.2 Pruebas No Destructivas.

Estas pruebas tienen como objetivo obtener las características físicas y mecánicas del concreto sin destruir el elemento.

Entre los métodos no destructivos se encuentran los siguientes:

2.7.2.2.1 Rebote Esclerométrico ó Martillo de Rebote.

Este ensayo determina el valor del número del rebote en concreto endurecido utilizando el denominado martillo Schmidt o martillo suizo. La metodología a continuación se basa en las normas ASTM C 805-97 y ACI 228.1R-89, adicionalmente lo establecido en la “Guía de ensayos no destructivos en estructuras de concreto” de la IAEA.

Fundamento teórico

El valor del número del martillo de rebote es en esencia una medida de dureza de la superficie del concreto. El martillo impacta sobre el concreto con una determinada cantidad de energía mediante un émbolo metálico y la distancia que el martillo rebota es medida.

Equipo

El equipo pesa alrededor de 1.8 kg y se utiliza tanto en laboratorio como en campo. Una vista esquemática del martillo suizo o Schmidt se presenta en la figura; los componentes principales incluyen el cuerpo exterior, el émbolo, el martillo y un resorte. El martillo impacta el área de émbolo y rebota, el martillo mueve el indicador que mide la distancia del rebote. La distancia del rebote es medida en una escala que va de 10 a 100 indicando el denominado “número del rebote”.

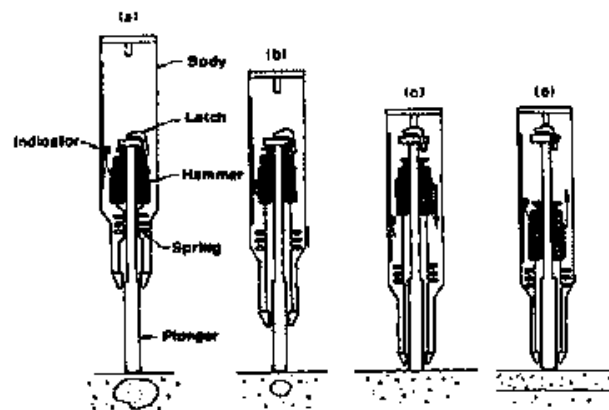


Figura : Componentes del martillo y su secuencia de uso. Tomado de Guidebook on non destructive testing of concrete structures.

Aplicaciones del ensayo

Este método, muy simple de emplear, es utilizado principalmente para verificar la uniformidad del concreto, detectar áreas de concreto de pobre calidad o deteriorado y para estimar el desarrollo de la resistencia en el campo. Además se caracteriza por ser rápido y económico.

En la utilización de este método para estimar esfuerzos es necesario establecer una relación entre el valor de rebote y los esfuerzos (correlaciones) para una

determinada mezcla de concreto y un aparato específico. La relación deberá ser establecida en el rango de resistencia del concreto que sea de interés. Para estimaciones de resistencia durante la construcción se debe establecer la relación para especímenes moldeados en campo o en laboratorio; para el caso de estructuras existentes se debe realizar la relación sobre núcleos de concretos tomados de los lugares en estudio.

Procedimiento

El procedimiento que se describe a continuación es el correspondiente para obtener las relaciones necesarias para la utilización de este equipo en campo como se explica en el apartado anterior.

Un procedimiento de correlación típica es el siguiente:

Primero es necesario preparar cilindros de concreto que cubran el rango de resistencia y condiciones de curado que se encontrará en campo.

Cuando llegue la fecha específica en la que se quiere evaluar el concreto, se colocan los cilindros en la máquina utilizada para ensayos a compresión bajo una carga aproximada al 15% de la resistencia última estimada o bien a una carga de 31 kg/cm² (3 MPa), asegurándose de que el elemento se encuentre en la condición saturada superficie seca.

Se realizan de 10 a 15 lecturas del martillo en distintos puntos, separados al menos 25 mm entre sí. El martillo se debe sostener firmemente y de manera perpendicular a la superficie de falla, presione gradualmente el instrumento hacia la superficie de prueba hasta que el martillo impacte, y lea el valor de rebote en la escala. Se debe tratar de tomar la medida con la misma orientación del instrumento que la que se tenga cuando se utilice en campo.

Determine el promedio de las lecturas del valor de rebote para el cilindro de prueba; si alguna lectura se diferencia por 7 o más unidades en el valor de rebote, este valor debe ser eliminado, si dos o más valores se diferencian de 7 unidades se debe descartar la probeta; posteriormente repita el procedimiento anterior para todos los cilindros siguientes.

Ensaye los cilindros a compresión y grafique el valor de rebote contra la resistencia a la compresión.

Realice el ajuste de la curva mediante el método de mínimos cuadrados.

Factores que influyen en el ensayo

Aunque esta prueba se caracteriza por ser rápida y económica tiene varias limitaciones como las siguientes:

- Requiere de una superficie lisa, ensayar sobre superficies rugosas disminuirá el valor de rebote, así como superficies con algún acabado que las endurezca producirán valores más altos. Para estos casos se puede limar la zona por ser ensayada.
- No evalúa a lo interno el estado de concreto, por tratarse de un método muy superficial.

- Solo el área de contacto del concreto influencia el valor de rebote, por lo que se pueden obtener valores altos o bajos cuando se golpea directamente sobre el agregado o cuando se golpea sobre un vacío respectivamente.
- La orientación del martillo afecta el valor de rebote, dado que el martillo interior es afectado por la acción de la gravedad, así entonces, se tendrán valores distintos según se varíe el ángulo respecto de la horizontal (los instrumentos usualmente traen factores de corrección)
- La forma, el tamaño y la rigidez del espécimen afectan el valor de rebote, así entonces, si el elemento tiene algún movimiento cuando se golpea con el martillo, se debe rigidizar de alguna forma.
- La humedad interna y de la superficie del espécimen.
- El tipo de agregado y de cemento que se utiliza.
- Se sugiere en este método utilizar las gráficas y ecuaciones suministradas por el equipo solo como un valor, seguramente, poco aproximado al real y se recomienda hacer siempre una calibración del equipo para el determinado elemento por evaluar.

Cálculos

Del valor promedio del número de rebote se puede hacer la siguiente aproximación de la resistencia según se especifica en el equipo:

$$f'_c = 173.04 \cdot N + 104.9$$

Donde N es el valor del rebote.

El anterior es sólo un valor aproximado por lo que se recomienda una relación propia para cada concreto específico.

2.7.2.2.2 Método de prueba estándar para determinar la velocidad de propagación de pulso a través del concreto (ASTM C 597).

El equipo consta principalmente de un generador del pulso eléctrico, un par de transductores, un amplificador, un dispositivo de medición de tiempo, una pantalla de proyección del tiempo y cables de conexión.



Figura . Equipo de Ultrasonido.

El propósito fundamental de este ensayo es determinar la velocidad de propagación de ondas de compresión (longitudinales) a través del concreto. La metodología que a continuación se presenta está basada en lo propuesto por las normas ASTM C 597-97 y ACI 228.1R-89, adicionalmente, en lo expuesto por la “Guía de ensayos no destructivos en estructuras de concreto” de la IAEA y en el manual del usuario del equipo.

Fundamento teórico

El pulso de las vibraciones horizontales (ondas longitudinales y transversales) es producida por un transductor electro-acústico, este transductor (emisor) a su vez se mantiene en contacto con la superficie del concreto bajo prueba. Se utiliza un copulante o elemento de unión entre el concreto y el transductor (grasas, vaselina, jabones líquidos, o alguna otra sustancia recomendada por el instructivo del equipo que se utilice), cuya función es asegurar una correcta transmisión del pulso.

Las primeras ondas en llegar al otro transductor (receptor) son las ondas longitudinales (ondas de compresión) y estas son convertidas en una señal eléctrica que registra el tiempo “T” de viaje de la onda de un transductor a otro.

La velocidad del pulso (de las ondas de compresión) está dada por la siguiente ecuación fundamental de la física:

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

Donde:

v = es la velocidad del pulso longitudinal

L = es la longitud del camino

T = es el tiempo que le toma al pulso atravesar el medio

Equipo

El equipo consta principalmente de un generador del pulso eléctrico, un par de transductores, un amplificador, un dispositivo de medición de tiempo, una pantalla de proyección del tiempo y cables de conexión.

El generador del pulso consiste en un circuito que genera pulsos de voltaje (normalmente entre 500 y 1000 voltios) que debe producir como mínimo 3 pulsos por segundo. Los transductores (construidos de materiales piezoeléctricos o algún otro material sensible al voltaje) transforman los pulsos en ondas cuya frecuencia de resonancia depende del transductor que se utilice (de 20 a 150 kHz); las frecuencias bajas son utilizadas para grandes distancias (valor de “ L ”), mientras que altas frecuencias son más apropiadas para distancias pequeñas (desde aproximadamente 100 mm), esto se debe a que los pulsos de alta frecuencia se atenúan más rápidamente que los de bajo frecuencia al paso a través del concreto. La máxima distancia que puede evaluarse para determinado equipo es aquella hasta la cual la precisión es del $\pm 1\%$ dado que la precisión disminuye con la distancia.

Aplicaciones

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 o varias zonas, así como encontrar defectos en el mismo.
- Estimación de espesores de concreto mediante el método indirecto.
- Correlación entre la velocidad y la resistencia (como por ejemplo resistencia a la compresión y flexión), como una medida de aseguramiento de la calidad.
- Estimación del módulo de elasticidad y el módulo de Poisson para el concreto.
- Determinación de la resistencia residual después de daño por incendio, entre otros.

Ventajas

Las lecturas de velocidad del pulso en estructuras de concreto presentan la ventaja sobre otros ensayos, pues dada su flexibilidad se realizan in situ, además, por ser un ensayo no destructivo se pueden realizar el número de lecturas que se deseen, lo que permite tener información más representativa del material que se está evaluando. Las correlaciones para este ensayo pueden ser realizadas con especímenes elaborados en laboratorio (determinado en este trabajo) y también de probetas extraídas del lugar de trabajo.

Procedimiento

Inicialmente se coloca el copulante necesario sobre la cara de los transductores y la zona a ser evaluada (cilindro o viga en este proyecto), además se debe determinar de la manera más precisa posible (0.5% o menor) la distancia que se utilizará entre los transductores (esta distancia corresponde a la mínima distancia posible entre los transductores).

Luego es necesario calibrar el equipo para lograr ajustar el tiempo a cero, esto se hace colocando cara a cara ambos transductores, por lo que la distancia es casi cero, o también para algunos equipos se utilizan patrones de calibración.

Seguidamente se escoge el arreglo o colocación de los transductores según sean las características del elemento que se ensayaría en campo y se obtienen medidas de tiempo. Los transductores hay colocarlos presionando ligeramente sobre la superficie del concreto y esperar a que se estabilice la lectura del tiempo.

Se pueden utilizar las siguientes configuraciones:

- Caras Opuestas (Transmisión directa).
- Caras Adyacentes (Transmisión semi indirecta).
- La misma cara (Transmisión indirecta o de superficie).

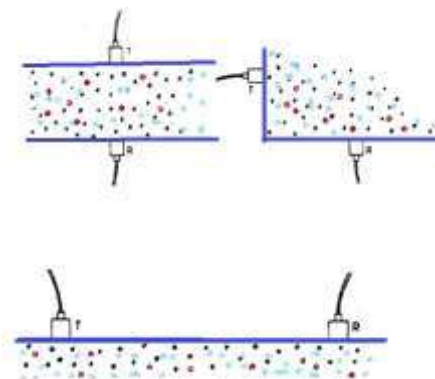


Figura : En la parte superior izquierda se muestra la transmisión directa y la semi-directa a la derecha, el inferior la indirecta. Tomada de Guidebook on non-destructives testing of concrete structures.

El arreglo de transmisión directa es el más satisfactorio porque la propagación del pulso longitudinal es principalmente normal a la cara del transductor. Ésta configuración es la más precisa de todas; para el caso de la transmisión indirecta apenas de un 1% al 3% de la energía detectada en el método directo es detectada en éste para una misma distancia de separación, por lo que, debe ser utilizado cuando solo se tenga una cara de concreto accesible. Los resultados de velocidad para el método indirecto son más bajos que los valores de la transmisión directa en una cuantía que varía aproximadamente del 5% al 20% dependiendo de la calidad del concreto hidráulico, por ello es necesario hacer una serie de mediciones a distintas distancias para eliminar esta incertidumbre.

Es recomendado según la norma ACI 228 que se realicen 5 lecturas de velocidad en el elemento de análisis, sin embargo para efectos de calibración se pueden realizar 3 lecturas para cada viga ó 1 lectura de velocidad en cada cilindro poco antes de que éstos sean sometidos al ensayo destructivo correspondiente. Se debe determinar el promedio de la velocidad, si se tiene para el espécimen, más de una lectura.

Factores en el concreto que afectan la velocidad del pulso

Hay algunos factores que se pueden encontrar en el concreto que afectan la lectura de la velocidad del pulso, entre ellos tenemos:

- Humedad y temperatura del concreto.
- La distancia (trayectoria o camino de tránsito).
- Forma y tamaño del espécimen.
- Efectos de las barras de refuerzo.

Hay que tomar en cuenta los factores anteriores con el fin de corregir los valores de velocidad, según sea el caso.

Existe una serie de correlaciones entre la resistencia a la compresión y la velocidad de onda, entre las cuales se presentan las siguientes suministradas por el manual del usuario:

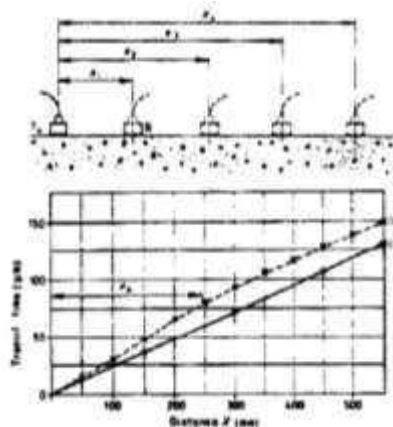


Figura .Gráfica distancia contra tiempo.

Existe una serie de correlaciones entre la resistencia a la compresión y la velocidad de onda, entre las cuales se presentan las siguientes:

$$f^{\wedge}c = \frac{10^{0,000778151 \cdot V + 0,16548568 \cdot 8}}{14,19}; \text{ para agregado}$$

de río y calibración usando vigas

Donde:

$f^{\wedge}c$ = Esfuerzo a la compresión en kg/cm^2
 V = Velocidad

Para el módulo de ruptura se tiene la siguiente:

$$M_K = \frac{10^{0,000547807 \cdot V + 0,25526133 \cdot 1}}{14,19}; \text{ para una}$$

mezcla de 1:6 (cemento : agregado) y calibrado con vigas

Donde:

M_K = Módulo de ruptura en kg/cm^2
 V = Velocidad

Figura .Fórmulas de correlación.

Existen otros tipos de pruebas que se realizan al concreto en estado endurecido de las cuales menciono las siguientes:

✓ **Prueba de Contracción por Secado del Concreto Hidráulico.**

La contracción por secado del concreto se origina básicamente en la pasta de cemento conforme endurece y pierde humedad; en tanto que la función de los agregados para este efecto consiste en restringir la contracción de la pasta del cemento.

✓ **Prueba de Densidad, Absorción y Vacíos en el concreto endurecido.**

De acuerdo con la norma ASTM C 462.

La porosidad del concreto se considera como los espacios vacíos que quedan en la masa del concreto a consecuencia de la evaporación del agua excedente al mezclarse y el aire atrapado durante su fabricación.

2.7.2.2.3 Prueba de Infrarrojo

La temperatura es un parámetro clave en procesos de fabricación, en evaluación de materiales y dispositivos, entre otros. Su medida de forma remota (sin contacto) evita la alteración del objeto de medida, del ambiente que lo rodea o del valor de la medida. La consecución de imágenes térmicas posibilita la observación bidimensional de los mecanismos de transferencia de calor otorgando mayor cantidad de información, en comparación con las técnicas de medida meramente

puntuales. El hecho de añadir la posibilidad de un análisis y un registro temporal de esas imágenes, conduce a un mayor control y conocimiento de los procesos bajo inspección. Por ello, la termografía infrarroja (TI) se posiciona como una alternativa seria, fiable y precisa a otras técnicas de ensayos no destructivos como la Radiología Industrial (RX), Ultrasonidos (UT), Corrientes Inducidas (PE), Partículas Magnéticas (PM), Líquidos Penetrantes (LP), Inspección Visual (IV), Emisiones Acústicas (EA) o Ensayo de Fugas (PF) (González, 2006).

La técnica de termografía infrarroja se basa en la detección de áreas calientes o frías mediante el análisis de la parte infrarroja del espectro electromagnético. La radiación infrarroja se transmite en forma de calor mediante ondas electromagnéticas a través del espacio. De esta forma, mediante el uso de instrumentos capaces de detectar la radiación infrarroja, es posible detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en los materiales (González, 2006).

Generalmente, en la técnica de termografía infrarroja se emplean una o más cámaras que proporcionan una imagen infrarroja (termograma), en la cual las áreas calientes se diferencian de las áreas frías por diferencias en tonalidades. Como ejemplo, podemos observar la figura 10, en la cual los tonos amarillos y rojizos representan las áreas calientes y los tonos azules y violetas representan las áreas frías.

De esta forma uno puede obtener un termograma típico de una pieza o componente sin discontinuidades. Posteriormente, si hubiese alguna discontinuidad, ésta interrumpirá el flujo o gradiente térmico normal, lo cual será evidente en el termograma.



Figura . Imágenes Visual y térmica de concreto en polvo en el puente Martin Luther King en St. Louis, Missouri. Las áreas rojas en la imagen térmica representan concreto en polvo (Malhotra and Carino, 2004).

2.7.2.2.4 Prueba Estándar para las Frecuencias de Resonancia fundamentales longitudinales de especímenes de Concreto

Este método de prueba se utiliza para determinar el módulo de elasticidad dinámico, el módulo dinámico de rigidez y el valor dinámico de Poisson en prismas o cilindros de concreto, es decir, este método está destinado para la detección de cambios significativos en el módulo de elasticidad dinámico de las muestras de laboratorio o campo que han sido expuestas a la intemperie o a otro tipo de influencias de deterioro.

En esta prueba los especímenes son excitados por una fuerza vibratoria. La resonancia es indicada por las vibraciones que tienen una amplitud máxima hasta que la frecuencia inducida cambia. La frecuencia de resonancia es leída con precisión de una escala gradual de un oscilador con manejo de audio variable. El equipo es usualmente conocido como un sonómetro, y ha sido usado para medir Módulos Dinámicos del concreto (ASTM C 215-02, 2003; Malhotra, 1976; Jones, 1962).

El aparato de prueba es el requerido por la ASTM C 215-85, titulada Método de prueba para frecuencias fundamentales longitudinales, transversales, y torsionales de especímenes de concreto (ASTM C 215-02, 2003), en la figura 30 se muestra un diagrama esquemático del aparato. Este equipo ha sido diseñado por varias organizaciones comerciales. El aparato consiste principalmente de dos secciones: una genera vibraciones mecánicas y la otra detecta estas vibraciones (Malhotra, 1976).



Figura . Sonómetro comercial para determinar frecuencias de resonancia

Operación del Equipo.

Se requieren algunas habilidades y experiencias para determinar la frecuencia de resonancia fundamental usando un medidor tipo indicador por que se pueden

obtener varias frecuencias de resonancia correspondientes a diferentes modos de vibración. Los especímenes que tienen relaciones demasiado grandes o pequeñas de la dimensión longitudinal con respecto a la transversal son frecuentemente difíciles de excitar en el modo fundamental de vibración transversal. Se ha sugerido que se obtienen mejores resultados cuando esta relación está entre 3 y 5.

Los apoyos para los especímenes de prueba deben ser de un material que tenga una frecuencia fundamental fuera del rango de frecuencia que se está investigado y deben permitir que el espécimen vibre sin restricciones significantes. Idealmente, los especímenes deben colocarse en los puntos nodales, pero es suficiente con una goma y es preferible cuando los especímenes están siendo usados para estudios de congelación y deshielo.

La vibración fundamental transversal de un espécimen tiene dos puntos nodales, a una distancia de 0.224 veces la longitud, medida de cada uno de los extremos del espécimen. La amplitud de vibración es máxima en los extremos, alrededor de tres quintos de la máxima en el centro, y cero en los puntos nodales. Por lo tanto, el movimiento del receptor a lo largo de la muestra y la observación de la lectura del medidor mostrarán si la muestra está vibrando en su frecuencia fundamental.

Para las vibraciones fundamentales longitudinal y torsional, hay un punto de vibración cero (nodo) en el punto medio del espécimen y la amplitud máxima está en los extremos.

A veces en las pruebas de resonancia de especímenes de concreto, pueden presentarse dos frecuencias de resonancia, las cuales están muy juntas. Algunos investigadores creen que esto es causado por una forma asimétrica de la muestra lo que causa interferencia debido a una vibración del espécimen en otra dirección distinta a la prevista para la prueba (Kesler and Higuchi, 1954). La elección apropiada del tamaño y forma del espécimen prácticamente elimina este problema; por ejemplo en un espécimen de sección transversal rectangular el problema mencionado puede ser eliminado por la vibración del espécimen en la dirección paralela al lado más chico.

En la realización de pruebas de frecuencia de resonancia, es útil tener una estimación de la frecuencia fundamental esperada. La tabla siguiente muestra rangos aproximados de resonancias fundamentales longitudinales y transversales en especímenes de concreto (Jones, 1962).

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

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

Cálculo del módulo dinámico de elasticidad y rigidez, y de la relación de poisson.

Estos Módulos y la relación de Poisson se pueden calcular con las ecuaciones dadas en la norma ASTM C 215-02. Estas son modificaciones de ecuaciones teóricas aplicables a especímenes que son muy largos en comparación con su sección transversal (Pickett, 1945). Las correcciones de las ecuaciones teóricas en todos los casos involucran la relación de Poisson y son considerablemente mayores para las frecuencias de resonancia transversales que para las longitudinales. Por ejemplo, un prisma de 102mm x 102mm x 510mm requiere un factor de corrección de aproximadamente 27% para la frecuencia fundamental transversal, en comparación con menos del 0.5% para la frecuencia fundamental longitudinal. Los modos de vibración longitudinal y flexural dan casi el mismo valor para el Módulo de Elasticidad Dinámico (Jones, 1962). El Módulo Dinámico de Elasticidad puede variar de 14.0GPa, para un concreto de baja calidad a edades tempranas, hasta 48GPa para un concreto de buena calidad a mayores edades (Orchard, 1962). El Módulo Dinámico de Rigidez es aproximadamente el 40% del Módulo de Elasticidad Dinámico (Swamy and Rigby, 1971).

2.7.2.2.5 Prueba de Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y 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 tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. Su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. En cuanto a materiales y equipos puede efectuarse en el

laboratorio sobre testigos de concreto extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo (Torres Acosta, et al, 2010).

Tabla : Criterios de Evaluación de la Resistividad Eléctrica (Durar,2000).

Resistividad del Concreto (ρ) k Ω .cm	Pronóstico de Corrosión
$\rho > 200$	Poco Riesgo
$200 > \rho > 10$	Riesgo Moderado
$\rho > 10$	Alto Riesgo

2.7.3 Pruebas de durabilidad.

2.7.3.1 Prueba de Absorción Capilar.

Esta prueba se considera como la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los espacios capilares cuando el concreto se encuentra en estado líquido y en contacto con el agua. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua, y por tanto a los agentes agresivos que se encuentran en el ambiente.

Este método describe la cinética de la absorción del agua en el concreto por medio de tres coeficientes: (**ϵ** e) porosidad efectiva; (**k**) absorción capilar; y (**m**) resistencia a la penetración del agua; el valor de **m** esta únicamente en función de la estructura del poro, pero no de la porosidad total, estos tres coeficientes nos dan el valor de la absorción capilar [Juan José Carpio et al, 2000].

Objetivo.

Determinar la absorción capilar y la porosidad de morteros y hormigones como una medida de compacidad. Como porosidad de morteros se consideran los espacios vacíos que quedan en la matriz del cementante de morteros a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado en su manipulación. Los poros dependiendo de su tamaño y características se subdividen en:

Poros de gel.- Son de menor tamaño (<15-25 Å) y corresponden a espacios intersticiales del gel de la cal apagada. Estos poros sólo intercambian agua con el

ambiente cuando se secan a humedades < 20%. Estos poros de tamaño reducido impiden el transporte capilar del agua, que sólo puede atravesarlo en estado gaseoso. Los materiales de microporosidad alta son, por lo tanto, casi impermeables a nivel capilar.

Poros capilares.- Son de forma variable y tamaño del orden de 2 nm a 1 µm. Cuando están interconectados y abiertos al exterior constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta de cal apagada endurecida, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes externos. Por ello, la eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para su durabilidad. Permiten el transporte capilar de agua; en estos casos, la cantidad absorbida depende de la capilaridad del material.

Poros de aire.- Son generados por las burbujas de aire atrapadas en la masa del concreto, en el proceso de manipulación tecnológica. No suelen estar interconectados entre sí y su dimensión es variable, aunque generalmente son mayores de 0.05 mm. Aunque afectan a la resistencia mecánica, en cuando a la durabilidad pueden, según el caso, inducir efectos benéficos, este tipo de poro grande tampoco favorece el transporte de capilar de agua.

Como absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando la cal apagada se encuentra en contacto con agua líquida. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agentes agresivos ambientales.

Factores que influyen en la absorción capilar.

-Estructura porosa del material.

Lógicamente, la absorción va a estar muy ligada a los factores que determinan la distribución de tamaño de poros.

Esta propiedad, varía con el tipo de la mezcla y el grado de compactación, siendo esta propiedad muy sensible a este último factor. La absorción aumenta con la relación agua/cal y disminuye en materiales bien curados. El límite inferior de esta propiedad está en torno a $0.1 \text{ mm/min}^{0.5}$ en morteros.

-Contenido inicial de agua.

En la práctica, ninguna estructura de concreto o mortero está completamente seca, por lo que el extrapolar los datos de laboratorio a situaciones reales puede ser bastante complejo.

El contenido de agua que inicialmente existía en la probeta debe estar uniformemente repartido para que se cumpla la relación con la raíz cuadrada del tiempo.

-Temperatura.

La absorción es proporcional a $(\sigma/\eta)^{0.5}$, siendo σ la tensión superficial y η la viscosidad del fluido absorbido. Este valor se duplica si pasamos de 5°C a 35°C, por lo que la absorción se incrementa con la temperatura, aun que muy despacio.

-Fluido absorbido.

La capacidad de absorber de un material varía con el tipo de fluido según la relación $(\sigma/\eta)^{0.5}$. Añadiendo sales al agua se observa una ligera variación en cuando a la velocidad de absorción [San Juan Barbudo, 1992], posiblemente debido a los pequeños cambios de viscosidad y tensión superficial con el agua pura. En general, cualquier sal disuelta puede difundirse a través de los poros hacia el interior pudiendo recrystalizar y producir tensiones y fisuración.

La permeabilidad está íntimamente relacionada con la estructura porosa del material en cuestión, en particular, con los poros capilares. Como ya se ha visto, la porosidad capilar decrece con el tiempo y por lo tanto, la permeabilidad.

La influencia de los áridos, en función de su tamaño, en la permeabilidad del agua. Se puede considerar a nivel práctico, que el árido es impermeable debido a su baja permeabilidad ($10^{-8} - 10^{-12}$ cm/s); cuando mayor sea la proporción de árido se obtendrá un coeficiente de permeabilidad mayor [San Juan Barbudo, 1992].

2.7.3.2 Prueba de Carbonatación.

La carbonatación es la pérdida de alcalinidad del concreto, este fenómeno actualmente afecta a muchas estructuras del país; se lleva a cabo cuando el dióxido de carbono CO_2 reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con un pH de 12 a 13, a carbonato de calcio CaCO_3 que tiene un pH menos alcalino.

El hidróxido de calcio y los iones de sodio (Na) y potasio (K) por su alta alcalinidad, forma en el acero de refuerzo embebido en el concreto una capa pasiva de hidróxido de hierro $\text{Fe}(\text{OH})_2$, que lo cubre y protege de la corrosión. La permanencia de esta capa depende de que el concreto conserve dicha alcalinidad, la que al descender ante la presencia de dióxido de carbono en el concreto, el acero pierda su capa pasiva, se considera un pH menor a 11 para que se inicie este efecto (K. Tuutti, 1982).

Los factores que afectan durante la carbonatación son:

- El contenido de humedad.
- El contenido de CO_2 y SO_2 en el ambiente atmosférico.
- La permeabilidad del concreto.

El contenido de humedad relativa es un ambiental es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50 – 70% aproximadamente ya que a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas los poros se bloquean, evitando su ingreso (R. Montani, 2000).

Tabla : Proceso de Carbonatación en relación con la humedad relativa (R. Montani, 2000).

Humedad Relativa % (HR)	Proceso de Carbonatación
HR > 70%	Evita el ingreso de CO ₂
50% < HR < 70%	Avanza Rápidamente
HR < 50%	No hay suficiente agua para que se disuelva el CO ₂

El contenido de dióxido de carbono en la atmosfera, depende en gran medida de la actividad económico-industrial que se desarrolle en la zona rural, siendo mayores en la primera; aunque para que se inicie el fenómeno de carbonatación en el concreto, se requiere una pequeña cantidad de concentración de CO₂ que normalmente se encuentra en la atmosfera en el rango de 0.03% (ACI 222, 2002).

El objetivo de la prueba es determinar el avance de la carbonatación del concreto por el método de la vía húmeda, con solución de indicador ácido-base (UNE 112-011-94).

La profundidad o el grado de carbonatación se pueden determinar por técnicas petrográficas a través de la observación del carbonato de calcio; también se puede utilizar la prueba de color de fenolftaleína para estimar la profundidad de carbonatación a través de la prueba de pH del concreto(la carbonatación reduce el pH). Con la aplicación de la solución de fenolftaleína en la superficie recién fracturada o cortada, las áreas no carbonatadas se vuelven rojas o moradas, mientras que las carbonatadas no cambian de color.



Fig . Determinación de la profundidad de carbonatación a través del rociado de una solución de fenolftaleína sobre la superficie del concreto recién roto [PCA, Boletín de ingeniería EB201].

2.7.3.3 Prueba de Ataque por Sulfatos y Cristalización.

Los Sulfatos presentes en el suelo y en el agua pueden atacar y destruir un concreto que no fue adecuadamente diseñado. Los sulfatos (de calcio, de sodio, de magnesio) pueden atacar un concreto pues reaccionan con los compuestos hidratados en la pasta de cemento hidratada. Estas reacciones pueden crear presiones suficientes para romper la pasta de cemento, resultando en la desintegración del concreto.

El sulfato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio y aluminato de calcio hidratado y forma etringita y yeso.

El mayor daño producido por estas sales ocurre con el secado de las soluciones saturadas de estas sales, normalmente en ambientes con ciclos de cambios de humedad relativa y de temperatura que alteran las fases mineralógicas. En concretos permeables, expuestos a estas condiciones de humedad y secado, las soluciones de sales pueden ascender hacia la superficie por acción capilar y posteriormente como resultado de la evaporación en la superficie, la fase de solución se vuelve supersaturada y la cristalización de la sal ocurre, generando presiones suficientes para causar la fisuración[PCA, Boletín de ingeniería EB201].

El procedimiento de prueba de ataque por sulfatos en concreto se realiza de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM-C-452-95 Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate.

2.7.3.4 Ensayo Cántabro.

Si bien es sabido que el concreto en estado endurecido no tiene capacidad para resistir esfuerzos a flexión o la que soporta es muy baja. Aparte de que el concreto es muy frágil; se pensó en realizar una prueba que nos permitiera determinar cómo es que el concreto resulta afectado después de someterse a un proceso de abrasión por impacto para determinar la erosión que sufre debido a esta acción. Tomando como base la metodología propuesta por el Dr. Miró Recasens para determinar la pérdida por abrasión en pastillas Marshall mediante el ensayo Cántabro.

Esta metodología para el caso del concreto nos permitirá evaluar las mezclas realizadas con los diferentes materiales para poder así determinar cuál es la

mezcla que nos arroja una mayor resistencia al desgaste por abrasión lo cual es un parámetro que nos determina que tan durable puede ser el concreto bajo la acción repetida de cargas que generen este tipo de desgaste en el concreto y poder así garantizar la mezcla que alcance en determinado tiempo la durabilidad para la que fue diseñado.

2.7.3.5 Prueba de Congelamiento y Deshielo.

El concreto debe tener una buena durabilidad para resistir a condiciones de exposición anticipadas. El factor de intemperismo potencialmente más destructivo es la congelación y deshielo mientras el concreto está más húmedo.

El deterioro es causado por la congelación del agua y su posterior expansión en la pasta, agregado o ambos.

Con el empleo de aire incluido, el concreto es altamente resistente a este tipo de deterioro.

Durante la congelación, el agua desplazada por la formación de hielo en la pasta se acomoda, no siendo perjudicial; las burbujas microscópicas de aire en la pasta ofrecen cámaras para que el agua entre y entonces alivie la presión hidráulica generada.

Cuando la congelación ocurre en el concreto que tiene agregado saturado, presiones hidráulicas perjudiciales se pueden crear también en el agregado. El agua, desplazada de las partículas de agregado durante la formación de hielo, no se puede escapar hacia la pasta circundante suficientemente rápido para el alivio de presión. Sin embargo, para la mayoría de las condiciones de exposición, una pasta de buena calidad, es decir de baja relación agua-cemento va a prevenir la saturación de la mayoría de los agregados.

La siguiente figura nos muestra que para una serie de relaciones agua-cemento que:

El concreto con aire incluido es más resistente a los ciclos de congelamiento y deshielo que un concreto sin aire incluido.

El concreto con baja relación agua-cemento es más durable que un concreto con alta relación agua-cemento.

Un periodo de secado antes de la exposición a la congelación y deshielo beneficia grandemente la resistencia al congelamiento y deshielo del concreto con aire incluido.

El concreto con aire incluido y baja relación agua-cemento, con un contenido de aire del 5% al 8% va a resistir un gran número de ciclos de congelación y deshielo sin presentar fallas [PCA, Boletín de ingeniería EB201].

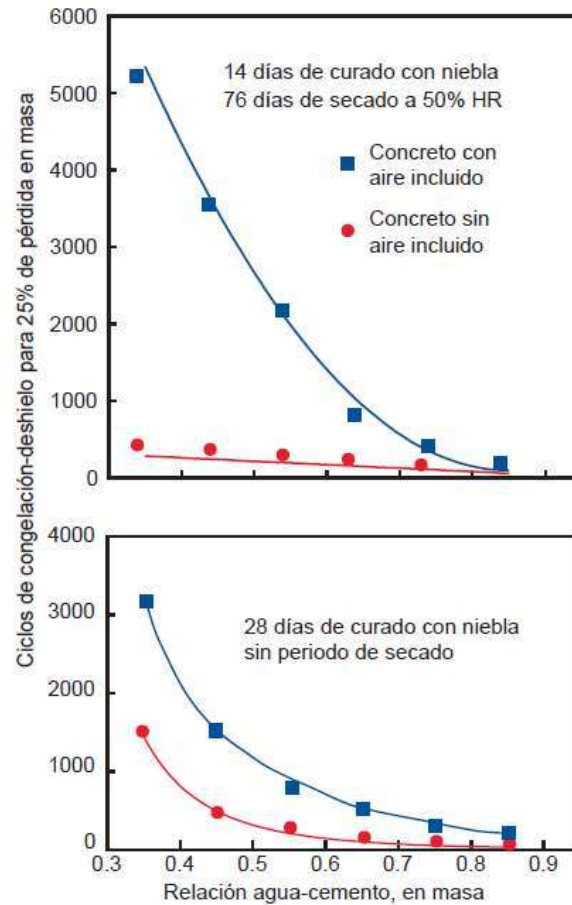


Fig . Relación entre la resistencia al congelamiento y deshielo, relación agua-cemento y desecación de concretos con aire incluido y sin aire incluido (Backstrom y otros 1955).

El procedimiento de prueba empleado en esta investigación es una variante de la prueba AASHTO T-283-02 y de la recomendación AMAAC RA 04/2008.

3 DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN

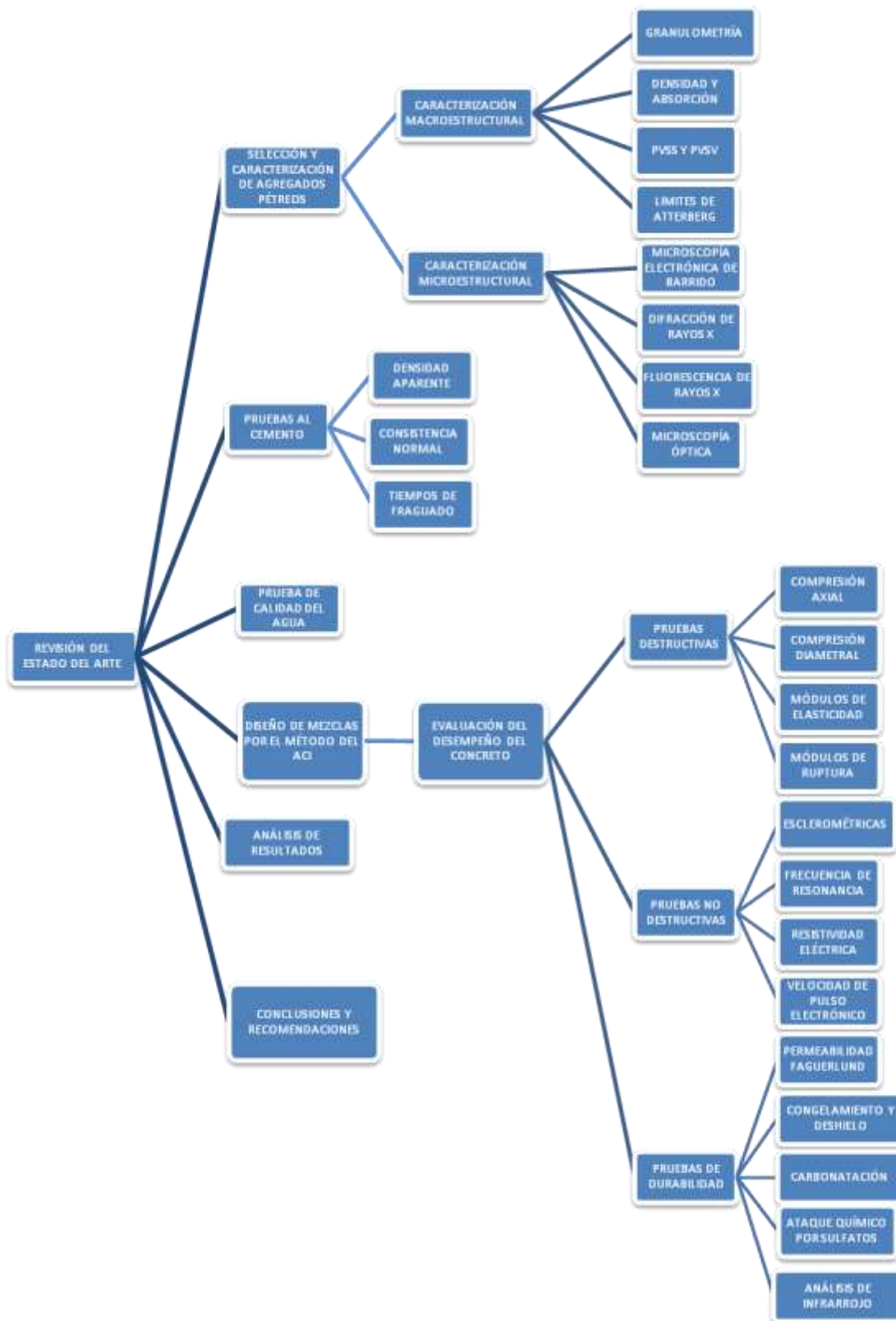




FIGURA 7. Croquis de localización de Bancos de Materiales de la SCT. [www.sct.gob.mx]

Los bancos seleccionados son los siguientes:

- Banco de Origen Calcáreo “Piedras de Lumbre”, ubicado en la ciudad de Zitácuaro.
- Banco de Origen Volcánico (Basalto) “AGC”, ubicado en la salida Morelia-Salamanca.
- Banco de Origen Volcánico “El tigre”, ubicado en la salida Morelia- Quiroga.
- Banco de Origen Volcánico “Zinapécuaro”, ubicado en Zinapécuaro.

4.1.2 Muestreo de los Bancos de Materiales.

Este muestreo se realizó directamente en cada uno de los bancos de materiales, de manera que las muestras recolectadas fueran representativas.

Es importante mencionar que se realizaron 2 muestreos, el primero se realizó a 11 bancos de materiales para analizarse microestructuralmente en la Universidad Autónoma de Barcelona, gracias a una beca para una estancia; y la segunda solo se realizó a los 5 bancos antes mencionados.

La reducción de 11 bancos de materiales a 4 bancos se debe a que es necesario iniciar con los bancos más utilizados en el Estado, y principal mente para dar cabida a posteriores investigaciones, dejando con esto la línea de investigación abierta y poder lograr en un futuro con esto tener un catálogo o por lo menos los resultados; de que bancos de agregados del estado nos arrojan el

máximo u óptimo desempeño de las mezclas y lograr así un ahorro en los costos de edificación, garantizando la durabilidad de las obras civiles.

Los bancos analizados en esta primera etapa fueron los siguientes:

- **Joyitas** (Banco de Grava y Arena Volcánicos).
- **Cerritos** (Banco de Grava y Arena Volcánicos).
- **AGC** (Banco de Basalto, Grava y Polvo de Trituración).
- **SUPRA** (Banco de Basalto, Gravas y Polvo de Trituración).
- **Banco de Arena Negra de Paracho.**
- **Banco de Arena Blanca de Zitácuaro.**
- **Banco de Arena Negra de Valle de Santiago.**
- **Banco de Arena El Tigre.**
- **Calizas de Morelia** (Banco de Caliza, Ubicado en Zitácuaro).
- **Agregados de Rio el Marqués** (Nueva Italia, Grava y arena).
- **Arena de Río** (Acámbaro).

A continuación se presentan algunas imágenes tomadas durante el muestreo de estos:

AGC (Banco de Basalto, Grava y Polvo de Trituración).



Figura 8. Muestreo de grava en Banco AGC.

Esta imagen fue tomada durante el muestreo del Banco de Triturados de AGC, ubicado en carretera Morelia- Salamanca en el Municipio de Mesón Nuevo Michoacán.

SUPRA (Banco de Basalto, Gravas y Polvo de Trituración).



Figura 9. Muestreo de grava en Banco SUPRA.

Imagen tomada durante el muestreo del Banco de Triturados de SUPRA, ubicado en carretera Morelia- Salamanca en el Municipio de Tarímbaro Michoacán, sus agregados son los más empleados para la elaboración de Mezcla Asfáltica, y se emplean también en parte para elaborar Concreto Hidráulico.

Joyitas (Banco de Grava y Arena Volcánicos).



Figura 10. Muestreo de arena y grava en Banco Joyitas.

Banco de Materiales de Joyitas, es un banco de agregados de origen volcánico, de Gravas y Arenas; sus agregados se emplean en la mayoría de construcciones que se realizan en la Ciudad de Morelia, este banco se ubica en la carretera Morelia- Cuto del Porvenir.

Cerritos (Banco de Grava y Arena Volcánicos).



Figura 11. Muestreo de arena y grava en Banco Cerritos.

Este Banco se Ubica en el entronque de la Carretera Morelia- Quiroga, Morelia- Cuto del porvenir, sus agregados son de origen volcánico y es muy empleado en las edificaciones de la ciudad de Morelia, así como para capas de pavimento ya sean de base o sub-base, por citar algunos ejemplos.

Calizas de Morelia (Banco de Caliza, Ubicado en Zitácuaro).



Figura 11. Muestreo de polvo de trituración en Banco Piedras de Lumbre.

Este banco se localiza en la Población de Piedras de Lumbre, Municipio de Zitácuaro Michoacán y pertenece a la empresa CAL MURO SA de CV, es un Banco de Roca Caliza, y se emplea principalmente como materia prima para elaborar Cal, aunque también se comercializa como agregados triturados principalmente en la Ciudad de Zitácuaro, es de importancia su estudio debido a que es el principal banco en el estado con esta clase de agregado.

Una vez realizado los muestreos se procedió a tomar la muestra que se llevaría a estudiar a la Universidad de Barcelona España, realizando la nomenclatura para la identificación de las muestras, la cual se identifica con las

iniciales del banco en estudio y con los números 1 y 2 para diferenciar entre Arenas y Gravas respectivamente.

Nomenclatura	Identificación
A-1	Arena del Banco Acámbaro.
AG-1	Arena (Polvo de Trituración) del Banco AGC.
AG-2	Grava del Banco AGC.
S-1	Arena (Polvo de Trituración) del Banco SUPRA.
S-2	Grava del Banco SUPRA.
PL-1	Arena (Polvo de Trituración) del Banco Piedras de Lumbre.
PL-2	Grava del Banco Piedras de Lumbre.
EM-1	Arena proveniente del Río El Marqués
EM-2	Grava proveniente del Río El Marqués

Nomenclatura	Identificación
E-1	Arena del Banco El Tigre.
P-1	Arena del Banco Paracho.
J-1	Arena del Banco Joyitas.
J-2	Grava del Banco Joyitas.
C-1	Arena del Banco Cerritos.
C-2	Grava del Banco Cerritos.
V-1	Arena del Banco Valle de Santiago.
Z-1	Arena Blanca del Banco de Zitácuaro

4.1.3 Caracterización Macroestructural.

Esta etapa corresponde al segundo muestreo realizado a los bancos de materiales (4 bancos), y queda comprendida por la caracterización de los agregados mediante las siguientes pruebas a nivel Macroestructural:

- Granulometría.
- Peso volumétrico.
- Densidad.
- Absorción.
- Colorimetría.
- Límites de Atterberg.

Para la realización de estas pruebas se procedió de manera inicial al muestreo de los bancos de manera representativa.

4.1.3.1 Granulometría, Pesos Volumétricos, Densidad, Absorción y Colorimetría de los Agregados.

La granulometría es una prueba que nos sirve para determinar la distribución de las partículas de un agregado respecto a su tamaño, clasificándolo mediante la determinación de la curva granulométrica y obtener el tamaño máximo del agregado.

Para las gravas es necesario cribar el material, previamente seco y cuarteado para obtener una muestra representativa de aproximadamente 15 kilogramos, por las siguientes mallas en pulgadas:

2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", y No. 4.

Mientras que para las arenas la granulometría nos sirve para determinar el módulo de finura y de igual manera que en las gravas para determinar la distribución de los tamaños de las partículas, cribándose un material de peso 500gramos por las siguientes mallas:

Números. 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200.

A continuación se presentan algunas imágenes tomadas durante la ejecución de esta prueba:



Figura. Fotografía del Cuarteo de una Arena.



Figura . Fotografía del Cuarteo de una Grava.



Figura . Fotografía del Cribado de una Arena.

La determinación de los pesos volumétricos de las gravas y arenas nos sirve para determinar el peso de material por su unidad de volumen ya sea en forma natural (Peso Volumétrico Seco Suelto), o mediante varillado (Peso Volumétrico Seco Varillado), ayudándonos de un molde cilíndrico con masa y volumen conocidos, como el que se muestra en las imágenes 90 y 91.



Figura . Fotografía de la determinación de la masa del material.

La Densidad y Absorción de las Arenas y Gravas son pruebas que nos ayudan a determinar el volumen efectivo de los agregados, excluyendo los vacíos y la porosidad del material.

Para la determinación de la densidad de los materiales se procede a dejar una cantidad de material saturando durante 24 hrs. y cuando el material este en su humedad superficial se pesa una cantidad establecida, y se vierte este en un recipiente que nos dé el volumen de agua desalojado para con esto conocer la densidad del material, en el caso de las arenas el estado superficialmente seco se determina con la ayuda de un molde troncocónico, mientras que en la grava se determina al ver en el material una apariencia mate.

La absorción de los materiales se hace pesando una cantidad de material superficialmente seco y secándolo hasta peso constante para determinar la cantidad de agua absorbida.

Las siguientes imágenes nos muestran parte de la secuela de prueba:



Figura 94. Fotografía del equipo necesario para la determinación de la densidad de una arena.



Figura 95. Fotografía del estado superficialmente seco de una arena.



Figura 96. Fotografía del estado superficialmente seco de una grava.



Figura 97. Fotografía de la determinación del volumen desalojado.

La prueba de Colorimetría se aplica a las arenas y su objetivo es el de determinar el contenido de materia orgánica, en forma comparativa utilizando una solución incolora; y para determinar el grado de impureza nos auxiliamos de una paleta de colores que van desde transparente (1), ámbar (2), hasta oscuro (5).

En las siguientes imágenes se puede observar de forma precisa la colorimetría de las arenas en estudio:



Figura . Fotografía de Colorimetría en polvo de Caliza (Color Normal 1).



Figura . Fotografía de Colorimetría en Arena de Valle (Color Normal 1).



Figura . Fotografía de Colorimetría en Polvo de Trituración AGC (Color Normal 1).



Figura . Fotografía de Colorimetría en Arena El Tigre (Color Ámbar 2).

Figura . Fotografía de Colorimetría en Arena Zitácuaro (Color Normal 1).

4.1.3.2 Límites de Consistencia o de Atterberg en Finos de Arenas.

Esta prueba tiene como objetivo determinar en forma cualitativa las propiedades físicas del suelo así como el Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) y el Límite de Contracción (LC), de la porción de suelo que pasa la malla No. 40 (0.420 mm).

Con los resultados de esta prueba se puede concluir si el material fino de nuestro agregado es una arcilla, un limo, o una arena, pudiendo tener una combinación de estos.

Para nuestro caso se le realizó esta prueba a los finos de nuestras arenas, enseguida se muestran algunas imágenes tomadas durante la ejecución de la prueba:



Figura . Fotografía del equipo para determinar los Límites de Consistencia.



Figura . Preparación de la muestra en la copa de Casagrande.



Figura . Ranurado de la muestra



Figura . Pastillas de Contracción Lineal y Volumétrica.



Figura . Pastillas de Contracción Lineal y Volumétrica después del secado.

4.2 Caracterización Microestructural.

4.2.1 Preparación de Muestras para Análisis Microestructural.

Para poder realizar algunas pruebas a los agregados fue necesario prepararlos mediante diferentes procesos, los cuales a continuación se describen:

Para realizar las pruebas de:

- Difracción de Rayos X.
- Fluorescencia de Rayos X.

La preparación previa fue de maceración de las muestras a estudiar mediante procedimiento manual y mecánico, hasta lograr en la muestra una consistencia de polvo muy fino, debido a que así se requiere el material para poder ejecutar las pruebas.

A continuación se presenta la secuela de Maceración:

Para el Procedimiento Manual.

Se utiliza un mortero.



Figura . Maceración manual de los agregados.

- Se procede a macerar el material, hasta lograr la consistencia de polvo.
- Es importante que cada vez que se cambie de material se limpien bien los instrumentos usados para evitar la contaminación de los materiales, esto se realiza con Alcohol o acetona.

Procedimiento Mecánico.

- En este caso se cuenta con un equipo vibrador y un macerador, el cual está formado por varias piezas.



Figura . Equipo para Maceración Mecánica.

- El material se introduce entre las piezas para ser triturado, pero se debe de introducir trozos pequeños de material, por lo que antes el material se tritura con un mazo, hasta lograr fragmentos más pequeños.
- Se coloca en la maquina y se tritura durante 3 minutos, se retira de la maquina.
- Se retira cuidadosamente el polvo, se almacena y se limpia el equipo.



Figura . Vertido del agregado para su maceración mecánica.

4.2.1.1 Preparación de Muestras para Microscopía Electrónica de Barrido.

- El equipo y material empleados son: una base para colocar los granos de agregado o fragmentos, película auto adherible, equipo para recubrir el material con oro o carbono.



Figura . Equipo para Recubrir las Muestras.

- La película auto adherible se coloca sobre la base y a su vez encima se colocan los granos de material a estudiar.



Figura . Porta Muestras.

- Enseguida se procede a Cubrir la muestra ya sea con carbón u oro según lo que se desea visualizar, para nuestro caso el recubrimiento se realiza con oro.

Una vez cubierta con oro la muestra se encuentra lista para realizar la prueba.

4.2.1.2 Preparación de Muestras para Elaboración de Láminas Delgadas.

- Los agregados se secan en el horno durante 24 hrs, para una vez secos embeberlos en resina, cuando la resina endurece se procede a cortar la muestra.
- Ya cortada la muestra se coloca en un porta de cristal, para después rebajar la muestra mediante pulido hasta un espesor tal que se puedan visualizar los minerales en el microscopio óptico.



Figura . Muestras Recubiertas con resina.



Figura . Equipo de Corte.

- Cuando se tienen listas las muestras sobre el porta y con el espesor adecuado, las muestras están listas para ser observadas al microscopio.

4.2.2 Prueba de Difracción de Rayos X.

La cristalografía de rayos X es una de las técnicas que goza de mayor prestigio entre la comunidad científica para dilucidar estructuras cristalinas, debido a su precisión y a la experiencia acumulada durante décadas, elementos que la hacen muy fiable.

Es posible trabajar con monocristales o con polvo microcristalino, consiguiéndose diferentes datos en ambos casos. Para la resolución de los parámetros de la celda unidad puede ser suficiente la difracción de rayos X en polvo.

Como no existen dos sustancias que tengan exactamente el mismo modelo de difracción, si se toma en cuenta tanto la dirección como la intensidad de todos los rayos difractados; esto quiere decir que el modelo de difracción es una "huella dactilar" de un compuesto cristalino que permite identificar de modo individual los componentes cristalinos de una mezcla.

Procedimiento de Prueba.

- Con el material macerado hasta su consistencia de polvo, se procede a colocar este sobre una placa, la cual tiene un hueco para generar una pastilla, para lograr la pastilla el material se debe confinar hasta que al voltear la pastilla esta no se caiga.



Figura . Preparación de las Muestras.

- Una vez generada la pastilla esta se coloca sobre del porta muestras, mismo que se monta en el aparato de Difracción.



Figura . Cabina de Difracción.

- Después de colocadas las muestras en el Aparato de Difracción se alimenta la computadora con los datos de las muestras y se enciende el Aparato, las muestras se dejan ensayando 12 horas, durante el ensayo en la computadora se va generando el espectro correspondiente a cada muestra, el cual una vez terminado se analiza mediante un programa el cual identifica los posibles minerales constitutivos de la muestra.

4.2.3 Prueba de Microscopía Electrónica de Barrido.

La técnica de Microscopia electrónica de Barrido se utiliza para la observación y análisis de superficies, suministrando información de relieve, textura, tamaño, forma de grano y composición química de muestras biológicas y minerales.

El Microscopio Electrónico de Barrido permite obtener imágenes de gran resolución en materiales pétreos, metálicos y orgánicos. La luz se sustituye por un haz de electrones, las lentes por electroimanes y las muestras se hacen conductoras metalizando su superficie. Los electrones secundarios se asocian a una señal de TV.

El Procesado de Muestras para Microscopía que comprende:

Tratamiento de muestras tanto orgánicas como inorgánicas para M.E. de Barrido que comprende: lavado, fijación y secado mediante técnica de punto crítico y recubrimiento del material con oro o carbono.

Con ésta metodología se puede realizar estudios de morfología, análisis elemental y mapeo químico.

Para nuestro caso se empleó esta técnica para realizar estudios de análisis elemental, y mapeo químico; se tomaron también fotografías a diferentes acercamientos de las muestras.

Procedimiento de Prueba.

El procedimiento efectuado fue el siguiente:

- Con las muestras ya recubiertas en oro se procede a colocarlas dentro de una base la cual se introduce en el microscopio electrónico de barrido, ayudándonos de un brazo, para introducir y fijar la base al microscopio.



Figura . Equipo para Microscopía Electrónica de Barrido.

- Después se procede a realizar el análisis elemental de las muestras.
- El mapping de la muestra para identificar las zonas donde se encuentran los minerales y sus respectivas fotografías.

4.2.4 Prueba de Fluorescencia de Rayos X.

La fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF) es una técnica de muestreo versátil, rápida y no destructiva (en algunos casos en los que la penetración de los rayos X no fuera suficiente se requerirían cortes o pulidos, dependiendo también de la uniformidad de la muestra) relativamente nueva, que reconoce un gran número de elementos químicos (no compuestos químicos) y presenta los resultados en tiempo real, permitiendo decidir la necesidad de muestreo adicional ante resultados analíticos no concluyentes.

Logra alcanzar unos límites de detección de hasta 0.002% (20 ppm).

Existen dos tipos de ED-XRF. El equipo de mano es rápido y fácil de usar, sin embargo no resulta tan preciso como las máquinas de banco. Ambos tipos presentan una serie de limitaciones que deben ser comprendidas claramente por el analista. Asimismo, requieren seguir un procedimiento apropiado, esencial si se quieren evitar serios errores.

En nuestro caso la fluorescencia se determina con el equipo de mano.



Figura y . Fotografías del equipo móvil de Fluorescencia de Rayos X.



Figura y . Fotografías del medidor de radiación y estuche de equipo móvil de Fluorescencia de Rayos X respectivamente.

Las fotografías anteriores son de las piezas que componen el equipo móvil de Fluorescencia, en el caso del medidor de radiación es importante mencionar que se debe utilizar equipo adecuado, además de contar con un cuarto herméticamente cerrado para evitar la contaminación por radiación del ambiente.



Figura . Fotografía de la muestra preparada para la Fluorescencia de Rayos X.

4.2.5 Mineralogía Óptica de Láminas Delgadas.

Los métodos de Cristalografía óptica aportan una interesante información sobre las estructuras cristalinas que, aunque limitada respecto a las técnicas de rayos X, son muy efectivas y, a veces, un pre- requisito deseable para la determinación de una estructura mediante técnicas de rayos X.

La aplicación principal de la Cristalografía óptica es el estudio de minerales, rocas, o sólidos sintéticos en lámina delgada, usando el microscopio polarizante.

Se trata de la técnica más importante para la identificación y caracterización de una muestra, requiriéndose una cantidad de material muy pequeña, ya que se trata de observaciones microscópicas.

Los métodos de Cristalografía óptica se aplican a materiales transparentes a la luz, ya que son determinados por transmisión de la luz; sin embargo, los cristales opacos poseen también propiedades ópticas características que se estudian con microscopios de luz reflejada.

Procesado de Muestras para Microscopía Óptica:

Fijación, deshidratación, e inclusión en resina, así como la obtención de secciones finas y ultra finas para su análisis en el microscopio.



Figuras 74 y 75. Fotografías del microscopio óptico empleo y ejecución de la prueba por el Dr. Aurelio Álvarez.

4.3 Pruebas realizadas al cemento y agua empleados para la fabricación de Concreto.

El cemento empleado en esta investigación es un cemento Apasco CPC 30R y el agua empleada es el agua de la red suministrada a la Universidad la cual como característica distintiva del agua potable de la red es que a ésta agua no se le adiciona Cloro.

4.3.1 Método de Prueba Estándar para la determinación de la Consistencia Normal del Cemento Hidráulico.

Esta metodología de prueba está destinada a ser utilizada para determinar la cantidad de agua necesaria para preparar las pastas de cemento hidráulico para la realización de esta y otras pruebas. Siguiendo el procedimiento de acuerdo a la normativa mexicana NMX-C-057-1997-ONNCCE.

Procedimiento:

- Se pesan 300 gr de cemento y se vierten sobre una mesa con superficie lisa e impermeable y se forma una especie de cráter con el cemento ayudados con una pequeña espátula.



Figura . Pesaje de muestra de cemento.

- Se fija una cantidad de agua expresada en por ciento. Respecto a la masa del cemento seco, se mide en la probeta graduada y se vierte en el centro del cráter (echando a andar un cronómetro al caer el agua sobre el cemento).
- Con la espátula se lleva el material de las orillas del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca. (Esto debe realizarse en un máximo de 30 segundos).

- En otro ciclo de 30 segundos consecutivos a los anteriores se deja reposar la mezcla para que la humedad se homogenice. (Aprovechando el operador a colocarse guantes de hule ligeramente húmedos).



Figura . Mezclado de muestra de cemento.



Figura . Amasado de muestra de cemento.

- Se hace el amasado de la pasta en un tiempo global de 1.5 minutos contados a partir de los anteriores mediante la siguiente secuela:
- En los primeros 30 segundos se mezcla perfectamente la masa con las manos, golpeando la mezcla, con la parte pesada de las manos hasta lograr una pasta uniforme y homogénea.
- En otros 30 segundos se forma una esfera con la pasta y se completa la operación lanzándola de una mano a otra, seis veces, manteniendo las manos separadas por una distancia de 15 cm.



Figura . Pasta de cemento.

- En los últimos 30 segundos de los 1.5 minutos, se descansa la esfera en la palma de una mano y se introduce a presión dentro del anillo cónico del aparato de Vicat por la base mayor, el cual se sostiene con la otra mano, llenando completamente el anillo con la pasta (la otra boca se descansa sobre un cristal).



Figura . Muestra de cemento en anillo de Vicat.

- El sobrante de la pasta sobre la base mayor se quita mediante un movimiento de la palma de la mano, a 90 ° de la dirección del movimiento con el que se introdujo la bola de pasta en el anillo, enseguida se coloca el anillo por su base mayor sobre la placa “H”.
- El sobrante de la pasta se quita de la base menor mediante un corte oblicuo con el filo de la cuchara inclinada ligeramente sobre la base superior, si es necesario se alisa la superficie con el filo de la cuchara sin presionar la pasta.



Figura . Enrasado de muestra de cemento.

- Todo el conjunto constituido por la placa, pasta y anillo se lleva al aparato de Vicat procurando que quede centrado con respecto a la barra “B”. Se desliza la barra “B” hasta que toque con la parte “C” la superficie de la pasta confinada en el anillo, luego se ajusta el índice corredizo sobre la barra “B” al acero superior de la escala, o bien se hace una lectura inicial y se suelta la barra inmediatamente, esto no debe exceder los 30 segundos a partir del instante en que se terminó de hacer la pasta. El aparato debe permanecer libre de vibraciones durante la prueba.



Figura . Lectura en aparato de Vicat.

- Se considera que la pasta tiene una consistencia normal cuando la barra “B” con extremo “C” baje $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ a partir de la superficie original en un intervalo de 30 segundos contados desde el instante en que soltó dicha barra. Deben hacerse varias pruebas con distintos porcentajes de agua hasta que se obtenga la consistencia normal. Cada que se haga una prueba, se debe usar una porción nueva de la muestra de cemento que se prueba.

Cálculo:

La cantidad de agua que se requiere para obtener la consistencia normal (CN) se expresa en por ciento de la masa del cemento seco, calculándose hasta décimos de por ciento y se reporta al 0.5 % más próximo como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\text{CN} = \frac{\text{Mililitros de agua}}{\text{300 gr de cemento}} \times 100 = \underline{\hspace{2cm}} \%$$

4.3.2 Método de Prueba Estándar para la determinación del Tiempo de Fraguado del Cemento Hidráulico.

Con este método se efectúa la determinación del tiempo de fraguado de las pastas de cementantes hidráulicos, midiendo su resistencia a la penetración de la aguja del aparato de Vicat. La normativa empleada para esta prueba es la norma mexicana NMX-C-059-2006-ONNCCE.

El tiempo de fraguado se ve afectado por el porcentaje y la temperatura del agua utilizada, la cantidad de amasado que la pasta recibe, por la temperatura y la humedad del aire del cuarto de mezclado y por la humedad del cuarto húmedo.

La SCT describe esta prueba mediante su libro M MMP 2 02 006/04 “Tiempo de Fraguado del cemento por el método Vicat”.

Esta prueba permite determinar el tiempo de fraguado inicial y final de una pasta elaborada con cemento portland.

La prueba consiste en colocar sobre la superficie de una probeta elaborada la muestra del cemento una aguja de Vicat, midiendo la penetración de la aguja dentro de la probeta, repitiendo las penetraciones hasta que se obtenga la penetración deseada, midiendo el tiempo registrado desde el inicio de la prueba.

Procedimiento:

- Una vez terminado el moldeado con la pasta de cemento realizado en la prueba de consistencia normal, la muestra se coloca en forma de circular con espesor de 1cm aproximadamente sobre un cristal y se coloca el espécimen de prueba en el cuarto húmedo.



Figura . Preparación de muestra de cemento para determinar sus tiempos de fraguado.

- Después de permanecer 30 minutos en el cuarto húmedo, se determina la penetración de la aguja de 1 mm de diámetro del aparato de Vicat y posteriormente cada 15 minutos, hasta que se obtenga una penetración de 25 mm o menor.
- Para la determinación de la penetración, se baja la barra “B” hasta que la aguja “D” quede en contacto con la superficie de la pasta, en este punto se fija la barra “B” con el tornillo “E”.
- Se coloca el indicador “F” a una lectura cero en la escala, o se toma una lectura inicial.
- Se afloja el tornillo “E”, con lo que la barra queda suelta y cae sobre la superficie de la pasta en la cual penetra. A los 30 segundos de haber caído se aprieta el tornillo “E” y se toma la lectura en la escala para determinar la penetración de la aguja.
- La barra debe soltarse aflojando el tornillo “E” y caer libremente cuando se efectúen las determinaciones de tiempo de fraguado. Las penetraciones no deben efectuarse a una distancia menor de 5 mm una de otras y ninguna de ellas se hará a una distancia menor de 10 mm de la parte interior del molde.

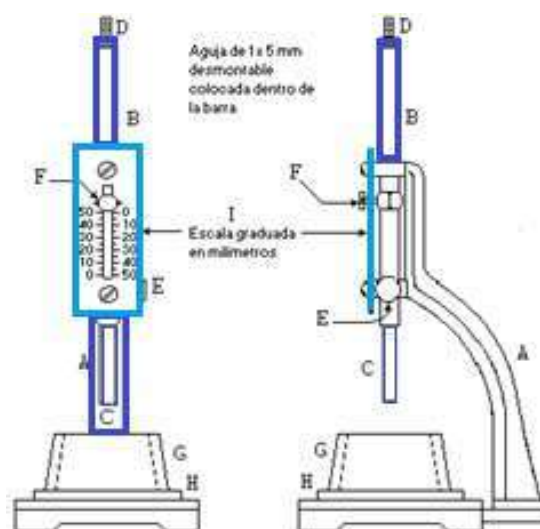


Figura . Esquema del Aparato de Vicat (NMX-C-057-1997-ONNCCE).

- Se registran todas las lecturas de las penetraciones y por interpolación se determina el tiempo correspondiente a la penetración de 25 mm; este es el tiempo de fraguado inicial. El tiempo de fraguado final es aquel en el que la misma aguja no penetra visiblemente en la pasta.



Figura . Fraguado inicial y final del cemento.

Cálculo:

Para esta prueba la normativa específica un tiempo de fraguado mínimo de acuerdo con la Normativa del Cemento Hidráulico NMX-C-414-ONNCCE-2004.

Tabla . Especificaciones Físicas del Cemento (NMX-C-414-ONNCCE-2004).

TIEMPO DE FRAGUADO (min)	
<i>Inicial</i>	<i>Final</i>
45 mínimo	600 máximo

4.3.3 Método de Prueba Estándar para la Determinación de la Densidad Aparente del Cemento Hidráulico.

Este método de prueba cubre la determinación de la densidad del cemento hidráulico y su utilidad particular en la relación con el diseño y control de mezclas de concreto, rigiéndose de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-152-1997-ONNCCE.

Para los efectos de esta norma, se entiende por Densidad de los Cementantes Hidráulicos, la relación de la masa del cementante en gramos entre el volumen en mililitros que desplaza al introducirse en un líquido (Keroseno), con el cual no se efectúe reacción química alguna.

Procedimiento:

- Se llena el matraz Lechatelier con keroseno libre de agua o nafta a un nivel medido entre cero y un mililitro. La parte interior del matraz arriba del nivel del líquido debe secarse en caso necesario. Se registra la primera lectura después de haber sumergido el matraz en un baño de agua a la temperatura del laboratorio.



Figura . Llenado del matraz Lechatelier con keroseno.

- Se debe tener la precaución de que la temperatura del baño sea constante durante la prueba de modo que la variación de la temperatura del líquido en el matraz al momento de tomar la lectura inicial y final, no tenga una variación mayor de 0.2 °C.

- Se pesa aproximadamente 60 g de cementante con una aproximación de 0.05 g y se introduce en pequeñas porciones dentro del matraz.



Figura . Baño maría del matraz Lechatelier con keroseno.

- Se debe tener cuidado de evitar salpicaduras y que el cementante se adhiera a las paredes interiores del cuello superior del matraz.
- Se coloca el tapón al matraz y se desaloja el aire que haya sido atrapado al introducir el cementante en el líquido, para lograr esto, se gira el frasco tomándolo entre las manos, en posición inclinada, o se hace rodar en posición inclinada sobre una superficie plana que conviene cubrir con una material que proteja al matraz de una posible ruptura.



Figura . Desalojo de Aire del Matraz.

- La segunda lectura se debe tomar estando el líquido en la parte graduada superior y después de sumergir el frasco en el baño de agua durante un tiempo suficiente para estabilizar la temperatura.

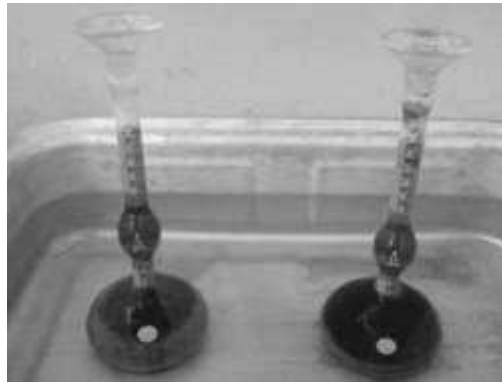


Figura . Toma de lectura del Matraz.

Cálculo:

La diferencia entre las lecturas inicial y final representa el volumen del líquido desplazado por la masa de cementante empleado en la prueba.

Calculando la Densidad Aparente mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

D = densidad el cementante hidráulico, en Mg/m³ o g/cm³

M = masa del cementante hidráulico, en gr

V = volumen del líquido desalojado, en cm³

4.3.4 Determinación de la Calidad del Agua para elaborar Concreto Hidráulico.

La determinación de la calidad del Agua se realiza de acuerdo a lo establecido en la Normativa mexicana NMX-C-122-ONNCCE-2004.

Esta normativa nos establece los valores característicos y Límites Máximos permitidos tolerables de sales e impurezas que podrán contener las aguas empleadas para la fabricación del concreto hidráulico.

Tabla . Valores Característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas(NMX-C-122-ONNCCE-2004).

Sales e Impurezas	Cementos ricos en Calcio Límites en p.p.m.	Cementos Sulforresistentes Límites en p.p.m.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (Limos y Arcillas).	2,000	2,000
En aguas recicladas (Finos de Cemento y Agregados).	50,000	35,000
Cloruros como CL (a)		
Para concreto con acero de pre esfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambientes húmedos o en contacto con metales como aluminio, fierro galvanizado y otros similares.	700 (c)	1,000 (c)
Sulfato como $SO_4^{=}$ (a)	3,000	3,500
Magnesio como Mg^{++} (a)	100	150
Carbonatos como CO_3	600	600
Dióxido de Carbonato disuelto como CO_2	5	3
Álcalis totales como Na^+	300	450
Total de Impurezas en solución	3,500	4,000
Grasas o Aceites	0	0
Materia Orgánica	150 (b)	150 (b)
Valor de pH	No menor de 6	No menor de 6.5

- Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.
- El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX-C-088.
- Cuando se use Cloruro de Calcio ($CaCl_2$) como aditivo acelerante, la cantidad de este debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de Cloruros en la tabla.

4.4 Diseño de Mezclas de Concreto Hidráulico con Criterio de Durabilidad ACI

En este apartado se diseñaron cuatro mezclas con relación agua-cemento de 0.50 que es el criterio de Durabilidad que nos establece el ACI; también se diseñaron otras cuatro mezclas con una relación agua-cemento de 0.65, que serían las que nos marcarían la pauta para poder identificar los beneficios en cuanto a Durabilidad se refiere entre esas dos relaciones agua cemento.

Como se mencionó en el apartado 4.3 el cemento que se empleó fue Cemento Apasco CPC 30R (Cemento Portland Compuesto de Resistencia Rápida) y el agua empleada fue de la red de agua potable de CU.

Las mezclas realizadas fueron elaboradas con mezclas de materiales y se nombraron con la nomenclatura que se describe en las siguientes tablas:

Tabla . Nomenclatura de los materiales y relaciones a/c utilizados.

Nomenclatura	Descripción
A	Grava de ¾" de Origen Basáltico proveniente del Banco AGC.
C	Grava de ¾" de Origen Calcáreo proveniente del Banco Piedras de Lumbre.
T	Arena Negra de Origen Volcánico proveniente de la Mina "El Tigre"
Z	Arena Blanca de Origen Volcánico proveniente de la Mina "Zitácuaro"
050	Relación agua/cemento (concepto de Durabilidad)
065	Relación agua/cemento (mezcla convencional)

Tabla . Nomenclatura de las mezclas realizadas para esta investigación.

Nomenclatura	Descripción
AT050	Mezcla con relación a/c de 0.50, fabricada con Grava de AGC y Arena de mina el Tigre.
AZ050	Mezcla con relación a/c de 0.50, fabricada con Grava de AGC y Arena de mina Zitácuaro.
CT050	Mezcla con relación a/c de 0.50 fabricada con Grava de Caliza y Arena de mina el Tigre.
CZ050	Mezcla con relación a/c de 0.50 fabricada con Grava de Caliza y Arena de mina Zitácuaro.
AT065	Mezcla con relación a/c de 0.65, fabricada con Grava de AGC y Arena de mina el Tigre.
AZ065	Mezcla con relación a/c de 0.65, fabricada con Grava de AGC y Arena de mina Zitácuaro.
CT065	Mezcla con relación a/c de 0.65 fabricada con Grava de Caliza y Arena de mina el Tigre.
CZ065	Mezcla con relación a/c de 0.65 fabricada con Grava de Caliza y Arena de mina Zitácuaro.

El procedimiento descrito en el documento de diseño ACI 211, se programó en una hoja de Excel obteniéndose los proporcionamientos para cada mezcla por metro cúbico y con los pesos de cada material para elaborar 50 litros de Concreto.

4.4.1 Método de Prueba Estándar para determinar el Revenimiento del Concreto Hidráulico

El Revenimiento es una medida de la consistencia del concreto fresco en término de la disminución de altura. Este método de prueba determina el revenimiento del concreto ya sea en el laboratorio o en campo de acuerdo con la NMX-C-156-1997-ONNCCE.

Procedimiento:

- Después de haber obtenido una muestra representativa de la mezcla elaborada, se remezcla el concreto con una pala o cucharón lo necesario para garantizar uniformidad en la mezcla y se procede a hacer la prueba inmediatamente.



Figura . Obtención de muestra representativa de concreto.

- Se humedece el molde; se coloca sobre una superficie horizontal, plana, rígida, húmeda y no absorbente. El operador lo debe mantener firme en su lugar durante la operación de llenado, apoyando los pies en los estribos que tiene para ello el molde.
- Se llena el molde con tres capas aproximadamente de igual volumen. La primera capa corresponde a una altura aproximada de 7 cm, la segunda capa debe llegar a una altura de aproximadamente 15 cm y la tercera, al extremo del molde.
- Se compacta cada capa con 25 penetraciones de la varilla introduciéndola por el extremo redondeado, distribuidos uniformemente sobre la sección de cada capa, por lo que es necesario inclinar la varilla ligeramente en la zona perimetral; aproximadamente la mitad de las penetraciones se hacen cerca del perímetro, después, con la varilla vertical se avanza en espiral hacia el centro.

- Se compacta la segunda capa y la superior a través de todo su espesor, de manera que la varilla penetre en la capa anterior aproximadamente 2 cm, para el llenado de la última capa se coloca un ligero excedente de concreto por encima del borde superior del molde, antes de empezar la compactación. Si a consecuencia de la compactación, el concreto se asienta a un nivel inferior del borde superior del molde, a la décima y/o vigésima penetración, se agrega concreto en exceso para mantener su nivel por encima del borde del molde, todo el tiempo.



Figura . Llenado del cono de Abrams.

- Después de terminar la compactación de la última capa, se enrasa el concreto mediante un movimiento de rodamiento de la varilla. Se limpia la superficie exterior de la base de asiento, e inmediatamente se levanta el molde con cuidado en dirección vertical.
- La operación para levantar completamente el molde de los 30 cm de su altura, debe hacerse en $5\text{ s} \pm 2\text{ s}$, alzándolo verticalmente sin movimiento lateral o torsional. La operación completa desde el comienzo del llenado hasta que se levante el molde, debe hacerse sin interrupción y en un tiempo no mayor de 2.5 min. Se mide inmediatamente el revenimiento, determinando el asentamiento del concreto a partir del nivel original de la base superior del molde, midiendo esta diferencia de alturas en el centro desplazado de la superficie superior del espécimen. Si alguna porción del concreto se desliza o cae hacia un lado, se desecha la prueba y se efectúa otra con una nueva porción de la misma muestra.



Figura . Determinación del Revenimiento.

4.4.2 Método de Prueba Estándar para de determinar la Masa Unitaria del concreto

Este método de prueba se utiliza generalmente para determinar los valores de masa volumétrica (o masa unitaria) del concreto fresco. El nombre correcto de la masa unitaria es masa por unidad de volumen siguiendo lo establecido en la NMX-C-162-ONNCCE-2000.

Procedimiento:

- Se coloca el concreto en tres capas de igual volumen aproximadamente. Cada capa se compacta con 25 penetraciones de la varilla si el volumen es de 14 litros o menos; y con 50 penetraciones si el volumen es mayor de 14 litros. La varilla debe penetrar en la capa inferior en todo su espesor, pero sin golpear el fondo del recipiente.
- Se distribuyen las penetraciones de la varilla uniformemente en toda la superficie del concreto. Para las dos capas superiores, la varilla debe penetrar aproximadamente 20 mm en la capa inmediata inferior.



Figura . Llenado del Recipiente para determinar la masa unitaria del concreto.

- Después de compactar cada capa, se deben dar de 10 a 15 ligeros golpes con el martillo o mazo apropiado a los lados del recipiente, hasta que se cierren los huecos dejados por la varilla de compactación y se liberen las burbujas o bolsas de aire que pudieran estar atrapadas. Al agregar la última capa se debe de evitar el rebosamiento.

- Al terminar la compactación se enrasa la superficie del concreto con la placa enrasadora hasta dejar la superficie pulida y justo a nivel con el borde del recipiente.
- Después de enrasar, se limpia todo el exceso de concreto adherido en el exterior del recipiente y se determina la masa del concreto con la precisión de 0.1% de la carga de prueba, cuidando que la báscula se encuentre nivelada, calibrada y fuera de corrientes de aire.



Figura . Determinación del peso del concreto.

Cálculo:

La determinación de la masa unitaria del concreto se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$M_u = \frac{G - T}{V}$$

Donde:

M_u = masa unitaria del concreto, en Kg/cm³.

G = masa del concreto más el recipiente, en Kg.

T = masa del recipiente, en Kg.

V = volumen del recipiente, en m³.

4.4.3 Método de Prueba Estándar para la Elaboración de Especímenes de Prueba en el Laboratorio

Este método establece los requisitos estandarizados para la preparación de los materiales utilizados para las pruebas de resistencia a la compresión, a la flexión y a la tensión diametral; las mezclas de concreto y la toma de muestras en condiciones de laboratorio. Si la preparación de muestras se controla como se estipula en la normativa NMX-C-159-ONNCCE-2004, las muestras pueden ser usadas para revelar información con los siguientes fines: mezclas de dosificación para concreto de proyecto, evaluación de mezclas de diferentes materiales, correlación con pruebas no destructivas y proporcionar muestras con fines de investigación.

Procedimiento:

- Se obtiene la fracción representativa de la mezcla del concreto para elaborar los especímenes.
- Se coloca el concreto dentro del molde, con el número de capas y espesor especificado.



Figura . Llenado del molde en capas de concreto.

- Se varilla cada capa con el extremo redondeado empleando el número de penetraciones y tamaño de varilla especificado.
- Se distribuyen los golpes uniformemente en toda la sección transversal del molde y para cada capa superior, permitiendo que la varilla penetre aproximadamente 10 mm dentro de la capa inmediata inferior, cuando el espesor de esa capa sea menor a 100 mm, y aproximadamente 20 mm cuando su espesor sea de 100 mm o más.



Figura . Varillado del concreto en el molde.

- Después de compactar cada capa se debe golpear ligeramente con el mazo de hule las paredes del molde para eliminar hasta donde sea posible las oquedades que deja la varilla.



Figura . Expulsión del aire en el concreto.

- Después de la compactación, se termina la superficie superior enrasándola con la varilla punta de bala, haciéndola rodar por la superficie.



Figura . Enrasado de los especímenes.

- Para evitar pérdidas de agua por evaporación, se recomienda cubrir los cilindros con bolsas de plástico.

4.4.4 Método de Prueba Estándar para el Curado de Especímenes de Prueba en el Laboratorio.

El curado es el procedimiento para mantener un contenido de humedad y temperatura conveniente, evitando la pérdida de agua por evaporación, durante la hidratación de los materiales cementantes en el concreto recién colado.

Es uno de los pasos con mayor importancia después del colado y terminado del concreto, es el último y uno de los pasos más fundamentales de las etapas de la construcción.

Para su apropiada realización nos apoyamos del procedimiento establecido en la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004.

Procedimiento:

- Para evitar la evaporación del agua en los especímenes de concreto sin fraguar, se deben cubrir inmediatamente después de terminados, de preferencia, con una placa no absorbente y no reactiva, o con una tela de plástico durable impermeable, hasta que los especímenes sean extraídos de los moldes.
- Los especímenes deben ser descimbrados no antes de 20 h ni después de 48 h de su elaboración.



Figura . Descimbrado de especímenes.

- A menos que en otro método se especifique lo contrario, todos los especímenes deben ser curados en humedad a temperatura de $296\text{ K} \pm 3\text{ K}$ ($23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$) durante las primeras 24 h, después de ese tiempo deben mantenerse a una temperatura de $296\text{ K} \pm 2\text{ K}$ ($23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$), con una humedad relativa de 95 % mínima, hasta el momento de la prueba.



Figura . Colocación de especímenes después de fabricados.

- El almacenaje durante las primeras 48 h debe ser en un sitio libre de vibraciones. Con relación a los especímenes extraídos de los moldes, el curado húmedo significa que los especímenes de prueba pueden mantenerse con agua libre en su superficie en todo tiempo. Esta condición se logra por inmersión en agua saturada con cal, o por almacenamiento en un cuarto húmedo.
- Los especímenes no deben ser expuestos a goteo directo o agua corriente.



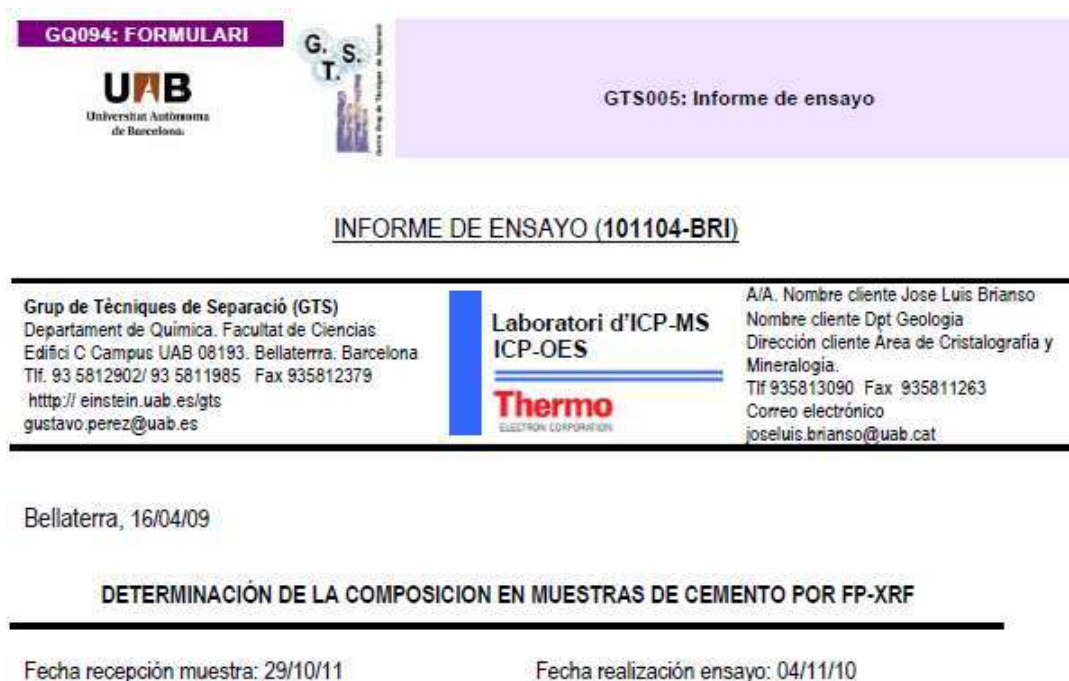
Figura . Curado de especímenes en pila de inmersión.

4.5 Análisis Microestructural del Concreto.

El análisis Microestructural de las muestras de concreto se realizó en los laboratorios de Geología de la Universidad Autónoma de Barcelona para realizar la prueba de Fluorescencia de Rayos X, mediante el ensayo 101104-BR; Mientras que el análisis de Microscopía Electrónica de Barrido se realizó en el Instituto de Ciencias Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

4.5.1 Prueba de Fluorescencia de Rayos X.

Como se mencionó anteriormente esta prueba se realizó en la universidad Autónoma de Barcelona, en la fotografía siguiente nos muestra parte del reporte.



GQ094: FORMULARI

UAB
Universitat Autònoma de Barcelona

G. S.
Grup de Tècniques de Separació

GTS005: Informe de ensayo

INFORME DE ENSAYO (101104-BRI)

Grup de Tècniques de Separació (GTS)
Departament de Química. Facultat de Ciències
Edifici C Campus UAB 08193. Bellaterra, Barcelona
Tlf. 93 5812902/ 93 5811985 Fax 935812379
<http://einstein.uab.es/gts>
gustavo.perez@uab.es

Laboratori d'ICP-MS ICP-OES
Thermo
ELECTRON CORPORATION

A/A. Nombre cliente Jose Luis Brioso
Nombre cliente Dpt Geologia
Dirección cliente Área de Cristalografía y Mineralogía.
Tlf 935813090 Fax 935811263
Correo electrónico
jose Luis.brioso@uab.cat

Bellaterra, 16/04/09

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICION EN MUESTRAS DE CEMENTO POR FP-XRF

Fecha recepción muestra: 29/10/11 Fecha realización ensayo: 04/11/10

Figura . Informe de Ensayo de Fluorescencia de Rayos X realizado a las muestras de concreto.

Preparación de las Muestras:

Para poder realizar esta prueba a los especímenes de concreto fue necesario prepararlos mediante un proceso de Maceración o pulverización, mismo que a continuación se describe:

La preparación previa fue de maceración de las muestras a estudiar mediante procedimiento manual, hasta lograr en la muestra una consistencia de polvo muy fino, debido a que así se requiere el material para poder ejecutar las pruebas.



Figura . Pastillas de concreto a analizar.

A continuación se presenta la secuela de Maceración:

- Se utiliza un mortero y espátulas para evitar contaminar nuestra muestra.



Figura . Maceración manual de las pastillas de concreto.

- Se procede a macerar el material, hasta lograr la consistencia de polvo.



Figura . Pulverización de las pastillas de concreto.

- Es importante que cada vez que se cambie de material se limpien bien los instrumentos usados para evitar la contaminación de los materiales, esto se realiza con Alcohol o acetona.
- El análisis de ED-XRF se realizó con el equipo de mano, el cual es rápido y fácil de usar, sin embargo no resulta tan preciso como las máquinas de banco. Ambos tipos presentan una serie de limitaciones que deben ser comprendidas claramente por el analista. Asimismo, requieren seguir un procedimiento apropiado, esencial si se quieren evitar serios errores.



Figura . Fotografías del equipo móvil de Fluorescencia de Rayos X.

Para realizar esta prueba es necesario contar con el medidor de radiación; ya que es importante mencionar que se debe utilizar equipo adecuado, además de contar con un cuarto herméticamente cerrado para evitar la contaminación por radiación del ambiente a la hora de realizar la prueba.



Figura . Fotografía del medidor de radiación del equipo de Fluorescencia de Rayos X.

4.5.2 Prueba de Microscopía Electrónica de Barrido en Muestras de Concreto.

La prueba de Microscopía Electrónica de Barrido se realizó en el Laboratorio de MEB (Microscopía Electrónica de Barrido del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Procedimiento de Prueba.

El procedimiento efectuado fue el siguiente:

- A los especímenes de concreto (cilindros se les corta una rodaja de aproximadamente 1 cm de espesor.



Figura . Corte de especímenes para Microscopía Electrónica de Barrido.

- Las rodajas de concreto se deben cortar en cubos de aproximadamente 1cm de lado y se deben limpiar con alcohol para evitar que quede polvo, o residuos de grasa que puedan afectar la prueba, se dejan saturando en alcohol por 24 hrs para que sea más fácil secarlas.

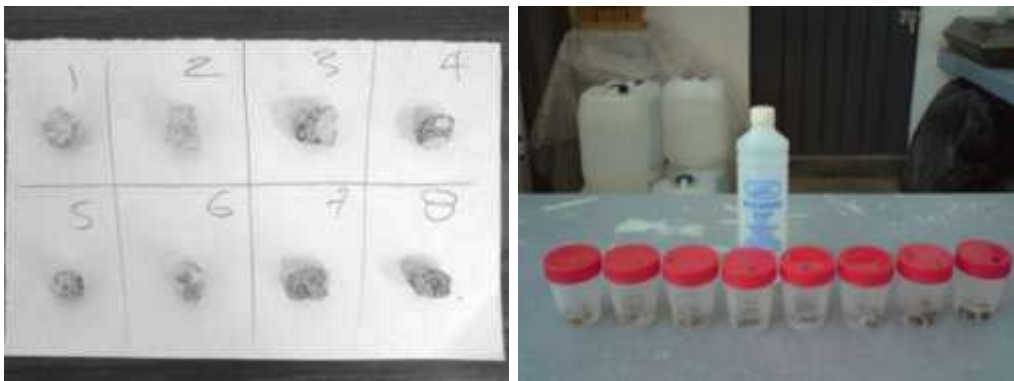


Figura . Corte y limpieza de muestras para MEB.

- Una vez que se han saturado las muestras procedemos a secarlas en el desecador hasta peso constante.



Figura . Desecado de muestras para MEB.

- Ya que las muestras se encuentran secas se procede a recubrir las con un metal conductor que en este caso fue el Cobre, esta preparación es el último paso antes de que se coloquen las muestras en el interior del Microscopio Electrónico de Barrido.
- Con las muestras ya recubiertas en cobre se procede a colocarlas dentro de una base la cual se introduce en el microscopio electrónico de barrido, ayudándonos de un brazo, para introducir y fijar la base al microscopio.



Figura . Equipo para Microscopía Electrónica de Barrido.

- Después se procede a realizar el análisis elemental de las muestras.
- El mapping de la muestra para identificar las zonas donde se encuentran los minerales y sus respectivas fotografías.

4.6 Pruebas Destructivas, no Destructivas y de Durabilidad.

A continuación se explicará de manera detallada cada una de las pruebas realizadas al concreto en estado endurecido, así como las pruebas destructivas, no destructivas y de durabilidad aplicadas en los especímenes de concreto fabricados durante esta investigación.

4.6.1 Método de prueba Estándar para el Cabeceo de Especímenes Cilíndricos de Concreto

Esta práctica describe los procedimientos para proporcionar superficies planas en los extremos de los cilindros de concreto para cabecear con materiales adheribles o cemento puro a los especímenes cilíndricos de concreto recién elaborados, así como con mortero de azufre a los especímenes cilíndricos y corazones de concreto endurecido, cuando la superficie final no se ajusten a los requisitos de planicidad y perpendicularidad de las normas aplicables, y que para nuestro caso es la NMX-C-109-ONNCCE-2004.

Procedimiento:

- Se prepara el mortero de azufre para su empleo calentándolo a $140\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Se recomienda colocar en los recipientes para el fundido la cantidad necesaria de mortero azufre para los especímenes por cabecear en esa etapa, y antes de volverse a llenar se elimina el material sobrante verificando que el material re-usado no tenga más de 10 usos, siempre y cuando se garantice que se cumple con lo indicado en la tabla siguiente:

Tabla . Resistencia a la compresión y espesor máximo del mortero de azufre [NMX-C-109-ONNCCE-2004].

Resistencia del concreto (Kg/cm ²)	Resistencia mínima del mortero de azufre (Kg/cm ²)	Espesor máximo de cada de cabeceo en cualquier punto (mm)
350 a 500	350 o la del concreto, cualquiera que sea mayor	8
Más de 500	No menor que la resistencia del concreto	5



Figura . Fabricación del mortero de Azufre con 25% de Ceniza Volante.



Figura . Determinación de la resistencia de los cubos de Azufre.

- Para el cabeceo de especímenes de concreto de resistencia mayor que 350 Kg/cm^2 , antes del cabeceo de los especímenes, se debe comprobar que el mortero tiene una resistencia de por lo menos la resistencia del concreto.
- El mortero de azufre debe estar seco en el momento que se coloque en el recipiente para el fundido ya que la humedad puede producir espuma. Por la misma razón el mortero de azufre fundido debe mantenerse alejado de cualquier humedad.



Figura . Fundido de mortero de Azufre.

- El plato y los dispositivos para el cabeceo, deben ser calentados ligeramente antes de ser empleados para disminuir la velocidad de endurecimiento y permitir la formación de capas delgadas. Inmediatamente antes de vaciar cada capa, se aceita ligeramente el plato de cabeceo y se agita el mortero de azufre fundido.



Figura . Cabeceo de Cilindros.

- Las bases de los especímenes curados en forma húmeda deben estar suficientemente secas en el momento del cabeceo, para evitar que dentro de las capas se formen burbujas de vapor o bolsas de espuma de diámetro mayor de 6 mm.
- Para asegurarse que la capa se ha adherido a la superficie del espécimen, la base de éste no debe ser aceitada antes de la aplicación de la capa.
- Los especímenes curados por vía húmeda deben ser mantenidos en condiciones húmedas durante el tiempo transcurrido entre el terminado del cabeceo y el momento de la prueba, regresándolos al almacenamiento húmedo o protegiéndolos con una manta o material similar húmedos para evitar la evaporación.
- Los especímenes cabeceados no se ensayaran hasta que el mortero de azufre haya desarrollado la resistencia requerida.



Figura . Especímenes Cabeceados y listos para prueba.

4.6.2 Método de Prueba Estándar para la Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto

Se debe tener cuidado en la interpretación de la importancia de la determinación de resistencia a la compresión por este método de prueba ya que la resistencia no es una propiedad fundamental del concreto hecho a partir de determinados materiales. Los valores obtenidos dependerán de la forma y tamaño del espécimen, de la dosificación, de los procedimientos de mezclado, de los métodos de muestreo, de los moldes, de la fabricación, de la edad, de la temperatura y de las condiciones de humedad durante el curado. Los resultados de este método se utilizan como base para el control de calidad del concreto y el procedimiento para su determinación se realiza con base en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2002.

Procedimiento:

- Se limpian las superficies de las placas superior e inferior y las cabezas del espécimen de prueba, se coloca este último sobre la placa inferior alineando su eje cuidadosamente con el centro de la placa de carga con asiento esférico; mientras la placa superior se baja hacia el espécimen asegurándose que se tenga un contacto suave y uniforme.



Figura . Colocación de Especímenes en maquina universal.

- Se debe aplicar la carga con una velocidad uniforme y continua sin producir impacto, ni pérdida de carga. La velocidad de carga debe estar dentro del intervalo de 84 Kg/cm²/min a 210 Kg/cm²/min, equivalente para un diámetro estándar de 15 cm a un rango de 14.8 Tonf/min a 37.1 Tonf/min.

- Se permite una velocidad mayor durante la aplicación de la primera mitad de la carga máxima esperada siempre y cuando durante la segunda mitad se mantenga la velocidad especificada; pueden utilizarse máquinas operadas manualmente o motorizadas que permitan cumplir con lo anterior, teniendo en cuenta que sólo se harán los ajustes necesarios en los controles de la máquina de prueba para mantener uniforme la velocidad de aplicación de carga, hasta que ocurra la falla.



Figura . Aplicación de carga al Especimen.

- Se aplica la carga hasta que aparezca la falla de ruptura, registrándola en el informe.



Figura . Falla de Ruptura en Especimen.

- Los especímenes para la aceptación o rechazo de concreto deben ensayar se a la edad de 14 días en el caso del concreto de resistencia rápida o 28 días en el caso de resistencia normal con las tolerancias que se indican en la norma antes mencionada.

Tabla . Tolerancias para la prueba Resistencia a Compresión de Cilindros de Concreto [NMX-C-083-ONNCCE-2002].

Edad de Prueba	Tolerancia Permisible
24 h	± 0:30 h
3 días	± 2 h
7 días	± 6 h
14 días	± 12 h
28 días	± 24 h

Cálculo:

Para calcular la resistencia a la compresión real que resiste el concreto, se divide la carga resistente entre el área de la sección transversal:

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

Donde:

σ = resistencia a la compresión real que resiste el especimen, en Kgf/cm²

P = carga de ruptura, en Kgf

A = área de la sección transversal del especimen, en cm²

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

$$\% \text{ resistencia} = \frac{\sigma}{\sigma_p}$$

Donde:

% resistencia = porcentaje de la resistencia real del especimen, en %

σ = resistencia real a cierta edad, en días y en Kgf/cm²

σ_p = resistencia de proyecto, Kgf/cm²

Este porcentaje de resistencia calculado se compara con la cura de resistencia del concreto respecto a la edad en días y se verifica si esta dentro de las especificaciones.

4.6.3 Método de Prueba Estándar para la determinación del Módulo de Elasticidad del Concreto

El Módulo de Elasticidad del concreto es un aspecto fundamental a considerar en esta investigación. Depende directamente de la resistencia a la compresión del concreto, por lo que los concretos de alta resistencia poseen Módulos de Elasticidad mayores que aquellos concretos de baja resistencia.

La metodología empleada se basa en la normativa NMX-C-128-ONNCCE.

Procedimiento:

- Colocar el espécimen en una superficie horizontal plana y firme, donde se le monte el dispositivo de medición. Se debe tener precaución de que, al colocar el dispositivo en el espécimen éste quede exactamente al centro de los anillos, fijándolos firmemente mediante los anillos de punta, para evitar que existan deslizamientos.
- Una vez colocado los anillos se debe verificar que los micrómetros del deformímetro queden perfectamente verticales, paralelos al eje longitudinal del espécimen, asegurándose que el vástago del micrómetro tenga la carrera suficiente para la deformación que deba registrarse.
- Ajustados los micrómetros hay que retirar cuidadosamente las barras que separan los anillos observando que los micrómetros no registren movimientos importantes, si esto sucede se tiene que volver a montar el deformímetro.
- Colocar los micrómetros en Cero.



Figura . Especimen instrumentado para Determinar el Módulo de Elasticidad.

- Aplicar la primera precarga del 10 al 15% del promedio de la resistencia a compresión de los especímenes compañeros ensayados previamente a esta prueba; durante esta precarga se debe verificar el correcto funcionamiento de los micrómetros y del deformímetro.
- Aplicar una segunda precarga hasta el mismo nivel que la anterior, registrando cargas y deformaciones cada tonelada hasta una carga de 5 t, después se toman lecturas cada 5 t.
- Se descarga el espécimen y se observa si las agujas de los micrómetros regresan a cero; si no es así se deberán realizar las precargas necesarias hasta lograrlo.



Figura . Revisión de Micrómetros para Determinar el Módulo de Elasticidad.

- Posteriormente se debe aplicar la carga de ensaye, registrando deformaciones cada tonelada hasta una carga de 5 t, si la caratula de la prensa lo permite en las primeras 2 t, registrar deformaciones cada 0.5 t, de no ser así registrarla a cada 5 t.

De 5 t en adelante, las deformaciones se deberán registrar cada 5 toneladas, hasta llegar al 60% del esfuerzo máximo obtenido en los especímenes ensayados.

La velocidad de la carga en las primeras 5 t debe ser de 1 min, de ahí en adelante 20 s por cada 5 t.

- Una vez alcanzada la carga que representa el 60% de la máxima obtenida en el ensaye a compresión, es importante reducir la velocidad de aplicación de la carga para permitir que se aflojen los tornillos que fijan los anillos y de ser posible, para evitar el deterioro se retiran los micrómetros, después se proseguirá con la aplicación de la aplicación de la carga según NMX-C-083, hasta llegar a la carga máxima o falla del espécimen.



Figura . Aplicación de Carga hasta la Ruptura para Determinar el Módulo de Elasticidad.

Cálculo:

Para calcular el módulo de elasticidad se procede de la siguiente forma:

- Con el área del especimen, las cargas, las lecturas de deformación y la longitud de medición deben calcularse los esfuerzos y las deformaciones unitarias correspondientes a cada carga, así como el esfuerzo máximo.
- Se traza la curva esfuerzo deformación unitaria.
- Se determina el esfuerzo “ S_1 ” en kg/cm^2 correspondiente a la deformación unitaria (e_1) de 0.000050.
- Determinar el esfuerzo “ S_2 ” correspondiente al 40% del esfuerzo máximo.
- Determinar la deformación unitaria “ e_2 ” correspondiente al es fuerzo “ S_2 ”.
- Calcular el módulo de elasticidad empleando la fórmula siguiente:

$$E = (S_2 - S_1) / (e_2 - 0.000050)$$

En donde:

E = Módulo de Elasticidad en kg/cm^2 .

Para calcular la relación de Poisson se procede con la siguiente fórmula:

$$M = (e_2 - e_1) / (e_2 - 0.000050)$$

M = Relación de Poisson.

e_2 = Deformación transversal unitaria a la altura media del especimen producida por el esfuerzo S_2 .

e_1 = Deformación transversal unitaria a la altura media del especimen producida por el esfuerzo S_1 .

En esta prueba es importante mencionar que para la determinación del módulo de elasticidad y relación de poisson realizadas a los especímenes cilíndricos de 10x20 cm fue necesario fabricar el dispositivo de anillos.

El Dispositivo se realizó a escala partiendo del dispositivo original para prueba de cilindros de 15x30 cm.

A continuación se presentan algunas imágenes del dispositivo fabricado para esta prueba.



Figuras . Equipo Patrón para determinar el Módulo Elástico en Cilindros de 15x30 cm



Figuras . Equipo Fabricado para determinar el Módulo Elástico en Cilindros de 10x20 cm

4.6.4 Método de Prueba Estándar para determinar la Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto

Este método de prueba proporciona una resistencia generalmente inferior a resistencia a la flexión (módulo de ruptura).

La resistencia a la tensión utiliza en el diseño de miembros estructurales de concreto ligero para evaluar la resistencia al corte proporcionado por el concreto y determinar la longitud de desarrollo de refuerzo.

El procedimiento de prueba se especifica de manera clara en la norma NMX-C-163-1997-ONNCCE.

Procedimiento:

- En cada extremo del espécimen se deben dibujar líneas diametrales usando un dispositivo adecuado que asegure que las líneas se encuentren en el mismo plano diametral.
- Se determina el diámetro del espécimen de prueba con una aproximación de 1 mm, se calcula con el promedio de tres diámetros, medidos cerca de los extremos, al centro del espécimen y contenidos dentro del plano, que incluye las líneas marcadas en los extremos.
- Se determina la longitud del espécimen con aproximación de 1 mm, con el promedio de por lo menos dos medidas de longitud tomadas en el plano que contienen las líneas marcadas en los extremos.
- Para cada prueba se debe contar con dos tiras de madera de triplay, neopreno o con dureza de 80 shore similar, libre de imperfecciones con un espesor de 3 mm, un ancho de 25 mm, aproximadamente y una longitud igual o ligeramente mayor que el espécimen. Las tiras de distribución de carga se colocan entre el espécimen y ambas platinas de carga, superior e inferior de la máquina de prueba, o entre el espécimen y las placas suplementarias cuando se utilicen. Después de cada prueba las tiras de triplay deben desecharse.



Figura . Colocación de Especimen para Prueba de Tensión Diametral.

- Se centra una de las tiras de carga sobre la platina inferior. Se coloca el espécimen sobre la tira y se alinea en tal forma, que las líneas marcadas en los extremos del cilindro estén verticales y centradas con relación a las tiras. Se coloca la segunda tira de carga longitudinalmente sobre el cilindro, centrándolo con relación a las líneas marcadas en los extremos del mismo. Se acomoda el conjunto para asegurar que se cumplan las condiciones anteriores.



Figura . Nivelado de Especimen para Prueba de Tensión Diametral.

- Se debe aplicar la carga en forma continua sin impacto a una velocidad constante de tal manera, que se logren esfuerzos de tensión por compresión diametral de 5 Kg/cm^2 a 15 Kg/cm^2 por minuto hasta la falla del espécimen.



Figura . Aplicación de Carga a Especimen para Prueba de Tensión Diametral.

- Para cilindros de 15 por 30 cm, el rango de esfuerzos de tensión corresponde a una carga aplicada aproximadamente entre 3467 Kgf y 10 605 Kgf por minuto.
- Se registra la carga máxima aplicada, indicada por la máquina de prueba en el momento de la falla.
- Se deben observar, el tipo de falla y la apariencia del concreto.



Figura . Falla por Tensión Diametral en Cilindros.

Cálculo:

Se calcula la resistencia a la tensión por compresión diametral del espécimen como sigue:

$$T = \frac{2P}{\pi Ld}$$

Donde:

T = resistencia a la tensión por compresión diametral, en Kgf/cm².

P = carga máxima aplicada, en Kgf.

L = longitud, en cm.

d = diámetro, en cm.

4.6.5 Método de Prueba Estándar para la determinación del Módulo de Ruptura del Concreto.

La norma NMX-C-191-ONNCCE-2004; ésta norma especifica el método para determinar la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.

Procedimiento de Prueba:

- El espécimen prismático se debe voltear sobre un lado a la posición del moldeado.



Figura . Medición del Especimen y marcado de los tercios medios

- Se centra el espécimen sobre los bloques de apoyo, se hace coincidir el espécimen previamente marcado en los tercios medios con el eje de los apoyos.
- Se debe verificar que se tenga contacto total entre la aplicación de la carga y los bloques de apoyo con la superficie del espécimen.



Figura . Medición del Especimen y marcado de los tercios medios

- Se colocan tiras de cuero para garantizar que la carga se distribuya en toda la longitud de apoyo.
- Se aplica la carga a una velocidad uniforme de 10 kgf/cm² por min.



Figura . Medición del Especimen y marcado de los tercios medios

- Se determina el ancho promedio, el peralte y la localización de la línea de falla.





Figuras . Fallas obtenidas en cada uno de los especímenes de cada mezcla.

Cálculos:

Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro, el módulo de ruptura se calcula como sigue:

$$R = (P \times L) / (b \times d^2)$$

Donde:

R = Módulo de ruptura, en kgf/cm^2 .

P = Es la carga máxima aplicada en kgf.

L = Distancia entre apoyos, en cm.

b = Ancho promedio del espécimen en cm.

d = Peralte promedio del espécimen.

Si la ruptura se presenta fuera del tercio medio del claro, en no más del 5 % de su longitud, se calcula como sigue:

$$R = (3 P \times a) / (b \times d^2)$$

Donde:

a = Distancia promedio entre la línea de fractura y el apoyo más cercano en la superficie de la viga en mm.

Si la fractura esta fuera del tercio medio del claro en más del 5% se desecha el resultado.

4.6.6 Método de prueba estándar para determinar la velocidad de pulso a través del concreto.

La norma NMX-C-275-ONNCCE-2004; especifica el método para determinar la velocidad de propagación de pulsos de onda de esfuerzo longitudinal a través del concreto. Esta velocidad está relacionada con las propiedades elásticas del concreto y su densidad.

Este método es aplicable para evaluar la calidad y homogeneidad (uniformidad relativa) del concreto, para indicar la presencia de vacíos o grietas y para evaluar la efectividad de las reparaciones a estas grietas. También es aplicable para indicar los cambios en las propiedades del concreto y en el estudio de las estructuras para estimar la severidad del deterioro o la formación de grietas.

Procedimiento:

- Los especímenes o zonas de concreto a ser ensayados deben tener la superficie plana, lisa, exenta de suciedad y no deben estar carbonatados.
- Aquellas superficies que no sean suficientemente lisas, se deben regularizar a través de procesos mecánicos o con una capa de pasta de cemento, yeso o resina epóxica con un espesor mínimo, a fin de posibilitar un buen acoplamiento con los transductores o sondas, pero sin que puedan interferir en la medida.
- Se calibra el equipo de velocidad de pulso con ultrasonido usando la barra de referencia.



Figura . Calibración de Equipo de Ultrasonido.

- El modo de prueba se realizó de la forma:

- Transmisión directa: con los transductores en las caras opuestas del material.



Figura . Modo de Prueba para determinar velocidad de pulso.

- Se aplica un adecuado agente de acoplamiento (como agua, vaselina, grasa, goma moldeable, u otros materiales viscosos) a las caras de los transductores o la superficie de ensayo o ambas.
- Se presionan las caras de los transductores firmemente contra la superficie de concreto hasta que se muestre un tiempo estable o hasta obtener el valor estable más bajo que se considere adecuado.



Figura . Aplicación de agente de Acoplamiento y determinación de velocidad de pulso.

- Se registra ese valor y se determina la distancia en línea recta medida de centro a centro de las caras de los transductores.



Figura . Obtención de velocidad de pulso ultrasónico.

Cálculo:

Para transmisiones directas y semidirectas, la velocidad se determina con la fórmula siguiente:

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

Donde:

V = velocidad de pulso, en Km/s.

L = longitud de paso, en mm.

T = tiempo que toma el pulso para atravesar la longitud, en μ s.

De la medición de la velocidad de las ondas ultrasónicas es posible calcular el módulo elástico dinámico como sigue:

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

Donde:

Ed = módulo de elasticidad dinámico, en MN/m².

V = velocidad de pulso, en Km/s.

Q = densidad del concreto, en Kg/m³ (Masa saturada entre volumen del concreto)

ν = proporción de Poisson (concreto de alta resistencia $\nu = 0.15$; concreto de baja resistencia $\nu = 0.30$).

Especificaciones:

La Red Durar en su manual del 2000 nos presenta la siguiente tabla, donde evalúa la calidad del concreto.

Tabla . Criterios de Evaluación para la Calidad del Concreto [Red Durar, 2000].

Velocidad de Propagación (m/s)	Tolerancia Permisible
< 2,000	Deficiente
2,001 a 3,000	Normal
3,001 a 4,000	Alta
> 4,000	Durable

4.6.7 Método de prueba estándar para determinar la resistencia de especímenes de concreto mediante Rebote Esclerométrico.

Para esta prueba el equipo empleado fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B, marca CONTROLS, medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos; con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9 μ s; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1 μ s; salida del transmisor hasta 1500V; funciona con baterías recargables internas; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM.

Se les realizó una prueba combinada de velocidad de pulso y rebote Esclerométrico con el equipo para poder determinar de manera no destructiva la resistencia del concreto.

En la determinación de la resistencia de los cilindros por rebote Esclerométrico se tuvo un problema en la obtención de las lecturas del esclerómetro, si nosotros aplicábamos el procedimiento descrito para el esclerómetro o martillo de Schmidt directamente en el cilindro no se detectaban rebotes en el esclerómetro y por tanto no obteníamos resistencia alguna. Para resolver el problema, fue necesario aplicar al cilindro una precarga de sujeción del 15 % aproximadamente del esfuerzo de falla y posteriormente realizar la tomas de lecturas con el esclerómetro, con esto se obtenían los rebotes del esclerómetro del mismo equipo de ultrasonido.



Figura . Acomodo de especimen para obtener el rebote esclerométrico sin precarga.

Por otro lado, es necesario el manejo de un factor de experiencia que debe ser introducido en el equipo al momento de hacer la prueba. Este factor puede

variar de 0.1 a 1.99 y para determinarlo realizamos tomas de lecturas con todas las variaciones posibles del factor y posteriormente los cilindros se sometieron a la prueba destructiva de compresión para obtener así nuestro factor; En las mezclas de los cilindros el mejor factor fue de 1.5, y este factor se empleó en las mediciones combinadas de velocidad de pulso con esclerometría.

El procedimiento seguido consistió en lo siguiente:

- Se aplicó una precarga del 15 % de la carga de falla al cilindro, para no dañar a los especímenes se empleó una placa de neopreno pero aún así algunos cilindros sufrieron daños.



Figura . Acomodo de especimen para obtener el rebote esclerométrico con precarga.



Figura . Daños presentes en especimen después de la prueba de rebote.

- Se tomaron lecturas con el esclerómetro adosado al equipo de ultrasonido y se guardaron en el equipo con un número de prueba. Para la toma de estas lecturas nos aseguramos de que los cilindros se encuentran en una condición saturada superficialmente seca, las lecturas de rebote se realizaron en las caras del especimen, tratando de evitar los ensayos en el mismo punto dos veces. El equipo por sí solo determina un promedio de las lecturas tomadas para obtener un rebote final. Cabe destacar que no fue posible en la primera etapa hacer este procedimiento por fallas del equipo, en la segunda etapa falló nuevamente el equipo, sin embargo se usó un esclerómetro digital con el que se realizaron las tomas de los rebotes y estos rebotes se introdujeron de manera manual al equipo de ultrasonido para calcular la resistencia a compresión del cilindro.
- Se guarda el archivo para su posterior descarga a la computadora.
- En los cilindros que no fue posible tomar las lecturas del rebote esclerométrico se introdujo el valor de rebote obtenido con el equipo digital en el equipo dual para que nos arrojará los valores de resistencia de los especímenes.

4.6.8 Método de prueba estándar para determinar las frecuencias de resonancia fundamentales longitudinales de especímenes de concreto.

Este método de prueba se utiliza para determinar el módulo de elasticidad dinámico, el módulo dinámico de rigidez y el valor dinámico de Poisson en prismas o cilindros de concreto siguiendo lo establecido en la NMX-C-089-1997-ONNCCE.

Este método está destinado para la detección de cambios significativos en el módulo de elasticidad dinámico de las muestras de laboratorio o campo que han sido expuestas a la intemperie o a otro tipo de influencias de deterioro.

Procedimiento:

- Se determina la masa y el promedio de la longitud del espécimen.
- Se determina el promedio de la sección transversal. Las relaciones esbeltez pequeñas o grandes son comúnmente difíciles de excitar en el modo de vibración fundamental, es por ello que se recomienda relaciones entre 3 y 5. Para la aplicación de este procedimiento la relación de esbeltez debe ser al menos de 2.



Figura . Medición de Especimen.

- Se monta el espécimen en el equipo de manera que sea capaz de vibrar libremente en el modo longitudinal colocándose de manera que la fuerza que lo maneja sea perpendicular a él y aproximadamente al centro de las caras de la muestra.



Figura . Montaje de Especimen cilíndrico y Prismático para prueba de resonancia.

- Se coloca la unidad de recolección de frecuencia en el espécimen de manera que la recolección de sensibilidad coincida con la dirección de la vibración, esto es, el eje longitudinal del espécimen.
- Se obliga al espécimen a vibrar a varias frecuencias y se registra la frecuencia más alta.



Figura . Obtención de frecuencia de resonancia en espécimen Cilíndrico y Prismático.

Cálculo:

La determinación del módulo de elasticidad dinámico se realiza mediante el empleo de la siguiente fórmula:

$$Ed = (4n^2 L^2 P) \times 10^{-2}$$

Donde:

Ed = módulo de elasticidad dinámico, en MN/m².

P = densidad del concreto, en Kg/m³.

L = longitud del espécimen, en mm.

n = frecuencia fundamental longitudinal, en Hz.

4.6.9 Método de prueba para determinar la Resistividad Eléctrica en el concreto hidráulico.

De acuerdo con la Red Durar, 2000. La Resistividad Eléctrica es una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del hormigón y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa.

Es función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras.

Procedimiento:

- Se toman las dimensiones de la muestra: diámetro y longitud) y el peso.



Figura . Determinación del Peso del especimen Cilíndrico.

- Se garantiza la conexión del amperímetro y voltímetro.
- Se monta la muestra en el equipo correspondiente.
- Se corrobora el contacto de los pines con las placas metálicas que se colocan sobre el concreto.



Figura . Montaje de especimen para prueba de resistividad.

- Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete éste a una corriente dada, (I).
- Se registra el voltaje (E) obtenido del aparato lo más preciso posible.



Figura . Voltaje Obtenido en prueba de resistividad.

Cálculo:

La Resistencia eléctrica, R_e , se calcula como E/I y se expresa en ohm. De esta manera la resistividad eléctrica está dada por:

$$\rho = R_e \frac{A}{L}$$

Donde:

ρ = resistividad eléctrica, en ohm-cm.

R_e = resistencia eléctrica, en Volts.

A = área transversal del espécimen, en cm^2 .

L = longitud del espécimen, en cm.

Especificaciones:

Tabla . Criterios de Evaluación para la Resistividad Eléctrica [Red Durar, 2000].

Resistividad Eléctrica ($\text{k}\Omega\text{-cm}$)	Riesgo de Corrosión
< 10	Alto riesgo
10 a 200	Riesgo moderado
> 200	Poco riesgo

4.6.10 Método de Prueba Estándar para la determinación de la Profundidad de Carbonatación

La carbonatación es la reducción de la alcalinidad normal del concreto por efecto de dióxido de carbono que difunde desde el medio ambiente que lo rodea.

El objetivo de esta prueba consiste en determinar el avance de la carbonatación del concreto por el método de vía húmeda, con solución de fenolftaleína.

La prueba se le realizó a cilindros de concreto de 10x20 cm en lotes de 3 muestras por cada mezcla realizada, los especímenes se colocaron en la loza de azotea del laboratorio de materiales para exponerse a los agentes atmosféricos durante 6 meses (Febrero – Julio).

Los especímenes se marcaron en una de sus caras para determinar su posición sur, que es la dirección de los vientos dominantes de la ciudad de Morelia y para el caso de los especímenes la orientación más desfavorable.



Figuras . Especímenes expuestos a la atmósfera y señalización de dirección sur respectivamente.

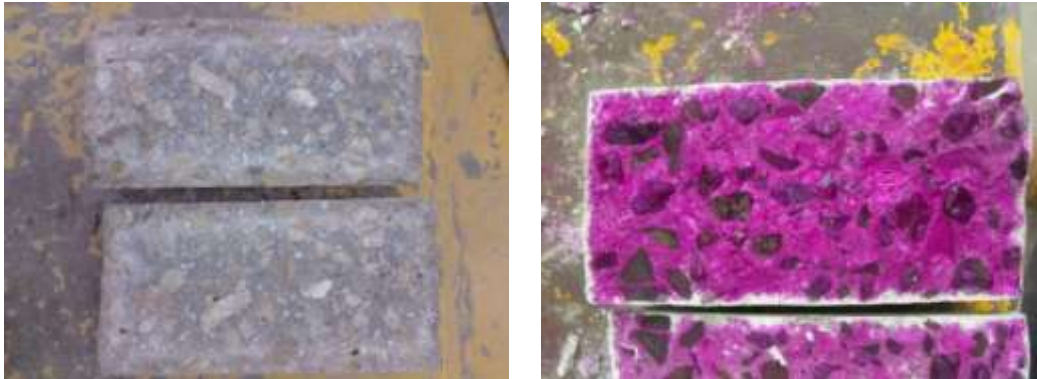
El procedimiento de prueba realizado fue el siguiente:

- Después del periodo de exposición, cada espécimen se le debe marcar nuevamente su cara expuesta en la dirección sur – norte.
- Los especímenes deben de cortarse para tener una sección longitudinal en la dirección sur - norte. Para nuestro caso en vez de realizar el corte se decidió realizar la prueba de tensión por compresión diametral, para obtener el corte y un valor de resistencia.



Figuras . Prueba de tensión y corte longitudinal debido a falla por compresión diametral.

- Después de que se realiza el corte longitudinal se limpia inmediatamente la cara interna de todo el material que queda suelto o polvo.
- Se le aplica con un atomizador de manera uniforme a cada una de las caras del corte la solución de fenolftaleína, el tiempo después de realizado el corte, a la aplicación de la solución no deberá ser mayor de 15 min.



Figuras . Limpieza del espécimen y aplicación de la solución ácido - base.

- Posteriormente sin que pasen más de 20 min después de realizado el corte se debe de tomar la profundidad de la carbonatación midiendo esta en cada lado del corte, obteniendo un valor promedio de la profundidad de carbonatación de cada lado para cada espécimen, la profundidad de carbonatación es la longitud que no se pigmenta de color morado.

CALCULOS:

Para predecir la velocidad de carbonatación del concreto se tiene la ecuación que relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición.

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}}$$

Donde:

X_{CO_2} = Profundidad de Carbonatación en mm.

K_{CO_2} = Constante de Carbonatación en $\text{mm} \cdot \text{año}^{0.5}$.

t = Tiempo de Exposición en años.

4.6.11 Método de Prueba Estándar para la determinación de la Absorción Capilar de Especímenes Cilíndricos de Concreto

La propuesta de la metodología de ensayo se debe a Gören Fagerlund y describe la cinética de la absorción capilar de concretos y morteros a través de tres coeficientes:

m = Resistencia a la penetración del agua.

k = Coeficiente de absorción capilar.

ϵ_o =Porosidad efectiva.

Procedimiento.

- El ensayo se realiza en especímenes de espesor $H \leq 50$ mm.



Figura . Especimen de prueba Fagerlund.

- Los especímenes se pre-acondicionan mediante un secado a 60°C por 48 horas o hasta peso constante.



Figura . Secado de Especímenes en Horno.

- Posteriormente se dejan enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente.



Figura . Especímenes a temperatura Ambiente.

- Se coloca resina o parafina en las caras laterales del espécimen para garantizar que el agua solo se absorba por la cara inferior.



Figura . Preparación de Especímenes con parafina.

- Se registra su peso inicial, W_o .



Figura . Obtención del peso inicial.

- El espécimen se coloca sobre una esponja húmeda en el interior de un recipiente de fondo plano, con un tirante de agua de sólo 3 mm por encima de la parte inferior del espécimen.



Figura . Acomodo de especímenes.



Figura . Tirante de agua de 3mm.

- El recipiente se deberá mantener cerrado durante la prueba para evitar la evaporación del agua y por consiguiente la disminución del tirante de agua.



Figura . Recipiente de Prueba.

- Se registra el peso del espécimen a intervalos de tiempo de 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4, 6, 24, 48...horas, hasta lograr peso constante.



Figura . Determinación del peso húmedo.

- Como último paso se procede a calcular los coeficientes de Fagerlund.

Los coeficientes se calculan con base en las siguientes ecuaciones:

Coeficiente de la resistencia a la penetración del agua (m).

$$m = \frac{t}{z^2} \text{ (s/m}^2\text{)}$$

Donde: z representa la profundidad de penetración del agua en el tiempo “t”.

Coeficiente de absorción capilar (k)

$$k = \frac{(w_t - w_o)/A}{\sqrt{t}} \text{ (kg/m}^2\text{s}^{1/2}\text{)}$$

Donde:

Wo = Peso inicial de la probeta (kg o gr)

Wt = Peso final de la probeta (kg o gr)

A = Área expuesta de la probeta (m o cm)

k es evaluado como la pendiente de la región lineal del gráfico (Wt-Wo)/A como función respecto de la raíz del tiempo $\sqrt{t}$.

4.6.12 Método de Prueba estándar para determinar la Abrasión del Concreto (Ensayo Cántabro)

De acuerdo con Miro Recasens (1994), el ensayo consiste en fabricar con la mezcla que se quiere estudiar una probeta tipo Marshall e introducirla en la máquina de ensayo de Los Ángeles (sin esferas metálicas) a una temperatura dada, después de un número determinado de vueltas se saca la probeta, que durante el ensayo ha ido perdiendo por desgaste parte de los áridos situados en la superficie, y se pesa. Como resultado del ensayo se obtiene el valor de la pérdida por desgaste expresada en tanto por ciento del peso inicial.

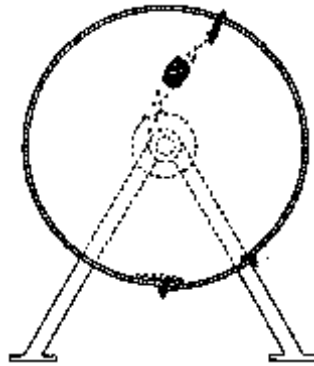


Fig . Determinación de la pérdida por desgaste: ensayo cántabro.

La muestra ensayada consiste en una probeta cilíndrica con diámetro de 10 cm y espesor de 6.5 cm.

Para obtener la probeta de prueba es necesario realizar cortes a los cilindros de 10x20 cm, para obtener las pastillas de espesor de 6.5 cm.



Figuras . Corte a cilindros y Probetas para ensaye cántabro.

Procedimiento para determinar la pérdida de desgaste de las probetas ensayadas:

- Las probetas cortadas se deben de someter a secado hasta peso constante.



Figura . Secado de probetas.

- Se pesa en seco la probeta, con una aproximación de 0.1 gramos (P.1.).



Figuras . Muestra para ensayo cántabro y Pesado de probetas.

Antes de ensayarla, la probeta se mantiene a la temperatura de ensayo un mínimo de 6 horas.

- Se introduce la probeta en la máquina de Los Ángeles sin ninguna clase de carga abrasiva, y se la somete a 100 revoluciones.



Fig . Colocado de muestra en maquina de desgaste de los ángeles.

- Se saca la probeta, que se habrá ido reduciendo por el desgaste, y se pesa con una aproximación de 0.1 gramos (P.2.).



Fig . Pesado de muestra después de 100 revoluciones.

- Este procedimiento se repite hasta llegar a las 500 revoluciones.



Figuras . Especímenes después de 0,100, 200, 300, 400 y 500 revoluciones.

Cálculos:

La pérdida de desgaste se expresa en tanto por ciento referida al peso inicial de la probeta:

$$P = (P_1 - P_2) / P_1 \times 100$$

Donde:

P = Pérdida por desgaste, en %.

P₁ = Peso inicial probeta, en g.

P₂ = Peso final probeta, en g.

4.6.13 Prueba de Congelamiento y Deshielo.

La prueba de congelamiento y deshielo empleada en esta tesis es una variante de la prueba AASHTO T-283-02 y de la recomendación AMAAC RA 04/2008; la cual consiste en evaluar el cambio en los resultados de la prueba de esfuerzo de tensión diametral [NMX-C-163-1997-ONNCCE], en pastillas de 6.5 cm de espesor y 10 cm de diámetro sometidos a la acción del congelamiento y deshielo, comparados con los resultados de pastillas no sometidas a este daño.

El procedimiento de Prueba es el siguiente:

- Se deberán tener al menos 3 pastillas por mezcla para someterlas a congelamiento y deshielo y otras 3 se mantendrán en condición ambiente.



Fig . Especímenes para congelamiento y deshielo.

- Se determina su peso seco, sus dimensiones y su volumen.
- Los especímenes secos deberán permanecer a temperatura ambiente, y hasta el momento de la prueba se deberán someter a baño maría a 25°C, durante 2 horas, con una pulgada de agua sobre su superficie.
- Las pastillas que se someterán a congelamiento y deshielo se dejarán saturar al menos 24hrs.



Fig . Saturado de Especímenes para congelamiento y deshielo.

- Se obtiene su peso superficialmente seco.
- Se colocan los especímenes en una bolsa de plástico, se vierten 10 ml de agua, se sella la bolsa.



Figuras . Preparación de Especímenes para congelamiento y deshielo.

- Se colocan los especímenes en el congelador a una temperatura de $-18^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ al menos 16hrs.



Figura . Colocación de especímenes en congelador.

- Se sacan del congelador y se colocan a baño María a 60°C durante un periodo de 24hrs, con 1" de agua sobre la superficie de los especímenes.



Figura . Especímenes a Baño María.

- Hasta el paso anterior termina el primer ciclo de congelamiento y deshielo.
- Se siguen los pasos anteriores hasta completar 5 ciclos, una vez que se terminan los ciclos, se prueban los especímenes sometidos a la acción del congelamiento-deshielo y los especímenes secos a tensión indirecta.



Figuras . Determinación de la resistencia a compresión diametral en Especímenes.

De los resultados obtenidos se determina el daño inducido mediante la siguiente fórmula:

$$TSR= S2/S1 \times 100$$

Donde:

TSR Es la Resistencia al daño inducido, expresado en %.

S1 Es la resistencia a tensión indirecta promedio de especímenes en seco.

S2 Es la resistencia a tensión indirecta promedio de especímenes sometidos al congelamiento y deshielo.

4.6.14 Prueba de Ataque Químico por Sulfatos.

Esta prueba fue realizada de acuerdo con la normativa ASTM C 88-99a, “Standard Test Method for Soundness of aggregates by use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate”.

Para esta investigación la solución concentrada de sulfato fue la de sulfato de sodio.

La prueba consiste en medir la pérdida de solidez del concreto debida a la acción de las sales a las que se encuentra sometido el concreto en ambientes marinos donde se tienen eventos de humedecimiento y secado del elemento.

Esta prueba trata de simular esos eventos de manera acelerada mediante ciclos de saturación en solución saturada de sulfato de sodio y de secado de los elementos sujetos a prueba.

Los especímenes sometidos a esta prueba fueron lotes de seis especímenes cilíndricos de 10x20 cm. Para cada una de las 8 mezclas realizadas para esta investigación.

El procedimiento de prueba es el siguiente:

- Primeramente se tiene que realizar una solución saturada de sulfato de sodio suficiente para realizar los 5 ciclos de humedecimiento y secado de los especímenes. Para la prueba fue necesario destilar 200 litros de agua (la cual fue proporcionada por el laboratorio de ingeniería ambiental de la FIC); la solución saturada de sulfato de sodio se logró disolviendo 350 gramos de sulfato de sodio (Sosa caustica) por cada litro de agua, para que la solución este lista se tiene que disolver completamente el sulfato de sodio en el agua evitando que queden polvos en el interior del recipiente.



Figuras . Solución saturada de Sulfato de Sodio.

- Los especímenes deberán de secarse hasta peso constante antes de iniciar la prueba. Para este caso los especímenes permanecieron en el horno a temperatura de 110°C durante un mes aproximadamente sin lograr el peso constante, aunque las variaciones de peso en los últimos días eran mínimas se tomó este tiempo como el necesario para iniciar la prueba.



Figura . Secado de especímenes en horno.

- Se pesan los especímenes para obtener el peso seco o peso inicial de cada espécimen, y se prepara un recipiente capaz de contener todos los especímenes durante la prueba con un tirante de solución de no menos de 2 cm por encima de la parte superior de los especímenes, la parte inferior de los especímenes deberá estar en contacto con la solución.



Figuras . Pesado de especímenes e inmersión de especímenes en solución saturada de sulfato de sodio.

- Los especímenes deberán de permanecer en la solución saturada de sodio durante un tiempo no menor de 16 horas ni mayor de 18 horas y manteniendo los a una temperatura en promedio de 21°C .
- Una vez pasadas las 16 horas se sacan los especímenes y se dejan escurrir durante 15 minutos para después colocarlos en el horno previamente calentado a una temperatura constante de 110°C , durante 24 horas.



Figuras . Especímenes después de 16 hrs. de inmersión y espécimen con cristales de sulfato de sodio en su parte superior (Primer Ciclo).

- Pasado el tiempo de secado se sacan del horno los especímenes y se dejan enfriar a temperatura ambiente para después obtener su peso seco. Todos los pasos mencionados hasta ahora generan un ciclo de saturación y secado de los especímenes, se deberá hacer lo mismo hasta completar 5 ciclos que es lo que nos marca la normativa.



Figuras . Especímenes después de 16 hrs. de inmersión, Secado de especímenes, pesado de espécimen dañado y sin daños respectivamente (Segundo Ciclo).



Figuras . Especímenes CT050, CT065, CZ050 y CZ065 después del Tercer Ciclo de ataque acelerado por sulfatos.



Figuras . Especímenes CT050, CT065, CZ050 y CZ065 después del Cuarto Ciclo de ataque acelerado por sulfatos.



Figuras . Especímenes CT050, CT065, CZ050 y CZ065 después del Quinto Ciclo de ataque acelerado por sulfatos.

- Como último paso a los cilindros que no se afectaron tanto de su base superior e inferior se les aplica una carga de compresión para después cotejar con los cilindros que se probaron sanos y ver cuál es la disminución de resistencia.
- El tiempo total que se empleó en esta prueba fue de 2 meses.



Figuras . Especímenes CT050, CT065, CZ050 y CZ065 después de aplicar la compresión axial.

4.6.15 Prueba de Infrarrojo.

Para esta prueba se utilizó una cámara de fotografía infrarroja; La Prueba consistió en lo siguiente:

- A los especímenes cilíndricos de 10x20 cm y de 15x30 cm durante la prueba de Determinación del Módulo de Elasticidad se le tomaron fotografías de infrarrojo a cada 5 toneladas de carga.



Figura . Toma de fotografías en infrarrojo durante la determinación del Módulo Elástico.

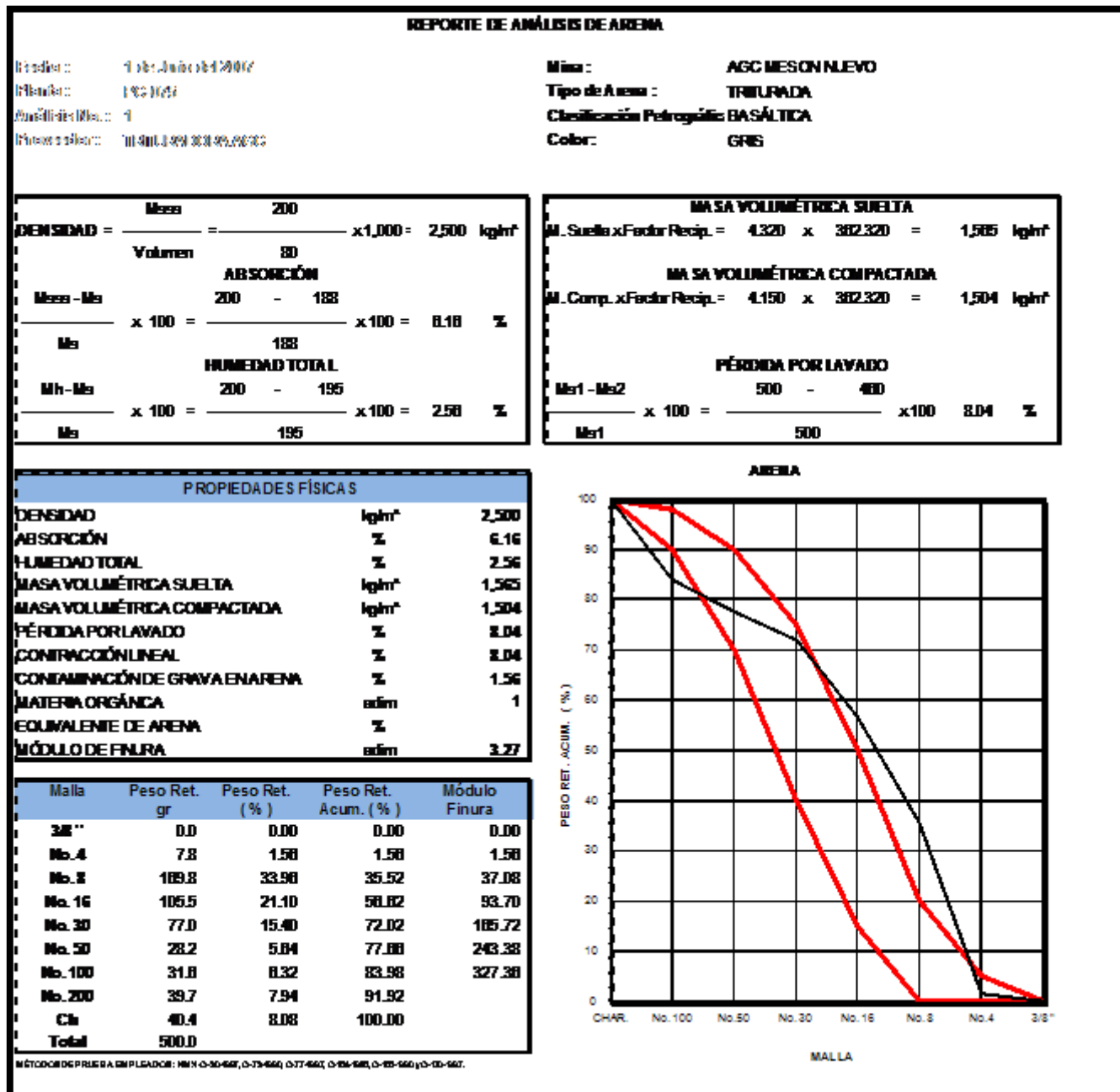
- Una vez que se obtuvo la carga para la prueba de módulo elástico del espécimen, y estando libre de los anillos de sujeción se les tomó fotografías durante la prueba de compresión a los cilindros hasta llegar a la falla.

5 RESULTADOS.

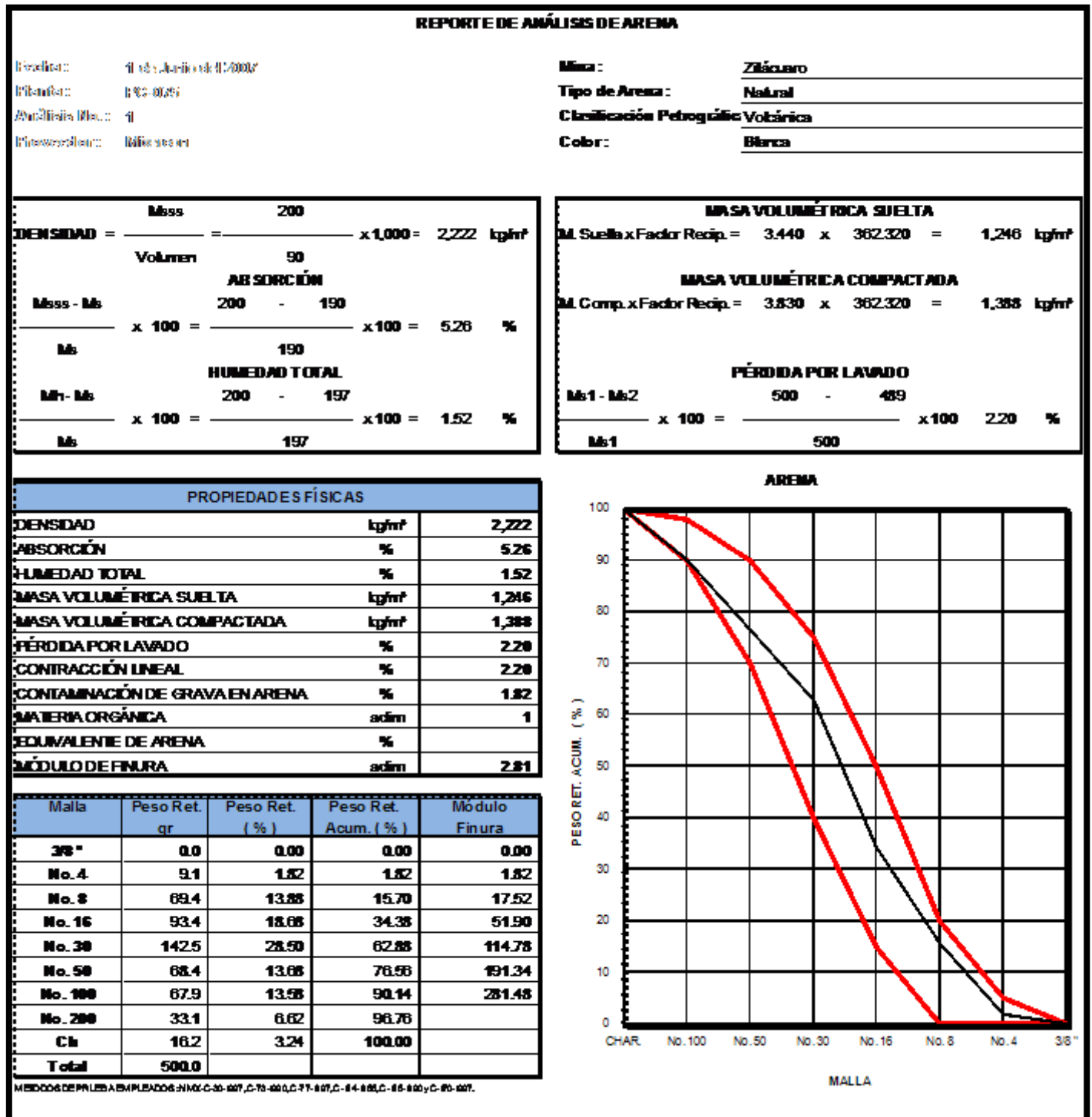
5.1 RESULTADOS DE MACROCARACTERIZACIÓN

5.1.1 Resultados de Granulometría, Pesos Volumétricos, Densidad y Absorción de los Agregados.

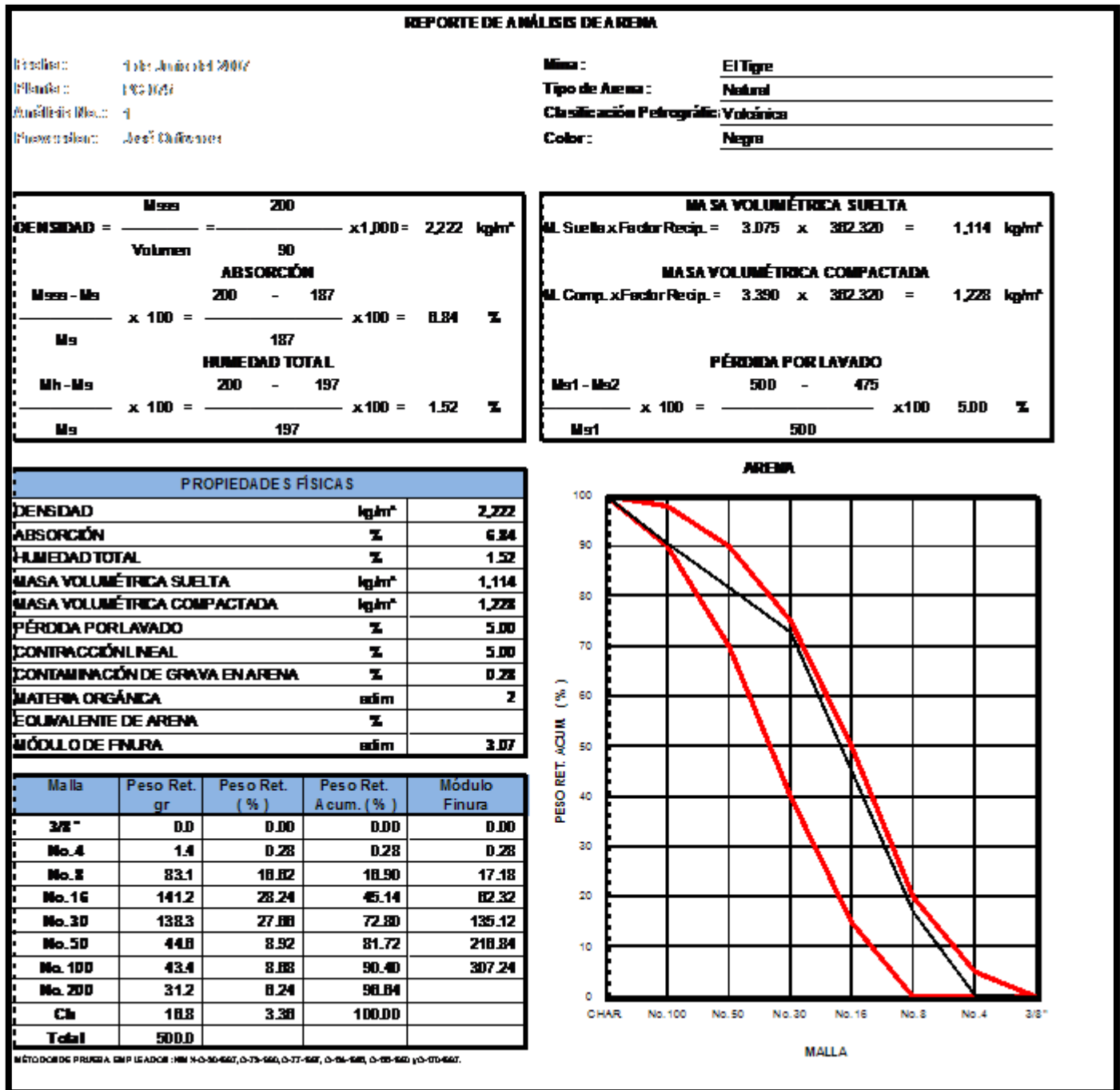
5.1.1.1 Polvo de Trituración AGC.



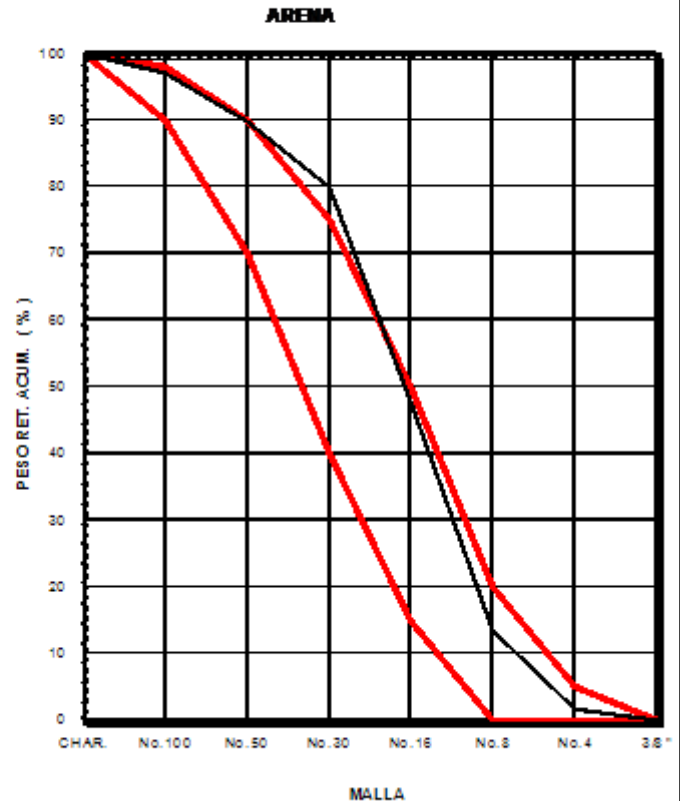
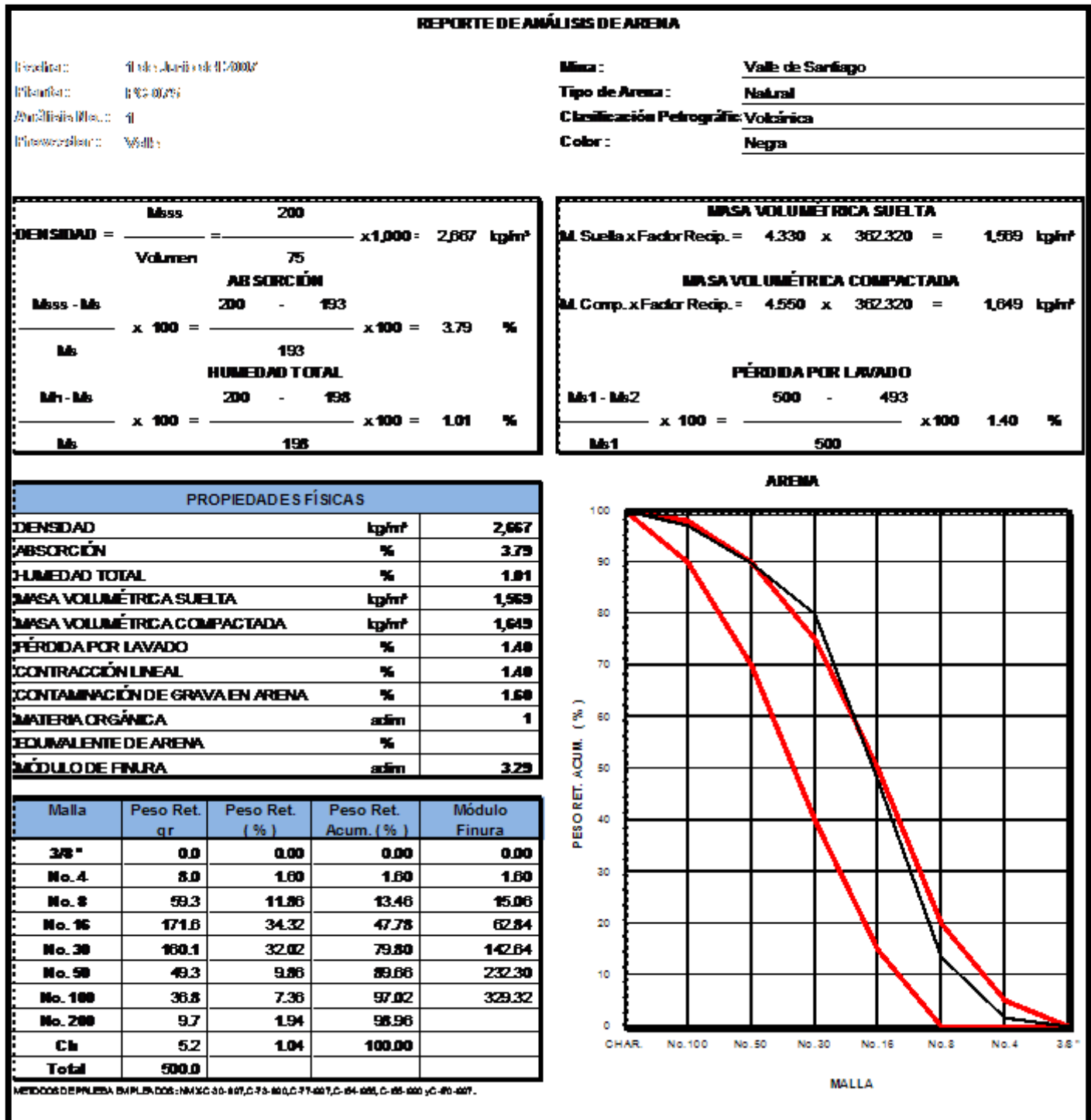
5.1.1.2 Arena Zitácuaro.



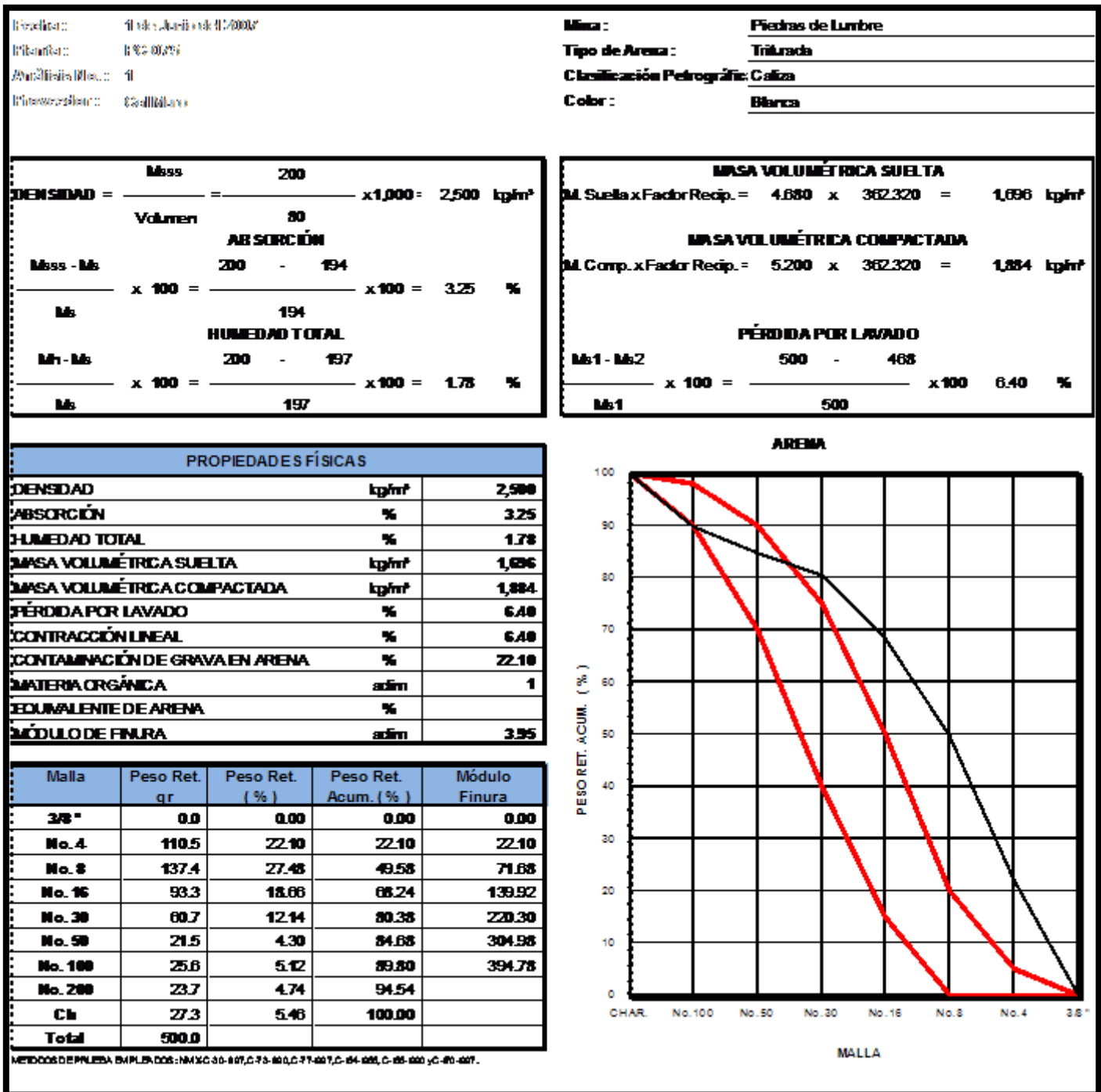
5.1.1.3 Arena del Tigre.



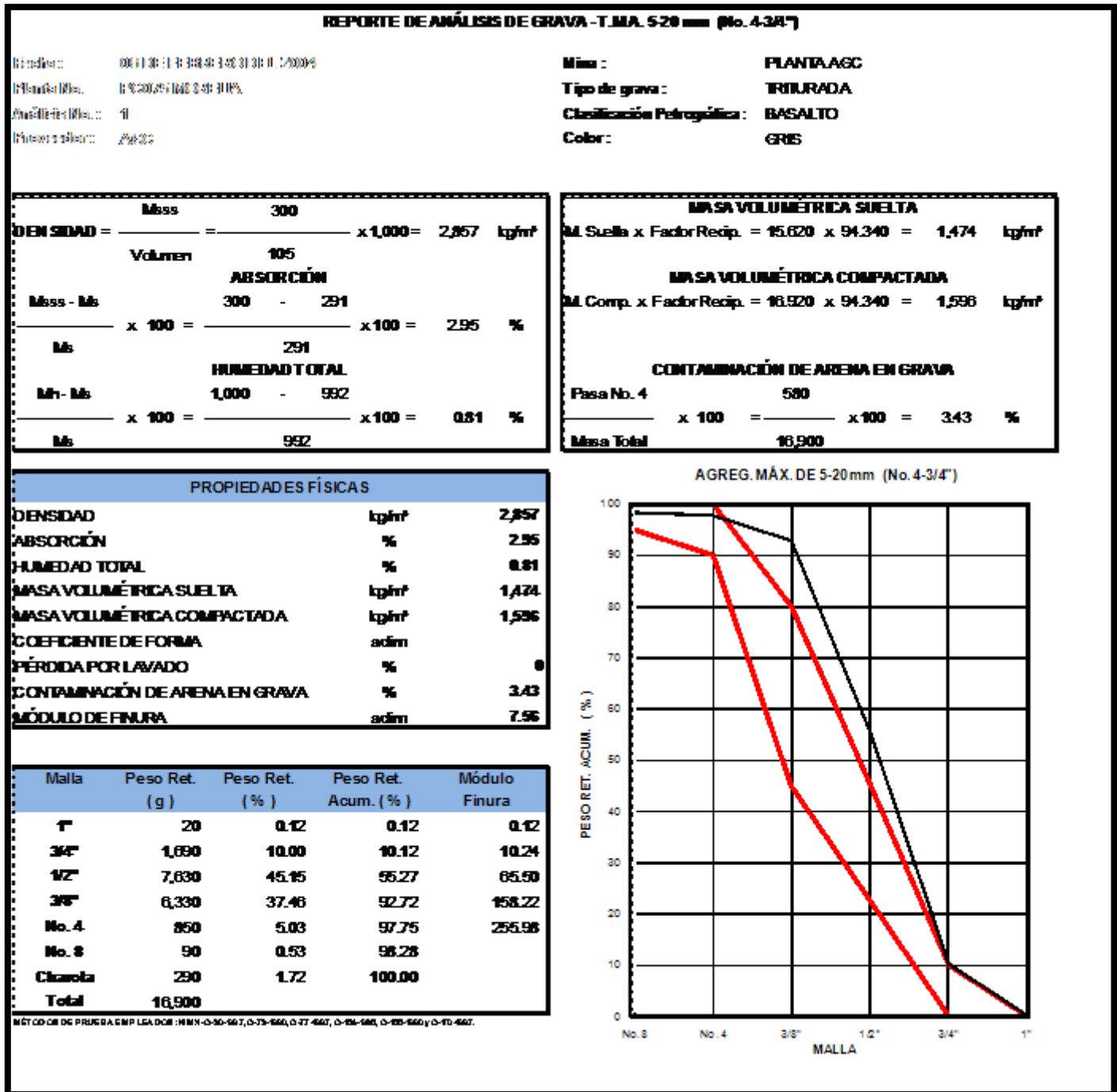
5.1.1.4 Arena de Valle.



5.1.1.5 Polvo de Caliza.



5.1.1.6 Grava AGC.



5.1.2 Resultados de Límites de Consistencia o de Atterberg en Finos de Arenas.

Los resultados que nos arrojó esta prueba es que los límites líquido y plástico no son apreciables para ningún material, lo cual con lleva a concluir que nuestros materiales no contienen finos con plasticidad apreciable o cuantificable.

Más sin en cambio en los especímenes de contracción lineal para las arenas se obtuvo contracción nula y en los polvos de trituración de AGC (Basalto) y Polvo de Trituración de Caliza se obtuvieron las siguientes contracciones de **1.91% y 3.2%** respectivamente, lo cual nos indica que estos materiales tienen una pequeña cantidad de material plástico que pudiera ser alguna contaminación de arcilla o limo al momento de su extracción.

5.2 RESULTADOS DE MICROCARACTERIZACIÓN

5.2.1 Resultados Obtenidos en Difracción.

Los resultados obtenidos en esta prueba son difractogramas, de los cuales debemos de identificar los picos, para con esto saber cuáles son los minerales presentes en nuestra muestra.

A continuación se muestran los resultados completos de algunas de las muestras, las cuales se analizaron con la tutoría del Dr. Aurelio Álvarez y Pérez.

Para la muestra J-1(Arena de Joyitas) tenemos:

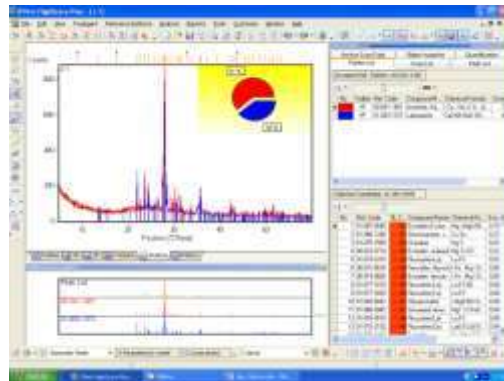


Figura . Difractograma de muestra J-1.

Del difractograma se observa que los principales componentes en la muestra son, la anhortita y la labradorita, aunque quedan algunos minerales por identificar.

Para la muestra EM-1(Arena del Río el Marqués) tenemos:

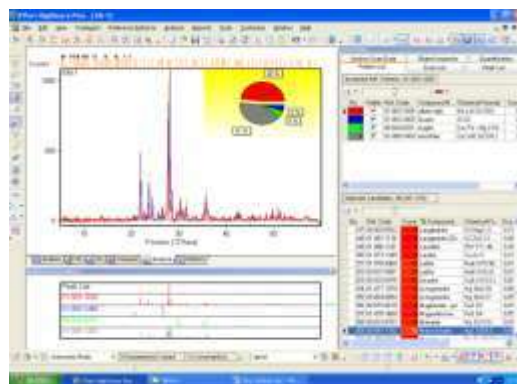


Figura . Difractograma de muestra EM-1.

Esta muestra se encuentra constituida por minerales de Albite, Cuarzo, Augita y Anhortita.

Para la muestra S-1 (Arena de Supra).

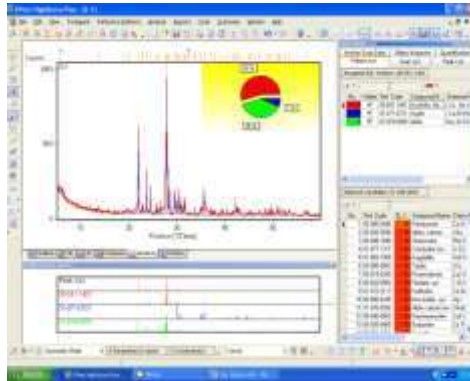


Figura . Difractograma de muestra S-1.

Para esta muestra los picos señalan minerales constitutivos de Anhortita, Augita y Albite.

Para la muestra AG-1 (Arena del AGC).

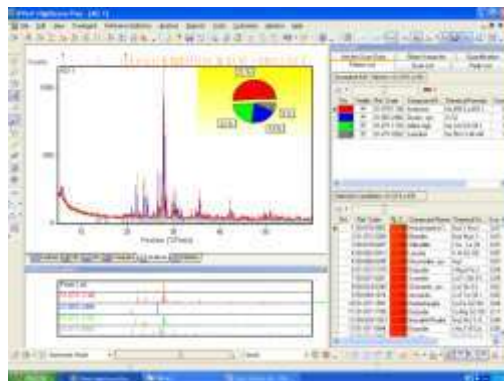


Figura . Difractograma de muestraAG-1.

En este caso se presentan en la muestra los minerales de Andesina, Cuarzo, Albite y Sanidina.

A continuación se presentan los difractogramas de otras muestras, de las cuales su identificación se encuentra en la parte superior izquierda.

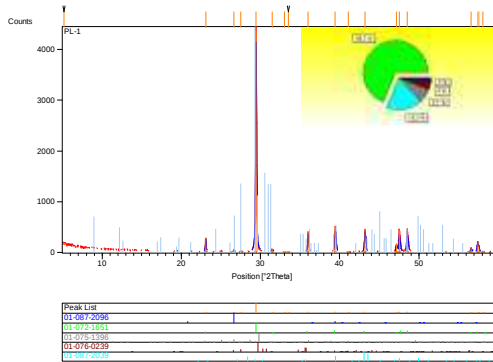


Figura . Difractograma de muestra PL-1
(Arena Piedras de Lumbre)

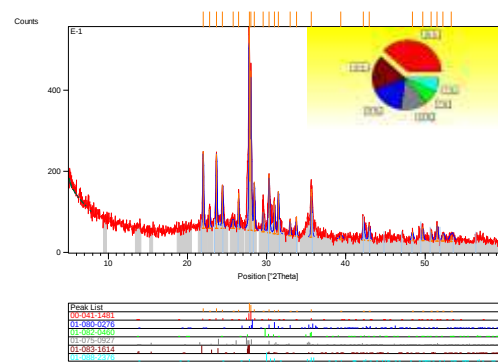


Figura . Difractograma de muestra E-1
(Arena de El Tigre).

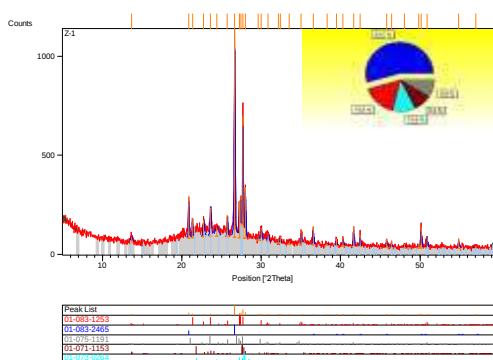


Figura . Difractograma de muestra Z-1
(Arena de Zinapécuaro).

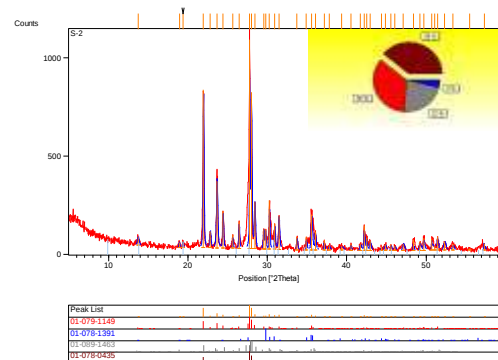


Figura . Difractograma de muestra S-2
(Grava de Supra).

Los difractogramas de algunas muestras quedan pendientes de identificar sus minerales constituyentes, no se logro identificarlos debido a la saturación de pruebas y a las pocas horas disponibles en el laboratorio, aunque cabe mencionar que se pueden identificar en algún otro laboratorio que maneje este tipo de pruebas, ya que se requiere de un software especial para poder manipular los archivos.

5.2.2 Resultados Obtenidos en Prueba de Microscopía Electrónica de Barrido.

Muestra Z-1 (Arena de Zinapécuaro).

Se obtuvo el siguiente espectro, mismo que nos da el análisis elemental de la muestra

Como se puede observar la muestra tiene un alto contenido de sílice (Cuarzo), una media cantidad de Aluminio, y pequeñas porciones de Sodio, Potasio y de Hierro.

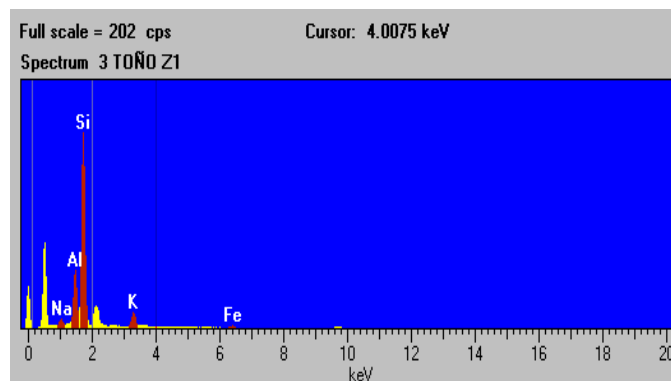


Figura . Espectro de muestra Z-1 (Arena de Zinapécuaro).

Se muestra el Mapping de la muestra en las siguientes fotografías.

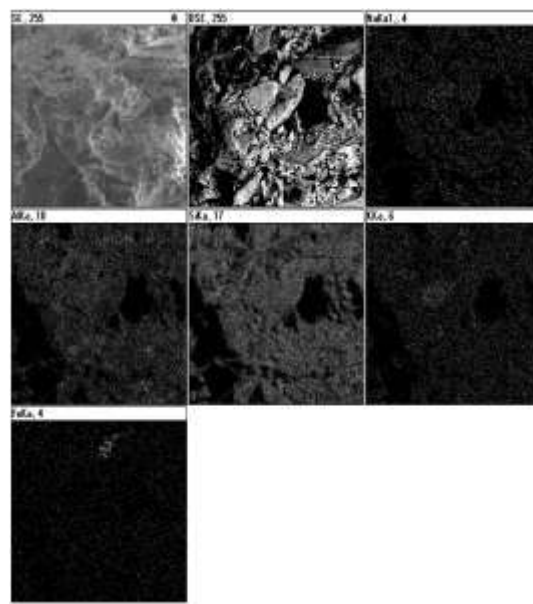


Figura . Fotos de Mapping en muestra Z-1 (Arena de Zinapécuaro).

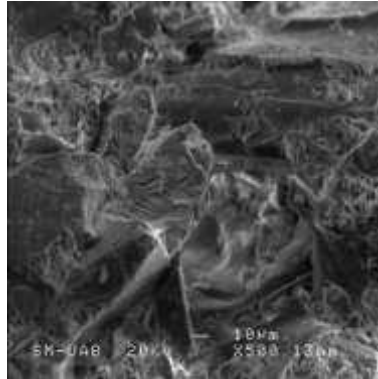


Figura . Foto de un grano del agregado Z-1(Arena de Zinapécuaro) a 500 aumentos.

Muestra V-1 (Arena de Valle de Santiago).

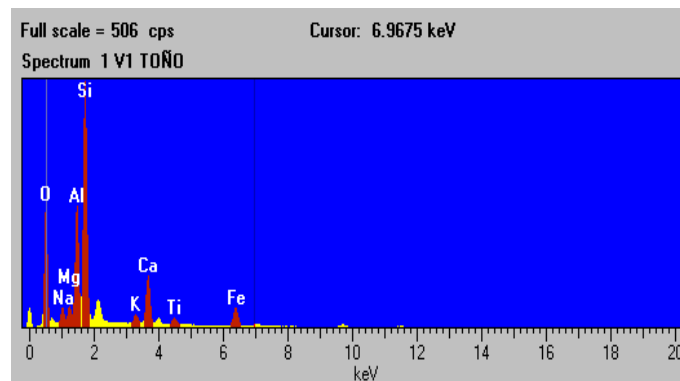


Figura . Espectro de muestra V-1 (Arena de Valle de Santiago).

Del espectro anterior se obtiene el análisis elemental de 2 granos de la muestra. La muestra se encuentra constituida por Sílice (Cuarzo), Aluminio, Magnesio, Calcio, Hierro, Magnesio, Sodio, Potasio y una cantidad pequeña de Titanio.

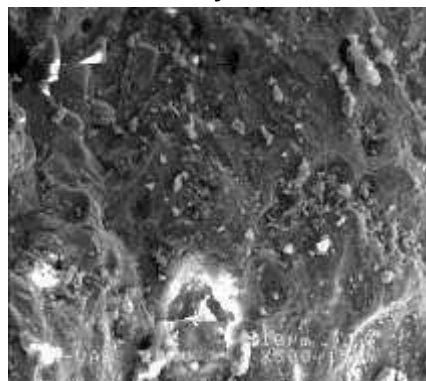


Figura . Foto tomada a la muestra V-1 (Arena de Valle de Santiago) a 500 aumentos.

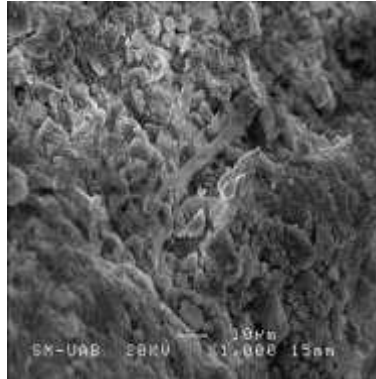


Figura . Foto tomada a la muestra V-1 (Arena de Valle de Santiago) a 1000 aumentos.

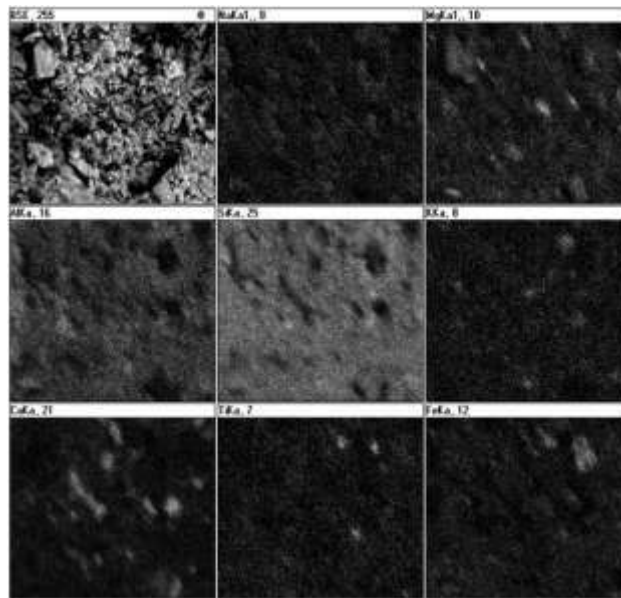


Figura . Fotos del Mapping realizado a la muestra V-1 (Arena de Valle de Santiago).

MUESTRA J-1(Arena de Joyitas).

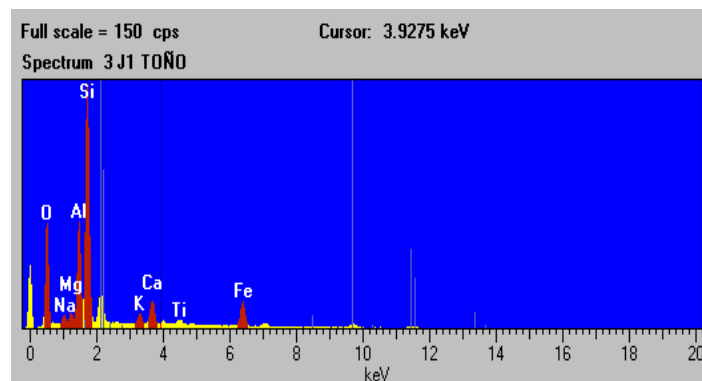


Figura . Espectro de la muestra J-1.

La composición de esta muestra es muy similar a la de la Muestra J-1, constituida por Sílice (Cuarzo), Aluminio, Magnesio, Calcio, Hierro, Magnesio, Sodio y Potasio.

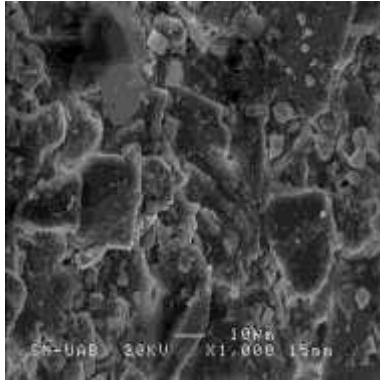


Figura . Foto tomada a 1000 aumentos de la muestra J-1 (Arena de Joyitas).

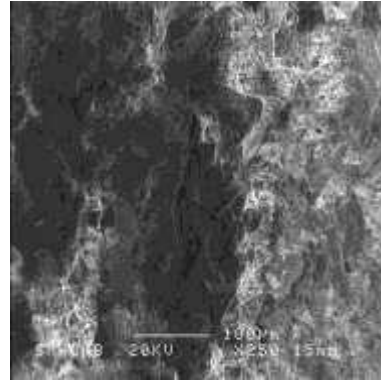


Figura . Foto tomada a 250 aumentos de la muestra J-1 (Arena de Joyitas).

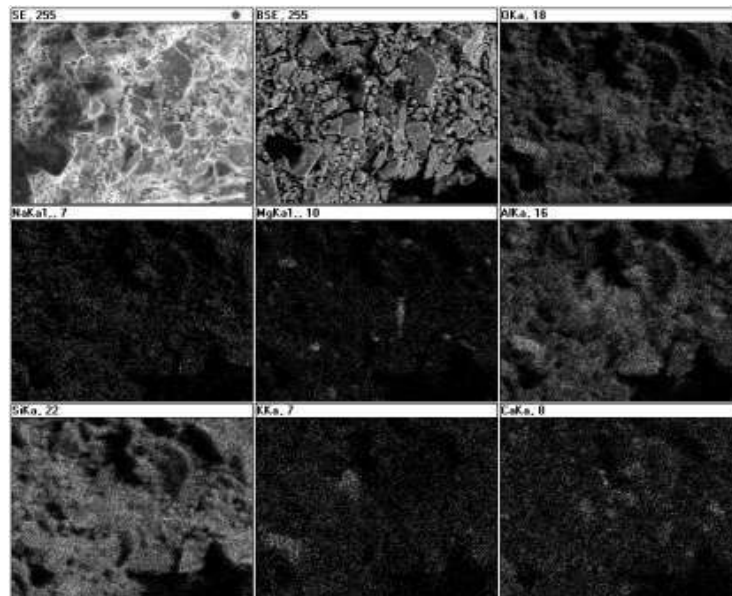


Figura 40. Mapping realizado a la muestra J-1 (Arena de Joyitas).

MUESTRA EM-1(Arena del Río el Marqués)

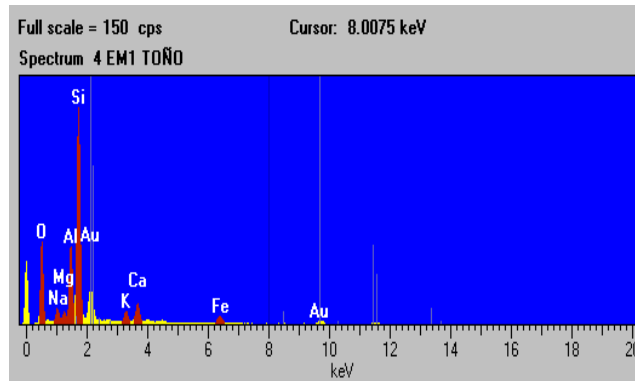


Figura . Espectro de muestra EM-1 (Arena del Río el Marqués).

Se observa que la muestra se encuentra formada principalmente por minerales de Sílice, Aluminio, Magnesio, Calcio, Sodio, Potasio y una muy pequeña cantidad de Hierro.

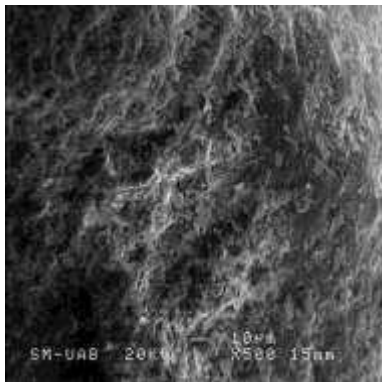


Figura . Fotografía realizada a 500 aumentos de muestra EM-1 (Arena del Río el Marqués).

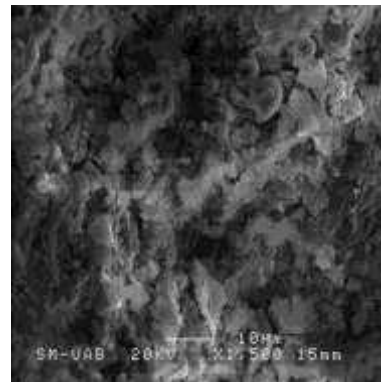


Figura . Fotografía realizada a 1500 aumentos de muestra EM-1 (Arena del Río el Marqués).

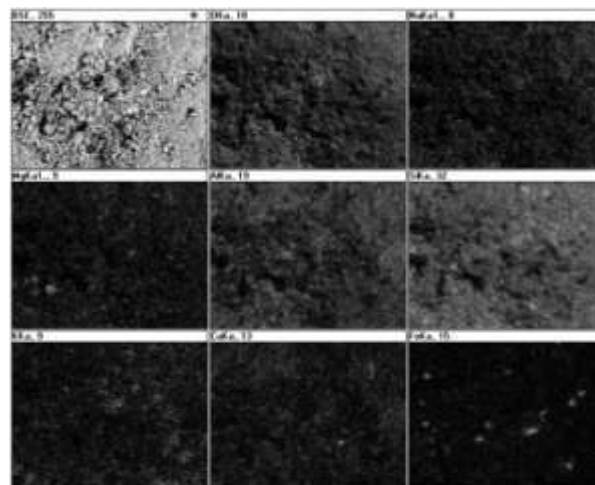


Figura . Mapping realizado a la muestra EM-1 (Arena del Río el Marqués).

MUESTRA E-1 (Arena de El Tigre).

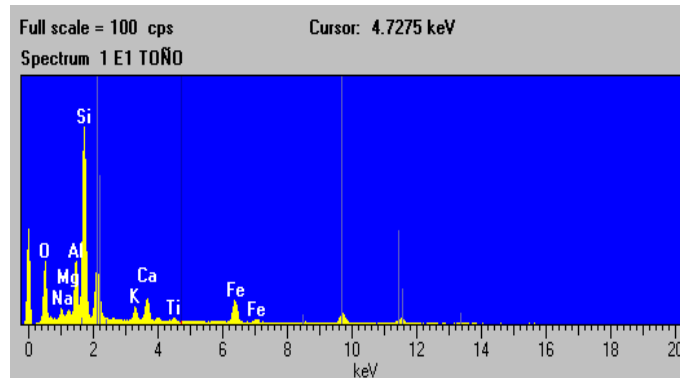


Figura . Espectro obtenido en la muestra E-1 (Arena de El Tigre).

Su composición es la siguiente: Sílice, Aluminio, Magnesio, Calcio, Sodio, Potasio y Minerales de Hierro.

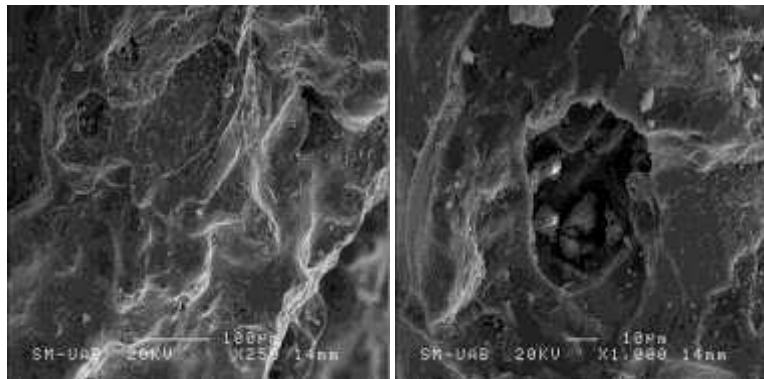


Figura y . Fotos tomadas a un grano de material a 250 y 1000 aumentos respectivamente en la muestra E-1 (Arena de El Tigre).

MUESTRA S-1(Arena de Supra).

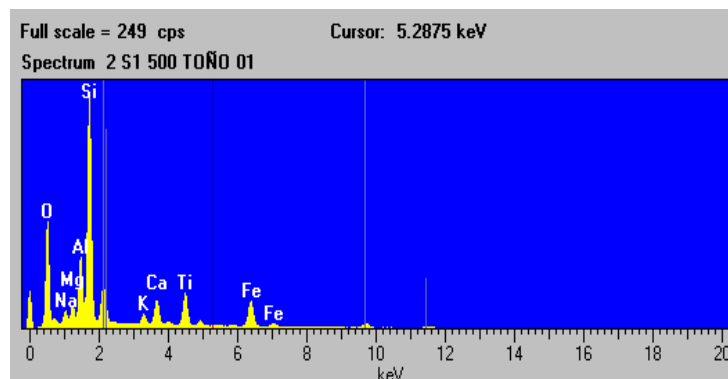


Figura . Espectro obtenido en muestra S-1 (Arena de Supra).

Su composición es la siguiente: Sílice, Aluminio, Magnesio, Calcio, Sodio, Potasio, Titanio y Minerales de Hierro.

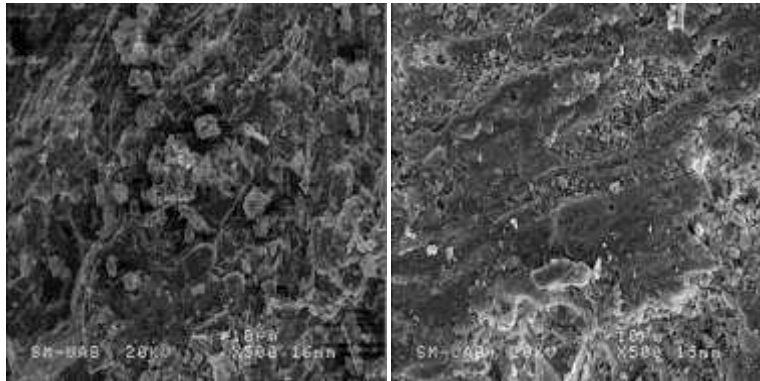


Figura y . Fotografías tomadas a 500 aumentos en 2 granos diferentes de la muestra S-1 (Arenas de Supra).

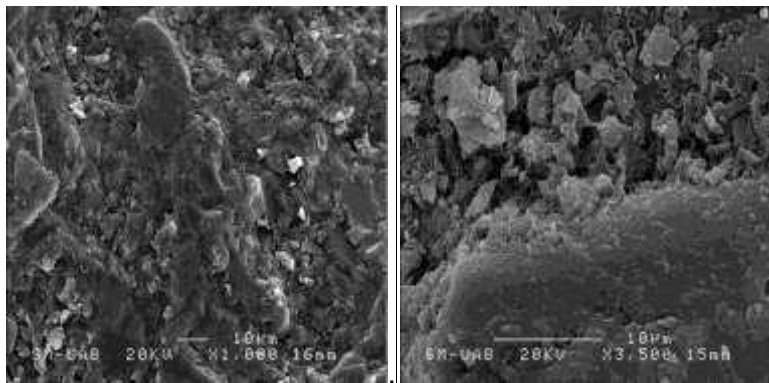


Figura y . Fotografías tomadas a 1000 y 3500 aumentos respectivamente a un grano de la muestra S-1 (Arenas de Supra).

MUESTRA A-1 (Arenas de Acámbaro).

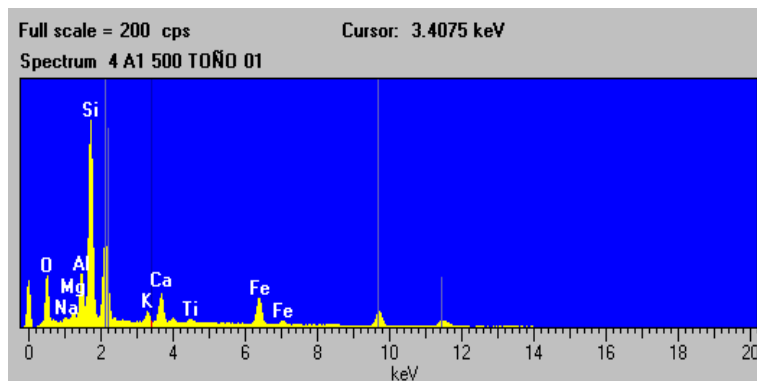


Figura . Espectro de muestra A-1 (Arenas de Acámbaro).

Su composición es la siguiente: Sílice, Aluminio, Magnesio, Calcio, Potasio, Titanio y Minerales de Hierro.

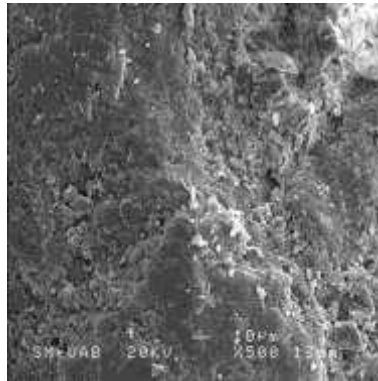


Figura . Fotografía tomada a 500 aumentos a un grano de la muestra A-1 (Arena de Acámbaro).

MUESTRA P-1 (Arena de Paracho).

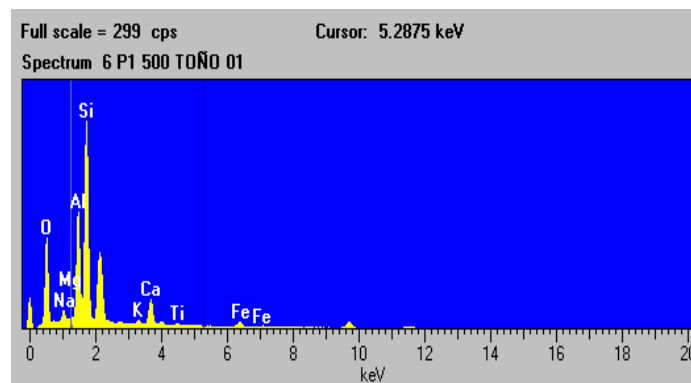


Figura . Espectro de la muestra P-1 (Arena de Paracho).

Su composición es la siguiente: Sílice, Aluminio, Magnesio, Calcio, Sodio, Potasio, Minerales de Hierro.

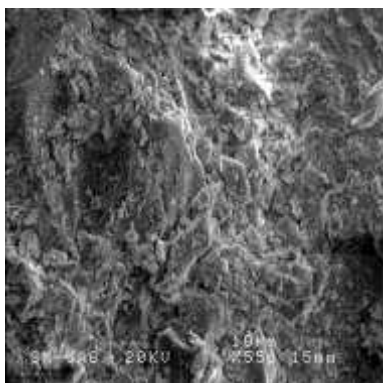


Figura . Fotografía tomada a 550 aumentos a un grano de la muestra P-1 (Arena de Paracho).

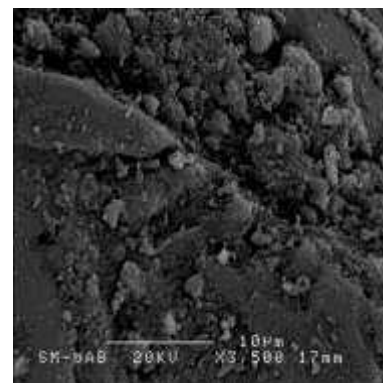


Figura . Fotografía tomada a 3500 aumentos a un grano de la muestra P-1 (Arena de Paracho).

MUESTRA AG-1 (Arena de AGC).

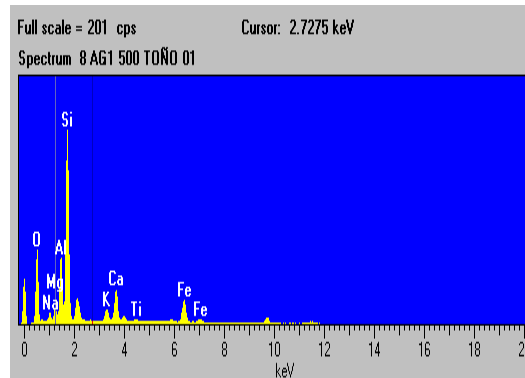


Figura . Espectro de la muestra AG-1 (Arena de AGC).

Contiene: Sílice, Aluminio, Magnesio, Calcio, Sodio, Potasio, Minerales de Hierro y poca cantidad de Titanio.

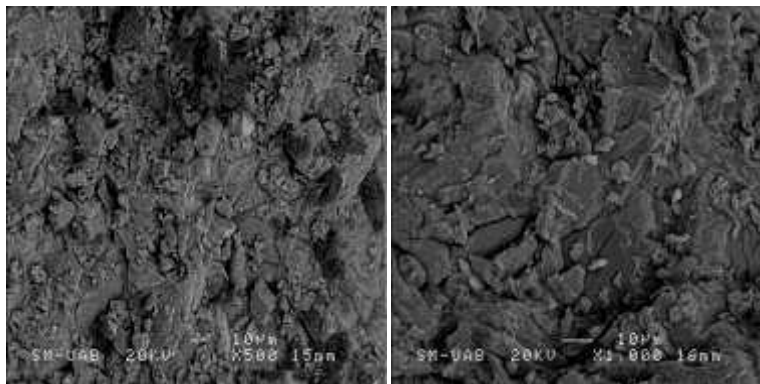


Figura y . Fotografías tomadas a 500 y 1000 aumentos respectivamente a un grano de la muestra AG-1 (Arena de AGC).

MUESTRA PL-1 (Arena de Piedras de Lumbre).

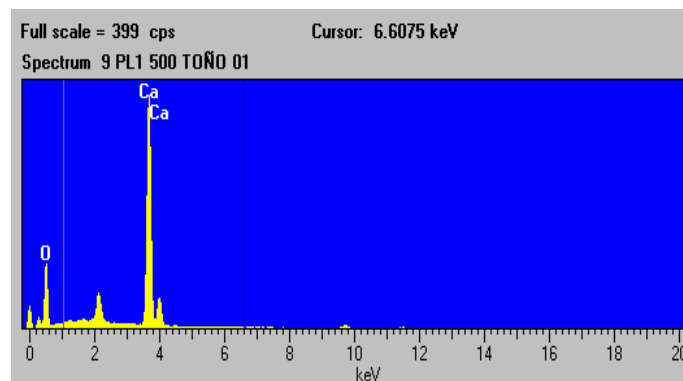


Figura . Espectro de la muestra PL-1 (Arena de Piedras de Lumbre).

Esta muestra solo contiene minerales de Calcio.

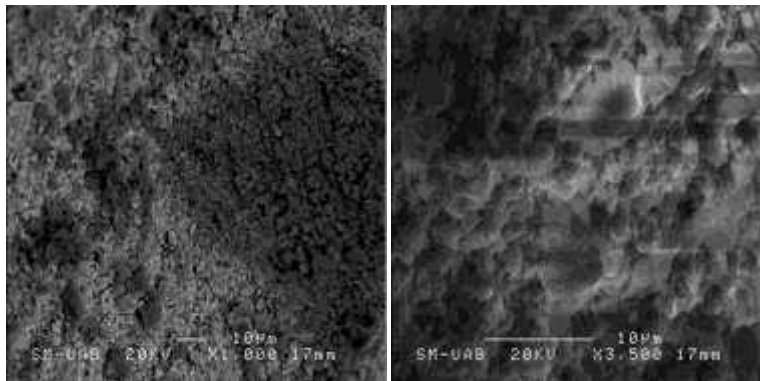


Figura y . Fotografías tomadas a 1000 y 3500 aumentos respectivamente a un grano de la muestra PL-1 (Arena de Piedras de Lumbre).

MUESTRA C-1 (Arena de Cerritos).

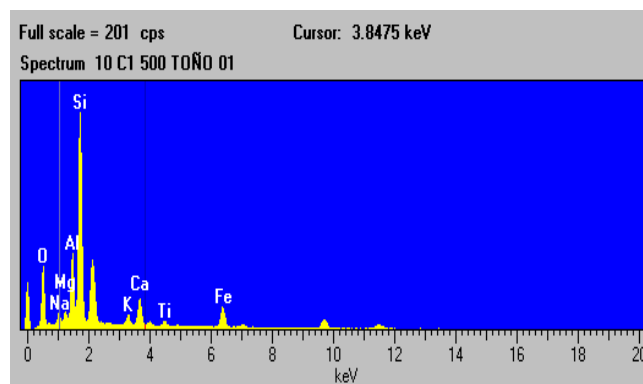


Figura . Espectro de la muestra C-1 (Arena de Cerritos).

Esta muestra contiene minerales de Sílice, Calcio, Aluminio, Magnesio, Sodio, Hierro y un poco de Titanio.

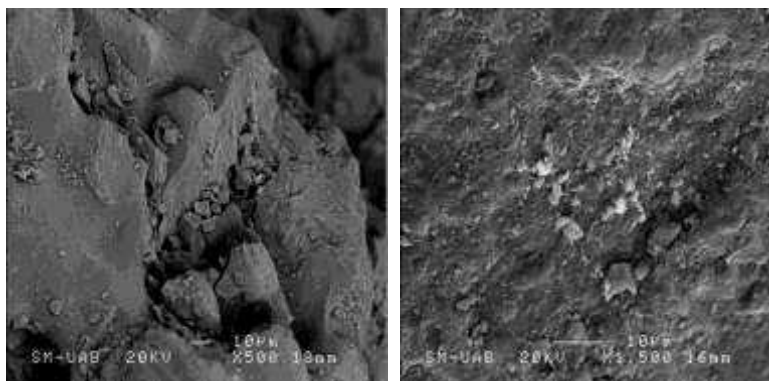


Figura y . Fotografías tomadas a 500 y 1500 aumentos respectivamente a un grano de la muestra C-1 (Arena de Cerritos).

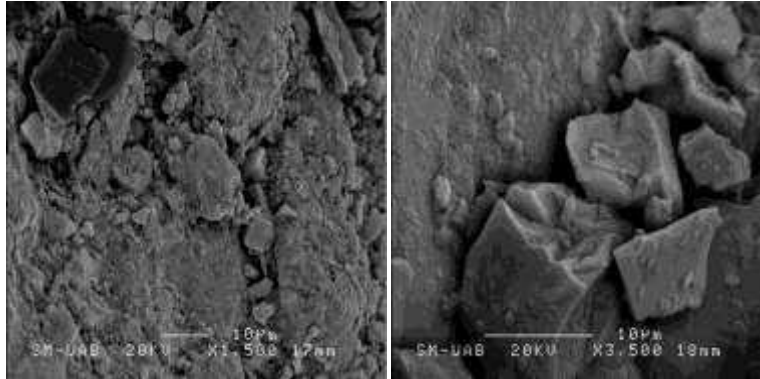


Figura y . Fotografías tomadas a 1500 y 3500 aumentos respectivamente a un grano de la muestra C-1 (Arena de Cerritos).

5.2.3 Resultados de la Prueba de Fluorescencia de Rayos X.

Tabla. Resultados de la Prueba de Fluorescencia de Rayos X.

	mg/kg												
SAMPLE ID	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mn	Mo	Pb	Rb	Sr	Ti	Zn	Zr
S-1 (Arena de Supra)	279	48403	<LOD	31331	<LOD	781	<LOD	<LOD	35	636	2993	47	108
C-1 (Arena de Cerritos)	402	41216	<LOD	39695	<LOD	660	<LOD	<LOD	25	488	5211	70	195
EM-1 (Arena Río el Marqués)	282	36956	<LOD	28276	2062	558	<LOD	<LOD	26	685	3159	60	121
S-2 (Grava Supra)	283	43150	<LOD	32827	<LOD	548	30	49	33	719	3257	54	113
C-2 (Grava de Cerritos)	349	46661	37	42182	<LOD	687	<LOD	118	25	496	5875	62	181
V-1 (Arena de Valle)	517	59776	<LOD	54929	<LOD	893	<LOD	12	16	576	10747	60	172
A-1 (Arena de Acámbaro)	148	16285	<LOD	11287	23630	233	<LOD	17	120	141	929	30	124
Z-1 (Arena de Zinapécuaro)	97	12122	<LOD	5968	21605	166	26	26	169	24	256	28	107
AG-1 (Arena de AGC)	351	49531	<LOD	36750	2476	453	50	<LOD	46	797	3777	62	133
J-2 (Grava de Joyitas)	344	39895	<LOD	32516	2246	549	<LOD	51	29	616	3736	65	154

En la tabla anterior se presentan los minerales constituyentes de las muestras analizadas así como la densidad de ellos en la muestra dados por miligramos cuantificados por cada kilogramo de muestra.

5.2.4 Resultados obtenidos en Mineralogía Óptica de Láminas Delgadas.

MUESTRA Z-1 (Arena de Zinapécuaro).

Al observar la muestra, contiene los siguientes minerales: Micas, Augitas, Sanidina, Ortoclasas, Plagioclasas (con extinción ondulante, debida al metamorfismo o a la alta presión) y Sílice (Cuarzo) el cual se encuentra en mayor cantidad.



Figura . Fotografía realizada con el microscopio óptico con Nícoles Cruzados a 4X de una Plagioclasea y un Cuarzo.

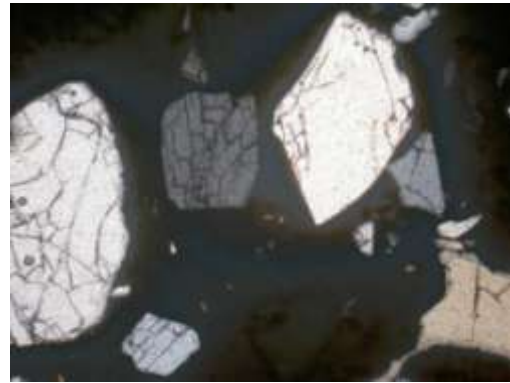


Figura . Fotografía realizada con Nícoles Cruzados a 4X de un Cuarzo y una Augita.

MUESTRA A-1 (Arena de Acámbaro).

En la muestra se observan Plagioclasas zonadas; en abundancia se encuentran Cuarzos y Fragmentos de Roca Andesita con microlitos, y Augitas.

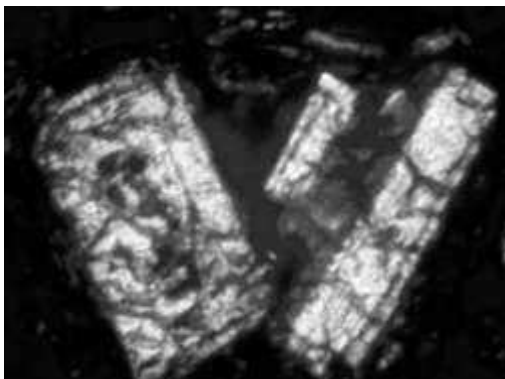


Figura . Fotografía realizada con Nícoles Cruzados a 20X de 3 Plagioclasas.



Figura . Fotografía realizada con Nícoles Cruzados a 4X de Plagioclasas.



Figura . Fotografía realizada con Nícoles Cruzados a 4X de Plagioclasas y Augita.

MUESTRA P-1 (Arena de Paracho).

Se pueden observar los siguientes minerales: Plagioclasas, Basaltos, Augitas, Dióxidos, Olivino, Anfíboles.



Figura . Fotografía realizada con Nícoles Cruzados a 4X de Plagioclasas y Augitas (Vista Norte).



Figura . Fotografía realizada con Nícoles Cruzados a 4X de Plagioclasas y Augitas (Vista Sur).

MUESTRA V-1(Arena de Valle de Santiago).

Observamos los siguientes minerales: Plagioclase Bitounita, Olivinos, Augitas, Basalto y Andesita.

Se tomaron las siguientes fotografías:

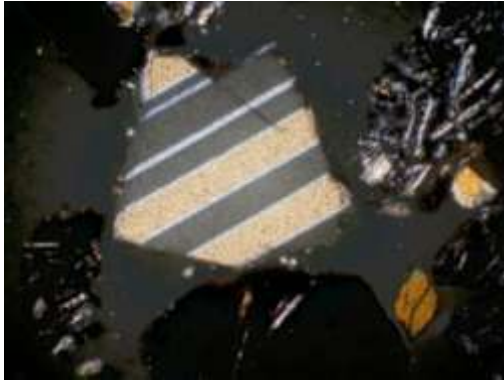


Figura . Fotografía realizada con Nícoles Cruzados a 10X de Plagioclase Bitounite.

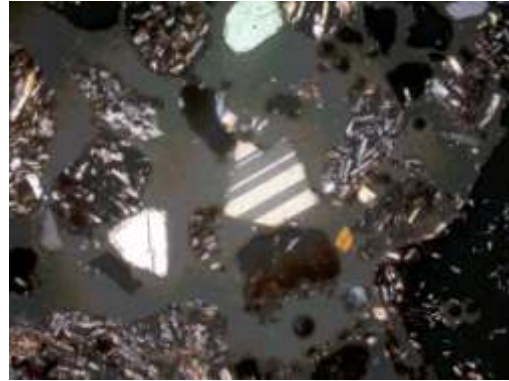


Figura . Fotografía realizada con Nícoles Cruzados a 4X de Plagioclase Bitounite, plagioclases y augitas.

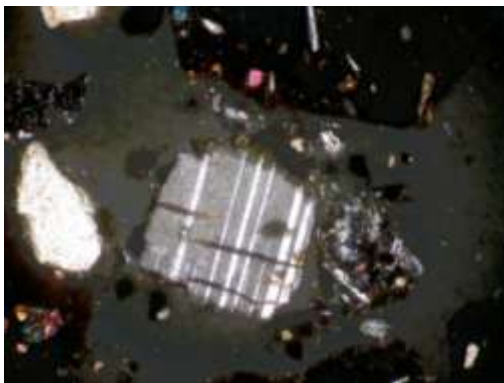


Figura . Fotografía realizada con Nícoles Cruzados a 10X de una Anortoclase.

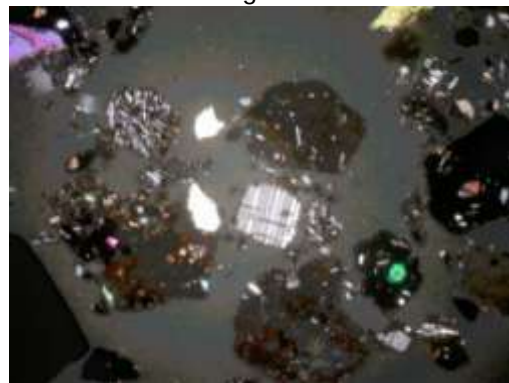


Figura . Fotografía realizada con Nícoles Cruzados a 4X de Anortoclase y Olivinos.

MUESTRA J-1 (Arena de Joyitas).

Se Observa Augitas, Olivinos, Plagioclases, Basaltos, Calcita (En pequeñas cantidades) y Piroxenos.



Figura . Fotografía realizada con Nícoles Cruzados a 10X de una plagioclase dentro de una matriz de basalto.

MUESTRA E-1 (Arena del río El Marqués).

Se observan Feldespatos en pequeños granos, Roca Volcánica muy fragmentada, Augitas y Plagioclasas.

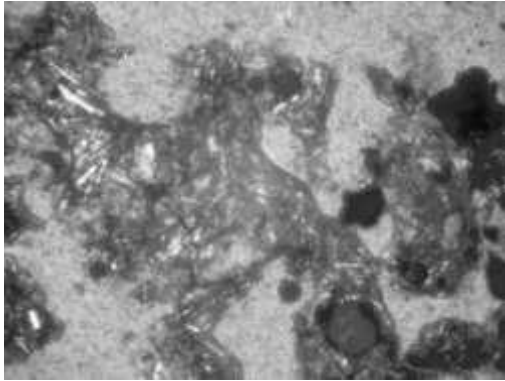


Figura . Fotografía realizada con Nícoles Cruzados a 10X de plagioclasas.



Figura . Fotografía realizada con Nícoles Cruzados a 10X de una augita.

5.3 Resultados de pruebas realizadas al Cemento y Agua para la Fabricación de Concreto Hidráulico.

5.3.1 Resultados del Método de Prueba Estándar para la determinación de la Consistencia Normal del Cemento Hidráulico.

La muestra de cemento empleada para esta prueba fue de 300grs de peso y la cantidad empleada de agua fue de 87 ml misma que nos arrojó una lectura de penetración en milímetros de 9; esta lectura cumple con lo establecido en la normativa.

La siguiente tabla nos muestra los tanteos realizados en esta prueba y su respectiva consistencia normal de la pasta de cemento:

Tabla . Determinación de la Consistencia Normal del Cemento.

TANTEO	% AGUA	AGUA (ml)	Lectura de Penetración (mm)	Consistencia Normal %
1	25	75	No trabajable	25.00
2	30	90	12.5	30.00
3	28	84	7	28.00
4	29	87	9	29.00

Para nuestro caso y de acuerdo con el tipo de cemento empleado se obtuvo una consistencia normal de 29%.

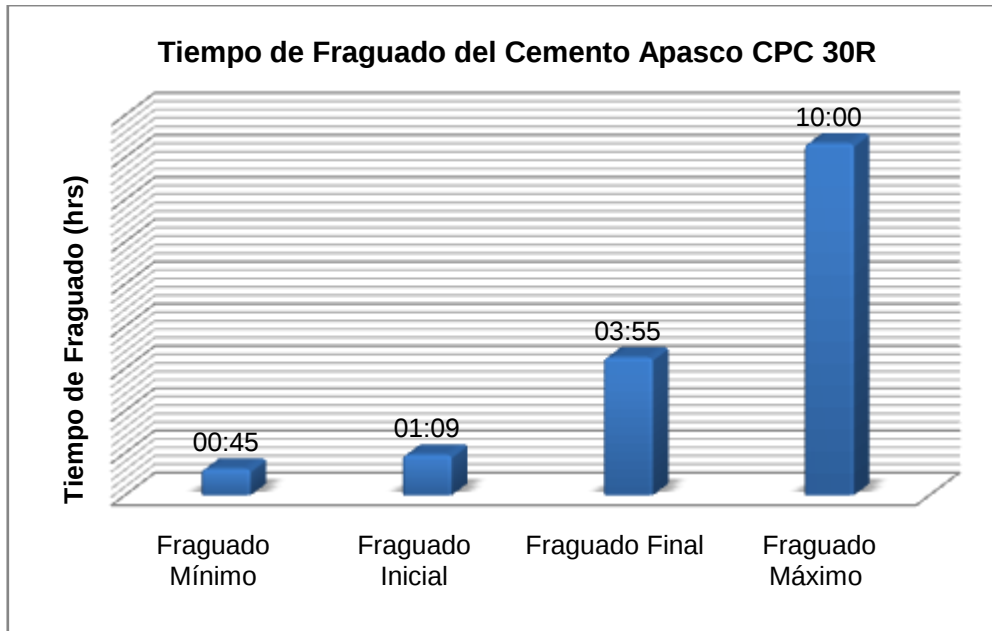
5.3.2 Resultados del Método de Prueba Estándar para la determinación del Tiempo de Fraguado del Cemento Hidráulico.

La siguiente tabla nos muestra los resultados obtenidos de esta prueba y vemos que los tiempos de fraguado inicial y final cumplen perfectamente con lo establecido en la normativa.

Tabla . Lecturas de la prueba de Fraguado del Cemento.

PRUEBA	Hr LECTURA	TIEMPO
INICIO FRAGUADO INICIAL	12:26	
TERMINO FRAGUADO INICIAL	13:35	01:09
INICIO FRAGUADO FINAL	13:35	
TERMINO FRAGUADO FINAL	17:30	03:55

Mediante el apoyo de esta gráfica se puede ver claramente los tiempos mínimos y máximos permitidos por la norma y los tiempos obtenidos.



Gráfica . Tiempos de Fraguado del Cemento Apasco CPC 30R.

5.3.3 Resultados del Método de Prueba Estándar para la Determinación de la Densidad Aparente del Cemento Hidráulico.

La prueba se realizó con una muestra de cemento de 64 grs. para cada uno de los matraces, la temperatura del baño maría fue de 38° durante toda la prueba, la lectura inicial se tomo una hora después de que se introdujo todo el cemento en el matraz y se homogenizo con el keroseno; la lectura final se tomo dos horas después de iniciada la prueba.

Para ejemplificar de una manera más práctica los resultados de la prueba se presenta la siguiente tabla:

Tabla . Determinación de la Densidad del Cemento.

ESPECIMEN	Tiempo Inicio	Tiempo Lectura Inicial	Lectura Inicial (mm)
1	11:37	12:30	0.5
2	11:37	12:37	0.7
ESPECIMEN	Tiempo Lectura Final	Lectura Final (mm)	DENSIDAD (g/cm3)
1	01:48	22.1	2.96
2	01:52	22.3	2.96

De acuerdo con la tabla se tiene para cada uno de los 2 matraces de prueba un valor de 2.96 g/cm^3 de densidad del cemento por lo que se toma como aprobada esta densidad debido a que no existió desviación alguna en los resultados; este resultado obtenido cumple de manera satisfactoria las solicitudes de la normativa.

5.3.4 Determinación de los valores característicos del Agua para elaborar Concreto Hidráulico.

La determinación de la calidad del agua se hizo con ayuda del laboratorio de ingeniería Ambiental perteneciente a la Facultad de Ingeniería Civil; Los laboratoristas tomaron muestras de agua de la llave que se encuentra en el laboratorio de materiales para posteriormente realizarle los análisis que determina la normativa correspondiente al empleo de agua para la fabricación de concreto hidráulico. El laboratorio expidió el siguiente reporte: En el cual el agua cumple para la fabricación de concreto Hidráulico.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental



Asunto: Reporte de análisis de calidad de agua
Hoja 1 de 1...

Laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas
Facultad de ingeniería Civil,

PRESENTE

Por este conducto, presentamos a usted los resultados de los estudios de calidad del agua, practicados a la muestra entregada en este laboratorio el día 24 de abril de 2009. El muestreo, transporte y preservación estuvo a cargo del solicitante. A la muestra se le practicó los análisis solicitados, conforme la Norma NMX-C-122-ONNCCE-2004, la cual establece los límites máximos de calidad del agua para la elaboración de concretos hidráulicos.

Tipo de muestreo: simple

Fecha de análisis: 24 al 29 de abril de 2009.

Tipo de agua: clara, para uso en fabricación de concreto hidráulico.

Resultados de laboratorio:

PARAMETRO	RESULTADO	LIMITE MÁXIMO NMX-C-122-ONNCCE-2004	MÉTODO UTILIZADO
pH	7.37	>6	NMX-AA-008-SCFI-2000
Temperatura (°C)	18.5	—	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad Electrolítica (µS/cm)	691	—	NMX-AA-093-SCFI-2000
Sólidos solubles (mg/l)	388	1500	Electrométrico
Oxígeno Disuelto (mg/l)	5.55	—	NMX-AA-012-SCFI-2001
Sulfatos (mg/l)	8	300	NMX-AA-074-1981
Cloruros (mg/l)	5.46	300	NMX-AA-073-SCFI-2001
Dureza total (mg/l CaCO ₃)	104.28	—	NMX-AA-072-SCFI-2001
Dureza cálcica (mg/l CaCO ₃)	89.72	—	Volumétrico
Sales de magnesio (mg/l CaCO ₃)	14.56	150	Volumétrico
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /l)	1	10	NMX-AA-030-SCFI-2001
Sólidos en suspensión (mg/l)	32	2000	NMX-AA-034-SCFI-2001

De lo anterior, se determina que la muestra de agua proporcionada **cumple** con los límites máximos establecidos para el agua cuya utilización será en la elaboración de concretos.

Sin otro particular por el momento reciba un cordial saludo.

Morelia Mich., a 30 de abril de 2009

ATENTAMENTE

Ing. 
Jefe del laboratorio de Ing. Sanitaria y Ambiental
Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.

C.c.p. Archivo

Edificio PIC
Tel. (443) 322 3500 - Ext. 4344

Ciudad Universitaria

Morelia Michoacán
Fax (443) 304 1052

5.4 Resultados Obtenidos del Diseño de Mezclas con metodología ACI.

5.4.1 Proporcionamientos obtenidos para cada Mezcla.

Tabla . Proporcionamiento empleado para mezcla AT050.

CALCULO DE MEZCLA									
PASO 1									
Revenimiento:		10	cm						
PASO 2									
Tamaño máximo de agregado:		19	mm						
PASO 3									
<u>Agua de mezclado:</u>		205	L/m3	Red. de agua con el aditivo, %:		0.0			
<u>Vacios en el concreto:</u>		2.0	%						
Agua real de mezclado:		205	L						
PASO 4									
Rel. a/c por resistencia:		0.40	(ver notas tabla 6.3.6)						
Rel. a/c por durabilidad:		0.40							
PASO 5									
Cemento, Kg/m3:		410			Rel. a/c selec.:		0.50		
PASO 6									
PVSC grava:		1,596	kg/m3						
<u>Contenido de grava:</u>		0.60	m3						
Peso de grava:		958	kg/m3						
PASO 7									
Contenido de arena:				Densidades:					
Vol. Cto., L/m3:		132			3.10				
Vol. Agua, L/m3:		205			1.00				
Vol. Vacíos, L/m3:		20							
Vol. Grava, L/m3:		335			2.86				
suma:		692							
Vol. de arena, L/m3:		308	(= 1000 - volumen resto de materiales)						
Peso de arena, Kg/m3:		683			2.222				
PASO 8									
Corrección por humedad:									
Material	Kg/m3	Humedad, %	+	Peso, Kg	Absorción, %	-	Peso, Kg	Pesos correc., Kg	
Arena	683	11.0		75	6.8		47	712	
Grava	958	2.6		25	3.0		28	954	
Agua	205			100			75	180	
Prop. Corregida por humedad:									
Cemento, Kg/m3:		410							
Agua, L/m3:		180							
Arena, Kg/m3:		712							
Grava, Kg/m3:		954							
Suma:		2256	Kg/m3						
PASO 9									
Corrección por rendimiento:									
Volumen de mezcla, L:		50							
Notas:									
1. Adición o sobrante de agua para alcanzar el revto. deseado:		0.000	L						
2. Adición o reducción de cemento para conservar la relación a/c:		0.000	Kg						
3. Adición de arena para mejorar la trabajabilidad:		0.000	Kg						
4. Adición de grava:		0.000	Kg						
4. Masa unitaria del concreto fresco:		2256	kg/m3						
					Rendimiento:		1000	L/m3	
Materiales reales empleados:									
Cemento, Kg:		20.500	(=cemento de diseño + cemento adicional)						
Agua, L:		9.017	(=agua de diseño+agua adicional)						
Arena, Kg:		35.588	(=arena de diseño+arena adicional)						
Grava, Kg:		47.695	(=grava de diseño+grava adicional)						
Suma, Kg:		112.800							
Rendimiento de la prueba:									
Rendimiento, L =		50.000							
Mezcla corregida:									
Cemento, Kg/m3:		410							
Agua, Kg/m3:		180							
Arena, Kg/m3:		712							
Grava, Kg/m3:		954							
Suma:		2256	kg/m3						

Tabla . Proporcionamiento empleado para mezcla AZ050.

CALCULO DE MEZCLA									
PASO 1									
Revenimiento:		10	cm						
PASO 2									
Tamaño máximo de agregado:		19	mm						
PASO 3									
Agua de mezclado:		205	L/m3		Red. de agua con el aditivo, %:		0.0		
Vacíos en el concreto:		2.0	%						
Agua real de mezclado:		205	L						
PASO 4									
Rel. a/c por resistencia:		0.40	(ver notas tabla 6.3.6)						
Rel. a/c por durabilidad:		0.40							
PASO 5									
Cemento, Kg/m3:		410			Rel. a/c selec.:		0.50		
PASO 6									
PVSC grava:		1,596	kg/m3						
Contenido de grava:		0.62	m3						
Peso de grava:		990	kg/m3						
PASO 7									
Contenido de arena:				Densidades:					
Vol. Cto., L/m3:		132					3.10		
Vol. Agua, L/m3:		205					1.00		
Vol. Vacíos, L/m3:		20							
Vol. Grava, L/m3:		346					2.86		
suma:		704							
Vol. de arena, L/m3:		296	(= 1000 - volumen resto de materiales)						
Peso de arena, Kg/m3:		659					2.222		
PASO 8									
Corrección por humedad:									
			+		-				
Material	Kg/m3	Humedad, %	Peso, Kg	Absorción, %	Peso, Kg	Pesos correc., Kg			
Arena	659	2.2	15	5.3	35	639			
Grava	990	3.0	30	3.0	29	990			
Agua	205		44		64	224			
Prop. Corregida por humedad:									
Cemento, Kg/m3:		410							
Agua, L/m3:		224							
Arena, Kg/m3:		639							
Grava, Kg/m3:		990							
Suma:		2263	Kg/m3						
PASO 9									
Corrección por rendimiento:									
Volumen de mezcla, L:		50							
Notas:									
1. Adición o sobrante de agua para alcanzar el revto. deseado:						0.000	L		
2. Adición o reducción de cemento para conservar la relación a/c:						0.000	Kg		
3. Adición de arena para mejorar la trabajabilidad:						0.000	Kg		
4. Adición de grava:						0.000	Kg		
4. Masa unitaria del concreto fresco:						2263	kg/m3		
						Rendimiento:	1000	L/m3	
Materiales reales empleados:									
Cemento, Kg:		20.500	(=cemento de diseño + cemento adicional)						
Agua, L:		11.223	(=agua de diseño+agua adicional)						
Arena, Kg:		31.938	(=arena de diseño+arena adicional)						
Grava, Kg:		49.494	(=grava de diseño+grava adicional)						
Suma, Kg:		113.155							
Rendimiento de la prueba:									
Rendimiento, L =		50.002							
Mezcla corregida:									
Cemento, Kg/m3:		410							
Agua, Kg/m3:		224							
Arena, Kg/m3:		639							
Grava, Kg/m3:		990							
Suma:		2263	kg/m3						

Tabla . Proporcionamiento empleado para mezcla CT050.

CALCULO DE MEZCLA									
PASO 1									
Revenimiento:		10	cm						
PASO 2									
Tamaño máximo de agregado:		19	mm						
PASO 3									
<u>Agua de mezclado:</u>		205	L/m3	Red. de agua con el aditivo, %:		0.0			
<u>Vacios en el concreto:</u>		2.0	%						
Agua real de mezclado:		205	L						
PASO 4									
Rel. a/c por resistencia:		0.40	(ver notas tabla 6.3.6)						
Rel. a/c por durabilidad:		0.40							
PASO 5									
Cemento, Kg/m3:		410			Rel. a/c selec.:		0.50		
PASO 6									
PVSC grava:		1,558	kg/m3						
<u>Contenido de grava:</u>		0.60	m3						
Peso de grava:		935	kg/m3						
PASO 7									
Contenido de arena:				Densidades:					
Vol. Cto., L/m3:		132			3.10				
Vol. Agua, L/m3:		205			1.00				
Vol. Vacíos, L/m3:		20							
Vol. Grava, L/m3:		343			2.72				
suma:		701							
Vol. de arena, L/m3:		299	(= 1000 - volumen resto de materiales)						
Peso de arena, Kg/m3:		665			2.222				
PASO 8									
Corrección por humedad:									
			+		-				
Material	Kg/m3	Humedad,%	Peso, Kg	Absorción,%	Peso, Kg	Pesos correc., Kg			
Arena	665	3.4	23	6.8	45	642			
Grava	935	0.6	6	0.6	5	935			
Agua	205		28		51	228			
Prop. Corregida por humedad:									
Cemento, Kg/m3:		410							
Agua, L/m3:		228							
Arena, Kg/m3:		642							
Grava, Kg/m3:		935							
Suma:		2215	Kg/m3						
PASO 9									
Corrección por rendimiento:									
Volumen de mezcla, L:		50							
Notas:									
1. Adición o sobrante de agua para alcanzar el revto. deseado:		0.000	L						
2. Adición o reducción de cemento para conservar la relación a/c:		0.000	Kg						
3. Adición de arena para mejorar la trabajabilidad:		0.000	Kg						
4. Adición de grava:		0.000	Kg						
4. Masa unitaria del concreto fresco:		2215	kg/m3						
				Rendimiento:		1000	L/m3		
Materiales reales empleados:									
Cemento, Kg:		20.500	(=cemento de diseño + cemento adicional)						
Agua, L:		11.377	(=agua de diseño+agua adicional)						
Arena, Kg:		32.114	(=arena de diseño+arena adicional)						
Grava, Kg:		46.754	(=grava de diseño+grava adicional)						
Suma, Kg:		110.744							
Rendimiento de la prueba:									
Rendimiento, L =		49.997							
Mezcla corregida:									
Cemento, Kg/m3:		410							
Agua, Kg/m3:		228							
Arena, Kg/m3:		642							
Grava, Kg/m3:		935							
Suma:		2215	kg/m3						

Tabla . Proporcionamiento empleado para mezcla CZ050.

CALCULO DE MEZCLA						
PASO 1						
Revenimiento:	10	cm				
PASO 2						
Tamaño máximo de agregado:	19	mm				
PASO 3						
Agua de mezclado:	205	L/m3	Red. de agua con el aditivo, %:	0.0		
Vacios en el concreto:	2.0	%				
Agua real de mezclado:	205	L				
PASO 4						
Rel. a/c por resistencia:	0.40	(ver notas tabla 6.3.6)				
Rel. a/c por durabilidad:	0.40					
PASO 5						
Cemento, Kg/m3:	410	Rel. a/c selec.:			0.50	
PASO 6						
PVSC grava:	1,558	kg/m3				
Contenido de grava:	0.62	m3				
Peso de grava:	966	kg/m3				
PASO 7						
Contenido de arena:			Densidades:			
Vol. Cto., L/m3:	132			3.10		
Vol. Agua, L/m3:	205			1.00		
Vol. Vacíos, L/m3:	20					
Vol. Grava, L/m3:	355			2.72		
suma:	712					
Vol. de arena, L/m3:	288	(= 1000 - volumen resto de materiales)				
Peso de arena, Kg/m3:	640			2.222		
PASO 8						
Corrección por humedad:						
			+		-	
Material	Kg/m3	Humedad,%	Peso, Kg	Absorción,%	Peso, Kg	Pesos correc., Kg
Arena	640	5.4	34	5.3	34	640
Grava	966	0.4	4	0.6	6	964
Agua	205		38		39	206
Prop. Corregida por humedad:						
Cemento, Kg/m3:	410					
Agua, L/m3:	206					
Arena, Kg/m3:	640					
Grava, Kg/m3:	964					
Suma:	2221	Kg/m3				
PASO 9						
Corrección por rendimiento:						
Volumen de mezcla, L:	50					
Notas:						
1. Adición o sobrante de agua para alcanzar el revto. deseado:	0.000	L				
2. Adición o reducción de cemento para conservar la relación a/c:	0.000	Kg				
3. Adición de arena para mejorar la trabajabilidad:	0.000	Kg				
4. Adición de grava:	0.000	Kg				
4. Masa unitaria del concreto fresco:	2221	kg/m3				
Rendimiento:					1000	L/m3
Materiales reales empleados:						
Cemento, Kg:	20.500	(=cemento de diseño + cemento adicional)				
Agua, L:	10.297	(=agua de diseño+agua adicional)				
Arena, Kg:	32.018	(=arena de diseño+arena adicional)				
Grava, Kg:	48.216	(=grava de diseño+grava adicional)				
Suma, Kg:	111.030					
Rendimiento de la prueba:						
Rendimiento, L =	49.991					
Mezcla corregida:						
Cemento, Kg/m3:	410					
Agua, Kg/m3:	206					
Arena, Kg/m3:	640					
Grava, Kg/m3:	964					
Suma:	2221	kg/m3				

Tabla . Proporcionamiento empleado para mezcla AT065.

CALCULO DE MEZCLA						
PASO 1						
Revenimiento:	10	cm				
PASO 2						
Tamaño máximo de agregado:	19	mm				
PASO 3						
Agua de mezclado:	205	L/m3	Red. de agua con el aditivo, %:	0.0		
Vacíos en el concreto:	2.0	%				
Agua real de mezclado:	205	L				
PASO 4						
Rel. a/c por resistencia:	0.40	(ver notas tabla 6.3.6)				
Rel. a/c por durabilidad:	0.40					
PASO 5						
Cemento, Kg/m3:	315	Rel. a/c selec.:			0.65	
PASO 6						
PVSC grava:	1,596	kg/m3				
Contenido de grava:	0.60	m3				
Peso de grava:	958	kg/m3				
PASO 7						
Contenido de arena:			Densidades:			
Vol. Cto., L/m3:	102			3.10		
Vol. Agua, L/m3:	205			1.00		
Vol. Vacíos, L/m3:	20					
Vol. Grava, L/m3:	335			2.86		
suma:	662					
Vol. de arena, L/m3:	338	(= 1000 - volumen resto de materiales)				
Peso de arena, Kg/m3:	751			2.222		
PASO 8						
Corrección por humedad:						
			+		-	
Material	Kg/m3	Humedad,%	Peso, Kg	Absorción,%	Peso, Kg	Pesos correc., Kg
Arena	751	11.0	83	6.8	51	782
Grava	958	2.6	25	3.0	28	954
Agua	205		107		80	178
Prop. Corregida por humedad:						
Cemento, Kg/m3:	315					
Agua, L/m3:	178					
Arena, Kg/m3:	782					
Grava, Kg/m3:	954					
Suma:	2229	Kg/m3				
PASO 9						
Corrección por rendimiento:						
Volumen de mezcla, L:	50					
Notas:						
1. Adición o sobrante de agua para alcanzar el revto. deseado:	0.000	L				
2. Adición o reducción de cemento para conservar la relación a/c:	0.000	Kg				
3. Adición de arena para mejorar la trabajabilidad:	0.000	Kg				
4. Adición de grava:	0.000	Kg				
4. Masa unitaria del concreto fresco:	2229	kg/m3				
					Rendimiento:	1000 L/m3
Materiales reales empleados:						
Cemento, Kg:	15.769	(=cemento de diseño + cemento adicional)				
Agua, L:	8.877	(=agua de diseño+agua adicional)				
Arena, Kg:	39.119	(=arena de diseño+arena adicional)				
Grava, Kg:	47.695	(=grava de diseño+grava adicional)				
Suma, Kg:	111.461					
Rendimiento de la prueba:						
Rendimiento, L =	50.005					
Mezcla corregida:						
Cemento, Kg/m3:	315					
Agua, Kg/m3:	178					
Arena, Kg/m3:	782					
Grava, Kg/m3:	954					
Suma:	2229	kg/m3				

Tabla . Proporcionamiento empleado para mezcla AZ065.

CALCULO DE MEZCLA						
PASO 1						
Revenimiento:	10	cm				
PASO 2						
Tamaño máximo de agregado:	19	mm				
PASO 3						
Agua de mezclado:	205	L/m3	Red. de agua con el aditivo, %:	0.0		
Vacíos en el concreto:	2.0	%				
Agua real de mezclado:	205	L				
PASO 4						
Rel. a/c por resistencia:	0.40	(ver notas tabla 6.3.6)				
Rel. a/c por durabilidad:	0.40					
PASO 5						
Cemento, Kg/m3:	315	Rel. a/c selec.:			0.65	
PASO 6						
PVSC grava:	1,596	kg/m3				
Contenido de grava:	0.62	m3				
Peso de grava:	990	kg/m3				
PASO 7						
Contenido de arena:		Densidades:				
Vol. Cto., L/m3:	102				3.10	
Vol. Agua, L/m3:	205				1.00	
Vol. Vacíos, L/m3:	20					
Vol. Grava, L/m3:	346				2.86	
suma:	673					
Vol. de arena, L/m3:	327	(= 1000 - volumen resto de materiales)				
Peso de arena, Kg/m3:	726	2.222				
PASO 8						
Corrección por humedad:						
			+		-	
Material	Kg/m3	Humedad,%	Peso, Kg	Absorción,%	Peso, Kg	Pesos correc., Kg
Arena	726	2.2	16	5.3	38	705
Grava	990	3.0	30	3.0	29	990
Agua	205		46		67	227
Prop. Corregida por humedad:						
Cemento, Kg/m3:	315					
Agua, L/m3:	227					
Arena, Kg/m3:	705					
Grava, Kg/m3:	990					
Suma:	2236	Kg/m3				
PASO 9						
Corrección por rendimiento:						
Volumen de mezcla, L:	50					
Notas:						
1. Adición o sobrante de agua para alcanzar el revto. deseado:	0.000	L				
2. Adición o reducción de cemento para conservar la relación a/c:	0.000	Kg				
3. Adición de arena para mejorar la trabajabilidad:	0.000	Kg				
4. Adición de grava:	0.000	Kg				
4. Masa unitaria del concreto fresco:	2236	kg/m3				
Rendimiento:					1000	L/m3
Materiales reales empleados:						
Cemento, Kg:	15.769	(=cemento de diseño + cemento adicional)				
Agua, L:	11.325	(=agua de diseño+agua adicional)				
Arena, Kg:	35.227	(=arena de diseño+arena adicional)				
Grava, Kg:	49.494	(=grava de diseño+grava adicional)				
Suma, Kg:	111.815					
Rendimiento de la prueba:						
Rendimiento, L =	50.007					
Mezcla corregida:						
Cemento, Kg/m3:	315					
Agua, Kg/m3:	226					
Arena, Kg/m3:	704					
Grava, Kg/m3:	990					
Suma:	2236	kg/m3				

Tabla . Proporcionamiento empleado para mezcla CT065.

CALCULO DE MEZCLA									
PASO 1									
Revenimiento:		10	cm						
PASO 2									
Tamaño máximo de agregado:		19	mm						
PASO 3									
Agua de mezclado:		205	L/m3		Red. de agua con el aditivo, %:		0.0		
Vacíos en el concreto:		2.0	%						
Agua real de mezclado:		205	L						
PASO 4									
Rel. a/c por resistencia:		0.40	(ver notas tabla 6.3.6)						
Rel. a/c por durabilidad:		0.40							
PASO 5									
Cemento, Kg/m3:		315					Rel. a/c selec.:		0.65
PASO 6									
PVSC grava:		1,558	kg/m3						
Contenido de grava:		0.60	m3						
Peso de grava:		935	kg/m3						
PASO 7									
Contenido de arena:				Densidades:					
Vol. Cto., L/m3:		102			3.10				
Vol. Agua, L/m3:		205			1.00				
Vol. Vacíos, L/m3:		20							
Vol. Grava, L/m3:		343			2.72				
suma:		670							
Vol. de arena, L/m3:		330	(= 1000 - volumen resto de materiales)						
Peso de arena, Kg/m3:		733			2.222				
PASO 8									
Corrección por humedad:									
			+		-				
Material	Kg/m3	Humedad, %	Peso, Kg	Absorción, %	Peso, Kg	Pesos correc., Kg			
Arena	733	3.4	25	6.8	50	708			
Grava	935	0.6	6	0.6	5	935			
Agua	205		31		55	230			
Prop. Corregida por humedad:									
Cemento, Kg/m3:		315							
Agua, L/m3:		230							
Arena, Kg/m3:		708							
Grava, Kg/m3:		935							
Suma:		2188	Kg/m3						
PASO 9									
Corrección por rendimiento:									
Volumen de mezcla, L:		50							
Notas:									
1. Adición o sobrante de agua para alcanzar el revto. deseado:		0.000	L						
2. Adición o reducción de cemento para conservar la relación a/c:		0.000	Kg						
3. Adición de arena para mejorar la trabajabilidad:		0.000	Kg						
4. Adición de grava:		0.000	Kg						
4. Masa unitaria del concreto fresco:		2215	kg/m3						
					Rendimiento:		988	L/m3	
Materiales reales empleados:									
Cemento, Kg:		15.769	(=cemento de diseño + cemento adicional)						
Agua, L:		11.493	(=agua de diseño+agua adicional)						
Arena, Kg:		35.388	(=arena de diseño+arena adicional)						
Grava, Kg:		46.754	(=grava de diseño+grava adicional)						
Suma, Kg:		109.404							
Rendimiento de la prueba:									
Rendimiento, L =		49.392							
Mezcla corregida:									
Cemento, Kg/m3:		319							
Agua, Kg/m3:		233							
Arena, Kg/m3:		716							
Grava, Kg/m3:		947							
Suma:		2215	kg/m3						

Tabla . Proporcionamiento empleado para mezcla CZ065.

CALCULO DE MEZCLA									
PASO 1									
Revenimiento:		10	cm						
PASO 2									
Tamaño máximo de agregado:		19	mm						
PASO 3									
Agua de mezclado:		205	L/m3		Red. de agua con el aditivo, %:		0.0		
Vacíos en el concreto:		2.0	%						
Agua real de mezclado:		205	L						
PASO 4									
Rel. a/c por resistencia:		0.40	(ver notas tabla 6.3.6)						
Rel. a/c por durabilidad:		0.40							
PASO 5									
Cemento, Kg/m3:		315					Rel. a/c selec.:		0.65
PASO 6									
PVSC grava:		1,558	kg/m3						
Contenido de grava:		0.62	m3						
Peso de grava:		966	kg/m3						
PASO 7									
Contenido de arena:				Densidades:					
Vol. Cto., L/m3:		102					3.10		
Vol. Agua, L/m3:		205					1.00		
Vol. Vacíos, L/m3:		20							
Vol. Grava, L/m3:		355					2.72		
suma:		682							
Vol. de arena, L/m3:		318	(= 1000 - volumen resto de materiales)						
Peso de arena, Kg/m3:		707					2.222		
PASO 8									
Corrección por humedad:									
			+		-				
Material	Kg/m3	Humedad,%	Peso, Kg	Absorción,%	Peso, Kg	Pesos correc., Kg			
Arena	707	5.4	38	5.3	37	708			
Grava	966	0.4	4	0.6	6	964			
Agua	205		42		43	206			
Prop. Corregida por humedad:									
Cemento, Kg/m3:		315							
Agua, L/m3:		206							
Arena, Kg/m3:		708							
Grava, Kg/m3:		964							
Suma:		2194	Kg/m3						
PASO 9									
Corrección por rendimiento:									
Volumen de mezcla, L:		50							
Notas:									
1. Adición o sobrante de agua para alcanzar el revto. deseado:		0.000	L						
2. Adición o reducción de cemento para conservar la relación a/c:		0.000	Kg						
3. Adición de arena para mejorar la trabajabilidad:		0.000	Kg						
4. Adición de grava:		0.000	Kg						
4. Masa unitaria del concreto fresco:		2194	kg/m3						
					Rendimiento:	1000	L/m3		
Materiales reales empleados:									
Cemento, Kg:		15.769	(=cemento de diseño + cemento adicional)						
Agua, L:		10.293	(=agua de diseño+agua adicional)						
Arena, Kg:		35.412	(=arena de diseño+arena adicional)						
Grava, Kg:		48.216	(=grava de diseño+grava adicional)						
Suma, Kg:		109.691							
Rendimiento de la prueba:									
Rendimiento, L =		49.996							
Mezcla corregida:									
Cemento, Kg/m3:		315							
Agua, Kg/m3:		206							
Arena, Kg/m3:		708							
Grava, Kg/m3:		964							
Suma:		2194	kg/m3						

Los resultados de las propiedades físicas de las mezclas realizadas se describen a continuación en la tabla siguiente:

Tabla . Propiedades físicas del concreto en estado fresco, obtenidas en las 8 mezclas realizadas.

Mezcla	Revenimiento (cm)	Masa Unitaria (ton/m3)	Rendimiento (Its)	Contenido de Aire (%)	Cohesión	Apariencia	Manejabilidad
AT050	5.00	2.261	1002	2.23	Alta	Gravuda	Media-Baja
AZ050	7.00	2.242	991	1.10	Media	Equilibrada	Alta
CT050	4.00	2.252	1017	3.61	Alta	Gravuda	Media-Baja
CZ050	7.00	2.233	1005	2.53	Media	Equilibrada	Alta
AT065	2.50	2.205	989	0.92	Alta	Gravuda	Baja
AZ065	12.50	2.224	994	1.45	Media-Baja	Pastosa	Alta
CT065	3.00	2.200	1005	2.53	Alta	Gravuda	Baja
CZ065	7.00	2.205	1005	2.48	Alta	Pastosa	Alta

De cada una de las mezclas realizadas se fabricaron los siguientes especímenes; mismos que se emplearon para la realización de las pruebas de experimentación de esta investigación.

Tabla . Especímenes realizados en cada una de las 8 mezclas.

Mezcla	Vigas Prismáticas de 15x15x60 cm	Cilindros de 10x20 cm	Cilindros de 15x30 cm
AT050	5.00	64.00	2.00
AZ050	5.00	66.00	3.00
CT050	5.00	61.00	2.00
CZ050	4.00	63.00	2.00
AT065	2.00	30.00	2.00
AZ065	2.00	31.00	3.00
CT065	2.00	31.00	3.00
CZ065	2.00	30.00	3.00
Total	27.00	376.00	20.00

5.5 Resultados de la Microcaracterización del Concreto.

5.5.1 Resultados de la prueba de Fluorescencia de Rayos X realizada al concreto.

Los resultados de esta prueba se detallan en el siguiente informe otorgado por la Universidad Autónoma de Barcelona.

GQ094: FORMULARI		GTS005: Informe de ensayo
		
INFORME DE ENSAYO (101104-BRI)		
Grup de Tècniques de Separació (GTS) Departament de Química, Facultat de Ciències Edifici C Campus UAB 08193, Bellaterra, Barcelona Tlf. 93 5812902/ 93 5811985 Fax 935812379 http://einstein.uab.es/gts gustavo.perez@uab.es		A/A. Nombre cliente Jose Luis Brianso Nombre cliente Dpt Geologia Direcció cliente Àrea de Cristal·lografia y Mineralogia. Tlf 935813090 Fax 935811263 Correu electrònic jose-luis.brianso@uab.cat

Bellaterra, 16/04/09

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICION EN MUESTRAS DE CEMENTO POR FP-XRF

Fecha recepción muestra: 29/10/11

Fecha realización ensayo: 04/11/10

OBJETO DEL ENSAYO

Se recibieron un total de 8 muestras en forma de perfiles rectangulares, perfectamente cortados y aproximadamente 3-5 g por muestra. La codificación de las muestras se indica a continuación: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

RESULTADOS

Las determinaciones mediante FP-XRF se han realizado a partir de las muestras suministradas por el cliente, directamente sobre la superficie pulida de la muestra, procediendo a la determinación directa. Para ello se ha empleado un equipo de fluorescencia de rayos X portátil de INNOV-X (modelo Alpha 6500, Woburn, MA, USA). Se efectuó la oportuna verificación, empleando materiales de referencia certificados (SRM 2709, SRM2710 y SRM 2711) y efectuando controles de blancos y CRMs cada 10 determinaciones según método EPA 6200. Las muestras se han analizado por duplicado. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas adjuntas.

GQ094: FORMULARI



GTS005: Informe de ensayo

Código muestra		FP-XRF										
		Concentración mg.kg ⁻¹										
Código	GTS	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mn	Pb	Sr	Ti	Zn	Zr
1	GTS04089	<75	311859±6051	36±11	7697±159	< 3500	206±20	15±5	166±5	391±10	38±6	54±4
2	GTS04090	<75	542680±12478	< 20	3685±96	< 3500	222±17	< 10	147±6	< 300	21±6	33±4
3	GTS04096	153±32	539973±8679	30±11	18414±338	<3500	385±15	< 10	287±5	1702±20	47±6	81±4
4	GTS04091	195±33	462375±10929	< 20	19967±358	< 3500	503±23	< 10	389±10	2349±20	64±7	48±5
5	GTS04092	166±34	134537±3037	< 20	18539±407	< 3500	379±21	< 10	343±8	2615±18	47±7	94±5
6	GTS04093	122±30	104581±2315	61±12	17077±363	6769±1254	339±20	18±5	301±8	1855±15	43±7	90±4
7	GTS04094	242±42	191614±4528	48±13	30183±695	< 3500	639±30	< 10	591±13	3349±22	76±9	108±5
8	GTS04095	320±49	93160±2285	< 20	42754±981	< 3500	602±30	< 10	735±15	4671±25	53±8	123±6

GQ094: FORMULARI



GTS005: Informe de ensayo

DESVIACIONES

N.A.

Firma responsable ensayo

Gustavo Pérez

Firma dirección técnica GTS

Manuel Valiente

Nombre responsable ensayo

Nombre dirección técnica

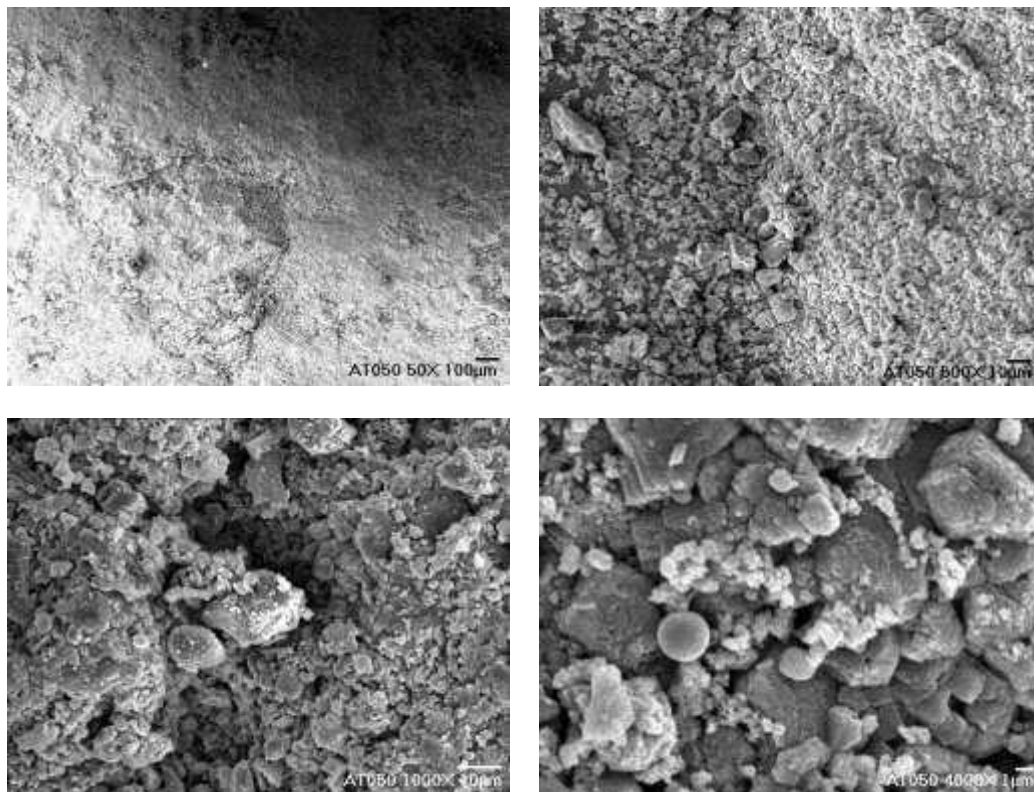
1. Los resultados contenidos en este informe de ensayo solo se refieren a las muestras objeto de ensayo enviadas por el cliente y al momento y las condiciones en que se realizaron los ensayos.
2. Este informe de ensayo no debe reproducirse parcialmente excepto con el permiso previo por escrito del laboratorio emisor GTS.
3. En el laboratorio existe un registro donde se encuentran documentados los detalles relativos a la recepción de las muestras.
4. Las muestras son aceptadas para el análisis en el entendimiento de que el Laboratorio del Centro GTS no se responsabiliza de la toma y transporte de las mismas, a menos que este proceso haya sido supervisado por el personal técnico de los citados laboratorios.

5.5.2 Resultados de la prueba de Microscopía Electrónica de Barrido realizada al concreto.

Los resultados que se muestran a continuación son los obtenidos con el MEB, se analizaron ocho diferentes muestras, de las cuales se realizaron de 3 a 4 microfotografías con diferentes aproximaciones, un análisis elemental de la muestra y la cuantificación de los elementos analizados en el concreto.

5.5.2.1 Resultados de la mezcla AT050

Resultados obtenidos para la Mezcla AT050 (Mezcla realizada con Grava de Basalto, Arena del banco del Tigre y con relación agua cemento de 0.50).



Figuras . Microfotografías tomadas a la muestra AT050 a 50X, 500X, 1000X y 4000X, respectivamente.

Espectro de la muestra, realizado al Agregado pétreo con acercamiento de 50X.

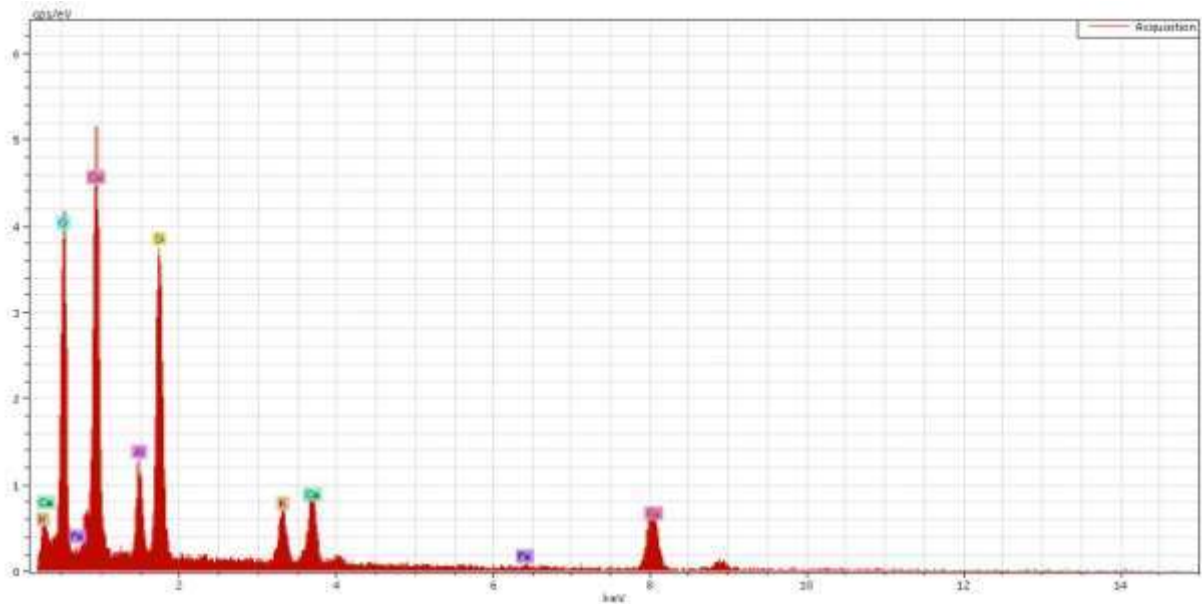


Figura . Análisis Espectral en agregado de la muestra AT050 a 50X.

Resultados de la cuantificación elemental en el agregado de la muestra AT050 con acercamiento de 50X.

Tabla . Cuantificación elemental en agregado de muestra AT050 tomado a 50X.

Microanálisis AT050 50x100micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	6.517	6.517	9.638	2.619
Oxygen	K-series	72.779	72.781	80.807	22.498
Silicon	K-series	1.504	1.504	0.951	0.087
Calcium	K-series	18.800	18.800	8.333	0.583
Aluminium	K-series	0.269	0.269	0.177	0.037
Magnesium	K-series	0.129	0.129	0.094	0.032
	Sum:	99.998	100	100	

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

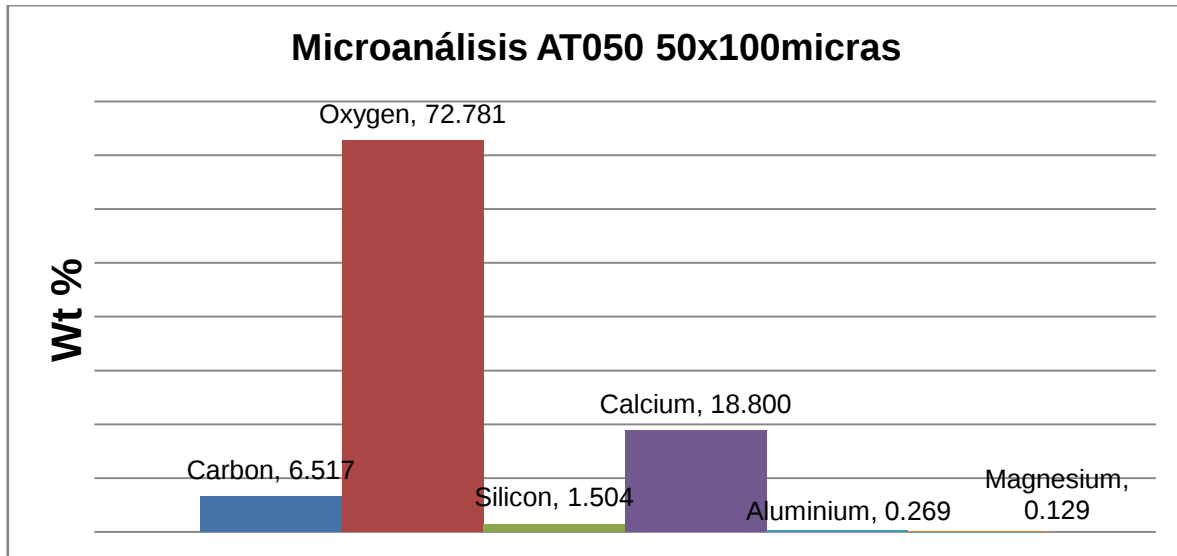


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en agregado de la muestra AT050 con acercamiento de 50X.

Espectro de la muestra, realizado a la matriz de cemento con acercamiento de 50X.

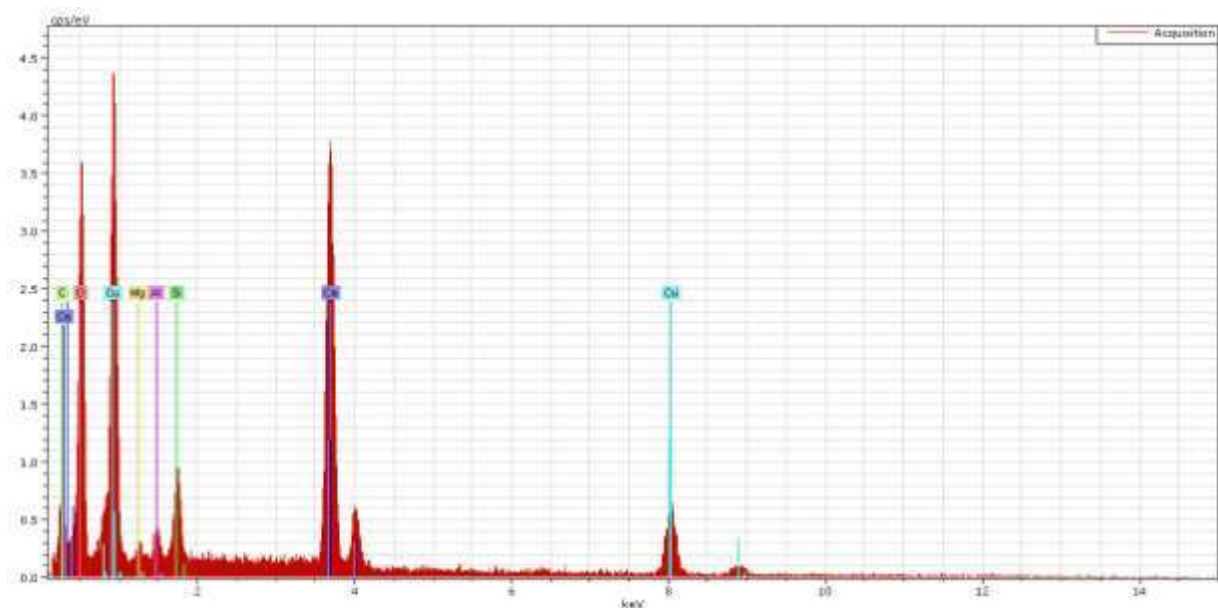


Figura . Análisis Espectral en la matriz cementicia de la muestra AT050 con acercamiento de 50X.

Resultados de la cuantificación elemental la matriz cementicia de la muestra AT050 con acercamiento de 50X.

Microanálisis AT050 50x100micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	6.517	6.517	9.638	2.619
Oxygen	K-series	72.779	72.781	80.807	22.498
Silicon	K-series	1.504	1.504	0.951	0.087
Calcium	K-series	18.800	18.800	8.333	0.583
Aluminium	K-series	0.269	0.269	0.177	0.037
Magnesium	K-series	0.129	0.129	0.094	0.032
	Sum:	99.998	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en matriz cementicia de muestra AT050 tomado a 50X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

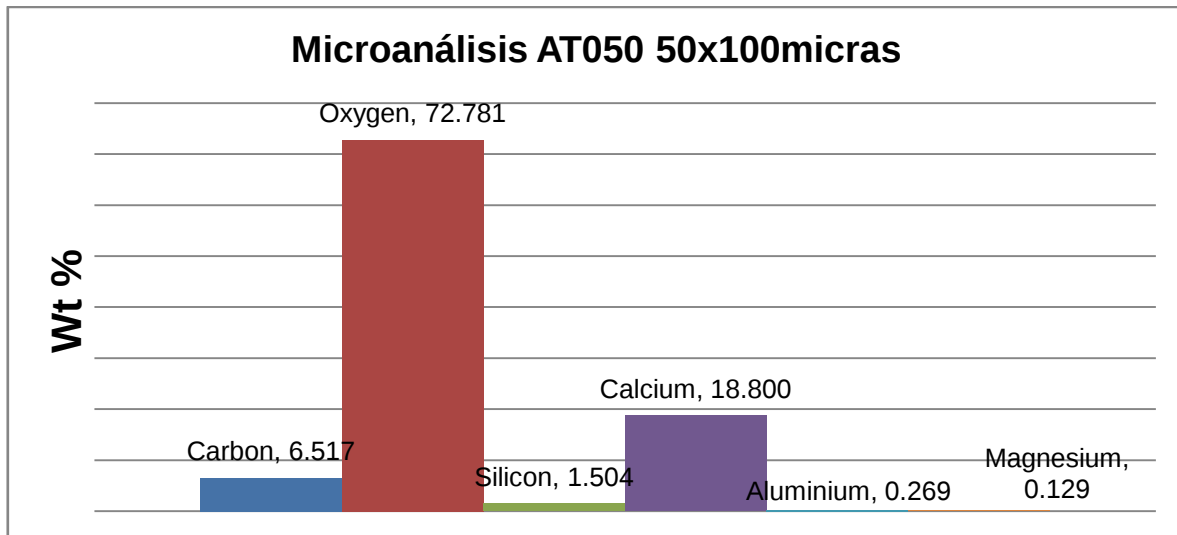
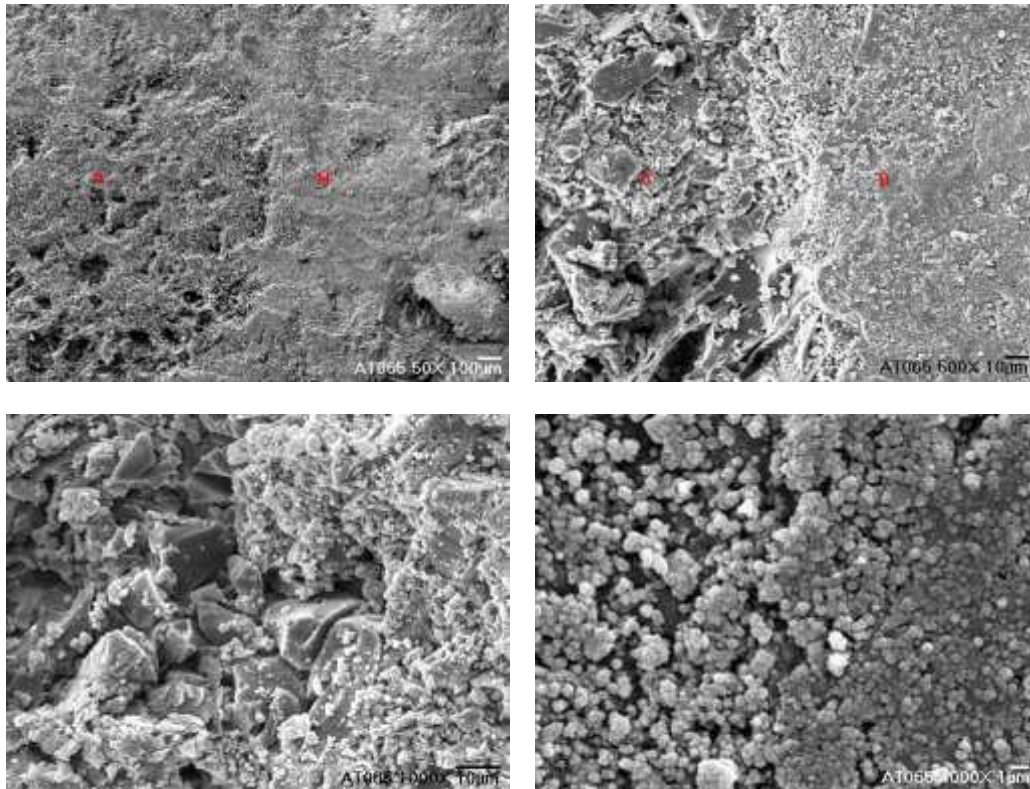


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en matriz cementicia de la muestra AT050 con acercamiento de 50X.

5.5.2.2 Resultados de la mezcla AT065

Resultados obtenidos para la Mezcla AT065 (Mezcla realizada con Grava de Basalto, Arena del banco del Tigre y con relación agua cemento de 0.65).



Figuras . Microfotografías tomadas a la muestra AT065 a 50X, 500X, 1000X y 4000X, respectivamente.

Espectro de la muestra, realizado al Agregado pétreo con acercamiento de 50X.

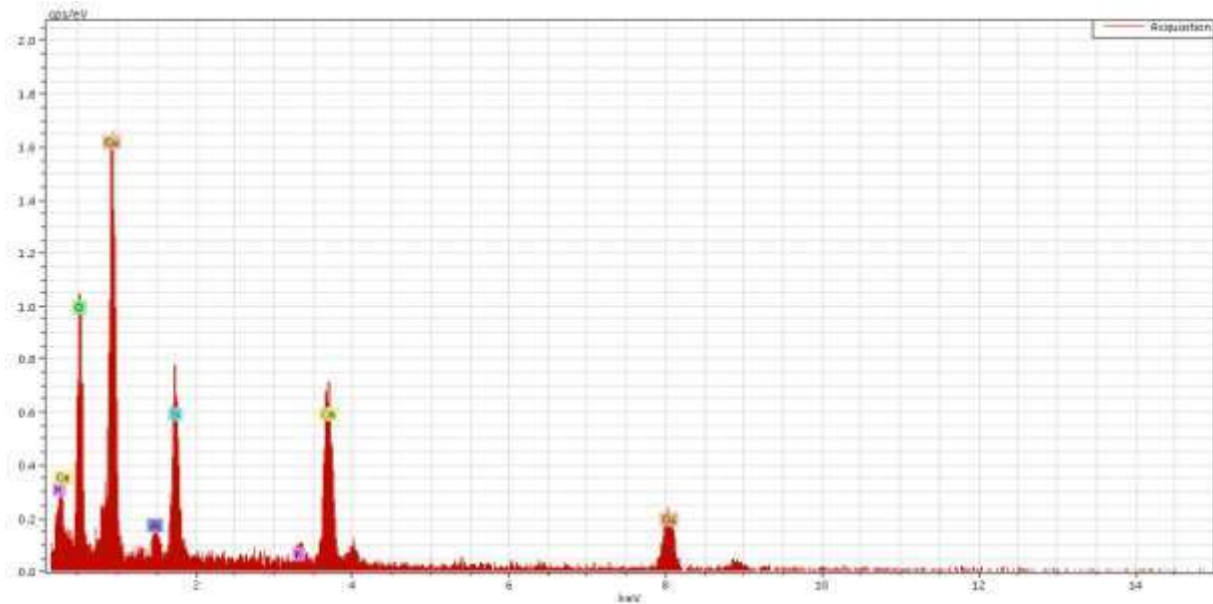


Figura . Análisis Espectral en agregado de la muestra AT065 a 50X.

Resultados de la cuantificación elemental en el agregado de la muestra AT065 con acercamiento de 50X.

Microanálisis AT065 50x100micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Oxygen	K-series	84.344	84.345	92.252	0.549
Aluminium	K-series	0.539	0.539	0.349	0.050
Silicon	K-series	4.254	4.254	2.650	0.201
Potassium	K-series	0.522	0.522	0.234	0.041
Calcium	K-series	10.341	10.341	4.515	0.332
	Sum:	99.999	100.000	100.000	

Tabla . Cuantificación elemental en agregado de muestra AT065 tomado a 50X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

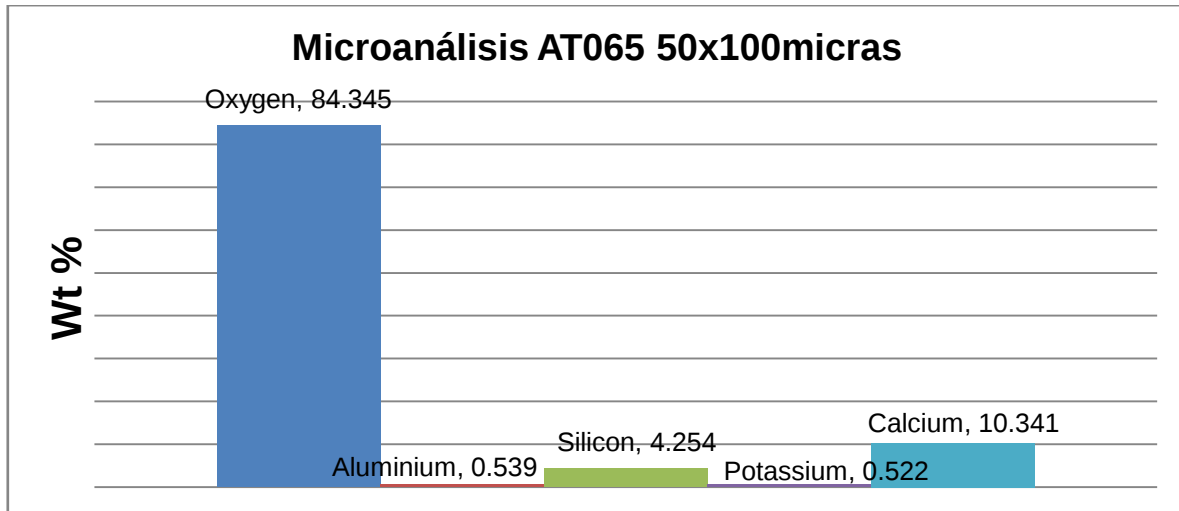


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en agregado de la muestra AT065 con acercamiento de 50X.

Espectro de la muestra, realizado a la matriz de cemento con acercamiento de 50X.

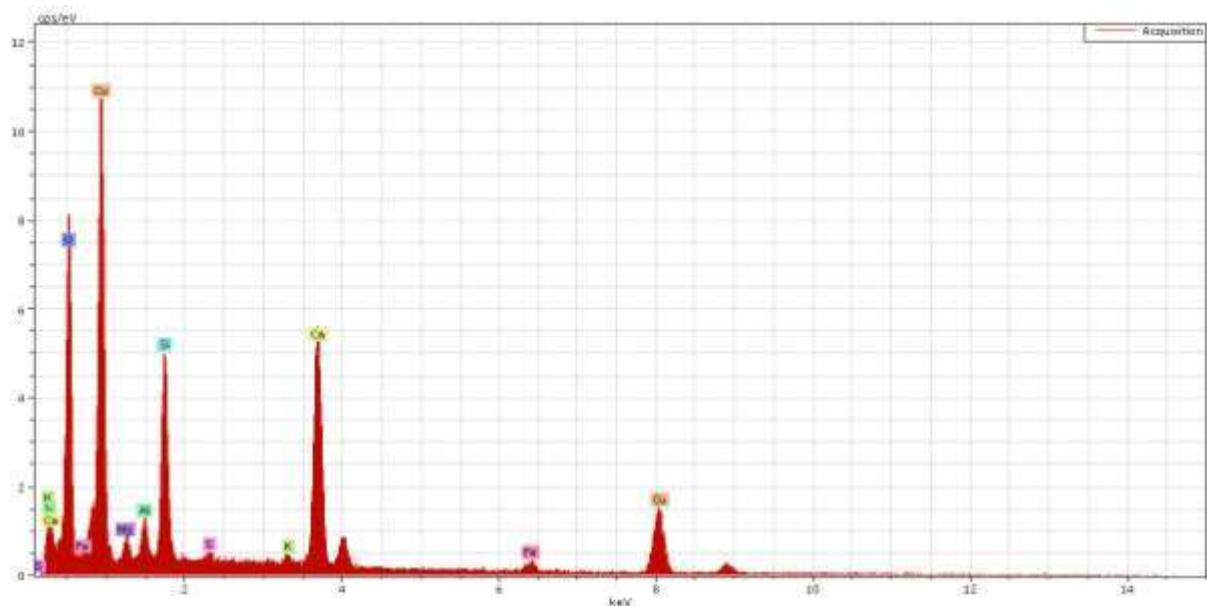


Figura . Análisis Espectral en la matriz cementicia de la muestra AT065 con acercamiento de 50X.

Resultados de la cuantificación elemental la matriz cementicia de la muestra AT065 con acercamiento de 50X.

Microanálisis AT065 50x100 micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	2.048	2.048	3.002	1.215
Oxygen	K-series	80.557	80.558	88.653	24.767
Silicon	K-series	3.762	3.762	2.358	0.181
Sulfur	K-series	0.054	0.054	0.030	0.027
Calcium	K-series	10.881	10.882	4.781	0.348
Aluminium	K-series	0.565	0.565	0.369	0.051
Magnesium	K-series	0.261	0.261	0.189	0.039
Iron	K-series	1.656	1.657	0.522	0.073
Potassium	K-series	0.214	0.214	0.096	0.032
	Sum:	99.998	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en matriz cementicia de muestra AT065 tomado a 50X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

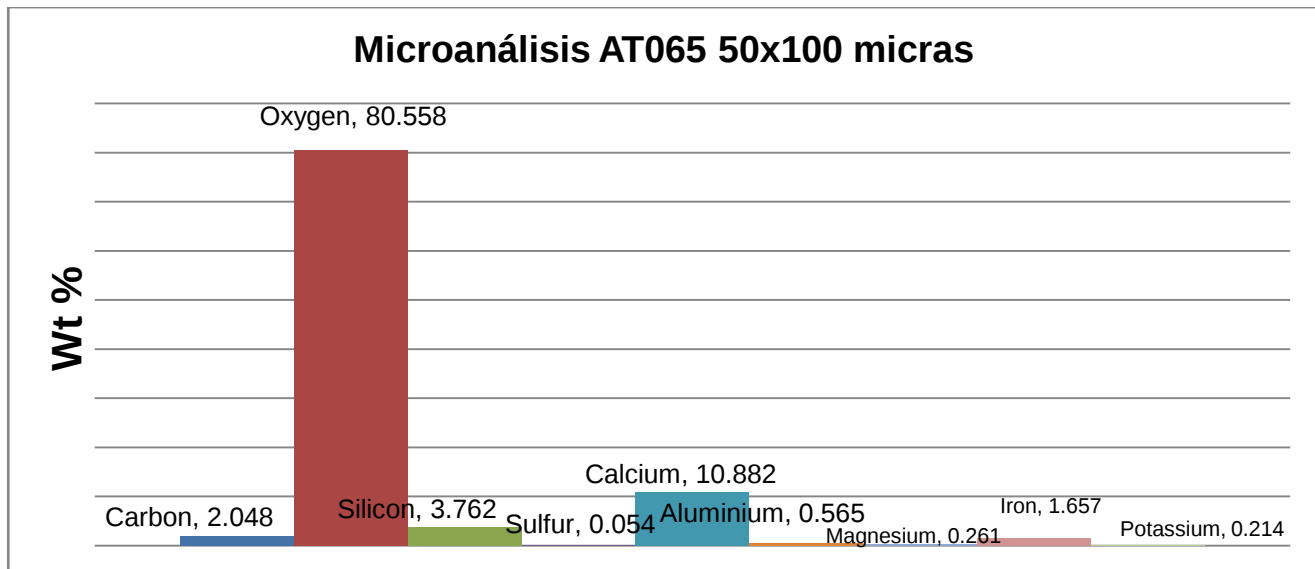
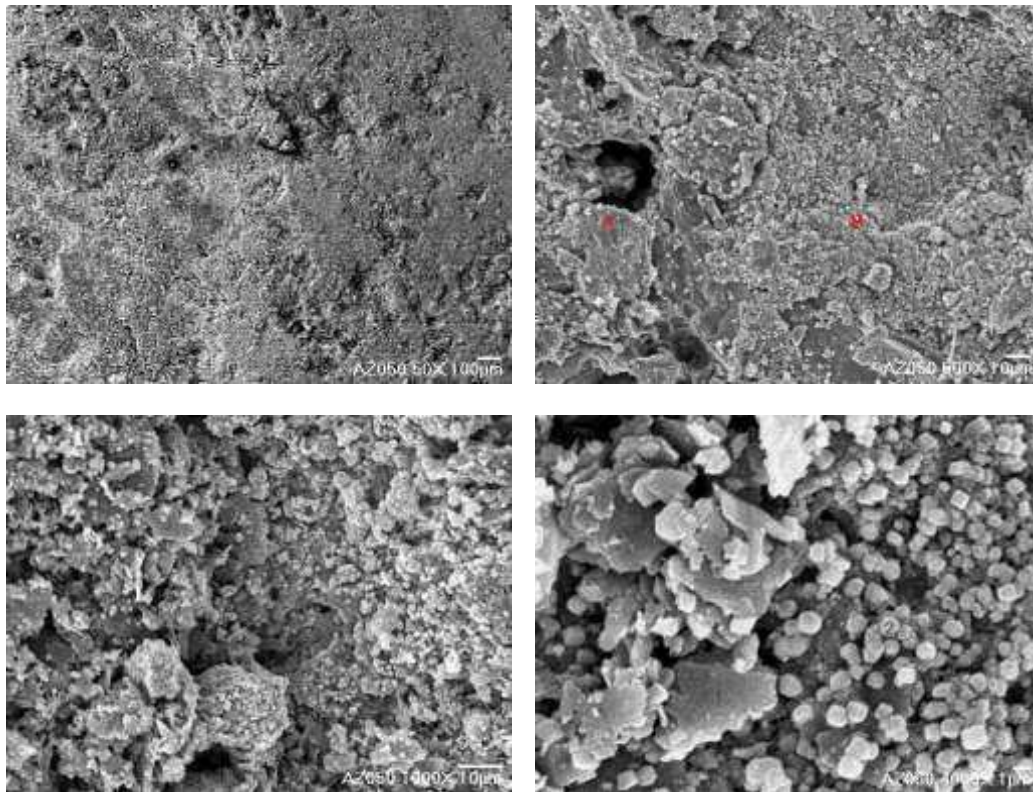


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en matriz cementicia de la muestra AT065 con acercamiento de 50X.

5.5.2.3 Resultados de la mezcla AZ050

Resultados obtenidos para la Mezcla AZ050 (Mezcla realizada con Grava de Basalto, Arena blanca de Zitácuaro y con relación agua cemento de 0.50).



Figuras . Microfotografías tomadas a la muestra AZ050 a 50X, 500X, 1000X y 4000X, respectivamente.

Espectro de la muestra, realizado al Agregado pétreo con acercamiento de 500X.

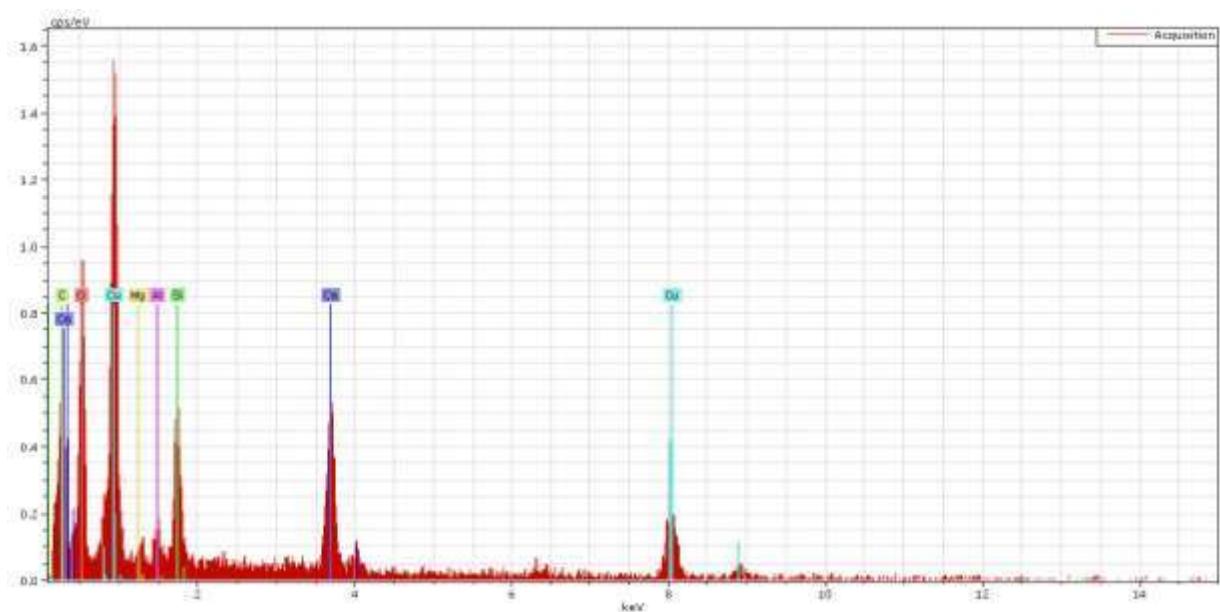


Figura . Análisis Espectral en agregado de la muestra AZ050 a 500X.

Resultados de la cuantificación elemental en el agregado de la muestra AZ050 con acercamiento de 500X.

Microanálisis AZ050 500x10micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	21.262	21.263	27.993	6.768
Oxygen	K-series	67.949	67.951	67.157	20.774
Silicon	K-series	2.675	2.675	1.506	0.136
Calcium	K-series	7.419	7.419	2.927	0.245
Aluminium	K-series	0.519	0.519	0.304	0.049
Magnesium	K-series	0.174	0.174	0.113	0.034
	Sum:	99.998	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en agregado de muestra AZ050 tomado a 500X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

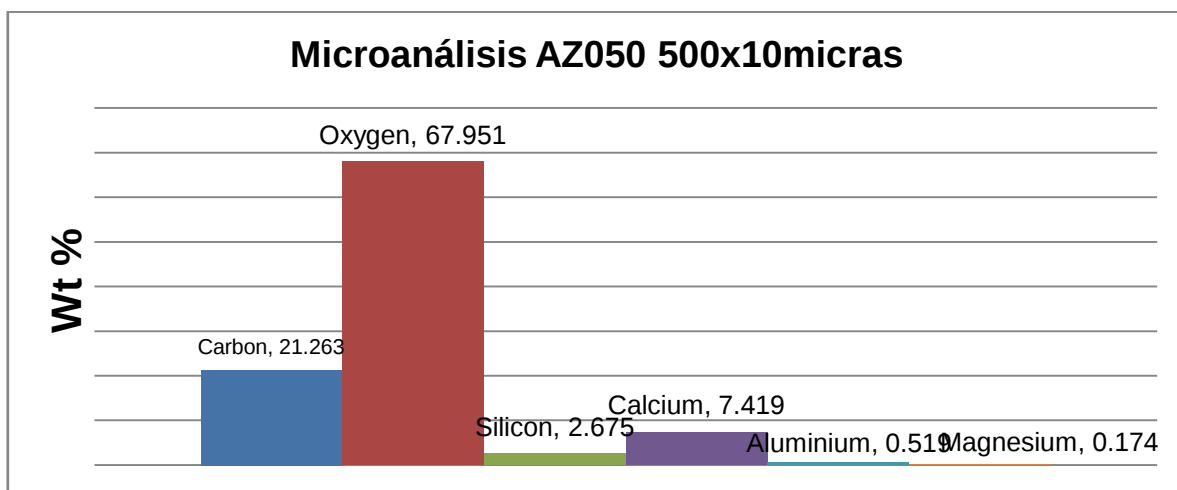


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en agregado de la muestra AZ050 con acercamiento de 500X.

Espectro de la muestra, realizado a la matriz de cemento con acercamiento de 50X.

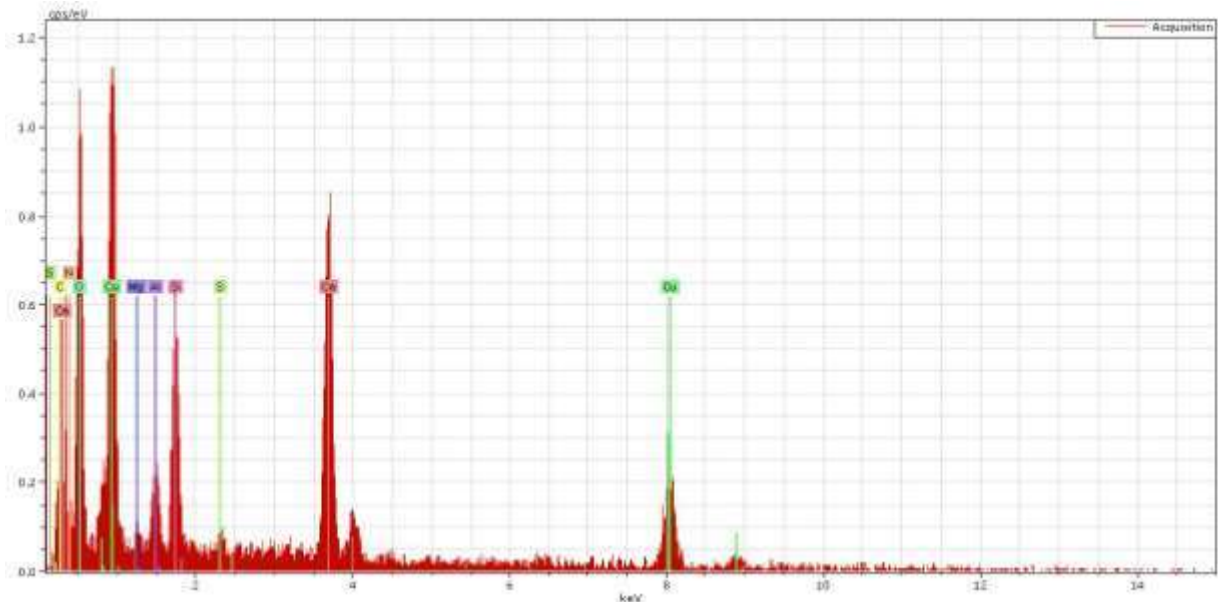


Figura . Análisis Espectral en la matriz cementicia de la muestra AZ050 con acercamiento de 500X.

Resultados de la cuantificación elemental realizado a la matriz cementicia de la muestra AZ050 con acercamiento de 500X.

Microanálisis AZ050 500x10 micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	5.833	5.833	8.116	2.272
Nitrogen	K-series	15.027	15.028	17.931	5.030
Oxygen	K-series	64.095	64.097	66.955	19.750
Aluminium	K-series	0.871	0.871	0.539	0.065
Silicon	K-series	3.039	3.039	1.809	0.151
Sulfur	K-series	0.069	0.069	0.036	0.027
Calcium	K-series	11.062	11.062	4.613	0.353
Magnesium	K-series	0.001	0.001	0.001	0.000
	Sum:	99.997	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en matriz cementicia de muestra AZ050 tomado a 500X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

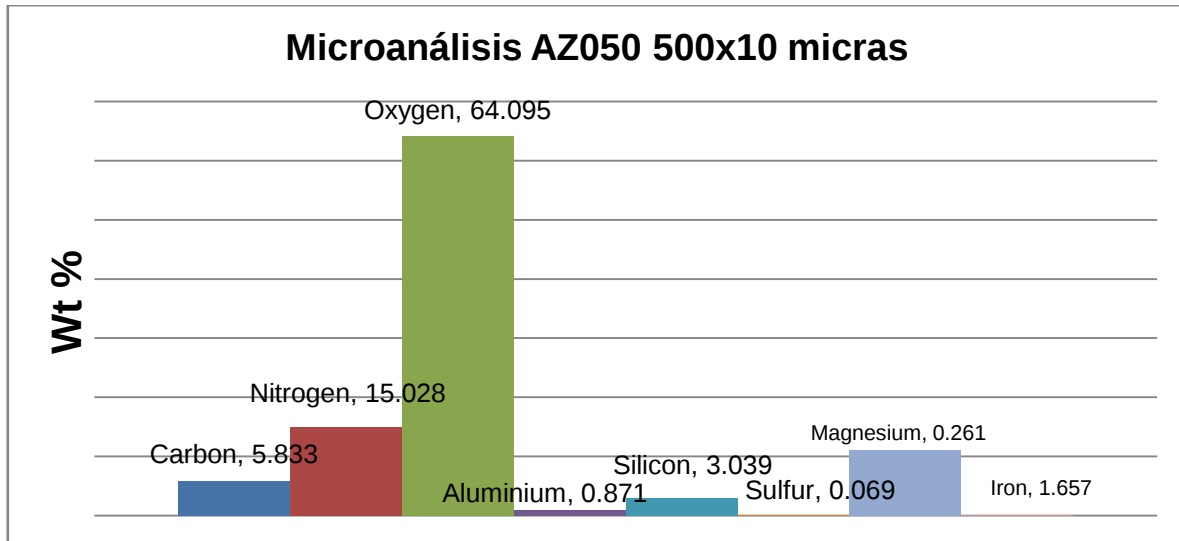


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en matriz cementicia de la muestra AZ050 con acercamiento de 500X.

De la microfotografía tomada a 4000X se puede observar dos formaciones muy particulares de las cuales se realizaron los análisis elementales el primero a la partícula de forma aplanada y el segundo a la partícula de forma esférica.

Espectro de la muestra, realizado a la partícula de forma lajeada con acercamiento de 4000X.

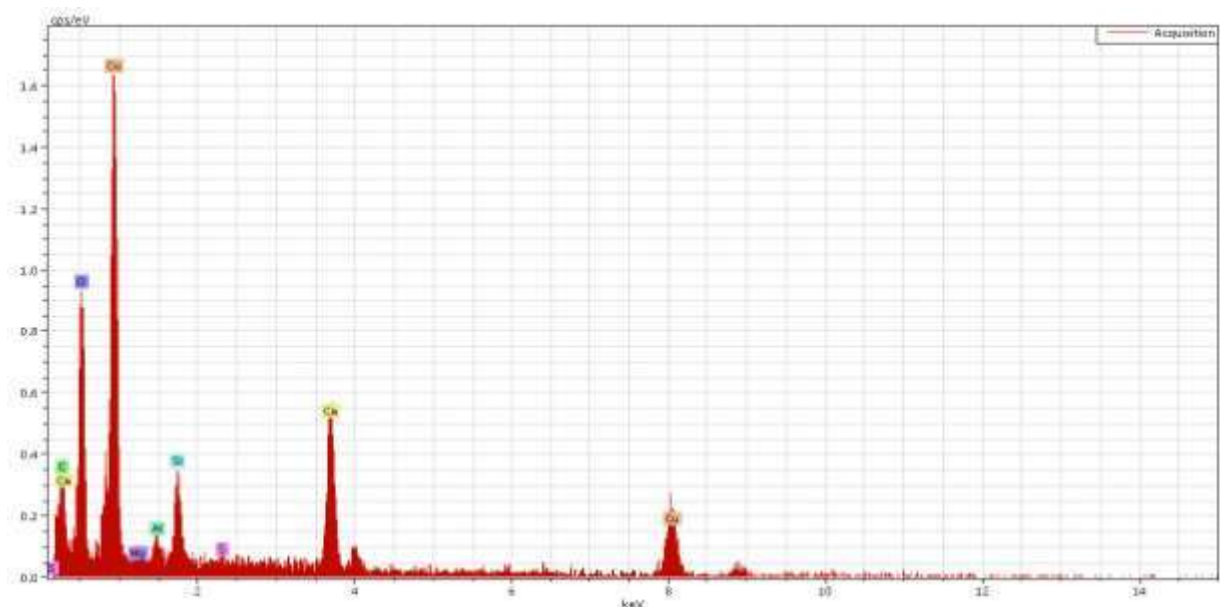


Figura . Análisis Espectral en partícula lajeada de la muestra AZ050 a 4000X.

Resultados de la cuantificación elemental en la partícula lajeada de la muestra AZ050 con acercamiento de 4000X.

Microanálisis AZ050 4000x1micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	14.665	14.666	19.652	4.736
Oxygen	K-series	75.664	75.665	76.117	23.036
Silicon	K-series	1.592	1.592	0.913	0.091
Sulfur	K-series	0.058	0.058	0.029	0.027
Calcium	K-series	7.674	7.674	3.082	0.253
Aluminium	K-series	0.308	0.308	0.184	0.039
Magnesium	K-series	0.037	0.037	0.024	0.002
	Sum:	99.998	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en la partícula lajeada de la muestra AZ050 tomado a 4000X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

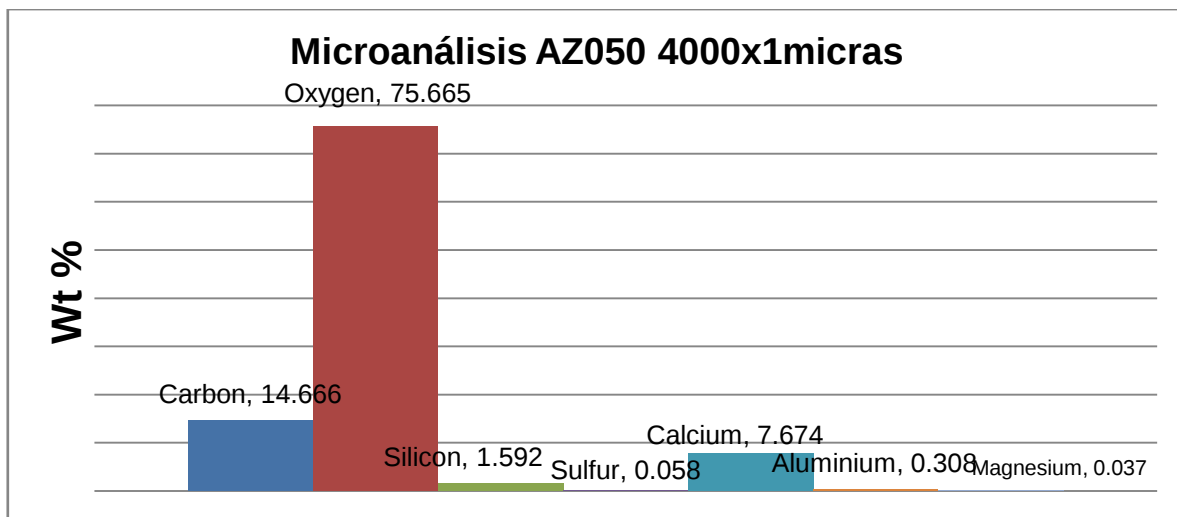


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en partícula lajeada de la muestra AZ050 con acercamiento de 4000X.

Espectro, realizado a la partícula esférica de la muestra AZ050 con acercamiento de 4000X.

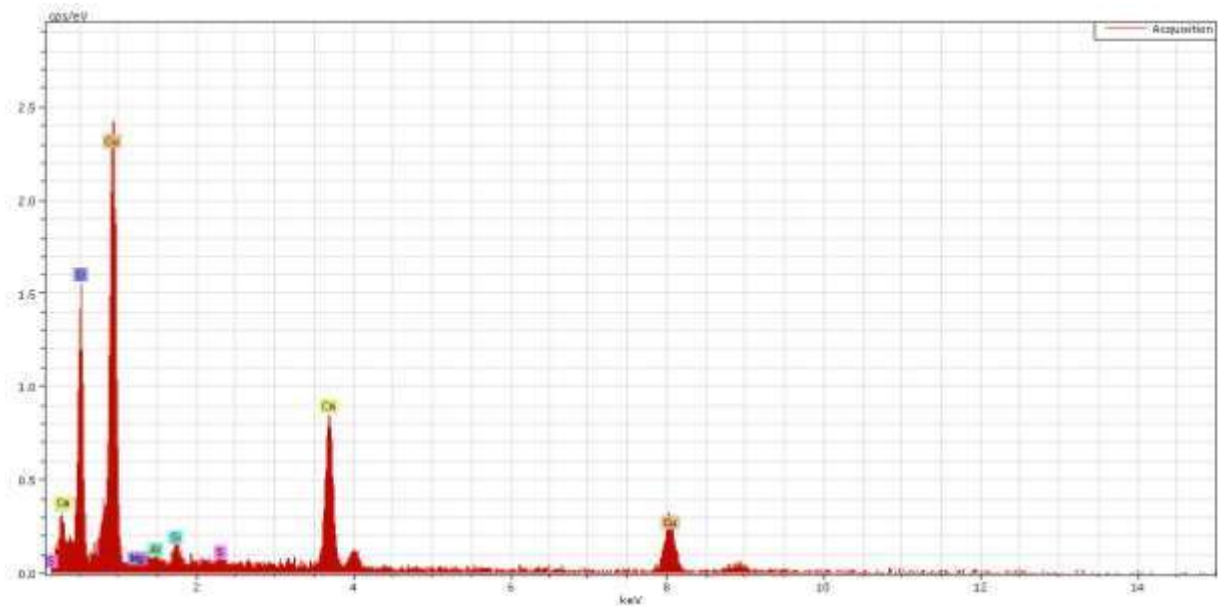


Figura . Análisis Espectral en partícula esférica de la muestra AZ050 con acercamiento de 4000X.

Resultados de la cuantificación elemental realizado a la partícula esférica de la muestra AZ050 con acercamiento de 4000X.

Tabla . Cuantificación elemental en partícula esférica de la muestra AZ050 con acercamiento de 4000X.

Microanálisis AZ050 4000x1 micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	8.203	8.203	11.368	2.823
Oxygen	K-series	80.652	80.653	83.907	24.558
Silicon	K-series	0.454	0.454	0.269	0.044
Sulfur	K-series	0.043	0.043	0.022	0.002
Calcium	K-series	10.585	10.586	4.396	0.339
Aluminium	K-series	0.060	0.060	0.037	0.028
Magnesium	K-series	0.001	0.001	0.001	0.000
	Sum:	99.998	100	100	

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

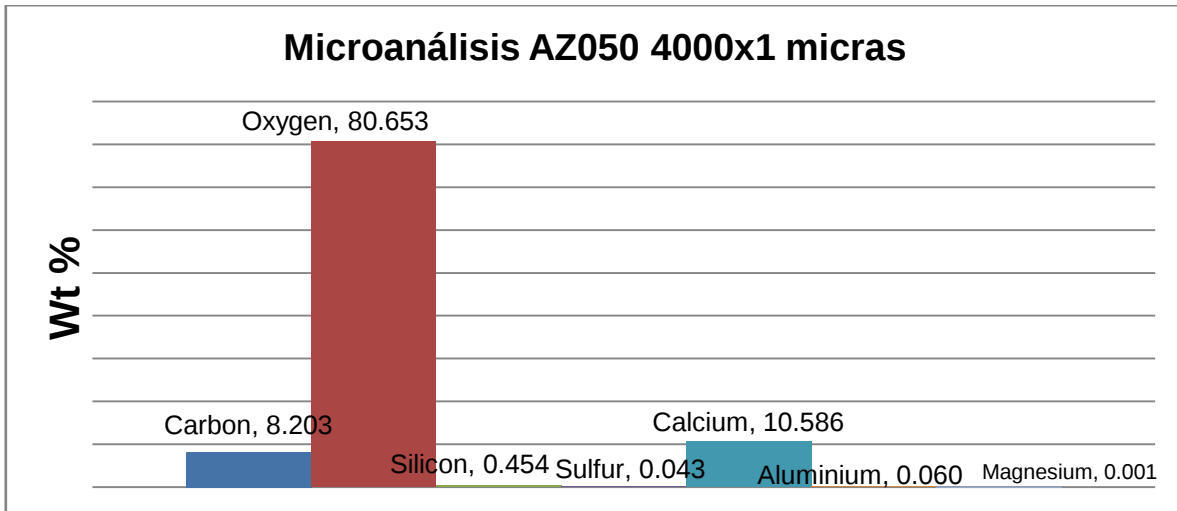
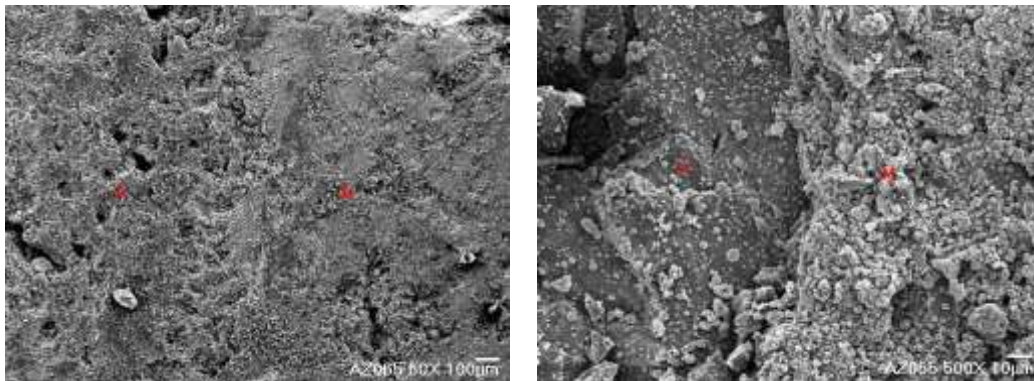
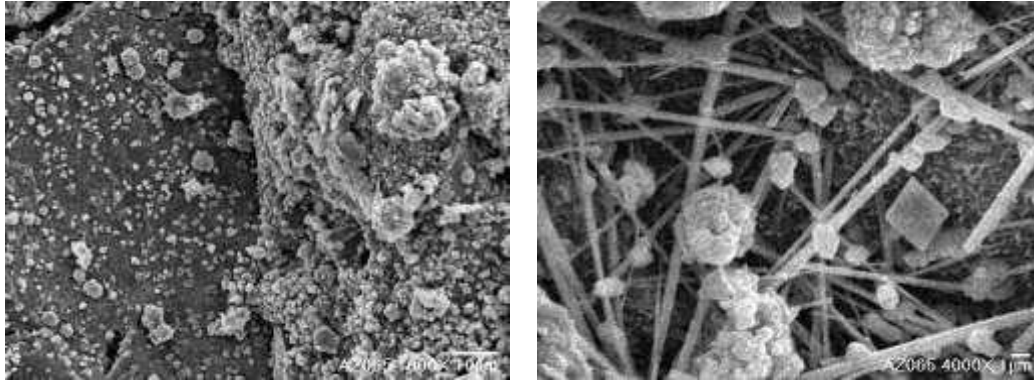


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en partícula esférica de la muestra AZ050 con acercamiento de 4000X.

5.5.2.4 Resultados de la mezcla AZ065

Resultados obtenidos para la Mezcla AZ065 (Mezcla realizada con Grava de Basalto, Arena blanca del banco Zitácuaro y con relación agua cemento de 0.65).





Figuras . Microfotografías tomadas a la muestra AZ065 a 50X, 500X, 1000X y 4000X, respectivamente.

Espectro de la muestra, realizado al Agregado pétreo con acercamiento de 50X.

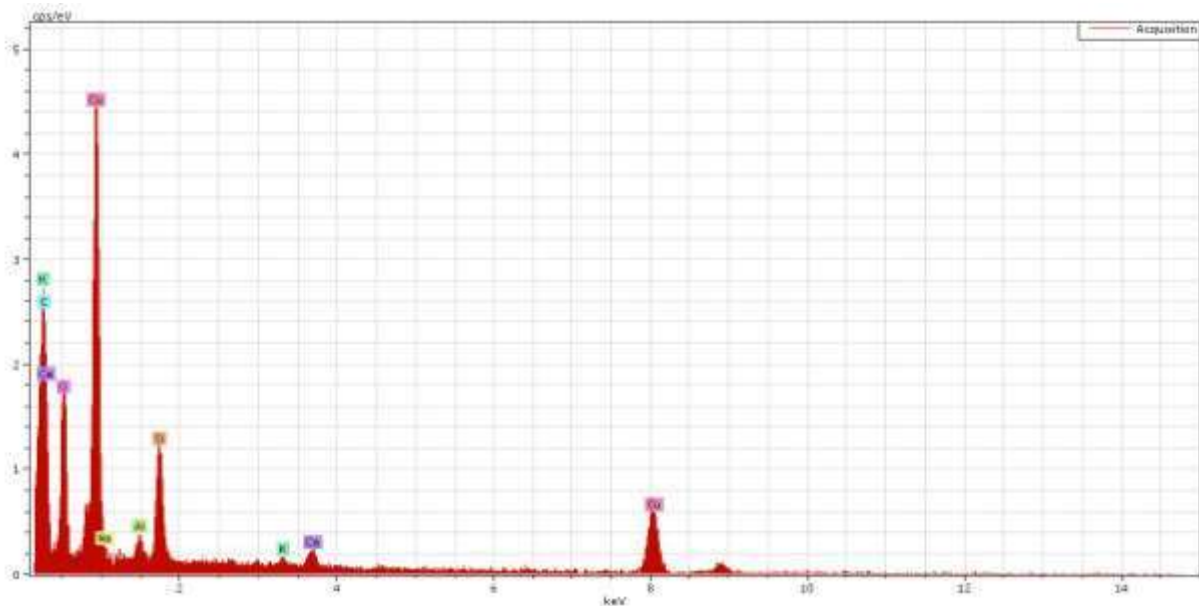


Figura . Análisis Espectral en agregado de la muestra AZ065 a 50X.

Resultados de la cuantificación elemental en el agregado de la muestra AZ065 con acercamiento de 50X.

Microanálisis AZ065 50x100micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	15.037	15.037	19.510	4.785
Oxygen	K-series	79.476	79.478	77.411	24.117
Sodium	K-series	1.522	1.523	1.032	0.119
Silicon	K-series	2.581	2.581	1.432	0.132
Potassium	K-series	0.180	0.180	0.072	0.031
Calcium	K-series	0.800	0.800	0.311	0.049

Aluminium	K-series	0.402	0.402	0.232	0.044
	Sum:	99.998	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en agregado de muestra AZ065 tomado a 50X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

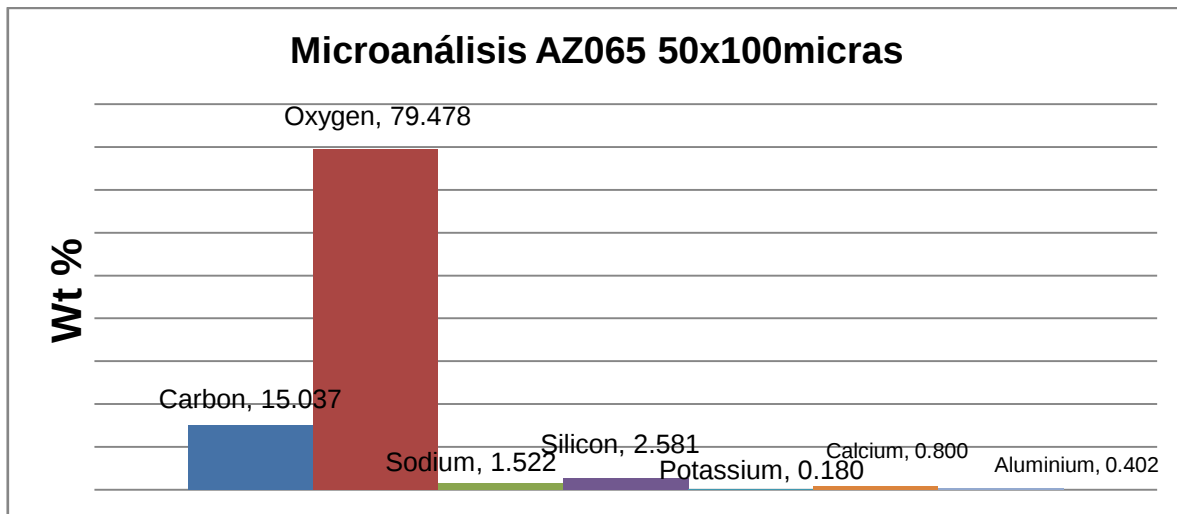


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en agregado de la muestra AZ065 con acercamiento de 50X.

Espectro de la muestra, realizado a la matriz de cemento con acercamiento de 50X.

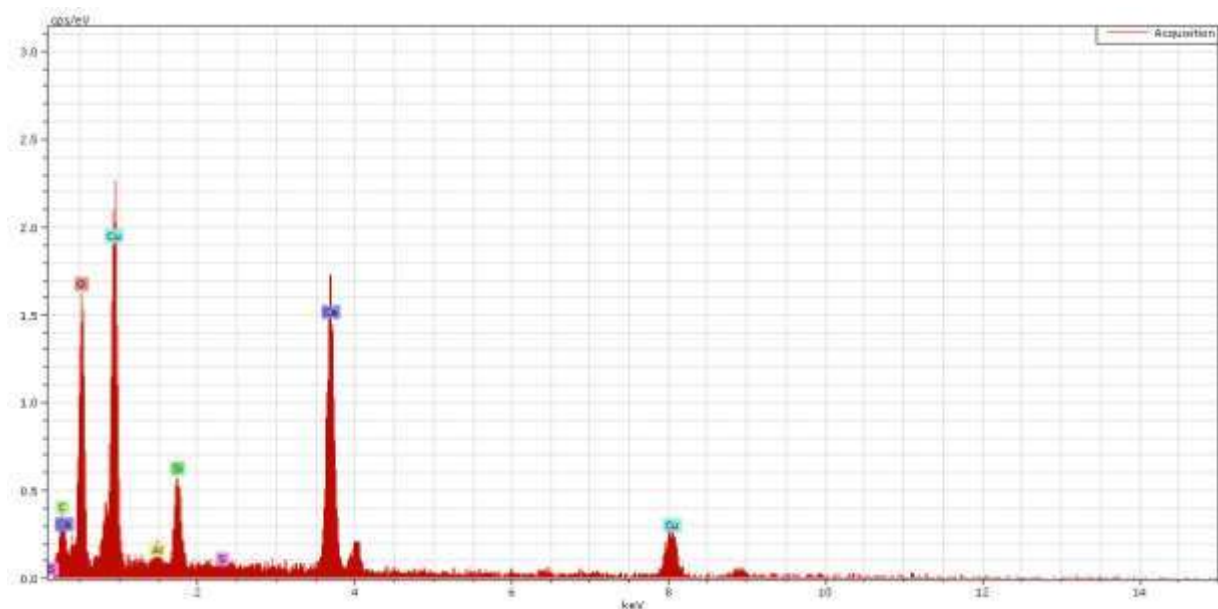


Figura . Análisis Espectral en la matriz cementicia de la muestra AZ065 con acercamiento de 50X.

Resultados de la cuantificación elemental la matriz cementicia de la muestra AZ065 con acercamiento de 50X.

Microanálisis AZ065 50x100micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	7.638	7.638	11.072	2.889
Oxygen	K-series	73.986	73.987	80.513	22.794
Silicon	K-series	2.035	2.035	1.261	0.109
Calcium	K-series	16.047	16.047	6.971	0.501
Sulfur	K-series	0.062	0.062	0.034	0.027
Aluminium	K-series	0.231	0.231	0.149	0.036
	Sum:	99.998	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en matriz cementicia de muestra AZ065 tomado a 50X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

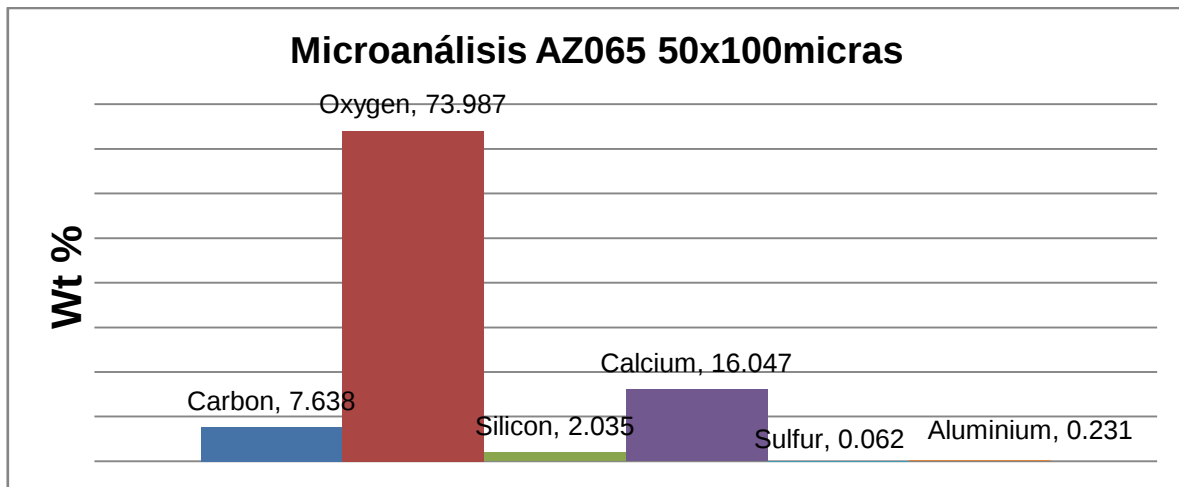
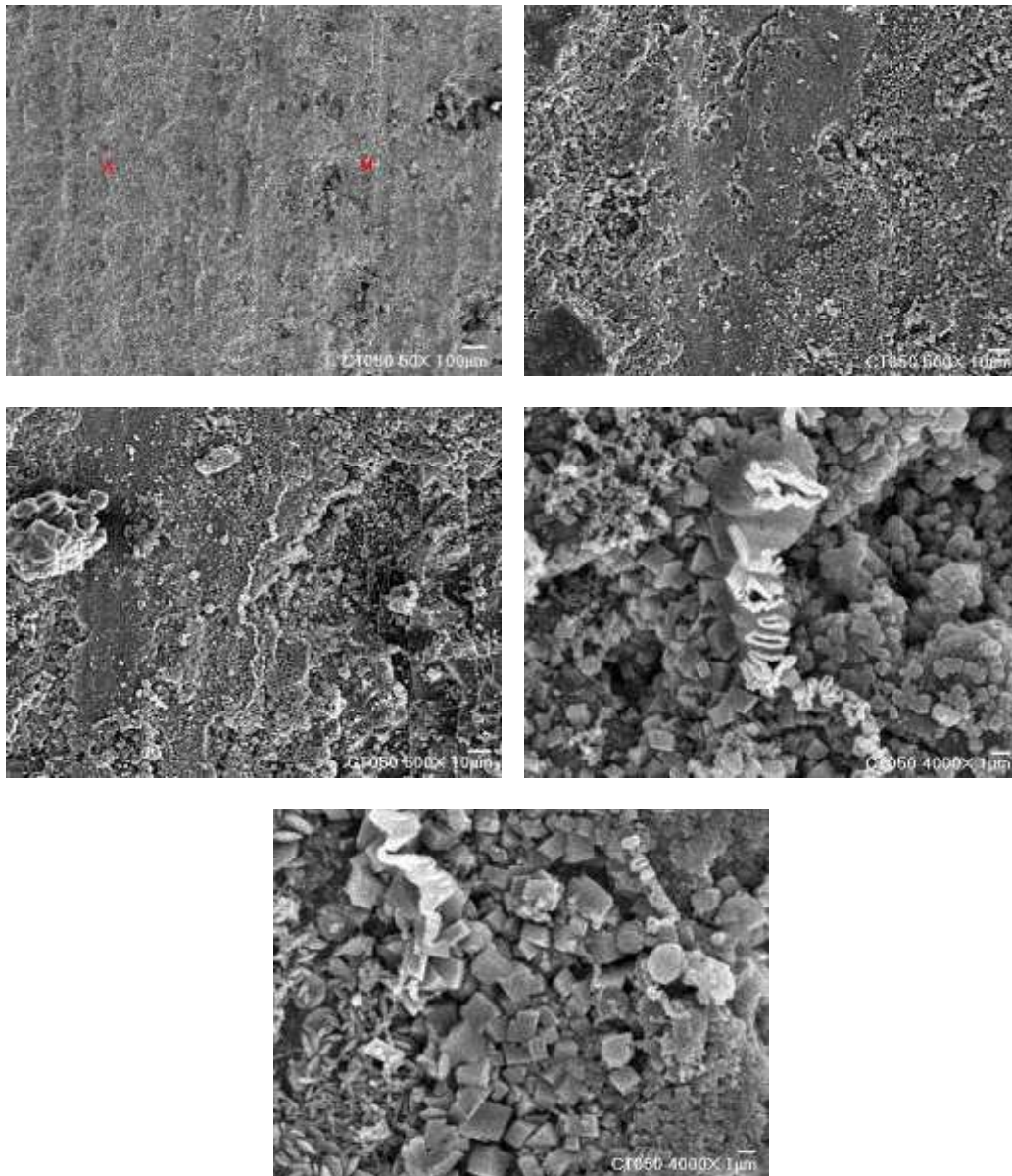


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en matriz cementicia de la muestra AZ065 con acercamiento de 50X.

5.5.2.5 Resultados de la mezcla CT050

Resultados obtenidos para la Mezcla CT050 (Mezcla realizada con Grava de Caliza, Arena del banco El Tigre y con relación agua cemento de 0.50).



Figuras . Microfotografías tomadas a la muestra CT050 a 50X, 500X, 500X, 4000X y 4000X, respectivamente.

Espectro de la muestra, realizado al Agregado pétreo con acercamiento de 50X.

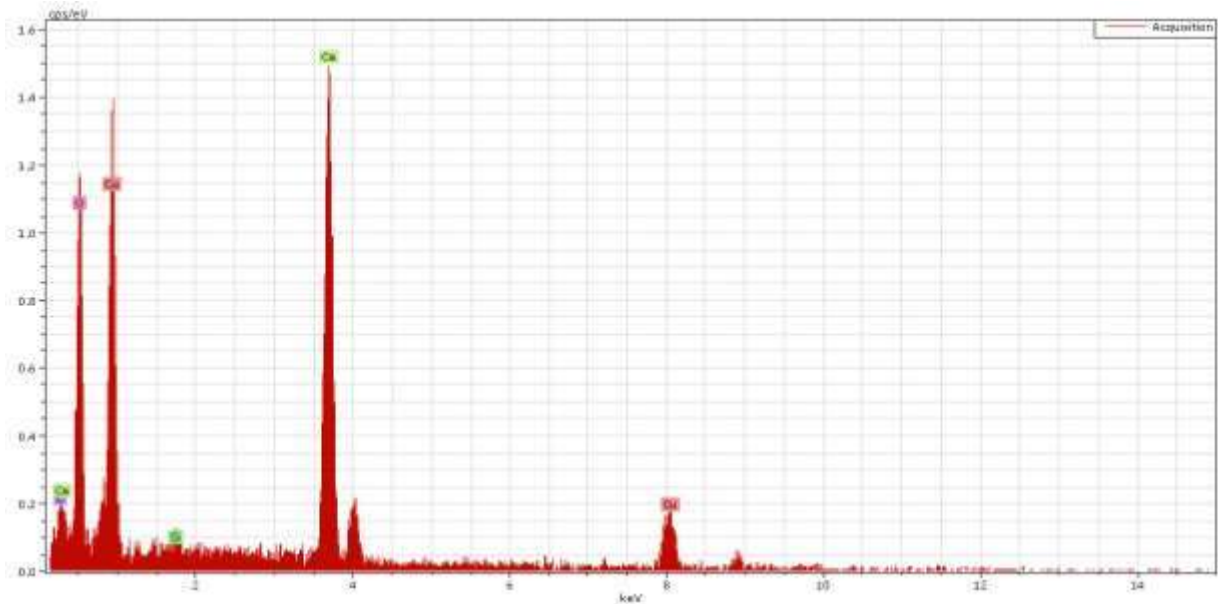


Figura . Análisis Espectral en agregado de la muestra CT050 a 50X.

Resultados de la cuantificación elemental en el agregado de la muestra CT050 con acercamiento de 50X.

MicroanálisisCT050 50x100 micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	2.955	3.665	5.925	0.671
Oxygen	K-series	52.383	64.970	78.856	7.384
Calcium	K-series	25.205	31.261	15.147	0.773
Silicon	K-series	0.083	0.103	0.071	0.028
	Sum:	80.626	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en agregado de muestra CT050 tomado a 50X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

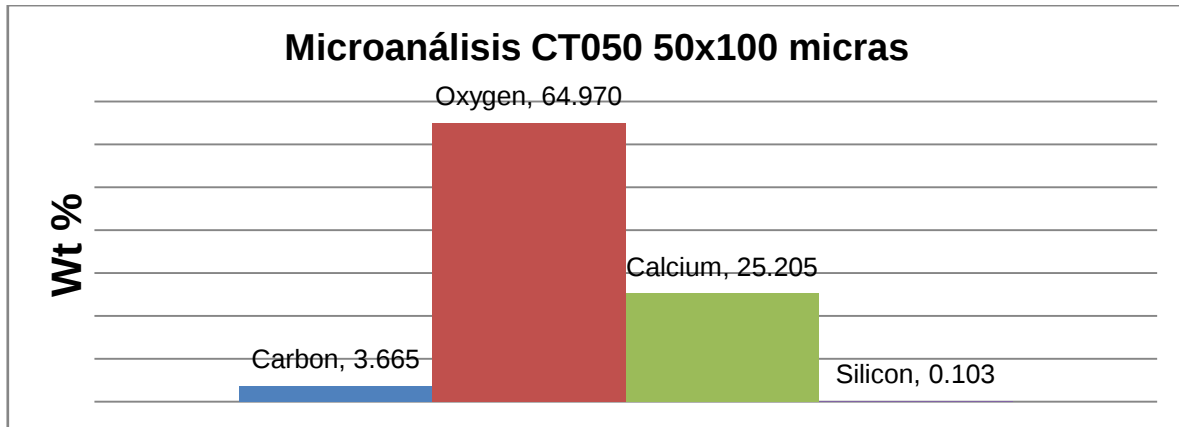


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en agregado de la muestra CT050 con acercamiento de 50X.

Espectro de la muestra, realizado a la matriz de cemento con acercamiento de 50X.

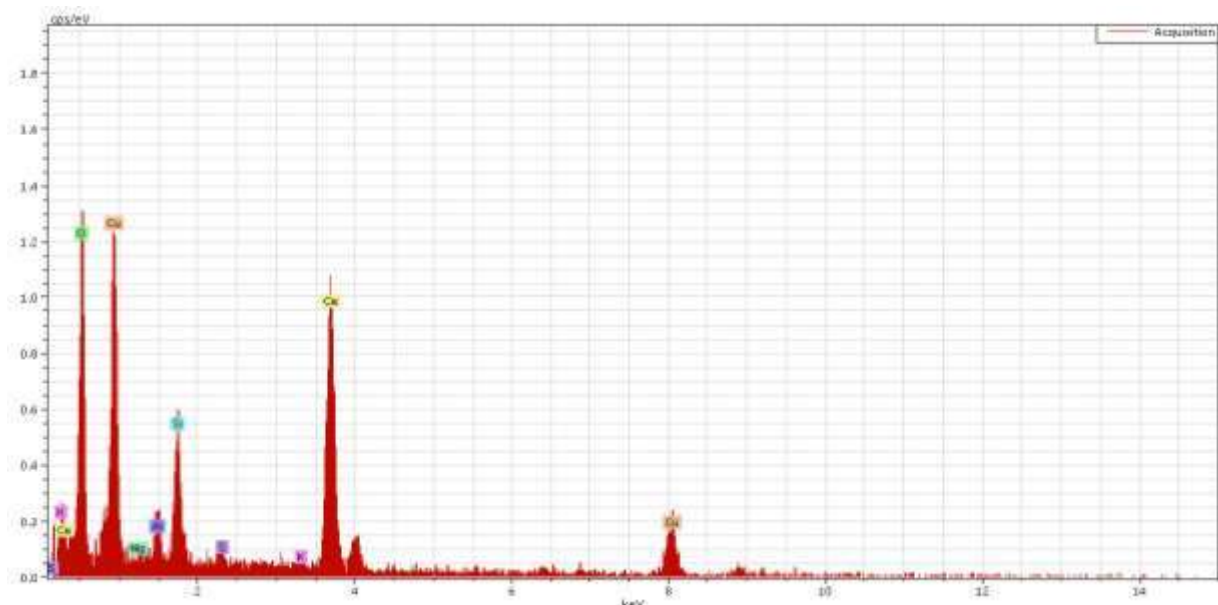


Figura . Análisis Espectral en la matriz cementicia de la muestra CT050 con acercamiento de 50X.

Resultados de la cuantificación elemental realizado a la matriz cementicia de la muestra CT065 con acercamiento de 500X.

Microanálisis CT050 50x100 micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Oxygen	K-series	80.235	80.236	90.338	0.662
Aluminium	K-series	0.880	0.880	0.588	0.066

Silicon	K-series	2.996	2.996	1.922	0.149
Potassium	K-series	0.231	0.231	0.107	0.032
Calcium	K-series	15.579	15.579	7.002	0.487
Magnesium	K-series	0.001	0.001	0.001	0.000
Sulfur	K-series	0.076	0.076	0.043	0.028
	Sum:	99.999	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en matriz cementicia de muestra CT050 tomado a 50X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

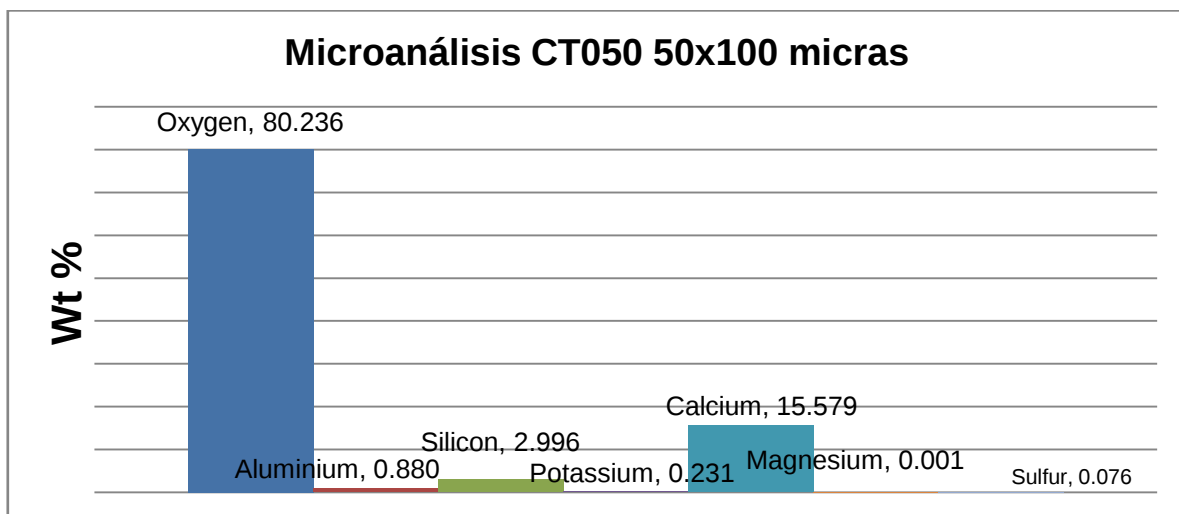


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en matriz cementicia de la muestra CT050 con acercamiento de 50X.

De la microfotografía tomada a 4000X se pueden observar cuatro formaciones muy particulares de las cuales se realizaron los análisis elementales el primero a la partícula alargada en su parte plana, en la misma partícula en la parte superior, el tercero en la partícula de forma cubica, el cuarto en la partícula de forma de microesferas.

Espectro de la muestra, realizado a la partícula alargada en su parte plana con acercamiento de 4000X.

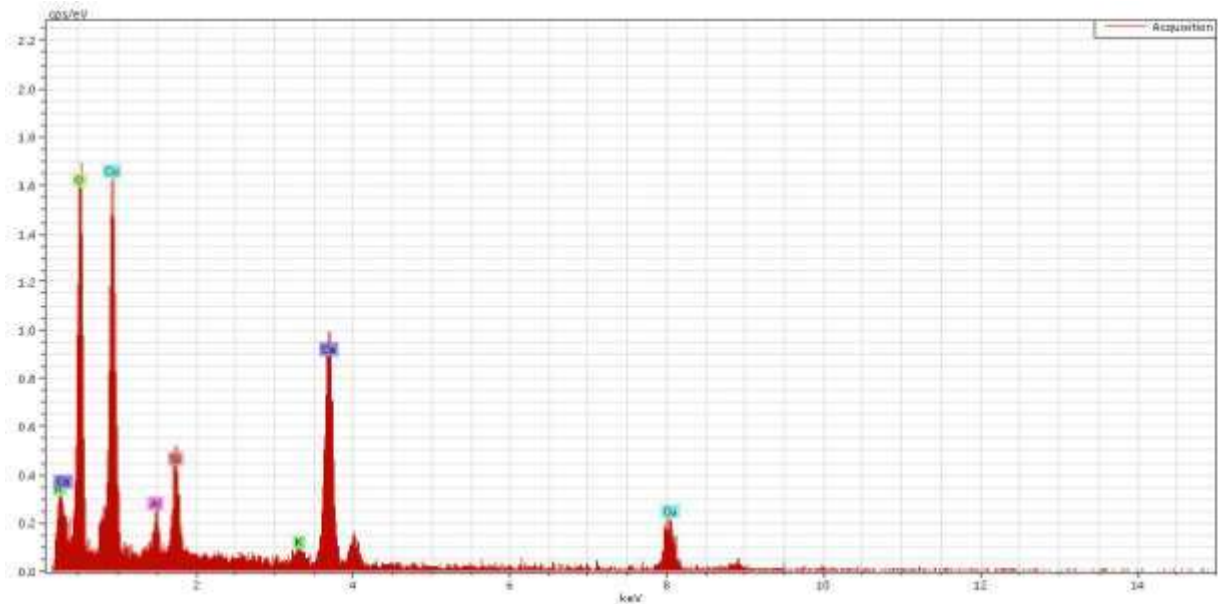


Figura . Análisis Espectral en partícula alargada en su parte plana de la muestra CT050 a 4000X.

Resultados de la cuantificación elemental en la partícula alargada en su parte plana de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

Microanálisis CT050 4000x1micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Oxygen	K-series	81.126	81.127	90.872	0.630
Silicon	K-series	2.536	2.536	1.618	0.130
Potassium	K-series	0.725	0.725	0.332	0.047
Calcium	K-series	14.707	14.707	6.576	0.461
Aluminium	K-series	0.905	0.905	0.601	0.067
	Sum:	99.999	100.000	100.000	

Tabla . Cuantificación elemental en la partícula alargada en su parte superior de la muestra CT050 tomado a 4000X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

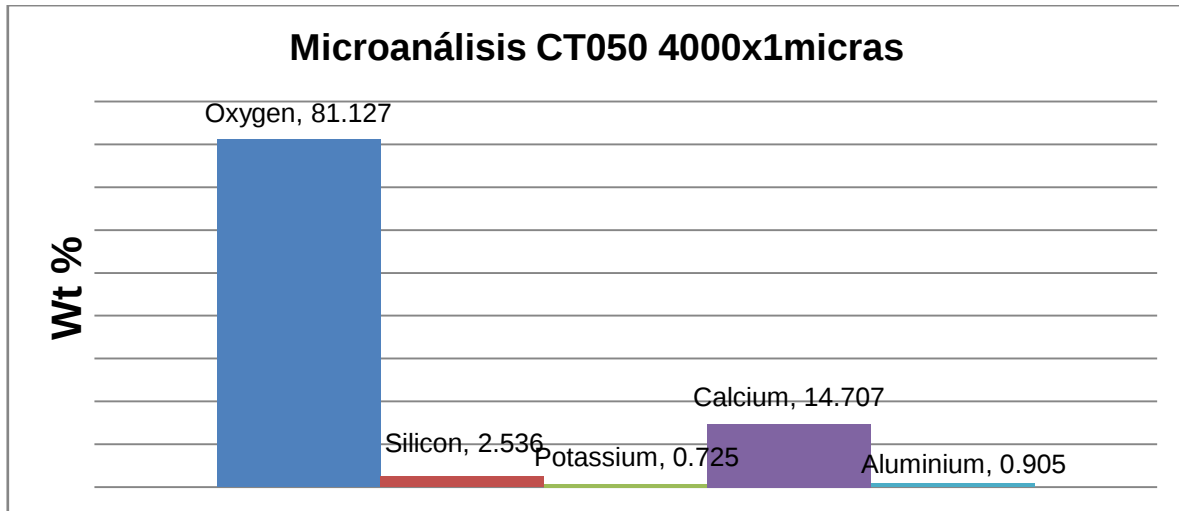


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en la partícula alargada en su parte plana de la muestra CT050 tomado a 4000X.

Espectro, realizado a la partícula alargada en su parte plana de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

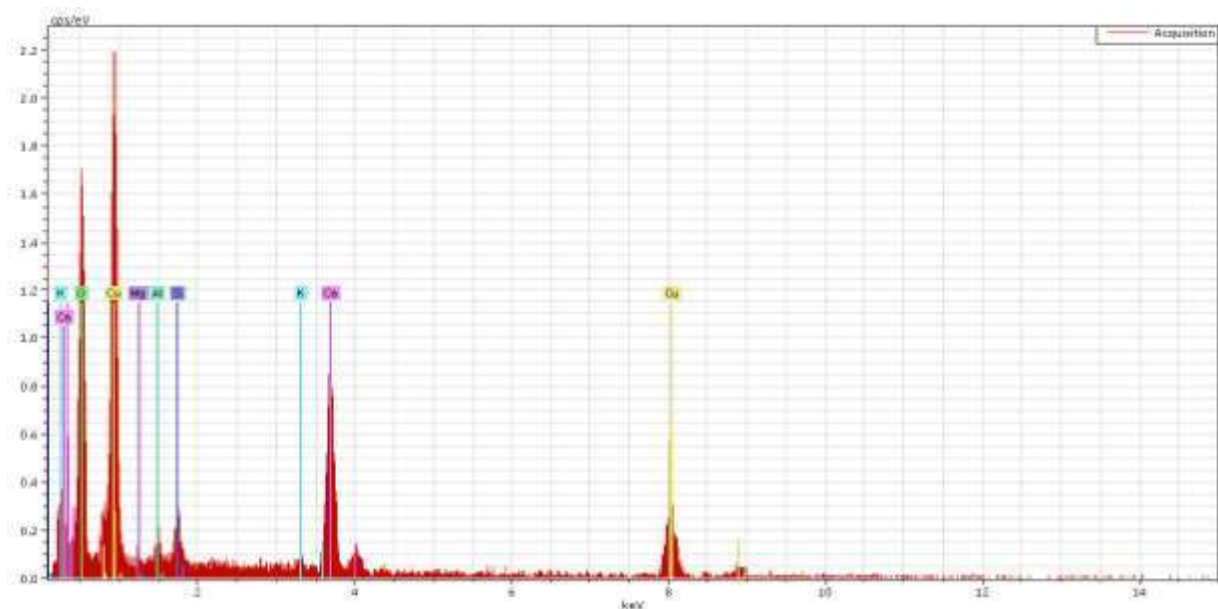


Figura . Análisis Espectral en partícula alargada en su parte plana de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

Microanálisis CT050 4000x1micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Oxygen	K-series	85.807	85.808	93.475	0.470
Silicon	K-series	1.241	1.241	0.770	0.076
Potassium	K-series	0.334	0.334	0.149	0.035
Calcium	K-series	12.075	12.075	5.251	0.383
Aluminium	K-series	0.479	0.479	0.310	0.047
Magnesium	K-series	0.062	0.062	0.045	0.028
	Sum:	99.999	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en la partícula alargada en su parte superior de la muestra CT050 tomado a 4000X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

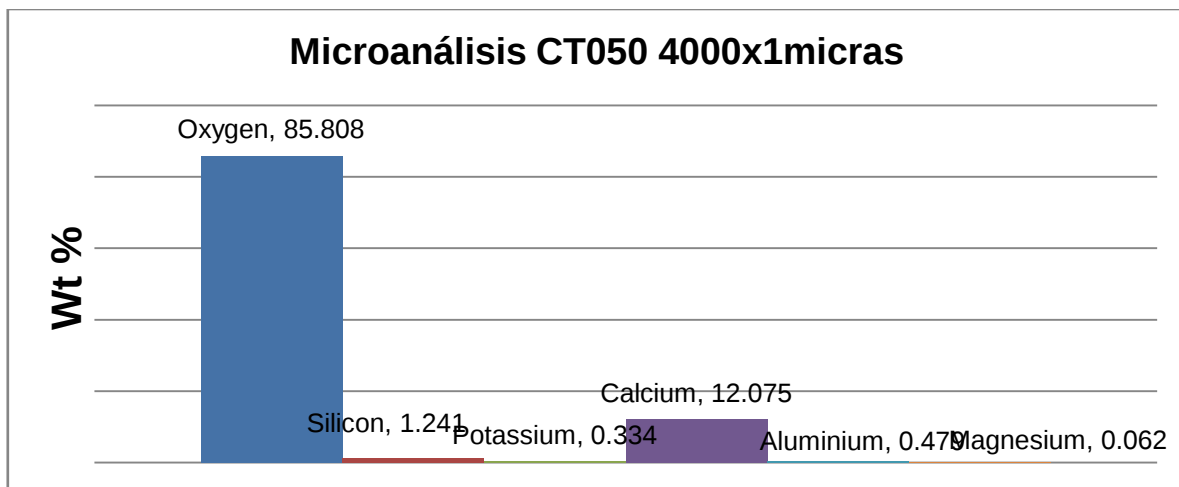


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en la partícula alargada en su parte superior de la muestra CT050 tomado a 4000X.

Espectro, realizado a la partícula cubica de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

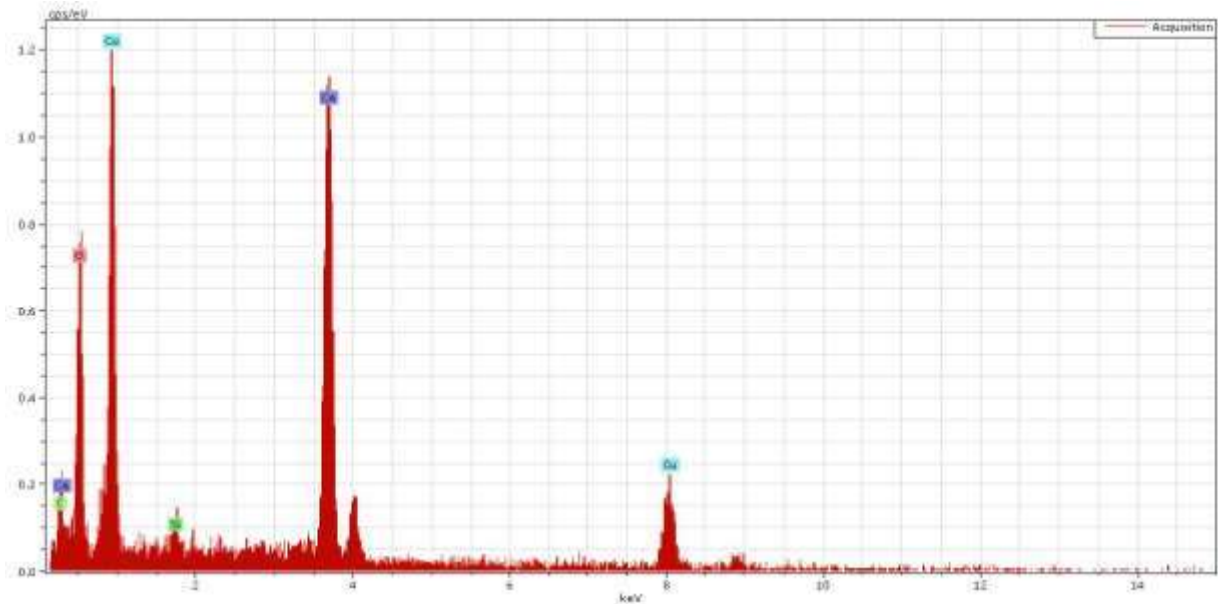


Figura . Análisis Espectral en partícula cubica de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

Resultados de la cuantificación elemental realizado a la partícula cubica en la parte plana de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

Tabla . Cuantificación elemental en partícula cubica de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

MicroanálisisCT050 4000x1micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	3.842	5.192	8.287	0.883
Oxygen	K-series	47.537	64.245	76.986	7.201
Silicon	K-series	0.384	0.519	0.354	0.041
Calcium	K-series	22.231	30.044	14.372	0.684
	Sum:	73.993	100	100	

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

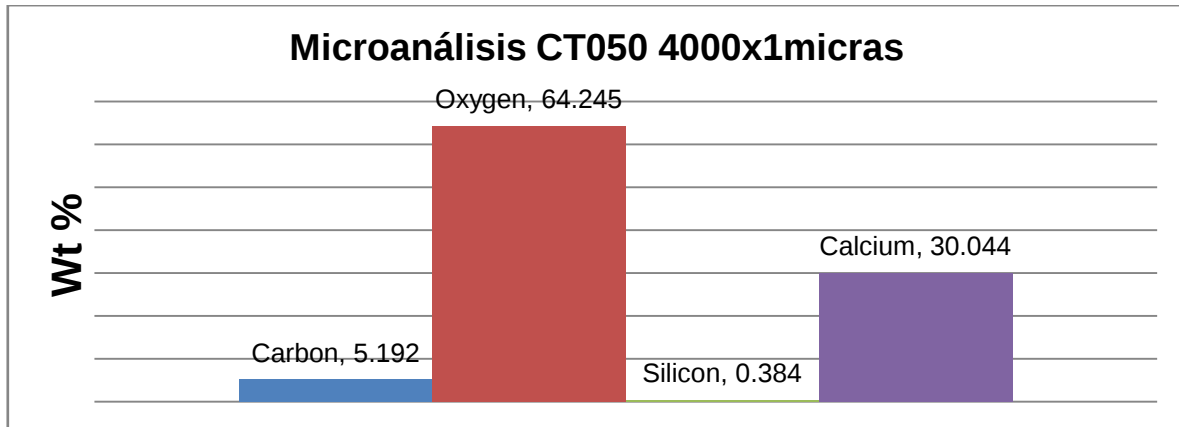


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en partícula cubica de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

Espectro, realizado a la partícula micro esférica de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

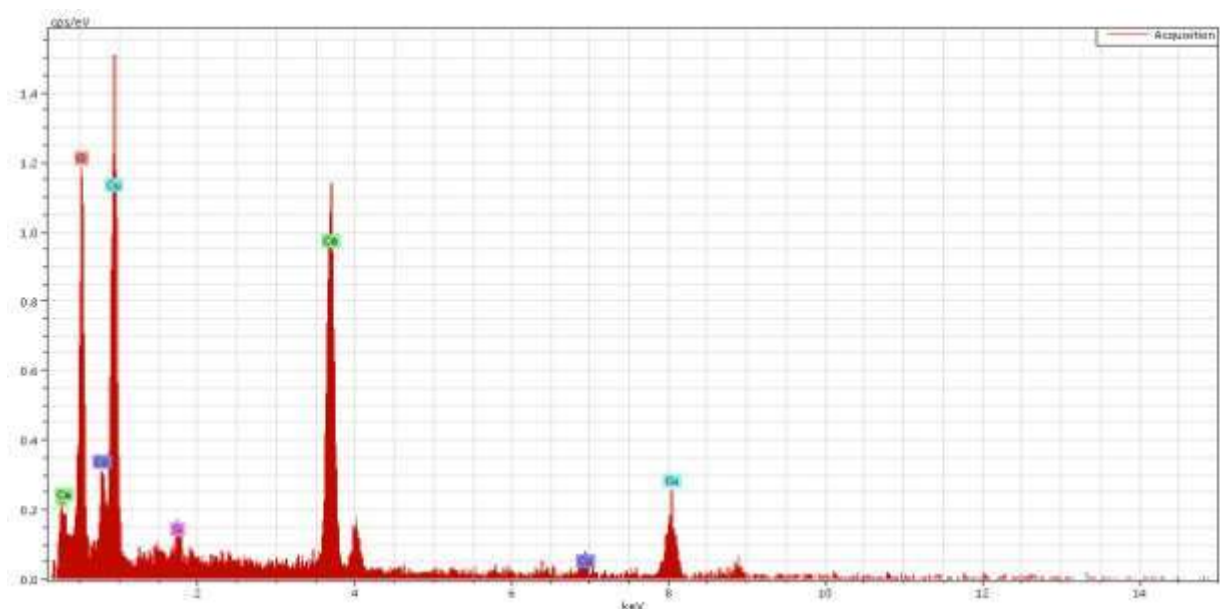


Figura . Análisis Espectral en partícula micro esférica de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

Resultados de la cuantificación elemental realizado a la partícula micro esférica de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

Tabla . Cuantificación elemental en partícula micro esférica de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

Microanálisis CT050 4000x1micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	5.884	5.884	8.855	2.441
Oxygen	K-series	72.366	72.367	81.759	22.385
Calcium	K-series	17.770	17.771	8.015	0.552
Cobalt	K-series	3.532	3.532	1.083	0.130
Silicon	K-series	0.446	0.446	0.287	0.044
	Sum:	99.998	100.000	100.000	

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

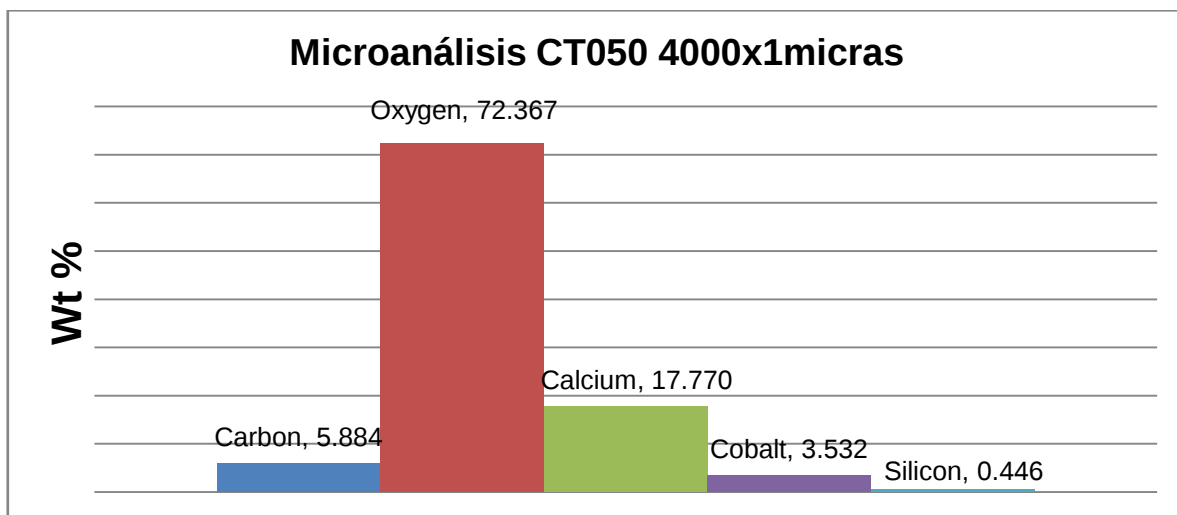
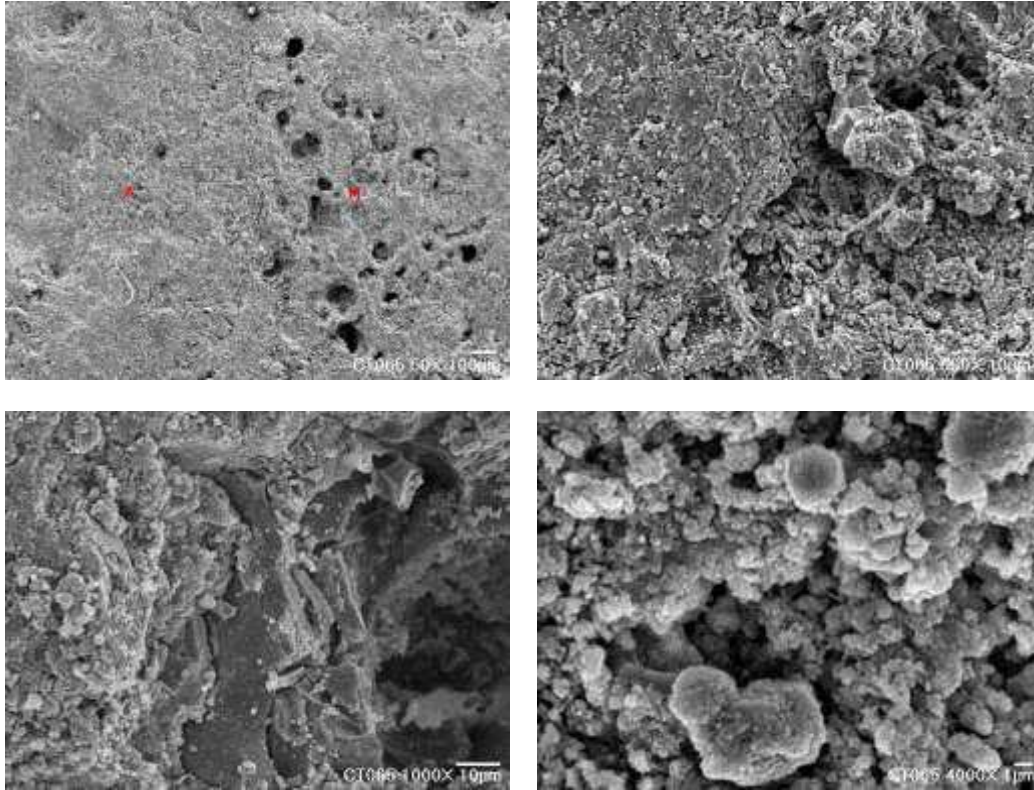


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en partícula esférica de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

5.5.2.6 Resultados de la mezcla CT065

Resultados obtenidos para la Mezcla CT065 (Mezcla realizada con Grava de Caliza, Arena del banco El Tigre y con relación agua cemento de 0.65).



Figuras . Microfotografías tomadas a la muestra CT065 a 50X, 500X, 1000X y 4000X, respectivamente.

Espectro, realizado al agregado pétreo de la muestra CT065 con acercamiento de 50X.

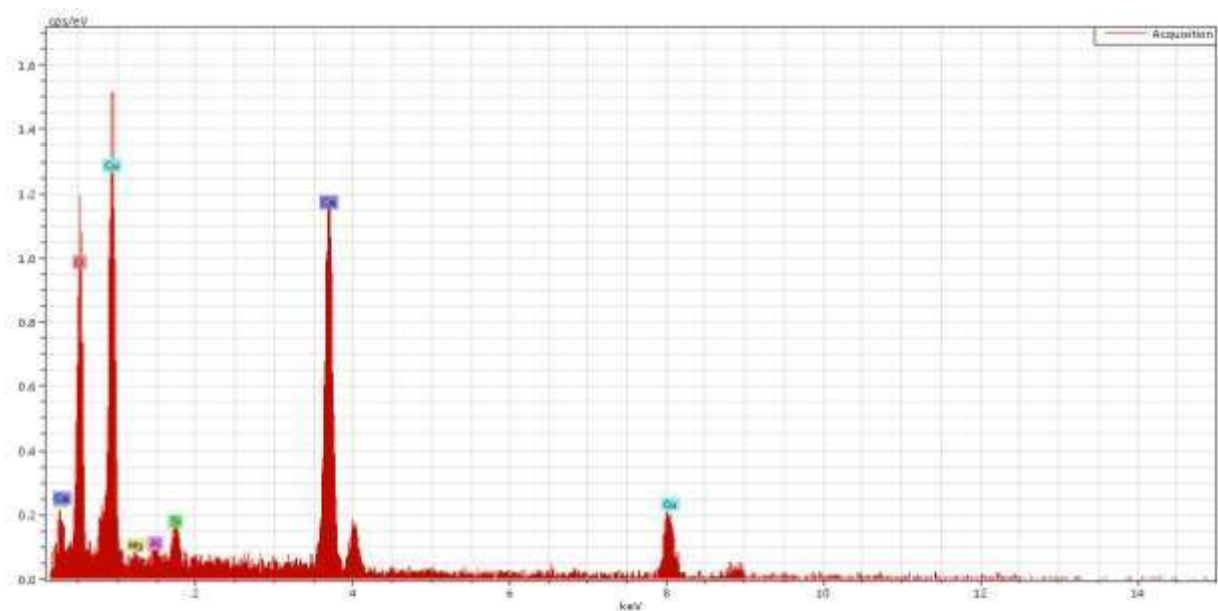


Figura . Análisis Espectral en agregado de la muestra CT065 con acercamiento de 50X.

Resultados de la cuantificación elemental realizado al agregado de la muestra CT065 con acercamiento de 50X.

Microanálisis CT065 50x100micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	5.880	5.880	8.669	2.377
Oxygen	K-series	74.609	74.611	82.574	22.995
Silicon	K-series	0.590	0.590	0.372	0.049
Calcium	K-series	18.802	18.803	8.307	0.583
Aluminium	K-series	0.099	0.099	0.065	0.030
Magnesium	K-series	0.017	0.017	0.012	0.001
	Sum:	99.998	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en agregado de la muestra CT065 con acercamiento de 50X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

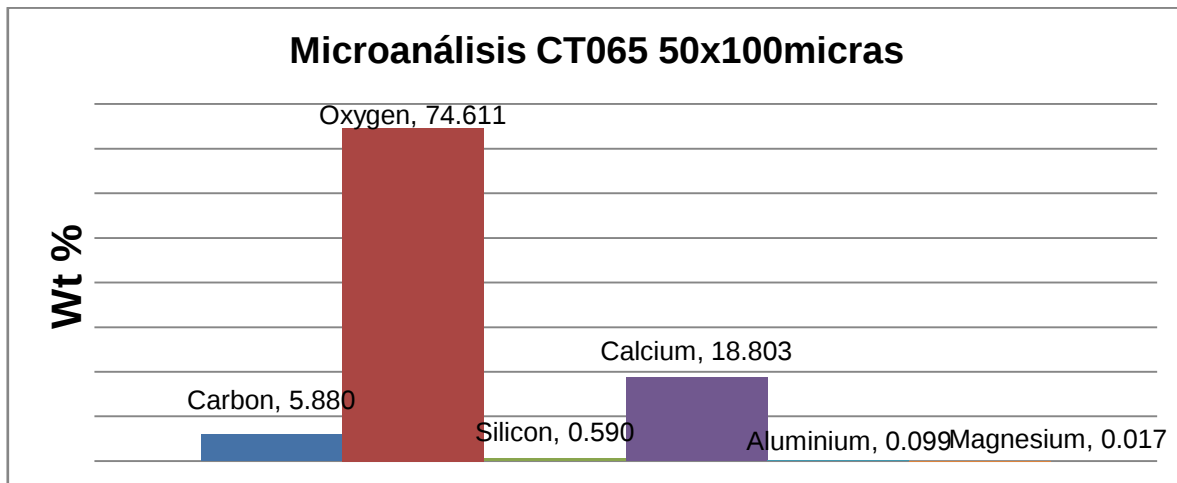


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en agregado de la muestra CT065 con acercamiento de 50X.

Espectro, realizado a la matriz cementicia de la muestra CT065 con acercamiento de 500X.

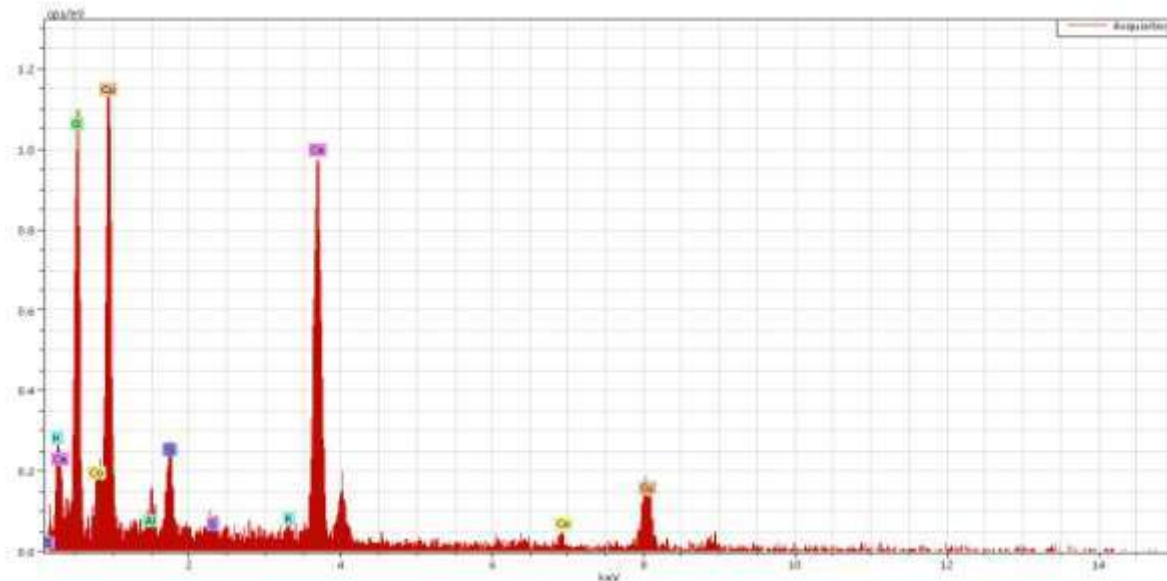


Figura . Análisis Espectral en matriz cementicia de la muestra CT065 con acercamiento de 500X.

Resultados de la cuantificación elemental realizado en matriz cementicia de la muestra CT065 con acercamiento de 500X.

Microanálisis CT065 500x10 micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Oxygen	K-series	51.862	69.405	84.820	7.444
Silicon	K-series	1.634	2.187	1.523	0.093
Potassium	K-series	0.279	0.374	0.187	0.034
Calcium	K-series	18.772	25.122	12.256	0.582
Cobalt	K-series	1.646	2.202	0.731	0.074
Aluminium	K-series	0.331	0.443	0.321	0.040
Sulfur	K-series	0.199	0.266	0.162	0.032
	Sum:	74.72346	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en matriz cementicia de la muestra CT065 con acercamiento de 500X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

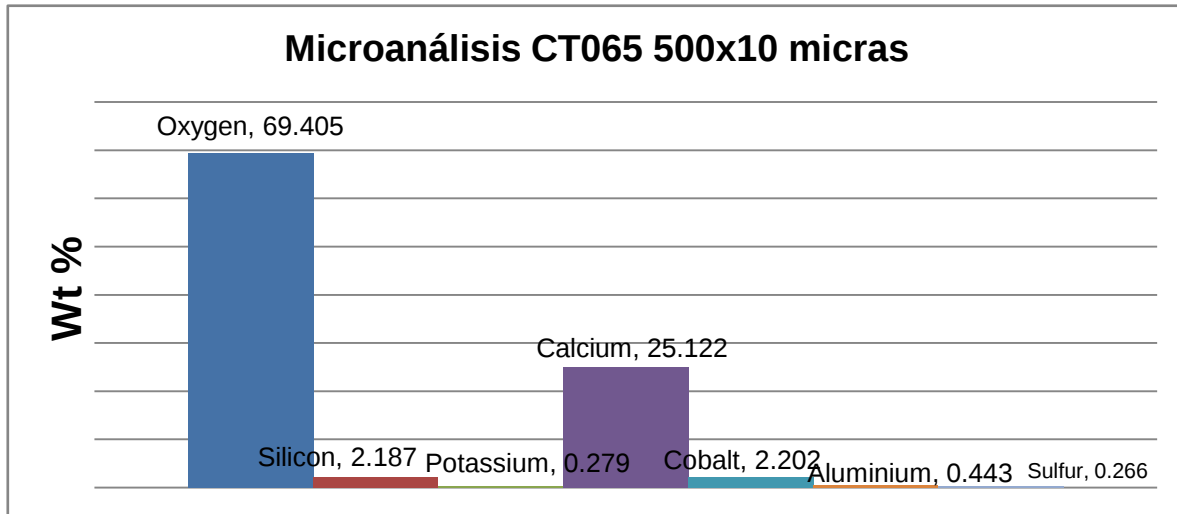


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en matriz cementicia de la muestra CT065 con acercamiento de 500X.

Espectro, realizado al agregado de la muestra CT065 con acercamiento de 50X.

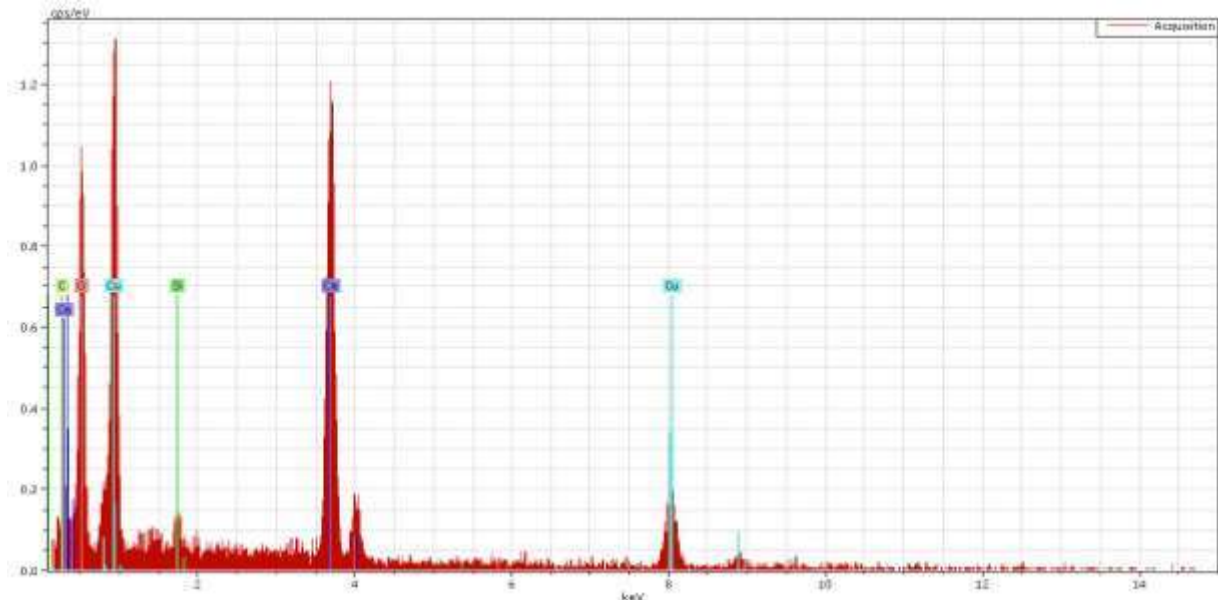


Figura . Análisis Espectral en agregado de la muestra CT065 con acercamiento de 50X.

Resultados de la cuantificación elemental realizado en agregado de la muestra CT065 con acercamiento de 50X.

MicroanálisisCT065 50x100 micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	3.661	4.676	7.392	0.814
Oxygen	K-series	51.951	66.343	78.744	7.471
Silicon	K-series	0.512	0.653	0.442	0.046
Calcium	K-series	22.182	28.328	13.422	0.683
	Sum:	78.306	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en agregado de la muestra CT065 con acercamiento de 50X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

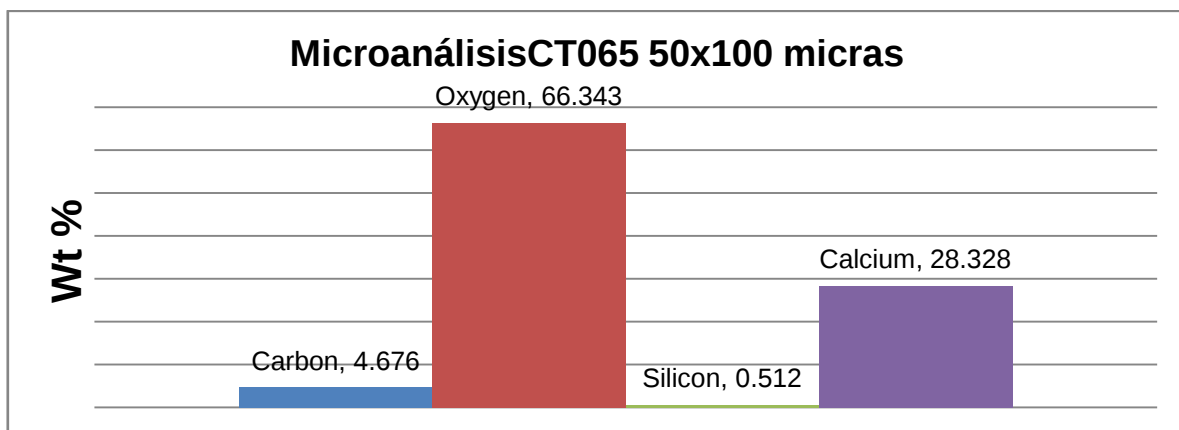
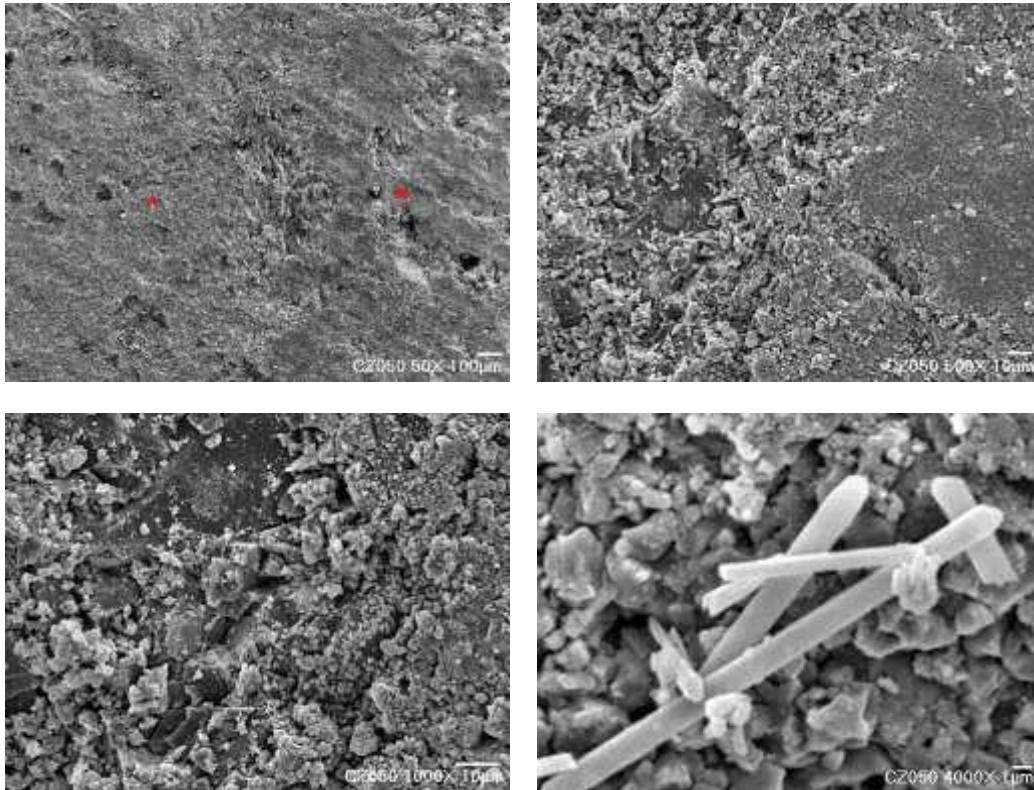


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en agregado de la muestra CT065 con acercamiento de 50X.

5.5.2.7 Resultados de la mezcla CZ050

Resultados obtenidos para la Mezcla CZ050 (Mezcla realizada con Grava de Caliza, Arena Blanca de Zitácuaro con relación agua cemento de 0.50).



Figuras . Microfotografías tomadas a la muestra CZ050 a 50X, 500X, 1000X y 4000X, respectivamente.

Espectro, realizado al agregado pétreo de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

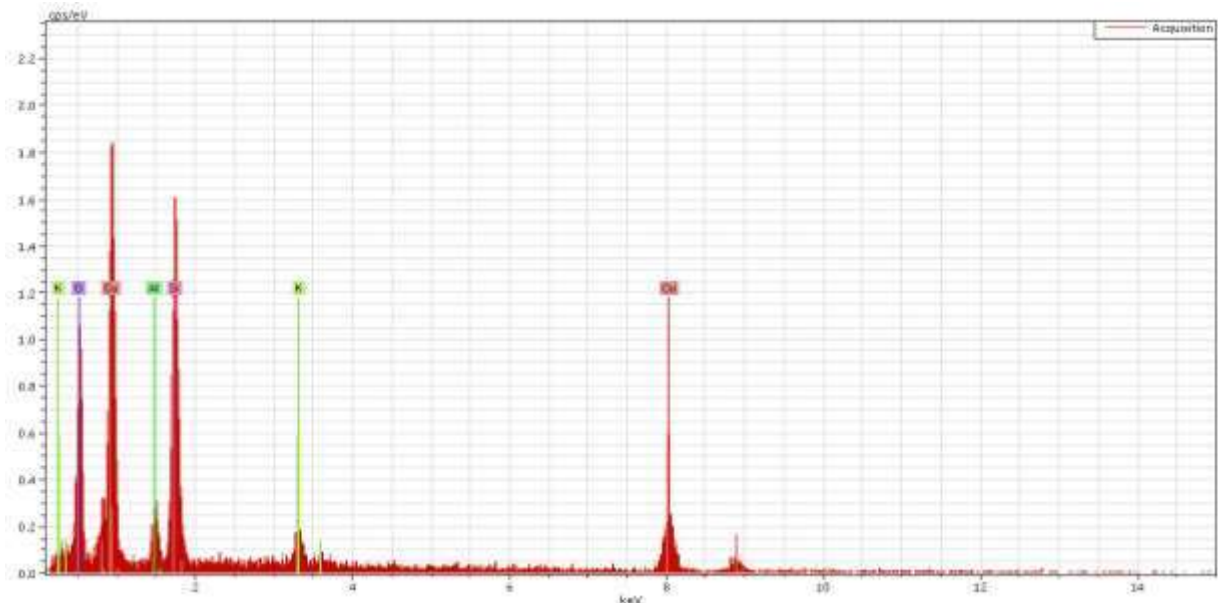


Figura . Análisis Espectral en agregado de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

Resultados de la cuantificación elemental realizado al agregado de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

Microanálisis CZ050 50x100 micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Oxygen	K-series	89.418	89.419	93.901	0.452
Silicon	K-series	8.063	8.063	4.823	0.359
Potassium	K-series	1.516	1.516	0.651	0.071
Aluminium	K-series	1.003	1.003	0.625	0.071
	Sum:	99.999	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en agregado de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

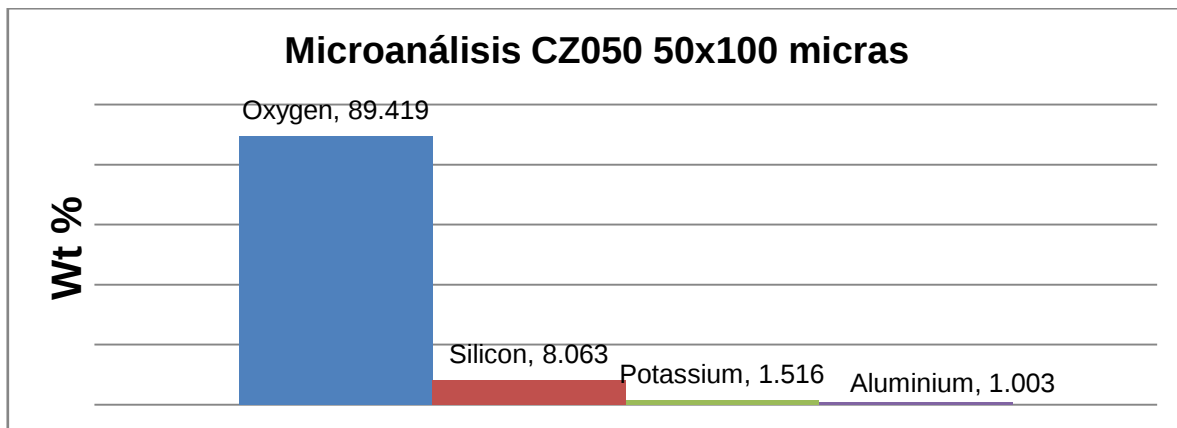


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en agregado de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

Espectro, realizado a la matriz cementicia de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

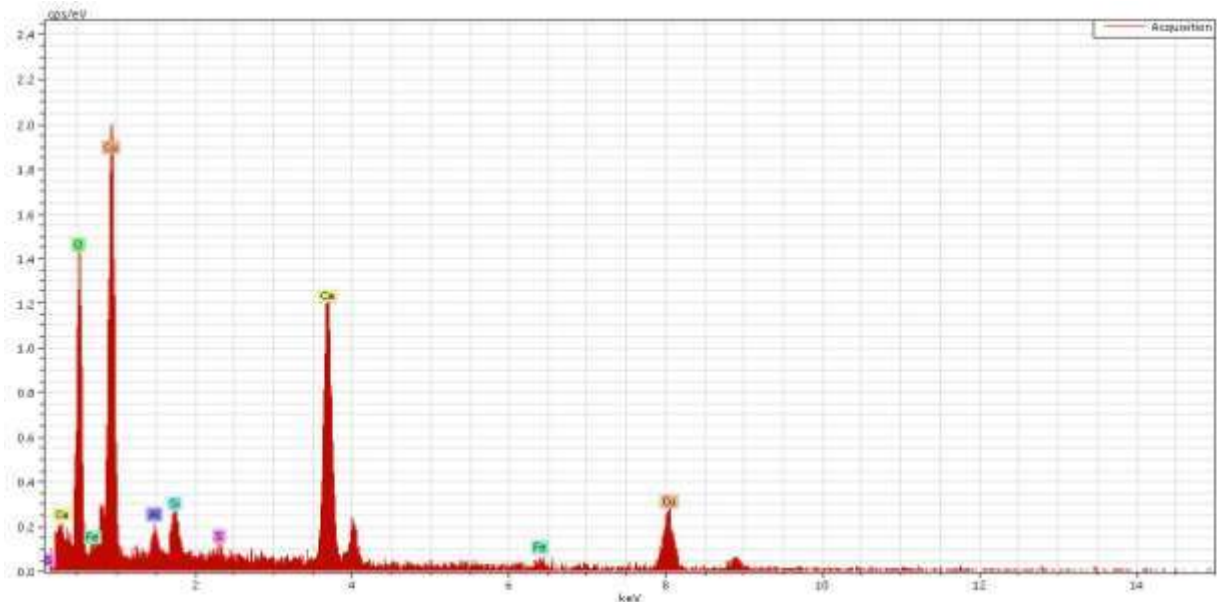


Figura . Análisis Espectral en matriz cementicia de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

Resultados de la cuantificación elemental realizado en matriz cementicia de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

Microanálisis CZ050 50x100micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Oxygen	K-series	81.481	81.482	91.548	0.595
Aluminium	K-series	0.499	0.499	0.333	0.048
Silicon	K-series	1.086	1.086	0.695	0.070
Sulfur	K-series	0.120	0.120	0.067	0.029
Calcium	K-series	15.361	15.361	6.890	0.481
Iron	K-series	1.452	1.452	0.467	0.067
	Sum:	99.999	100	100	

Tabla . Cuantificación elemental en matriz cementicia de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

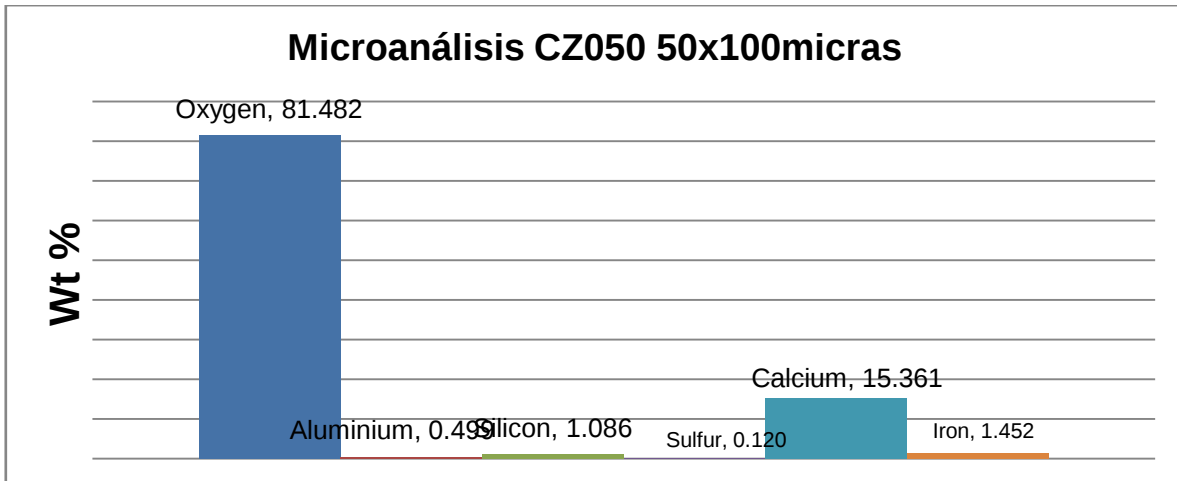


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en matriz cementicia de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

Espectro, realizado al agregado pétreo de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

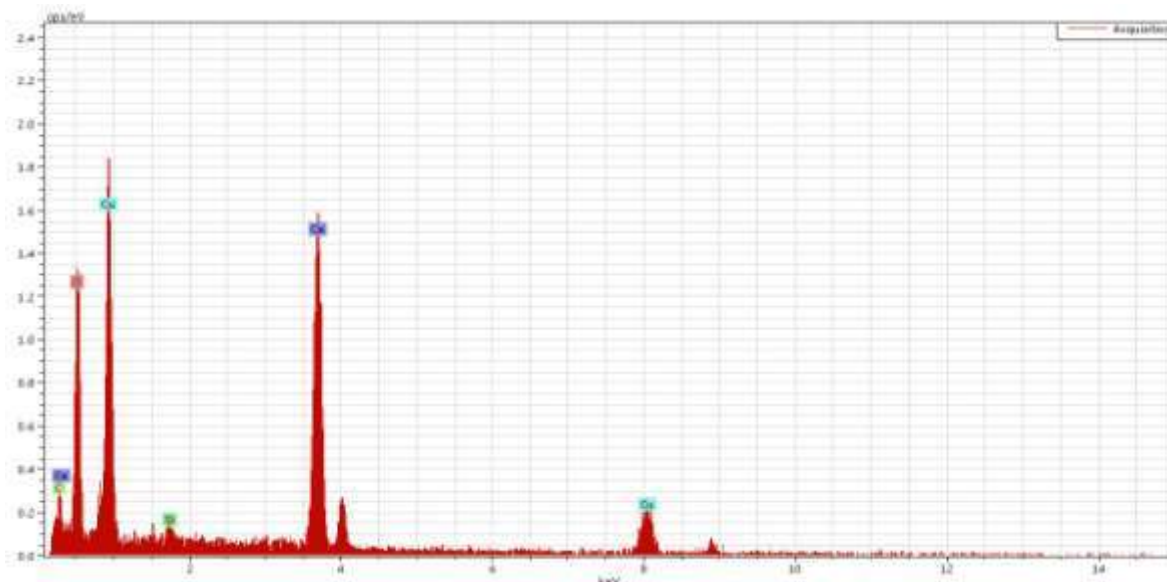


Figura . Análisis Espectral en agregado de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

Resultados de la cuantificación elemental realizado al agregado de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

Tabla . Cuantificación elemental en agregado de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

Microanálisis CZ050 50x100 micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	6.090	6.090	9.057	2.471

Oxygen	K-series	73.120	73.122	81.633	22.580
Silicon	K-series	0.241	0.241	0.153	0.035
Calcium	K-series	20.546	20.547	9.157	0.634
	Sum:	99.998	100	100	

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

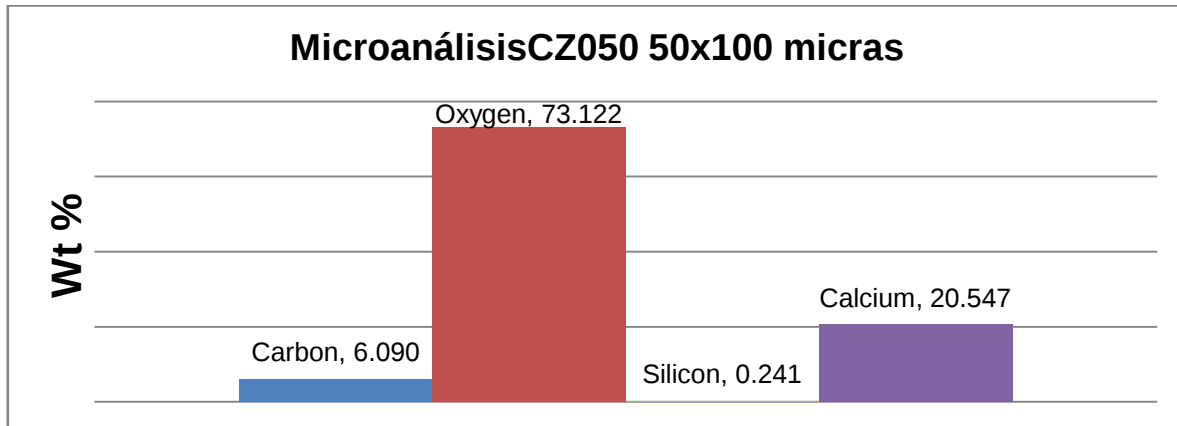
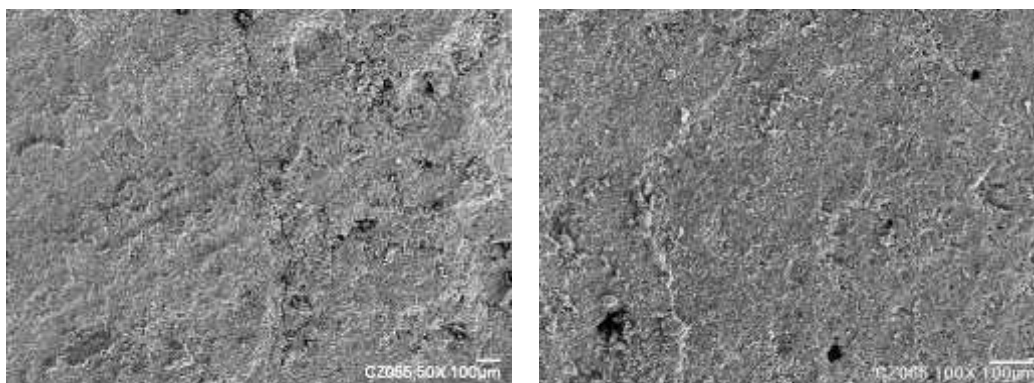
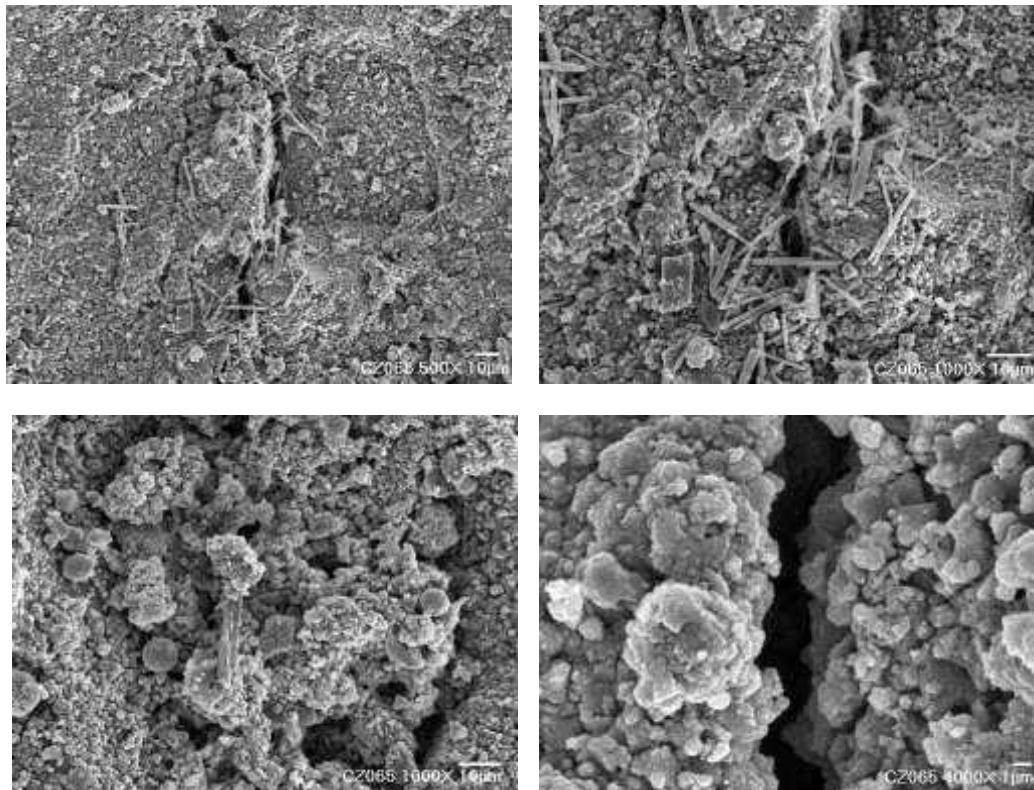


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en agregado de la muestra CZ050 con acercamiento de 50X.

5.5.2.8 Resultados de la mezcla CZ065

Resultados obtenidos para la Mezcla CZ065 (Mezcla realizada con Grava de Caliza, Arena Blanca de Zitácuaro, con relación agua cemento de 0.65).





Figuras . Microfotografías tomadas a la muestra CZ065 a 50X, 100X, 500X, 1000X, 1000X y 4000X, respectivamente.

Espectro de la muestra, realizado al Agregado pétreo con acercamiento de 50X.

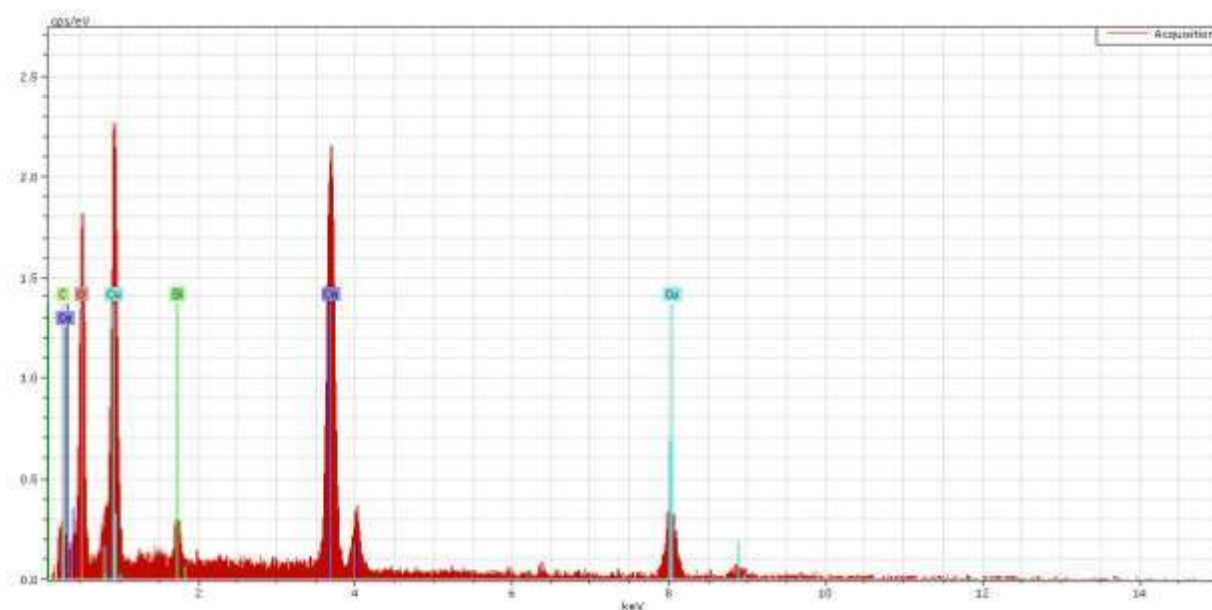


Figura . Análisis Espectral en agregado de la muestra CZ065 a 50X.

Resultados de la cuantificación elemental en el agregado de la muestra CT050 con acercamiento de 50X.

Tabla . Cuantificación elemental en agregado de muestra CZ065 tomado a 50X.

Microanálisis CZ065 50x100 micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	4.824	4.824	7.226	2.112
Oxygen	K-series	73.883	73.885	83.079	22.830
Silicon	K-series	0.720	0.720	0.461	0.055
Calcium	K-series	20.571	20.571	9.234	0.635
	Sum:	99.998	100	100	

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

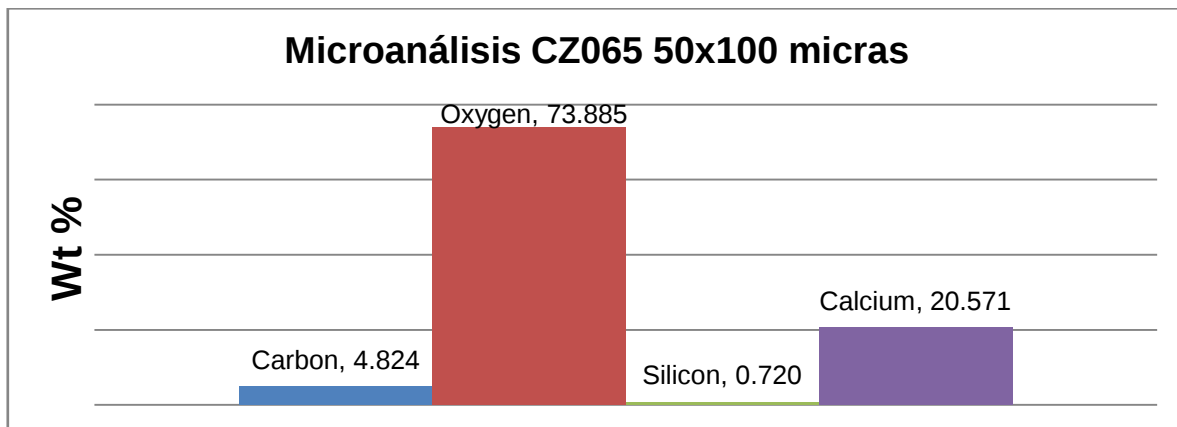


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en agregado de la muestra CZ065 con acercamiento de 50X.

Espectro de la muestra, realizado a la matriz de cemento con acercamiento de 50X.

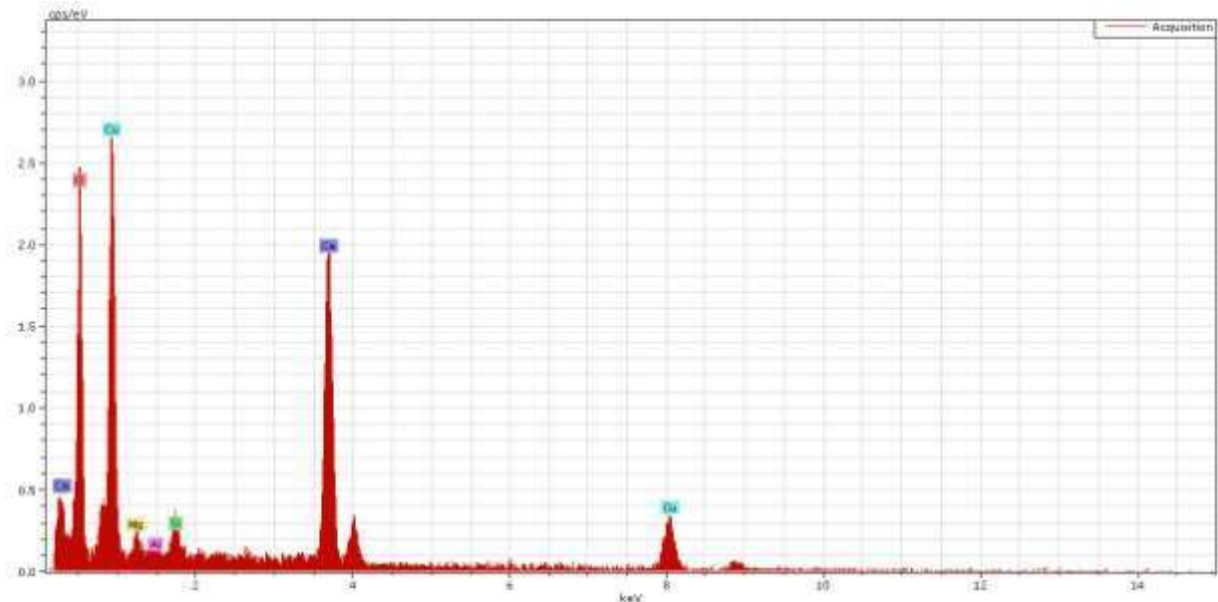


Figura . Análisis Espectral en la matriz cementicia de la muestra CZ065 con acercamiento de 50X.

Resultados de la cuantificación elemental realizado a la matriz cementicia de la muestra CZ065 con acercamiento de 500X.

Tabla . Cuantificación elemental en matriz cementicia de muestra CZ065 tomado a 50X.

Microanálisis CZ065 50x100micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	7.288	7.288	10.653	2.802
Oxygen	K-series	73.487	73.488	80.644	22.661
Silicon	K-series	0.787	0.787	0.492	0.058
Calcium	K-series	17.943	17.943	7.860	0.557
Aluminium	K-series	0.085	0.085	0.055	0.029
Magnesium	K-series	0.409	0.409	0.296	0.047
	Sum:	99.998	100	100	

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

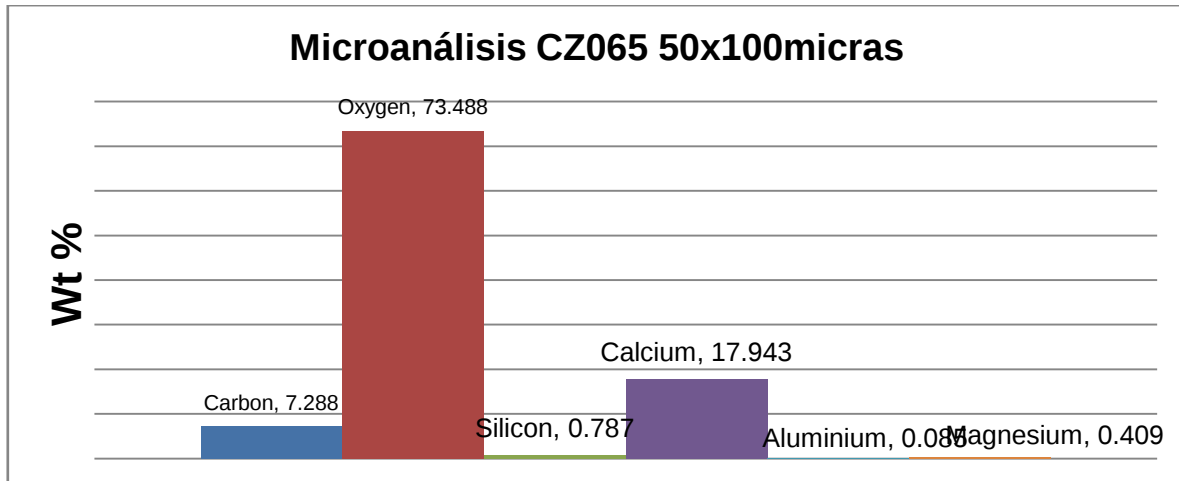


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en matriz cementicia de la muestra CZ065 con acercamiento de 50X.

De la microfotografía tomada a 1000X se pueden observar dos formaciones muy particulares de las cuales se realizó análisis elemental a la partícula micro esférica.

Espectro de la muestra, realizado a la partícula micro esférica con acercamiento de 1000X.

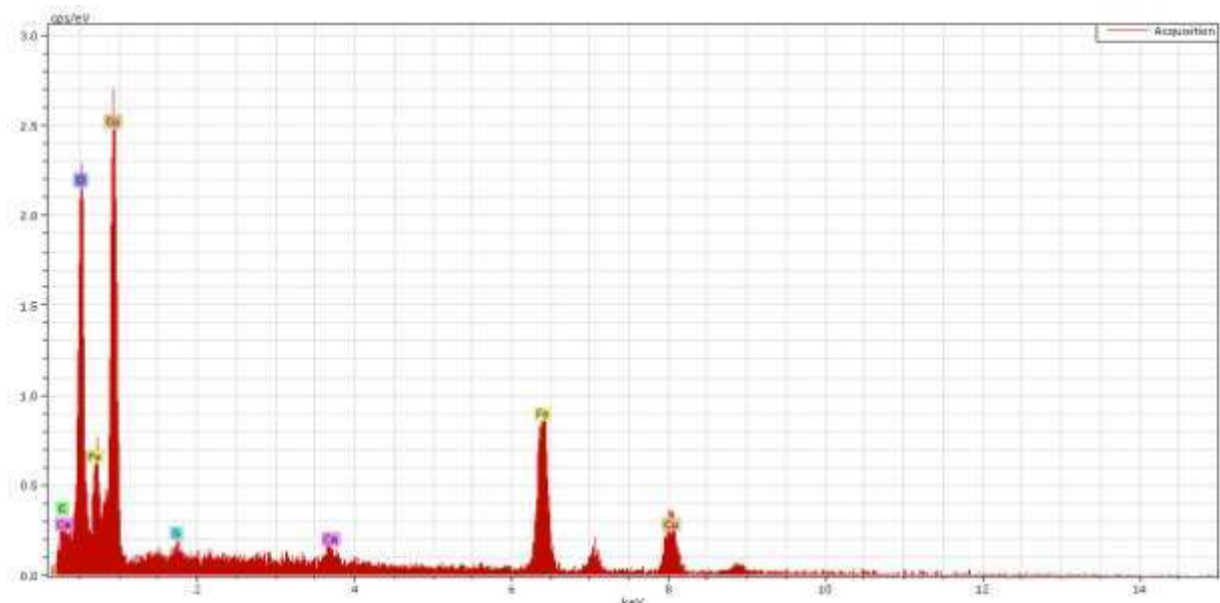


Figura . Análisis Espectral en partícula micro esférica de la muestra CZ065 a 1000X.

Resultados de la cuantificación elemental en la partícula alargada en su parte plana de la muestra CT050 con acercamiento de 4000X.

Tabla . Cuantificación elemental en la partícula micro esférica de la muestra CZ065 tomado a 1000X.

Microanálisis CZ065-2 1000x10micras					
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	K-series	2.258	2.992	6.514	0.486
Oxygen	K-series	30.807	40.813	66.711	4.006
Silicon	K-series	0.304	0.403	0.375	0.038
Calcium	K-series	1.122	1.487	0.970	0.058
Iron	K-series	40.993	54.306	25.430	1.220
	Sum:	75.48433	100	100	

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

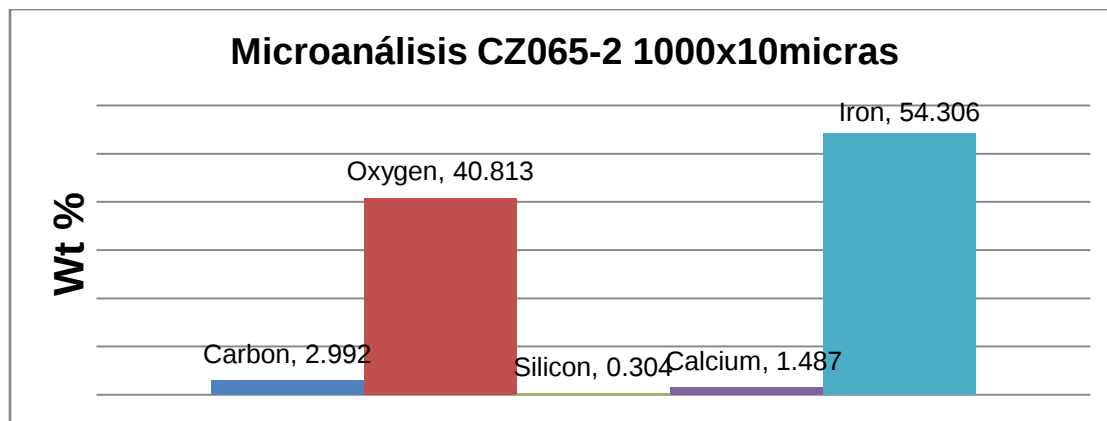


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en la partícula micro esférica de la muestra CZ065 tomado a 1000X.

Espectro, realizado a la partícula en forma de roseta de la muestra CZ065 con acercamiento de 4000X.

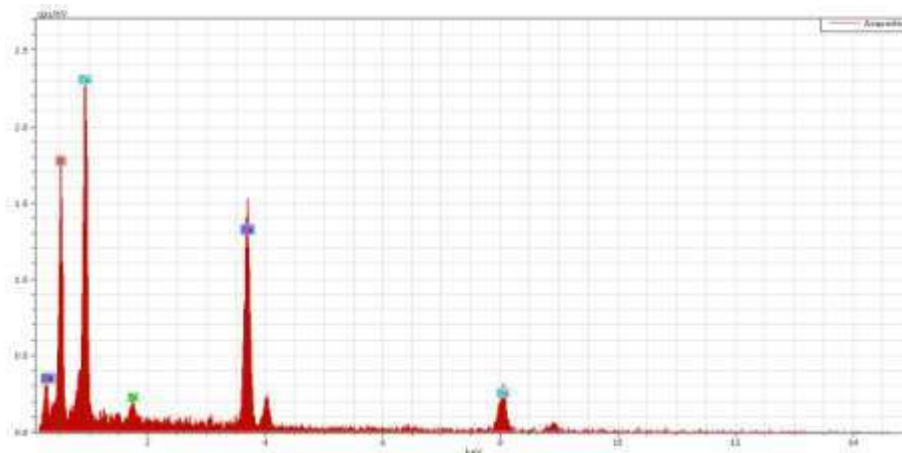


Figura . Análisis Espectral en partícula en forma de roseta de la muestra CZ065 con acercamiento de 4000X.

Resultados de la cuantificación elemental en la partícula en forma de roseta de la muestra CZ065 con acercamiento de 4000X.

Tabla . Cuantificación elemental en la partícula en forma de roseta de la muestra CZ065 tomado a 4000X.

Microanálisis CZ065 4000x1micras					
Element	series	[wt. %]	[norm. wt. %]	[norm. at. %]	Error in %
Carbón	K-series	6.705	6.705	9.729	2.561
Oxygen	K-series	75.801	75.803	82.572	23.290
Silicon	K-series	0.498	0.498	0.309	0.046
Calcium	K-series	16.994	16.994	7.390	0.529
	Sum:	99.998	100	100	

La siguiente es una gráfica realizada de acuerdo a la información obtenida en la tabla anterior.

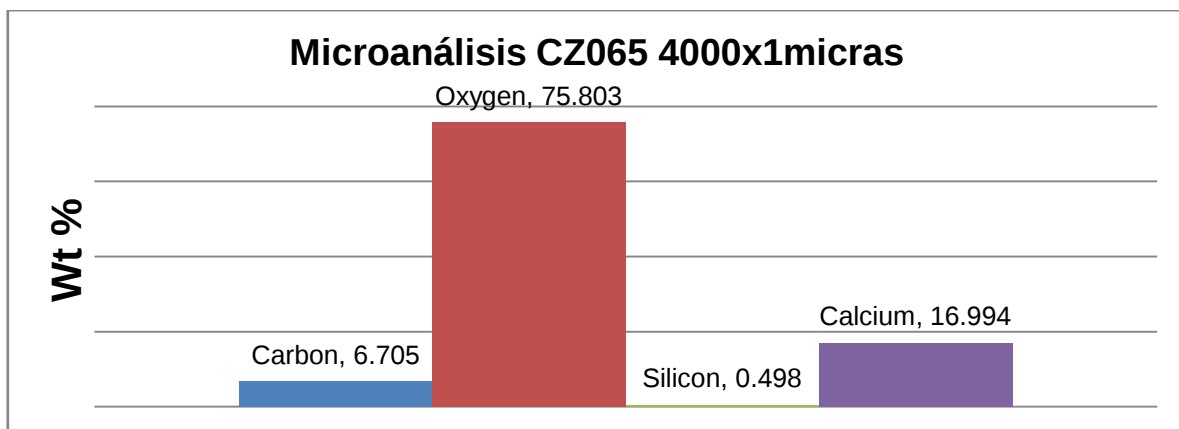


Figura . Gráfica de Cuantificación elemental en la partícula en forma de roseta de la muestra CZ065 tomado a 4000X.

5.6 Resultados de las pruebas Destructivas realizadas a los especímenes.

5.6.1 Resultados de la prueba de Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto.

Tabla . Resultados de la resistencia a compresión en especímenes cilíndricos de 15x30cm.

Especimen	Edad (Días)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Promedio de Resistencia (Kg/cm ²)
AT050	217	54,500.00	308.41	
AT050	217	54,556.41	308.73	308.57
AZ050	221	60,875.00	344.48	
AZ050	221	60,173.63	340.51	342.50
CT050	223	59,000.00	333.87	
CT050	223	66,245.78	374.87	354.37
CZ050	226	68,500.00	387.63	
CZ050	226	54,049.85	305.86	346.75
AT065	215	27,625.00	156.33	
AT065	215	34,233.43	193.72	175.02
AZ065	210	44,375.00	251.11	
AZ065	210	37,219.24	210.62	230.86
CT065	208	43,500.00	246.16	
CT065	208	36,612.58	207.18	226.67
CZ065	207	54,500.00	308.41	
CZ065	207	49,127.32	278.00	293.21

Tabla . Resultados de la resistencia a compresión en especímenes cilíndricos de 10x20cm.

Especimen	Edad (Días)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia Promedio (Kg/cm ²)
AT050	218	35000	445.63	
AT050	218	34250	436.08	
AT050	218	32875	418.58	
AT050	218	30750	391.52	422.95
AZ050	217	30500	388.34	
AZ050	217	32000	407.44	
AZ050	217	32375	412.21	

AZ050	217	33375	424.94	408.23
CT050	218	30500	388.34	
CT050	218	31000	394.70	
CT050	218	32675	416.03	
CT050	218	29000	369.24	392.08
CZ050	217	32625	415.39	
CZ050	217	35000	445.63	
CZ050	217	35500	452.00	
CZ050	217	35625	453.59	441.65
AT065	218	17625	224.41	
AT065	218	19375	246.69	
AT065	218	17625	224.41	
AT065	218	17875	227.59	230.77
AZ065	217	19375	246.69	
AZ065	217	18500	235.55	
AZ065	217	18150	231.09	
AZ065	217	19450	247.65	240.24
CT065	217	17625	224.41	
CT065	217	24250	308.76	
CT065	217	23100	294.12	
CT065	217	24450	311.31	284.65
CZ065	217	24600	313.22	
CZ065	217	23800	303.03	
CZ065	217	22150	282.02	
CZ065	217	22750	289.66	296.98

5.6.2 Resultados de la prueba de Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto.

Tabla . Resultados de la resistencia a tensión en especímenes cilíndricos de 15x30cm.

Especimen	Edad (Días)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)
AT050	223	17800.00	25.182
AZ050	219	22100.00	31.265
AZ065	210	16850.00	23.838
CT065	208	22650.00	32.043
CZ065	207	25200.00	35.651

Tabla . Resultados de la resistencia a tensión en especímenes cilíndricos de 10x20cm.

Especimen	Edad (Días)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia Promedio (Kg/cm ²)
AT050	218	11000	35.01	
AT050	218	11325	36.05	
AT050	218	11400	36.29	
AT050	218	11675	37.16	36.13
AZ050	217	11750	37.40	
AZ050	217	10150	32.31	
AZ050	217	9625	30.64	
AZ050	217	11425	36.37	34.18
CT050	218	11050	35.17	
CT050	218	10950	34.85	
CT050	218	11111	35.37	
CT050	218	12275	39.07	36.12
CZ050	217	13000	41.38	
CZ050	217	10800	34.38	
CZ050	217	11800	37.56	
CZ050	217	11825	37.64	37.74
AT065	218	8100	25.78	
AT065	218	7600	24.19	
AT065	218	8300	26.42	
AT065	218	7225	23.00	24.85
AZ065	217	8650	27.53	
AZ065	217	7650	24.35	
AZ065	217	10950	34.85	
AZ065	217	8525	27.14	28.47
CT065	217	9100	28.97	
CT065	217	10325	32.87	
CT065	217	8550	27.22	
CT065	217	10575	33.66	30.68
CZ065	217	9575	30.48	
CZ065	217	11025	35.09	
CZ065	217	11675	37.16	
CZ065	217	11750	37.40	35.03

5.6.3 Resultados de la prueba de Resistencia a la Flexión del Concreto.

Tabla . Resultados del módulo de ruptura en especímenes prismáticos de 15x15x 60 cm.

ESPECIMEN		Carga (Kg)	MR (Kg/cm ²)	MR Promedio (Kg/cm ²)
AT050	1	2750.00	36.67	
	2	2877.50	38.37	
	3	3512.50	46.83	
	4	3525.00	47.00	42.22
AZ050	1	2250.00	30.00	
	2	2650.00	35.33	
	3	3162.50	42.17	
	X	3550.00	47.33	38.71
CT050	1	3500.00	46.67	
	2	3475.00	46.33	
	3	3912.50	52.17	
	4	3762.50	50.17	48.83
CZ050	1	4600.00	61.33	
	2	3562.50	47.50	
	3	3700.00	49.33	
	5	3450.00	46.00	51.04
AT065	1	2900.00	38.67	
	2	3350.00	44.67	41.67
AZ065	1	2212.50	29.50	
	2	2762.50	36.83	33.17
CT065	1	3162.50	42.17	
	2	3625.00	48.33	45.25
CZ065	1	3250.00	43.33	
	2	3650.00	48.67	46.00

5.6.4 Resultados de la prueba de Módulo de Elasticidad del Concreto.

Para los cilindros de 15x30 cm se obtuvo el Módulo de Elasticidad y relación de Poisson. Mientras que en los cilindros de 10x20 cm solo se lograron obtener mediciones de deformación longitudinal por lo que únicamente se determinó el módulo de elasticidad.

Módulo de elasticidad y relación de Poisson en Mezcla AT050 en cilindro de 15x30 cm.

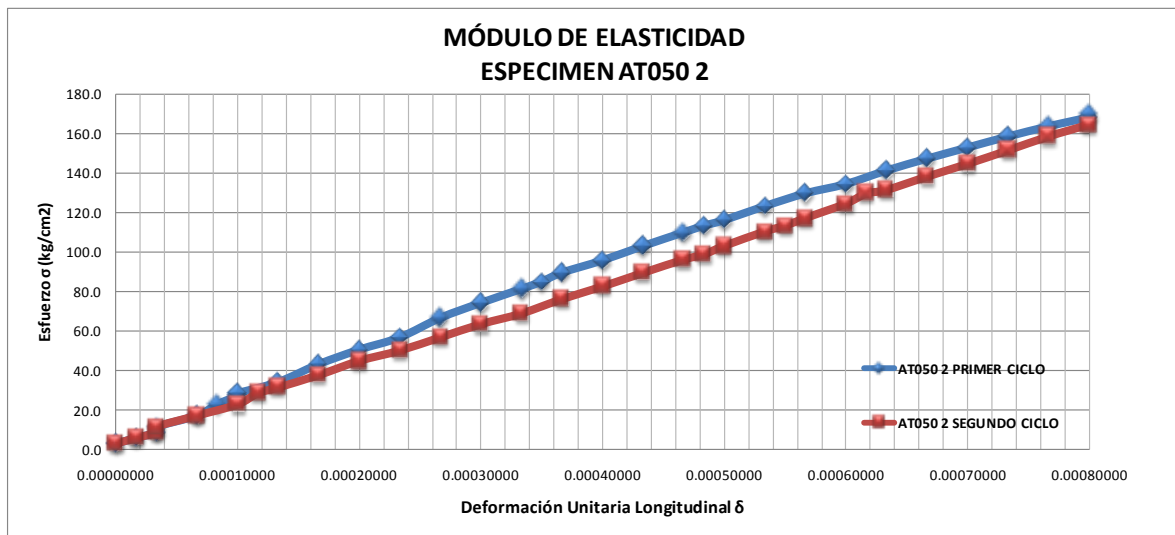


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla AT050.

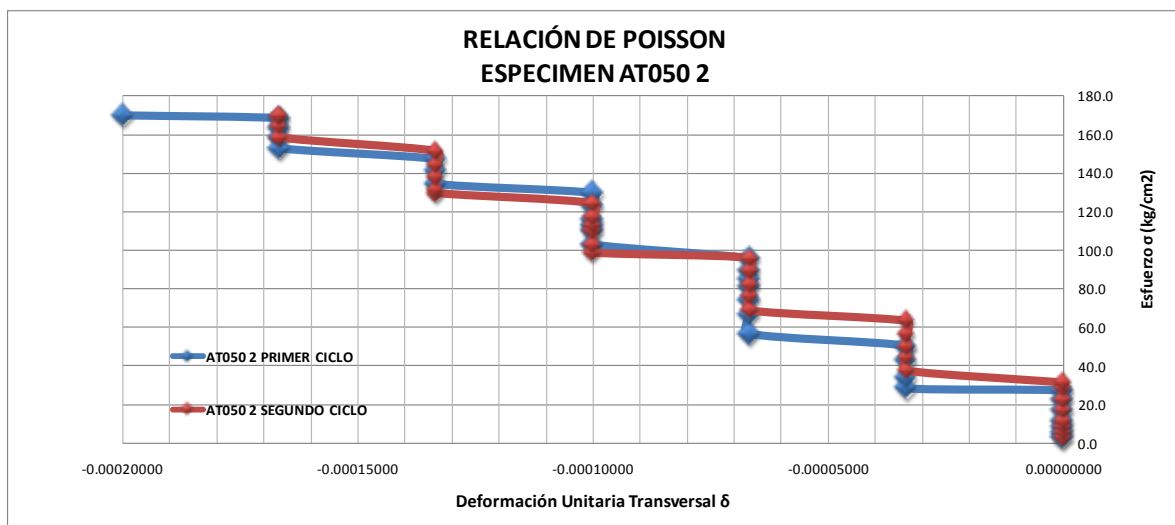


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación transversal obtenida en Mezcla AT050.

Módulo de elasticidad y relación de Poisson en Mezcla AZ050.

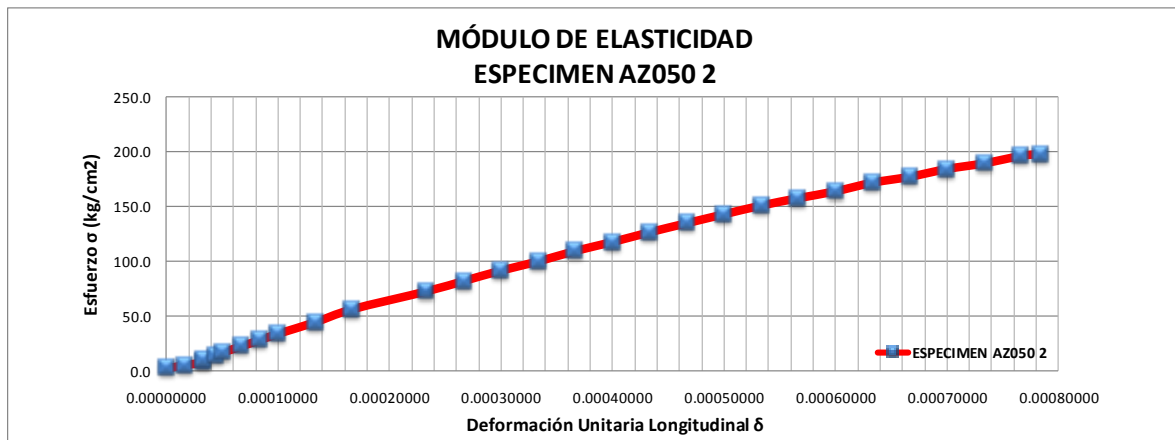


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla AZ050.

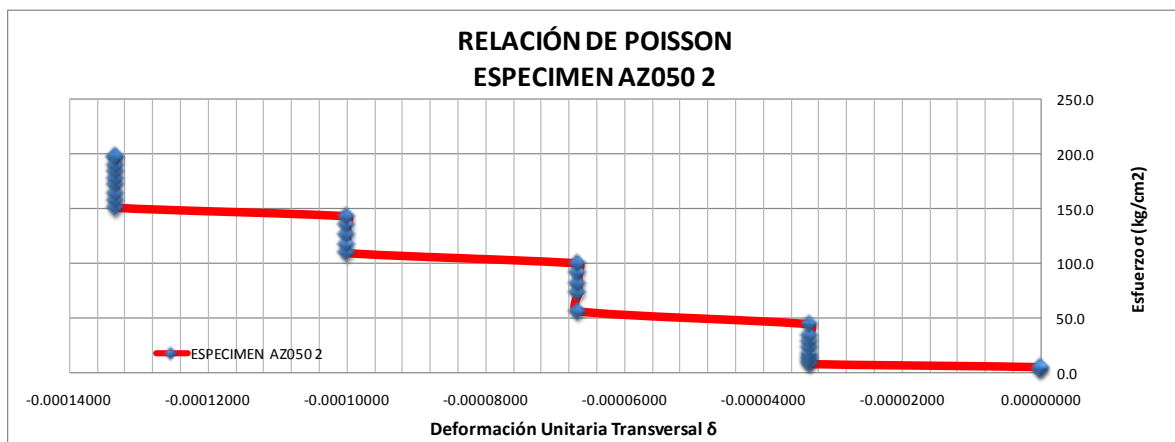


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación transversal obtenida en Mezcla AZ050.

Módulo de elasticidad y relación de Poisson en Mezcla CT050 en cilindros de 15x30 cm.

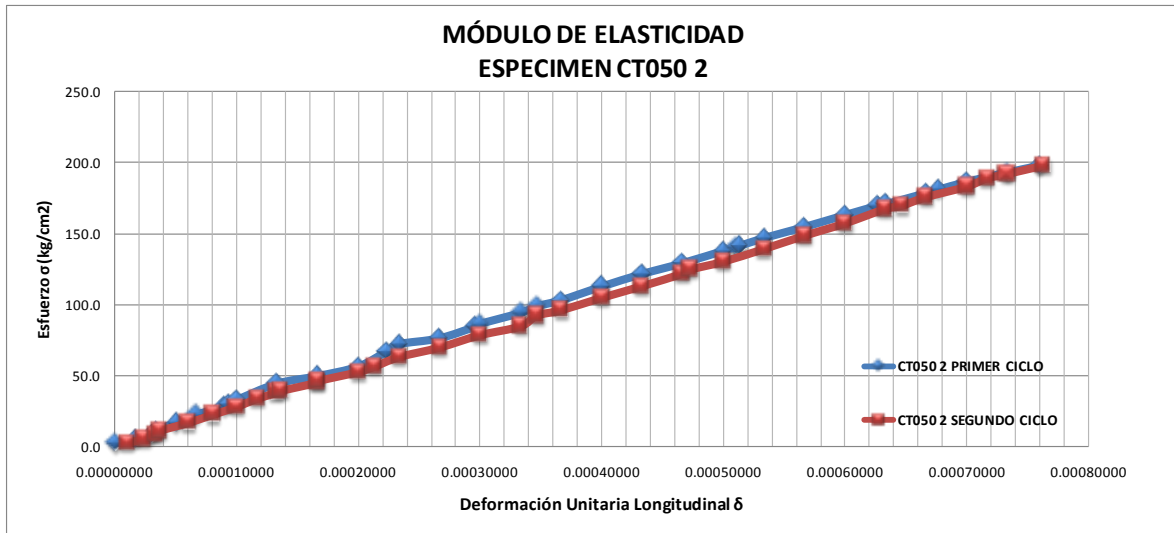


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla CT050.

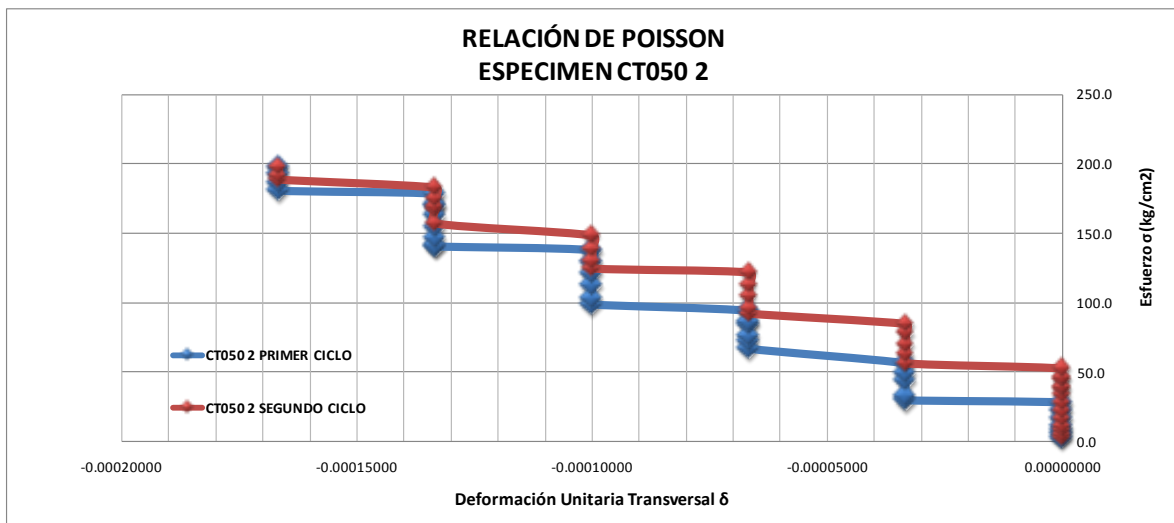


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación transversal obtenida en Mezcla CT050.

Módulo de elasticidad y relación de Poisson en Mezcla CZ050 en cilindro de 15 x30 cm.

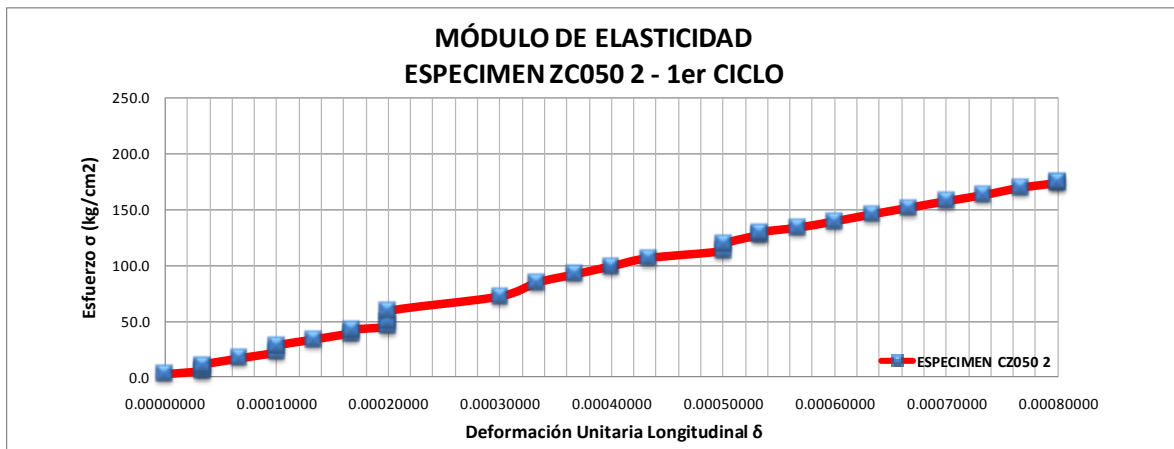


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla CZ050.

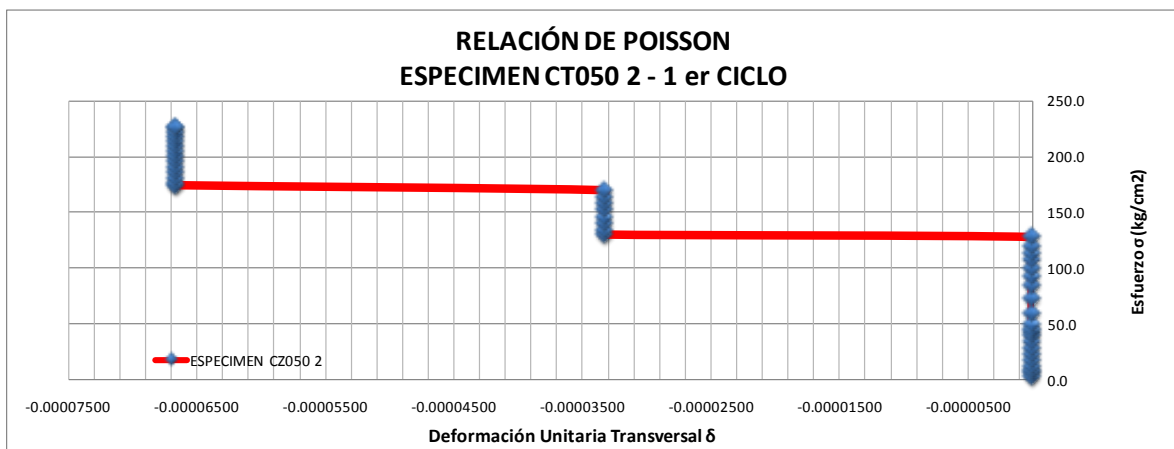


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación transversal obtenida en Mezcla CZ050.

Módulo de elasticidad y relación de Poisson en Mezcla AT065 en cilindro de 15 x30 cm.

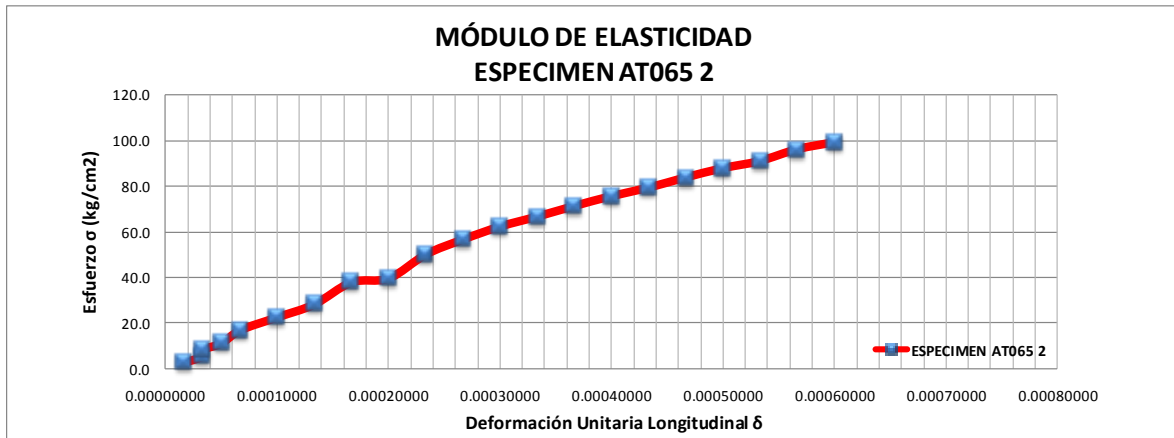


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla AT065.

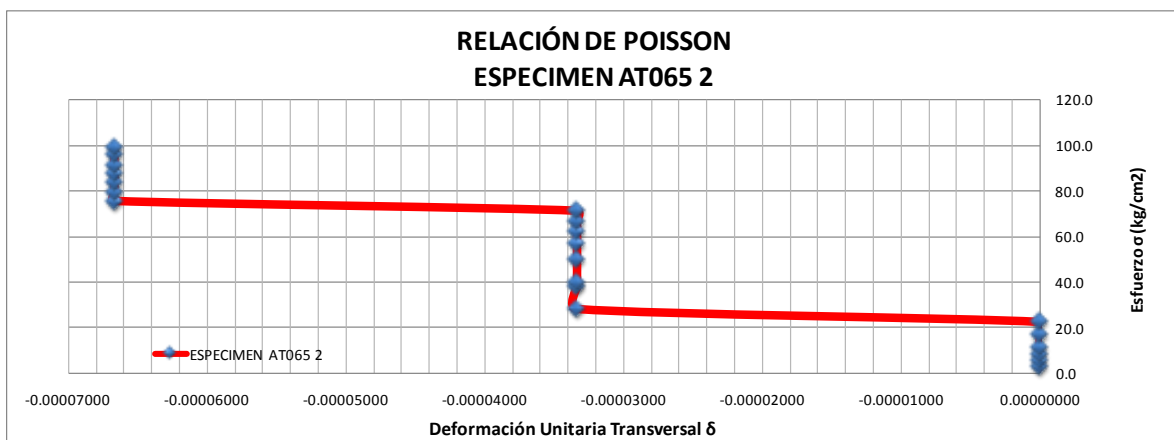


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación transversal obtenida en Mezcla AT065.

Módulo de elasticidad y relación de Poisson en Mezcla AZ065 en cilindro de 15 x30 cm.

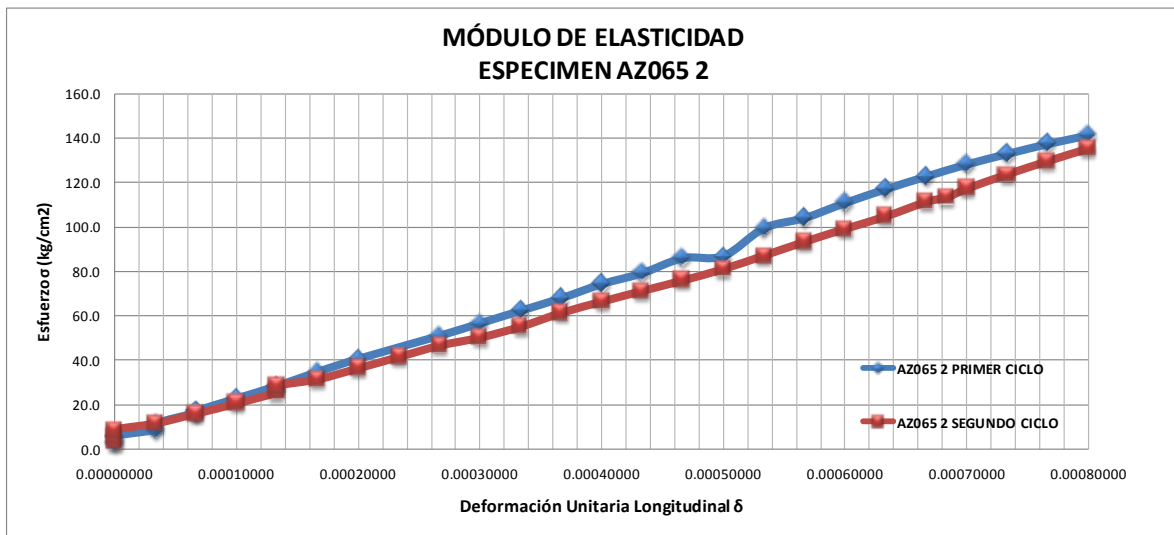


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla AZ065.

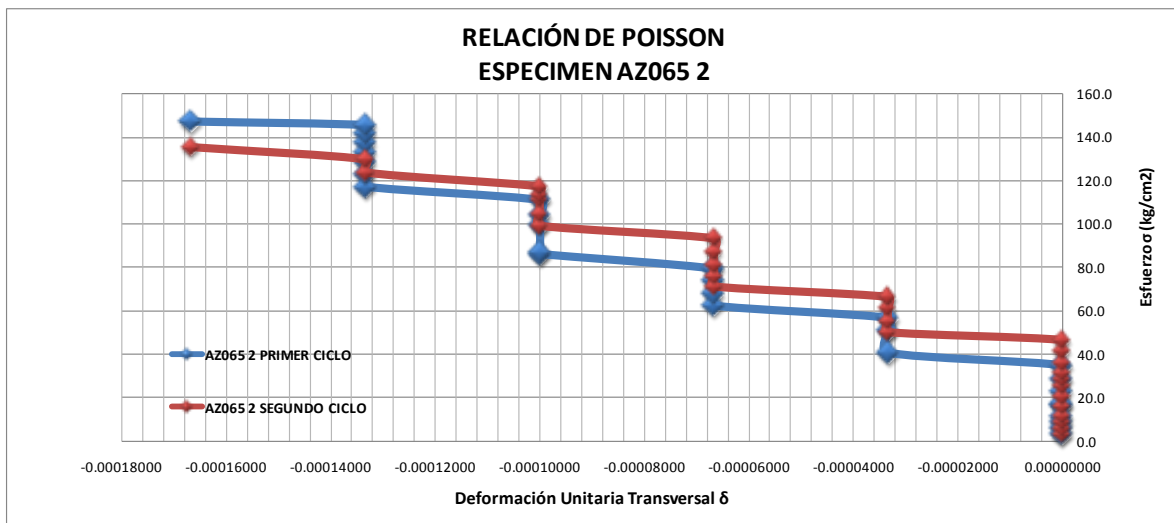


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación transversal obtenida en Mezcla AZ065.

Módulo de elasticidad y relación de Poisson en Mezcla CT065 en cilindro de 15 x30 cm.

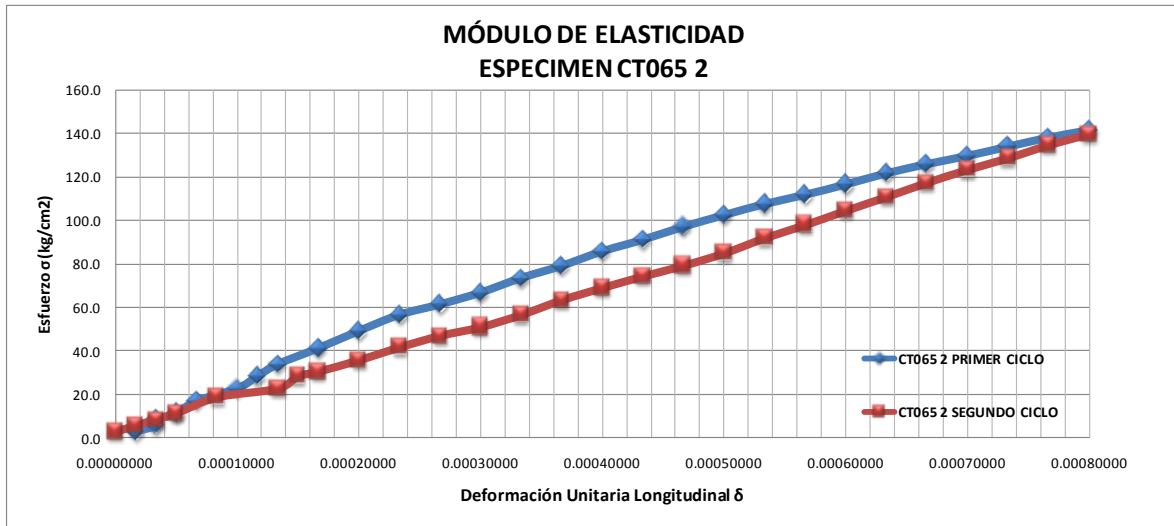


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla CT065.

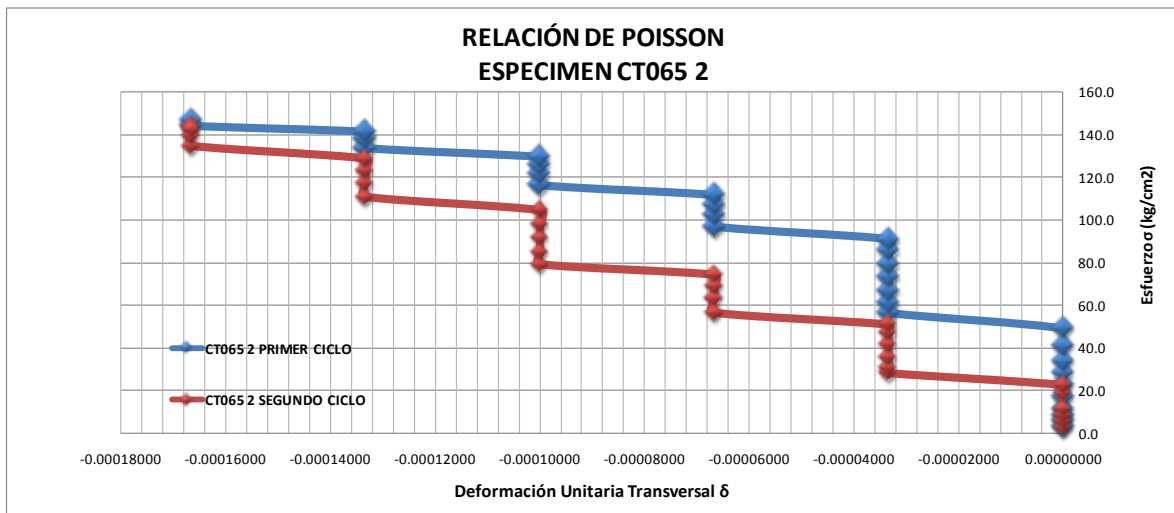


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación transversal obtenida en Mezcla CT065.

Módulo de elasticidad y relación de Poisson en Mezcla CZ065 en cilindro de 15 x30 cm.

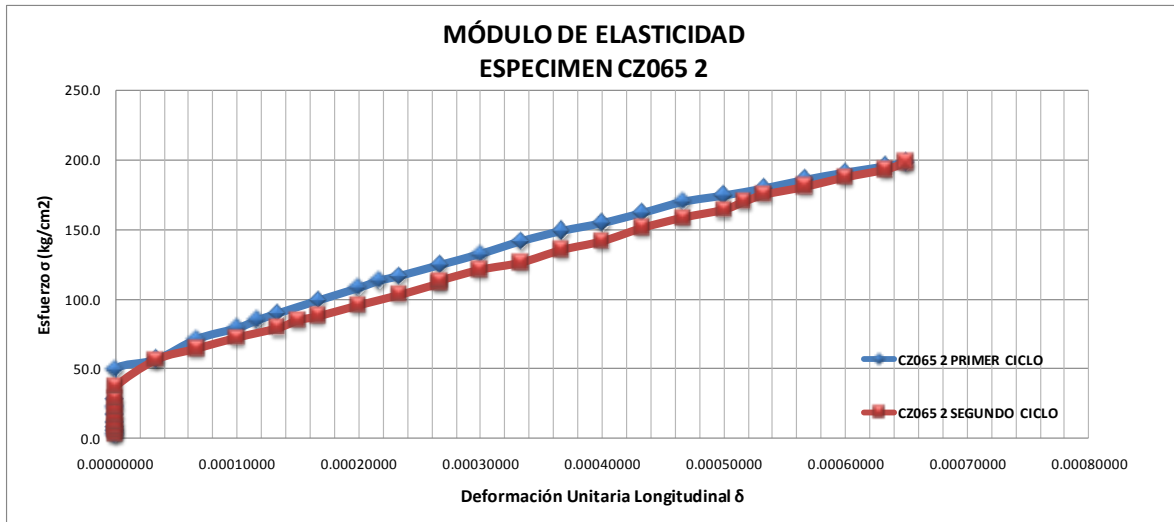


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla CZ065.

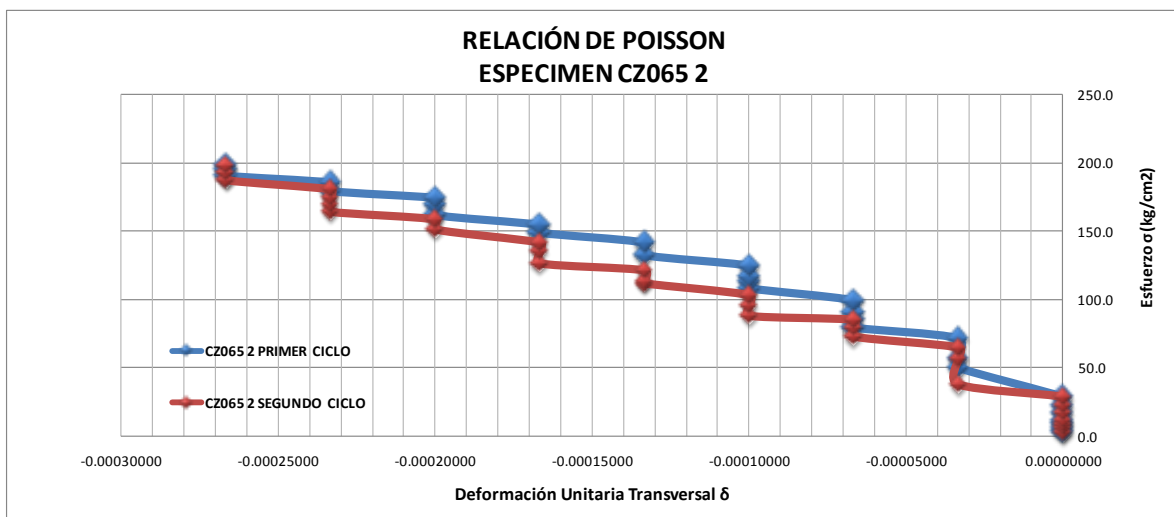


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación transversal obtenida en Mezcla CZ065.

Tabla . Módulos de Elasticidad promedio y Relación de Poisson en cilindros de 15 x 30 cm.

Especimen	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
AT050	212,737.80	0.19
AZ050	287,784.97	0.39
CT050	264,056.18	0.35
CZ050	241,562.16	0.07
AT065	230,765.96	0.09
AZ065	173,393.66	0.25
CT065	187,271.35	0.19
CZ065	264,970.54	0.44

Módulo de elasticidad en Mezcla AT050 en cilindros de 10 x20 cm.

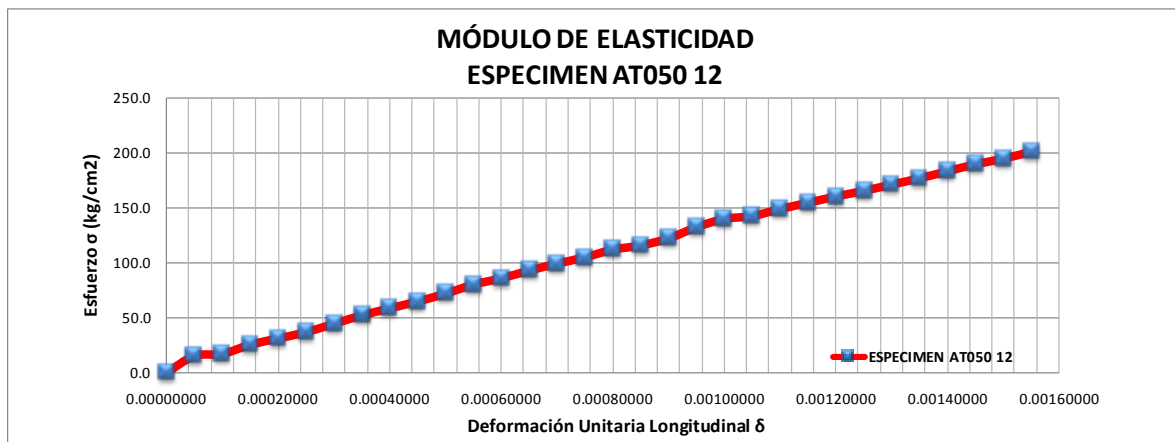


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla AT050 cilindro 12.

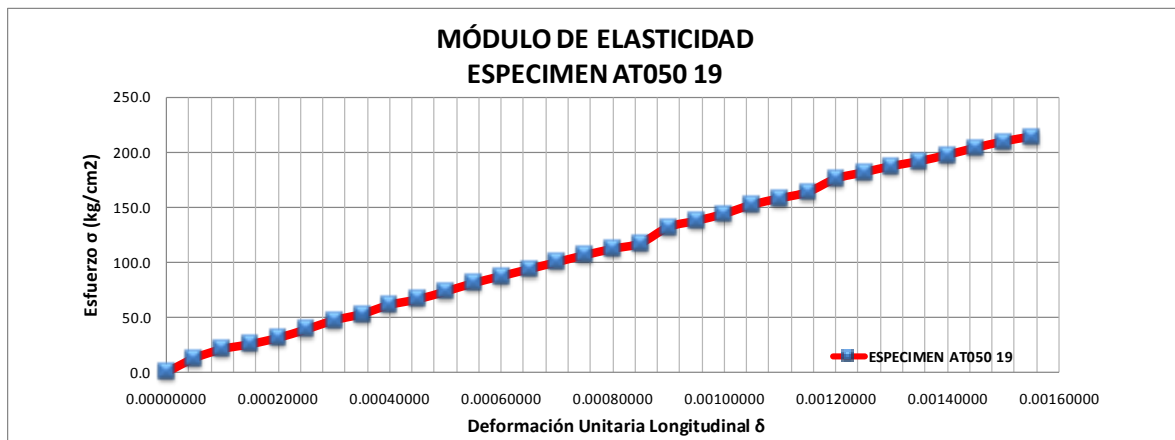


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla AT050 cilindro 19.

Módulo de elasticidad en Mezcla AZ050 en cilindro de 10 x20 cm.

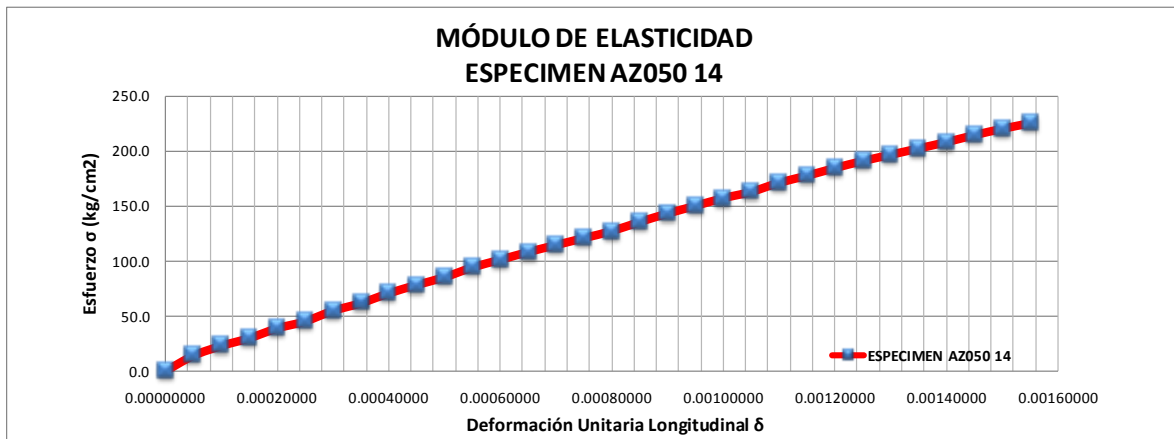


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla AZ050 cilindro 14.

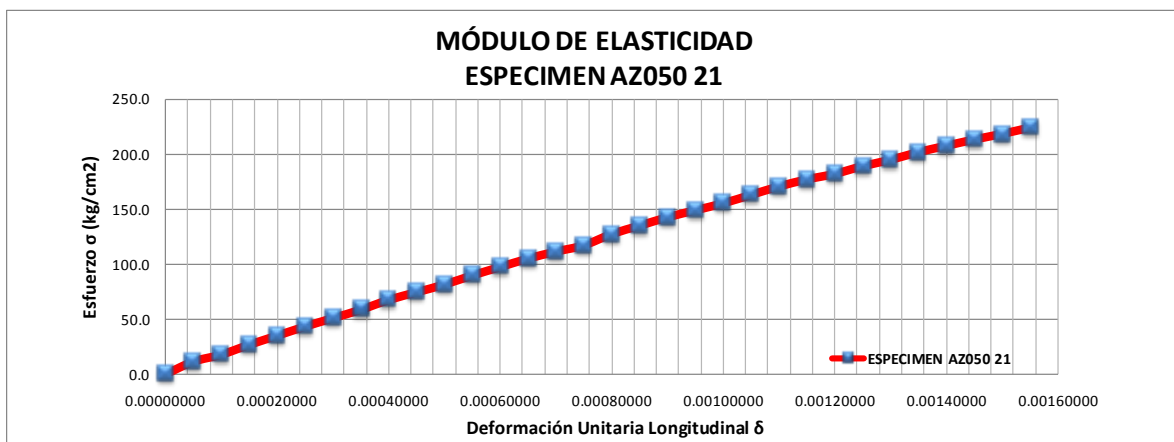


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla AZ050 cilindro 21.

Módulo de elasticidad en Mezcla CT050 en cilindro de 10 x20 cm.

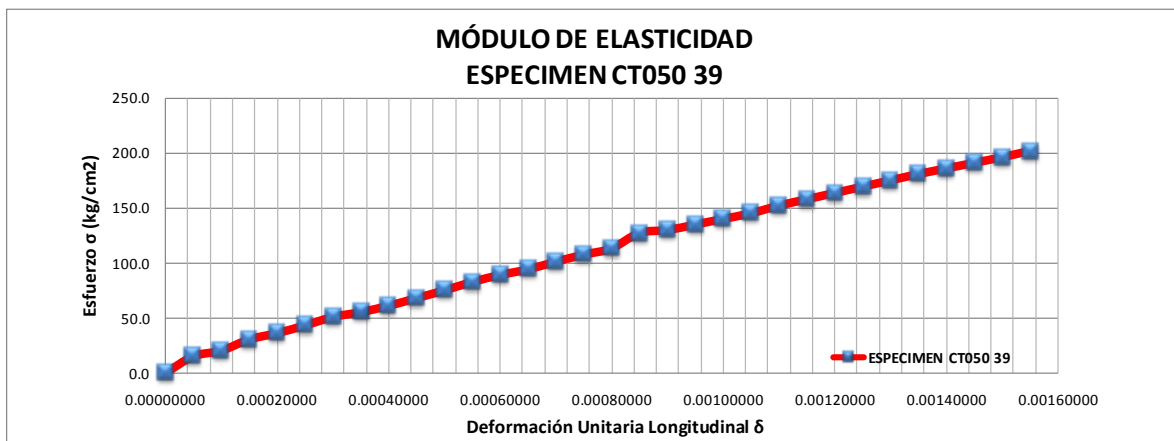


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla CT050 en cilindro 39.

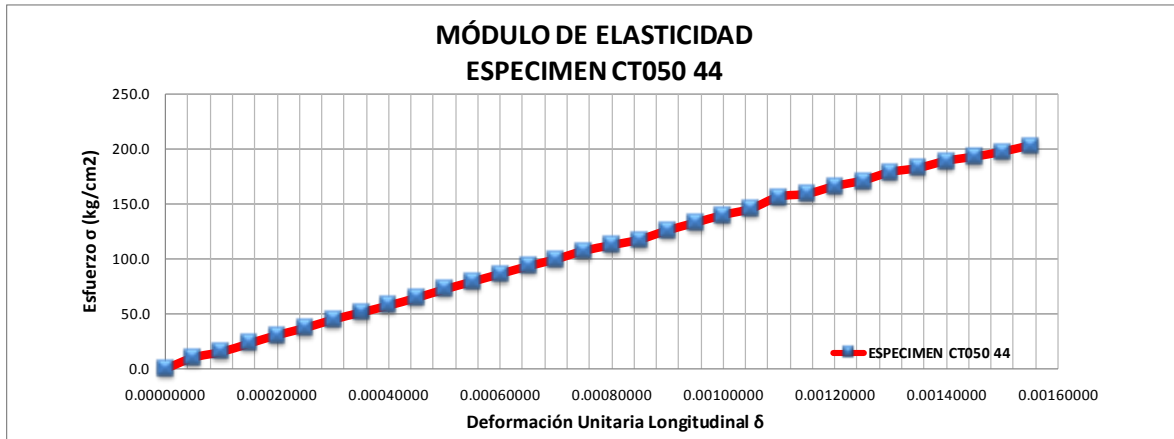


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla CT050 en cilindro 44.

Módulo de elasticidad en Mezcla CZ050 en cilindro de 10 x20 cm.

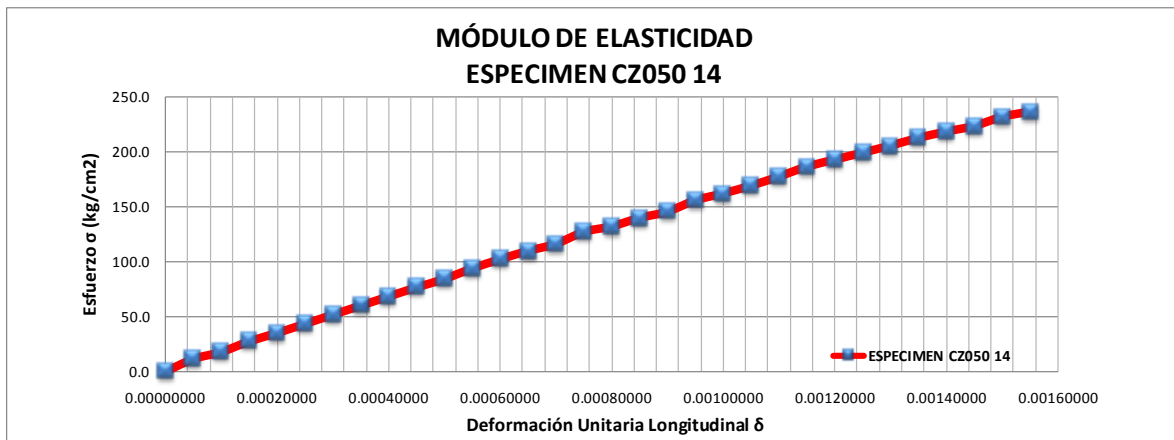


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla CZ050 en cilindro 14.

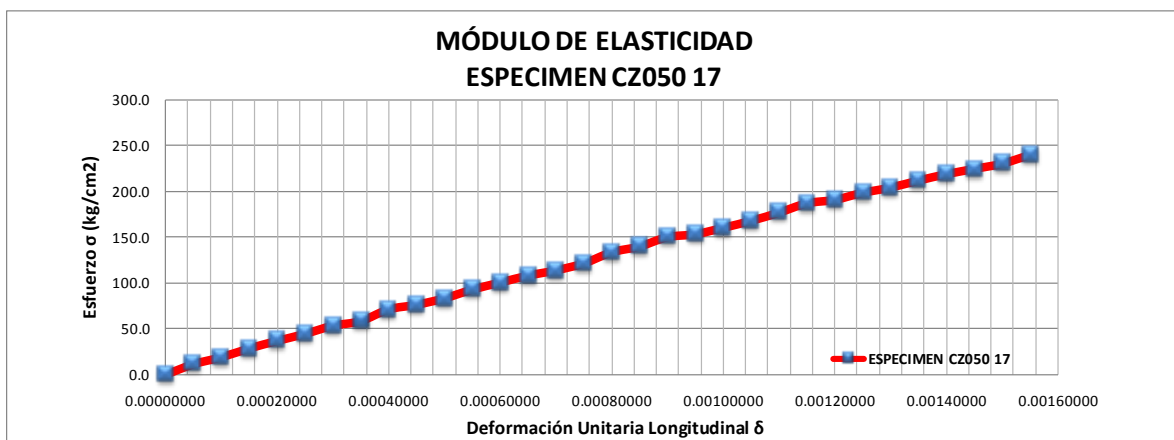


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla CZ050 en cilindro 17.

Módulo de elasticidad en Mezcla AT065 en cilindro de 10 x20 cm.

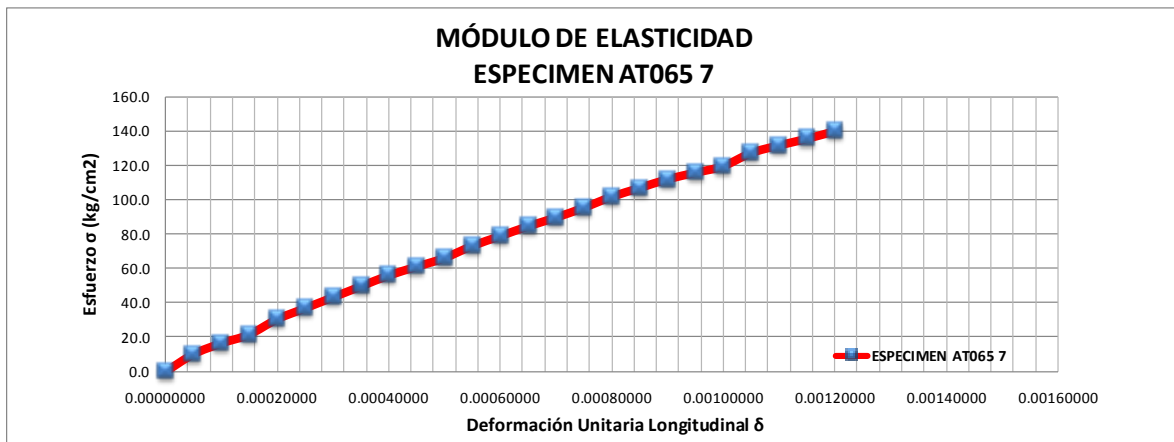


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla AT065 en cilindro 7.

Módulo de elasticidad en Mezcla AZ065 en cilindro de 10 x20 cm.

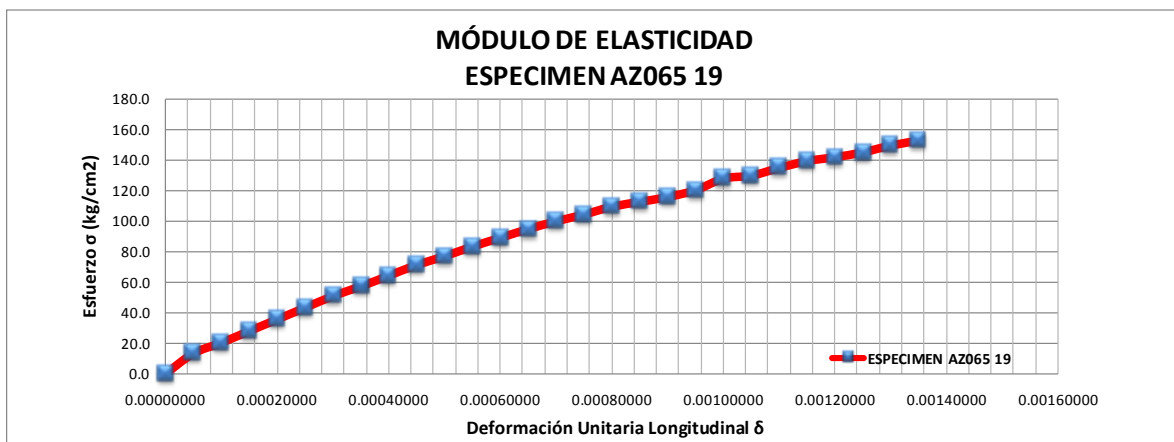


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla AZ065 en cilindro 19.

Módulo de elasticidad en Mezcla CT065 en cilindro de 10 x20 cm.

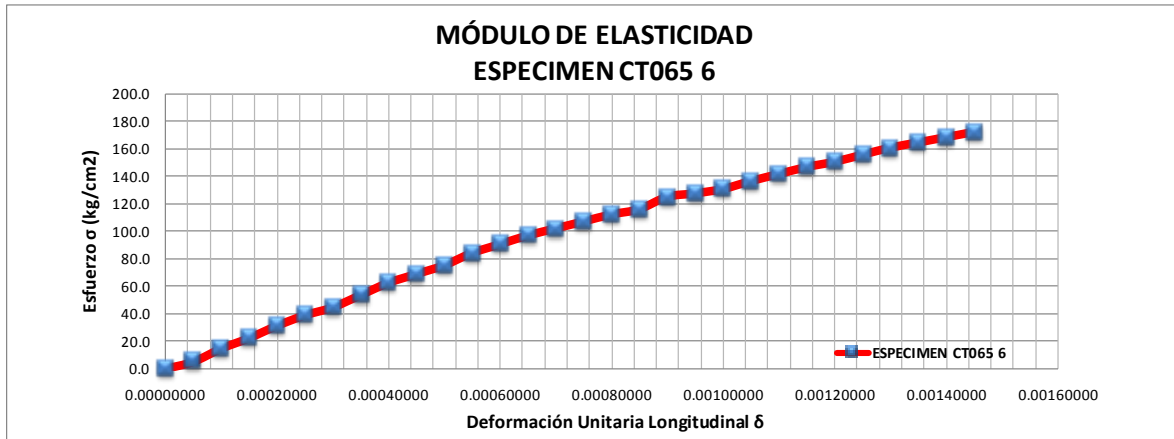


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla CT065 en cilindro 6.

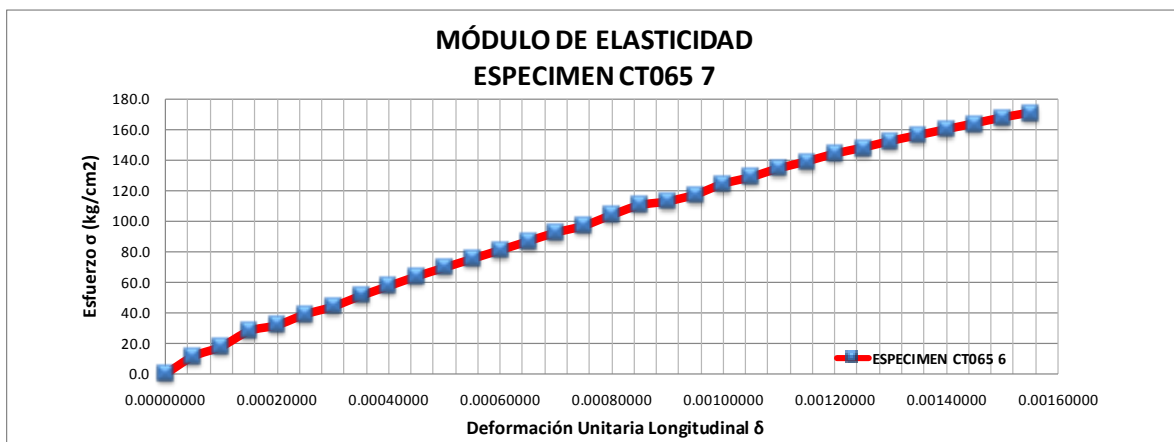


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla CT065 en cilindro 7.

Módulo de elasticidad en Mezcla CZ065 en cilindro de 10 x20 cm.

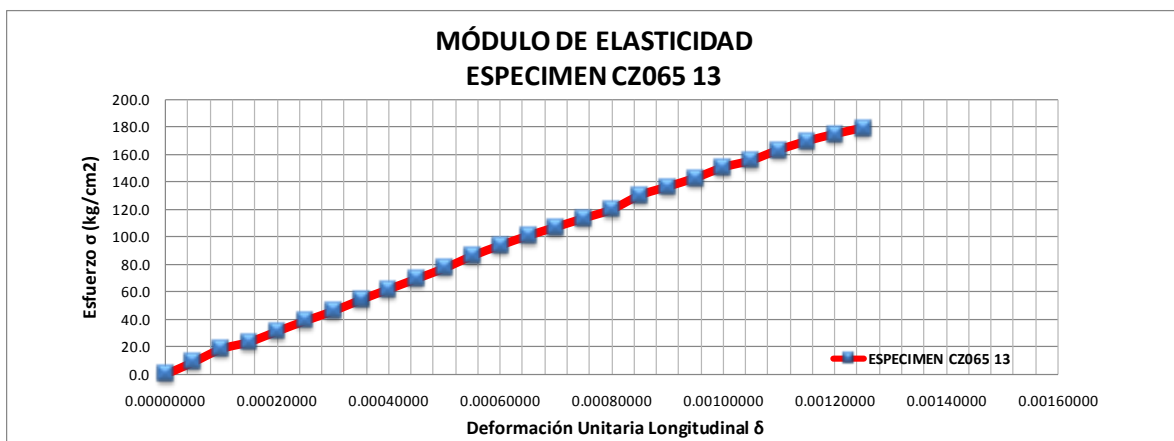


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla CZ065 en cilindro 13.

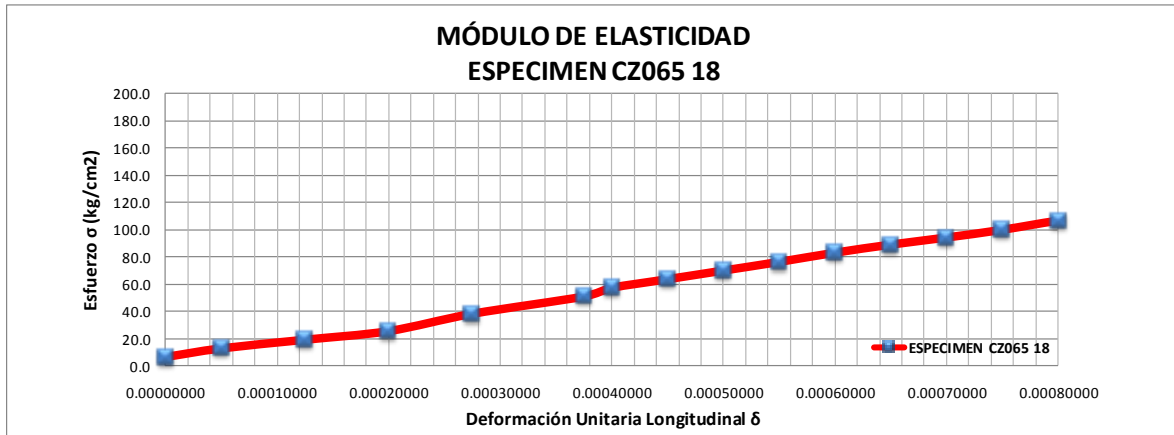


Figura . Gráfica esfuerzo- deformación longitudinal obtenida en Mezcla CZ065 en cilindro 13.

Tabla . Módulos de Elasticidad promedio en cilindros de 10 x 20 cm.

Especimen	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)
AT050	133,174.86
AZ050	150,530.21
CT050	136,800.59
CZ050	155,038.38
AT065	121,876.55
AZ065	134,916.90
CT065	137,059.12
CZ065	135,667.15

5.7 Resultados de las pruebas no Destructivas realizadas a los especímenes.

5.7.1 Resultados de la prueba de Resistividad Eléctrica.

Esta prueba se realizó a los cilindros de 10x20 cm a una edad de 147 días en promedio

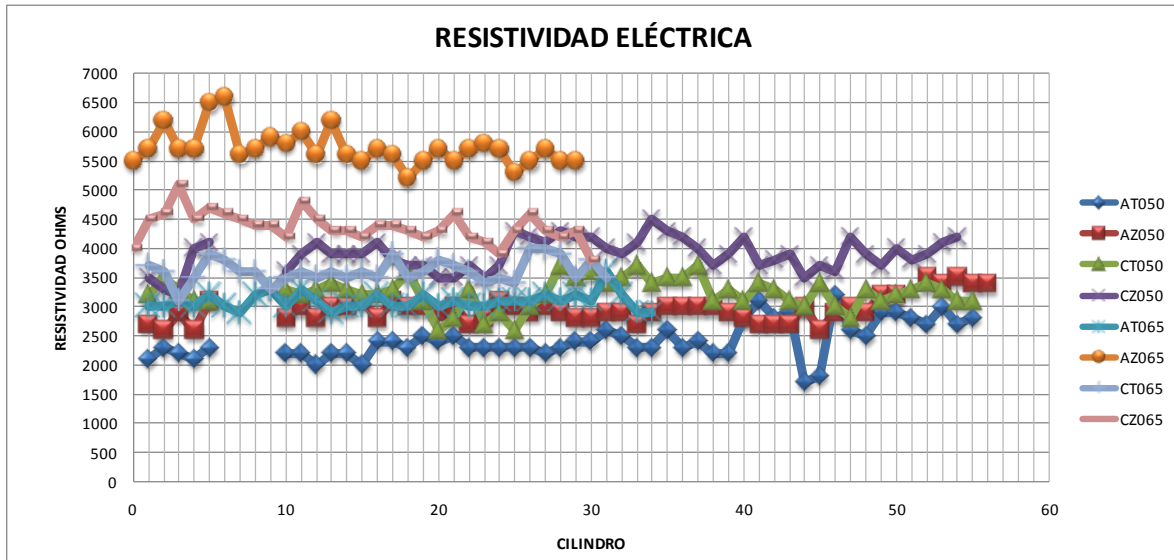


Figura . Gráfica de resistividad eléctrica en mezclas de concreto.

5.7.2 Resultados de la prueba para determinar la resistencia de especímenes de concreto mediante Rebote Esclerométrico.

Para poder garantizar la certeza en la obtención de los resultados de rebote esclerométrico fue necesario calibrar la precarga aplicada al cilindro, en el equipo dual Ponduit de rebote esclerométrico y velocidad de pulso, para poder así obtener los resultados de resistencia y poder comparar con el resultado obtenido de la prueba destructiva de compresión realizada al cilindro analizado.

Tabla . Calibración equipo Ponduit para obtener la precarga adecuada en cilindros de 10 x 20 cm.

Precarga Aplicada (Kgs)	N° de Rebote	Velocidad (m/s)	Resistencia (Kg/cm ²)	UMSNH Tiempo (μs)	Edad (Días)
2000	0.00	0.00	0.00	0.00	135
2500	0.00	0.00	0.00	0.00	135
3000	24.3	3861	289.7	51.80	135
3500	24.8	3683	185.1	54.30	135
4000	26.3	3634	243.7	55.04	135
4500	27	3891	339.8	51.40	135
5000	29.7	4040	468.5	49.50	135
5500	28.8	4000	432.2	50.00	135
6000	28.1	4016	436.1	49.80	135
6500	26.5	4008	415.9	49.90	135
7000	18.4	3944	392	50.71	135
7500	27.7	4000	420.7	50.00	135
8000	31	3846	433.8	52.00	135
8500	28.4	3921	378.9	51.01	135
9000	30.2	3891	408.6	51.40	135
9500	27.6	3906	358	51.20	135
10000	27.6	3897	365	51.32	135
10500	27.7	3944	382.6	50.71	135
11000	30.1	3780	407.9	52.91	135
11500	26.9	3846	311.2	52.00	135
12000	28.3	3780	328.5	52.91	135
12500	30.1	3766	412	53.11	135

El resultado de la prueba destructiva de compresión aplicada a un par de cilindros de 10x20 cm nos dieron en promedio **247.18 kg/cm²** es por ello que la precarga empleada para la prueba fue de **4,000 kg** aplicada de manera transversal al cilindro.

Esta prueba se realizó a los cilindros de 10x20 cm a una edad de 160 días en promedio

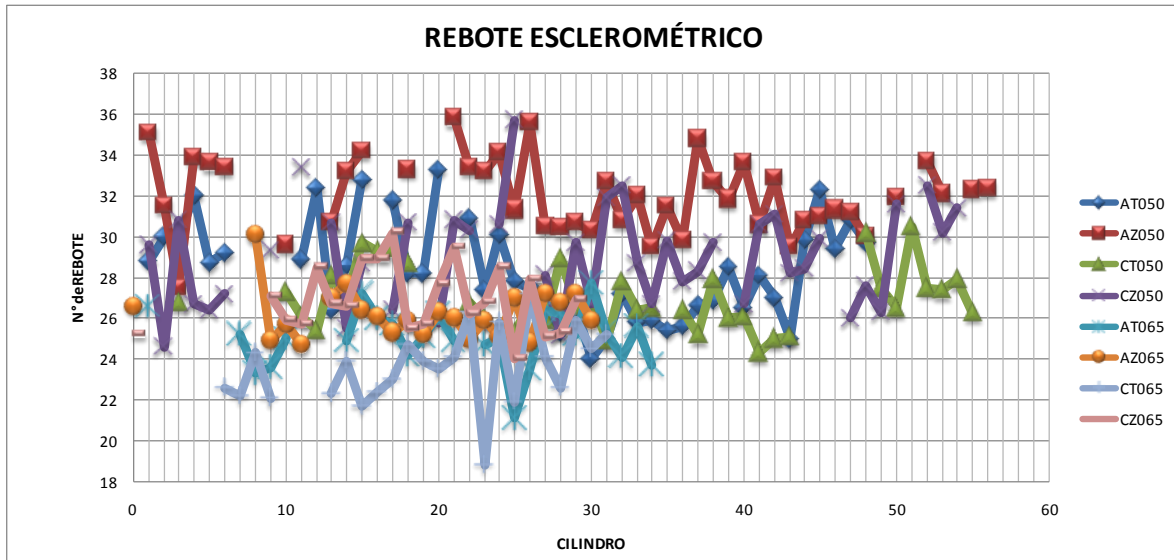


Figura . Gráfica de n° de rebote esclerométrico en mezclas de concreto.

5.7.3 Resultados de la prueba para determinar la velocidad de pulso a través del concreto.

Para esta prueba al igual que la anterior fue necesario calibrar el equipo en su factor de experiencia el cual varía de 0.10 a 1.99 para poder garantizar la certeza en la obtención de los resultados de velocidad de pulso ultrasónico, en el equipo dual Ponduit de rebote esclerométrico y velocidad de pulso, para poder así obtener los resultados de resistencia y poder comparar con el resultado obtenido de la prueba destructiva de compresión realizada al cilindro analizado.

Tabla . Calibración equipo Ponduit para obtener el factor de experiencia adecuado en cilindros de 10 x 20 cm.

Factor de Experiencia	Velocidad (m/s)	Resistencia (Kg/cm ²)	UMSNH Tiempo (μs)	Edad (Días)
0.10	4166	26.50	48.01	141
0.20	4166	53.00	48.01	141
0.30	4175	80.70	47.90	141
0.40	4175	107.60	47.90	141
0.50	4166	132.50	48.01	141

0.60	4169	160.10	47.97	141
0.70	4166	185.40	48.01	141
0.80	4166	211.90	48.01	141
0.90	4166	238.40	48.01	141
1.00	4166	264.90	48.01	141
1.10	4166	291.40	48.01	141
1.20	4166	317.90	48.01	141
1.30	4166	344.40	48.01	141
1.40	4166	370.90	48.01	141
1.50	4166	397.40	48.01	141
1.60	4166	423.90	48.01	141
1.70	4166	450.40	48.01	141
1.80	4166	476.90	48.01	141
1.90	4166	503.40	48.01	141
1.99	4166	527.4	48.01	141

Esta prueba se realizó a los cilindros de 10x20 cm a una edad de 160 días en promedio

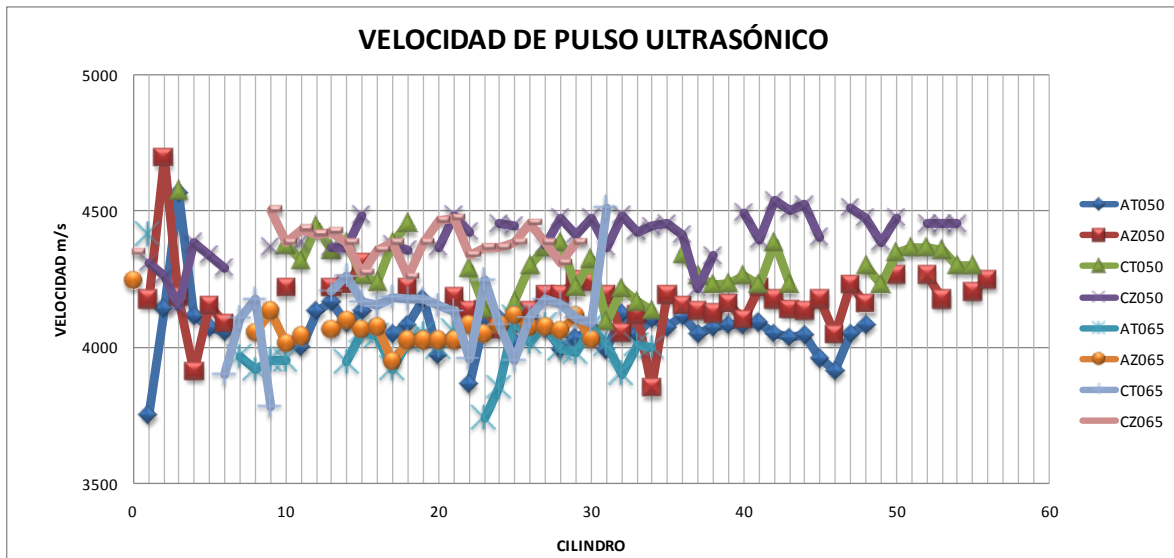


Figura . Gráfica de velocidad de pulso ultrasónico en mezclas de concreto.

5.7.4 Resultados de la prueba para determinar las frecuencias de Resonancia de especímenes de concreto.

En esta prueba se determinó la frecuencia de resonancia fundamental longitudinal a los cilindros de 10x20 cm a una edad de 160 días en promedio.

Se determinaron las frecuencias de resonancia fundamental longitudinal, a flexión y torsión en vigas prismáticas de 15x15x60 cm.

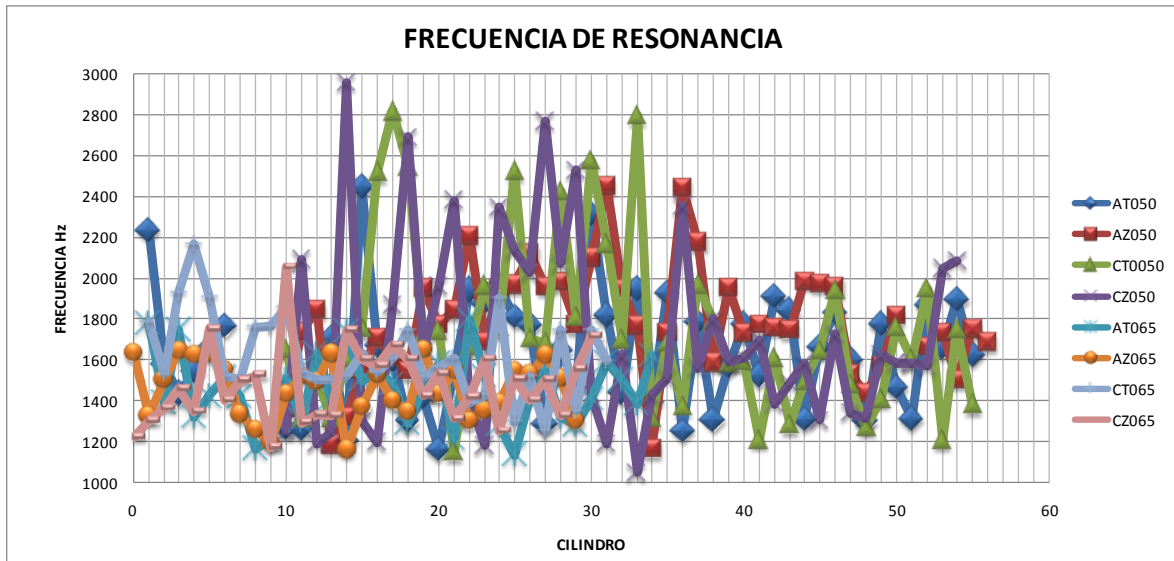


Figura . Gráfica de frecuencia de resonancia longitudinal aplicada a cilindros de 10x20 cm.

La determinación de las frecuencias de resonancia longitudinal, a flexión y torsional en vigas prismáticas de 15x15x60 cm, se realizó a la edad de 200 días en promedio.

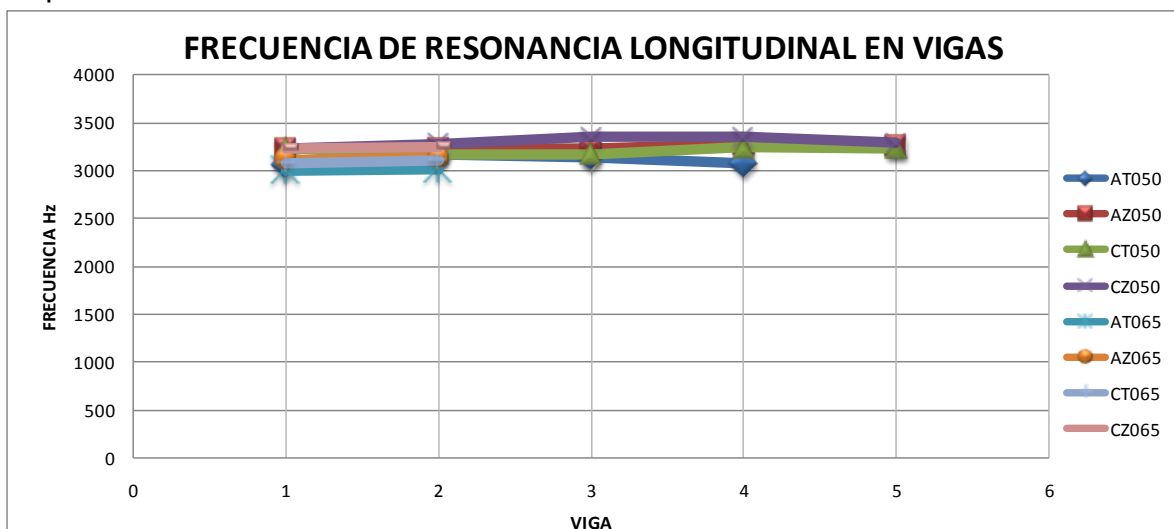


Figura . Gráfica de frecuencia de resonancia longitudinal aplicada a vigas prismáticas de 15x15x60 cm.

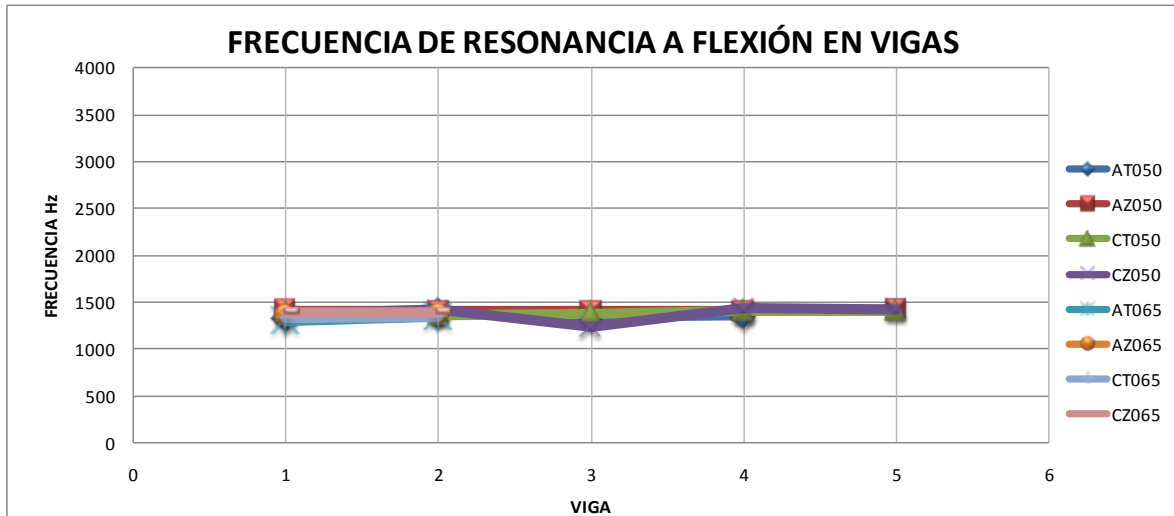


Figura . Gráfica de frecuencia de resonancia a flexión aplicada a vigas prismáticas de 15x15x60 cm.

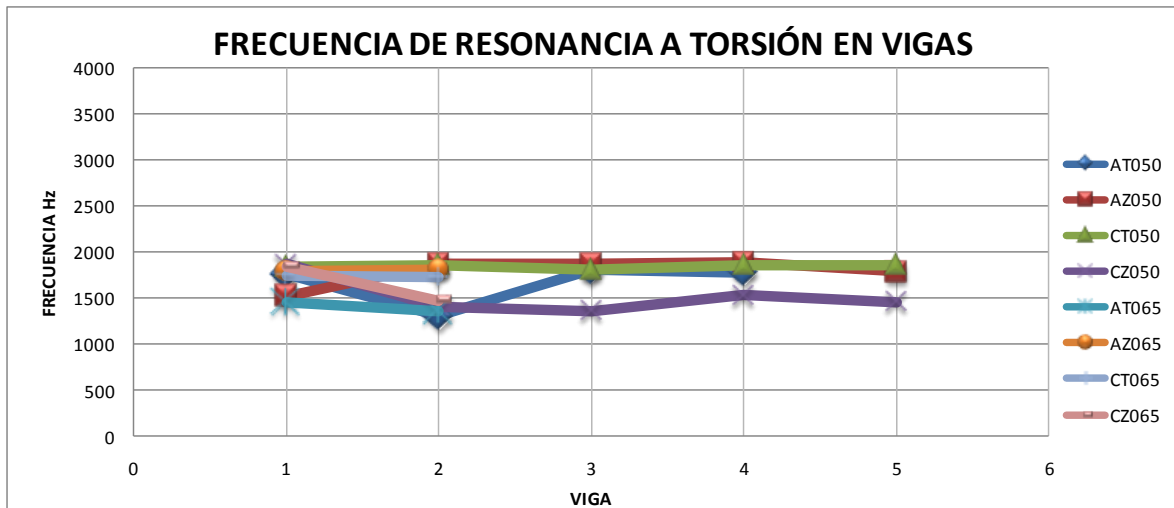


Figura . Gráfica de frecuencia de resonancia a torsión aplicada a vigas prismáticas de 15x15x60 cm.

5.7.5 Resultados de la prueba de Infrarrojo.

En esta prueba se realizaron fotografías termográficas o de infrarrojo a especímenes cilíndricos durante la prueba para determinar el módulo elástico y la resistencia a compresión. Se tomaron imágenes a cada 5 toneladas de carga empleada al espécimen hasta llegar a la falla.

A continuación se presenta una serie de imágenes de acuerdo con la carga aplicada al espécimen desde que esta descargado hasta que llega a la falla o ruptura.

5.8 Resultados de las pruebas de Durabilidad.

5.8.1 Resultados del Método de Prueba Estándar para la Determinación del Coeficiente de Capilaridad Faguerlund.

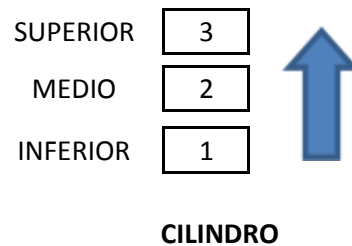


Figura . Diagrama de corte de especímenes para prueba de Capilaridad Faguerlund.

Los coeficientes de Capilaridad de faguerlund los obtendremos con la ayuda de una hoja de cálculo y mediante tablas.

A continuación, en las tablas siguientes se presentan los pesos obtenidos durante la prueba :

Tabla . Registro de pesos de mezclas relación A/C 0.50 en un tiempo de 24 hrs.

ESPECIMEN		Espesor (cm)	0 MIN	5 MIN	10 MIN	15 MIN	30 MIN	1 HR	2 HR	3 HR	4 HR	24 HR
AT050 10 13/07/10	1	5.30	897.28	900.03	901.27	902	903.44	906.08	910.05	913.14	914.78	943.94
	2	5.25	862.88	865.19	866.14	866.17	867.93	870.08	873.34	875.74	877.15	905.2
	3	5.30	845.11	847.77	848.86	849.6	850.96	853.45	857.26	860.03	861.62	892.47
AZ050 20 10/07/10	4	5.20	885.67	888.65	889.64	890.4	891.67	893.9	897.12	899.18	900.34	922.13
	5	5.20	858.56	860.85	861.7	862.27	863.35	865.27	868.23	870.53	871.86	895.24
	6	5.20	826.7	829.25	830.22	830.91	832.24	834.64	838.19	840.95	842.51	870.93
CT050 35 06/07/10	7	5.20	861.86	864.38	865.35	866.02	867.5	869.72	873.09	875.7	877.17	904.22
	8	5.30	868.99	872.01	873.02	873.8	875.3	877.93	881.8	884.81	886.09	912.64
	9	5.30	871.68	874.31	875.22	875.89	877.17	879.35	882.53	884.85	886.2	910.88
CZ050 23 05/07/10	10	5.30	893.24	895.49	896.25	896.83	897.98	899.82	902.54	904.48	905.67	924.77
	11	5.25	869.24	871.89	872.75	873.37	874.45	876.39	879.05	880.99	882.1	900.16
	12	5.30	849.56	852.08	852.98	853.62	854.82	856.89	859.85	862.07	863.34	884.51

Tabla . Registro de pesos de mezclas relación A/C 0.50 en un tiempo de 24 hrs a 6 días.

ESPECIMEN		2 DIAS	3 DIAS	4 DIAS	5 DIAS	6 DIAS	7 DIAS	12 DIAS	13 DIAS	25 DIAS	26 DIAS
AT050 10 13/07/10	1	955.39	963.42	967.31	969.94	970.31	971.08	972.63	972.71	973.3	973.33
	2	917.13	926.36	931.77	936.99	938.72	940.78	945.22	945.32	947.44	947.43
	3	905.28	914.98	920.43	925.44	927	928.6	931.43	931.51	932.52	932.45
AZ050 20 10/07/10	4	931.01	937.46	941.1	944.58	945.59	946.96	950.21	950.37	953.01	953.06
	5	903.91	910.18	913.96	917.86	919.27	921.01	925.56	925.9	930.47	930.86
	6	882.57	891.31	896.14	900.67	902.04	903.61	906.4	906.47	907.78	907.78
CT050 35 06/07/10	7	915.35	923.59	928.28	932.23	932.98	933.98	935.72	935.76	936.71	936.72
	8	922.97	930.73	934.98	938.98	939.8	940.91	942.69	942.76	943.76	943.71
	9	920.63	927.85	931.92	935.62	936.78	938.25	941.33	941.42	942.75	942.79
CZ050 23 05/07/10	10	931.82	936.75	939.61	942.42	943.33	944.49	947.22	947.47	950.44	950.58
	11	906.58	911.24	914.06	917.16	918.26	919.8	923.84	924.34	928.65	929.08
	12	891.45	897.34	900.6	903.88	905.2	906.93	911.06	911.53	915.83	916

Tabla . Registro de pesos de mezclas relación A/C 0.65 en un tiempo de 24 hrs.

ESPECIMEN		Espesor (cm)	0 MIN	5 MIN	10 MIN	15 MIN	30 MIN	1 HR	2 HR	3 HR	4 HR	24 HR
AT065 5 14/07/10	13	4.90	797.8	801.59	802.95	804.08	806.17	810	815.34	819.29	821.45	856.78
	14	4.90	799.24	802.85	804.18	805.21	807.32	811.37	816.84	820.75	822.97	856.34
	15	4.90	792.51	798.48	800.75	802.43	805.72	811.5	818.86	824.03	826.82	864.22
AZ065 5 14/07/10	16	5.20	893.93	897.07	898.12	898.89	900.57	903.6	907.74	910.81	912.39	939.52
	17	5.30	871.87	875	876.07	876.9	878.57	881.7	886.02	889.6	891.56	923.78
	18	5.25	826.98	830.08	831.14	831.93	833.52	836.45	840.57	843.96	845.86	876.96
CT065 10 21/07/10	19	5.00	830.28	833.94	835.18	836.1	837.96	841.34	845.93	849.28	851.1	881.81
	20	4.80	772.51	775.46	776.42	777.19	778.75	781.65	785.85	789.01	790.84	821.74
	21	5.00	782.88	785.94	787.02	787.85	789.47	792.6	797.01	800.33	802.26	830.08
CZ065 4 22/07/10	22	5.20	878.29	881.1	882.02	882.68	884.01	886.46	889.84	892.38	893.8	917.08
	23	5.30	857.88	860.68	861.55	862.28	863.51	865.91	869.12	871.39	872.74	895.16
	24	5.20	815.02	817.98	818.91	819.66	820.99	823.54	827.17	829.97	831.56	858.58

Tabla . Registro de pesos de mezclas relación A/C 0.65 en un tiempo de 24 hrs a 26 días.

ESPECIMEN		2 DIAS	3 DIAS	4 DIAS	5 DIAS	6 DIAS	7 DIAS	12 DIAS	13 DIAS	25 DIAS	26 DIAS
AT065 5 14/07/10	13	868.65	873.9	874.93	875.85	876.01	876.38	877.14	877.16	877.75	877.81
	14	867.83	873.72	875.14	876.17	876.2	876.64	877.38	877.44	878.17	878.28
	15	866.82	867.59	867.98	868.51	868.55	869.01	869.65	869.88	870.22	870.22
AZ065 5 14/07/10	16	948.21	953.8	956.73	959.44	960.21	961.25	963.69	963.71	964.63	964.59
	17	934.32	941.22	944.61	946.81	946.93	947.58	948.62	948.67	949.68	949.49
	18	888.02	895.71	899.86	903.79	904.81	906.36	909.6	909.81	911.27	911.15
CT065 10 21/07/10	19	892.08	898.53	900.8	902.25	902.35	902.83	903.82	903.82	904.53	904.64
	20	832.54	839.93	843.61	846.62	846.95	847.68	849.05	849.17	850.17	850
	21	848.1	856.19	860.25	863.5	864.04	864.91	866.48	866.61	867.69	867.57
CZ065 4 22/07/10	22	924.85	930.31	933.31	936.41	937.14	938.34	941.28	941.45	943.39	943.48
	23	902.77	908.12	911.19	914.49	915.49	916.95	921.03	921.49	926.95	927.2
	24	867.86	874.13	877.52	880.94	881.92	885.32	887.02	887.28	890.96	891.03

Para poder obtener la gráfica que nos relaciona la diferencia entre peso seco y el peso durante la prueba dividido entre el área de cada especimen nos apoyaremos de las tablas siguientes:

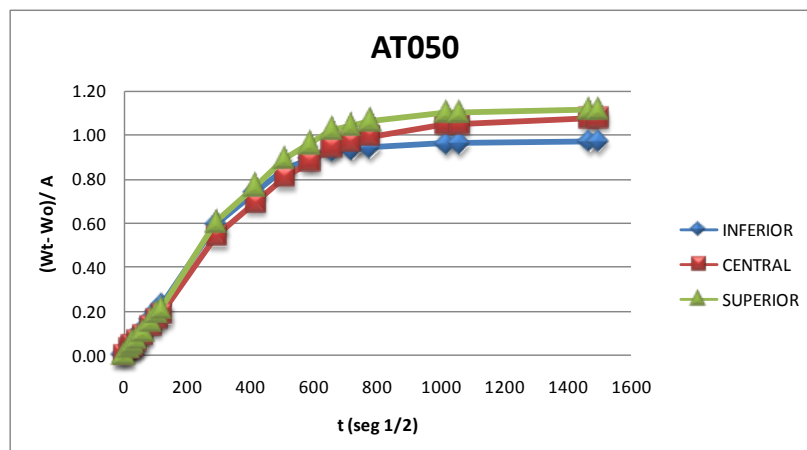
Tabla . Relación $(W_t - W_o)/A$ respecto a la raíz cuadrada del tiempo (hasta 120 seg $^{1/2}$).

ESPECIMEN	t (seg $^{1/2}$)	0	17.3205	24.4949	30	42.4264	60	84.8528	103.923	120
AT050 10 13/07 /10	1	0.00	0.04	0.05	0.06	0.08	0.11	0.16	0.20	0.22
	2	0.00	0.03	0.04	0.04	0.06	0.09	0.13	0.16	0.18
	3	0.00	0.03	0.05	0.06	0.07	0.11	0.15	0.19	0.21
AZ050 20 10/07 /10	4	0.00	0.04	0.05	0.06	0.08	0.10	0.15	0.17	0.19
	5	0.00	0.03	0.04	0.05	0.06	0.09	0.12	0.15	0.17
	6	0.00	0.03	0.04	0.05	0.07	0.10	0.15	0.18	0.20
CT050 35 06/07 /10	7	0.00	0.03	0.04	0.05	0.07	0.10	0.14	0.18	0.19
	8	0.00	0.04	0.05	0.06	0.08	0.11	0.16	0.20	0.22
	9	0.00	0.03	0.05	0.05	0.07	0.10	0.14	0.17	0.18
CZ050 23 05/07 /10	10	0.00	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.12	0.14	0.16
	11	0.00	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.12	0.15	0.16
	12	0.00	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.13	0.16	0.18
AT065 5 14/07 /10	13	0.00	0.05	0.07	0.08	0.11	0.16	0.22	0.27	0.30
	14	0.00	0.05	0.06	0.08	0.10	0.15	0.22	0.27	0.30
	15	0.00	0.08	0.10	0.13	0.17	0.24	0.34	0.40	0.44
AZ065 5 14/07 /10	16	0.00	0.04	0.05	0.06	0.08	0.12	0.18	0.21	0.24
	17	0.00	0.04	0.05	0.06	0.09	0.13	0.18	0.23	0.25
	18	0.00	0.04	0.05	0.06	0.08	0.12	0.17	0.22	0.24
CT065 10 21/07 /10	19	0.00	0.05	0.06	0.07	0.10	0.14	0.20	0.24	0.27
	20	0.00	0.04	0.05	0.06	0.08	0.12	0.17	0.21	0.23
	21	0.00	0.04	0.05	0.06	0.08	0.12	0.18	0.22	0.25
CZ065 4 22/07 /10	22	0.00	0.04	0.05	0.06	0.07	0.10	0.15	0.18	0.20
	23	0.00	0.04	0.05	0.06	0.07	0.10	0.14	0.17	0.19
	24	0.00	0.04	0.05	0.06	0.08	0.11	0.15	0.19	0.21

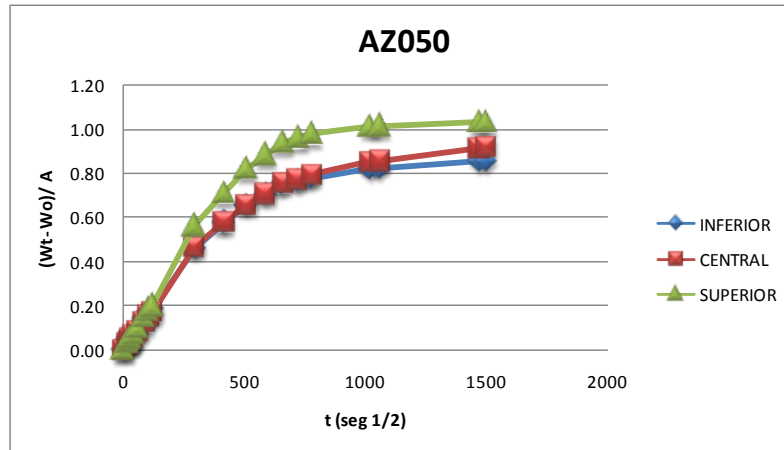
Tabla . Relación $(Wt-Wo)/A$ respecto a la raíz cuadrada del tiempo (de 294 seg $^{1/2}$ hasta 1498 seg $^{1/2}$).

ESPECIMEN	t [seg $^{1/2}$]	293.939	415.692	509.117	587.878	657.267	720	777.689	1018.23	1059.81	1469.69	1498.800
AT050 10 13/07/10	1	0.59	0.74	0.84	0.89	0.93	0.93	0.94	0.96	0.96	0.97	0.97
	2	0.54	0.69	0.81	0.88	0.94	0.97	0.99	1.05	1.05	1.08	1.08
	3	0.60	0.77	0.89	0.96	1.02	1.04	1.06	1.10	1.10	1.11	1.11
A2050 20 10/07/10	4	0.46	0.58	0.66	0.71	0.75	0.76	0.78	0.82	0.82	0.86	0.86
	5	0.47	0.58	0.66	0.71	0.76	0.77	0.80	0.85	0.86	0.92	0.92
	6	0.56	0.71	0.82	0.88	0.94	0.96	0.98	1.01	1.02	1.03	1.03
CT050 35 06/07/10	7	0.54	0.68	0.79	0.85	0.90	0.91	0.92	0.94	0.94	0.95	0.95
	8	0.56	0.69	0.79	0.84	0.89	0.90	0.92	0.94	0.94	0.95	0.95
	9	0.50	0.62	0.72	0.77	0.81	0.83	0.85	0.89	0.89	0.90	0.91
C2050 23 05/07/10	10	0.40	0.49	0.55	0.59	0.63	0.64	0.65	0.69	0.69	0.73	0.73
	11	0.39	0.48	0.53	0.57	0.61	0.62	0.64	0.70	0.70	0.76	0.76
	12	0.44	0.53	0.61	0.65	0.69	0.71	0.73	0.78	0.79	0.84	0.85
AT065 5 14/07/10	13	0.75	0.90	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.02
	14	0.73	0.87	0.95	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.01
	15	0.91	0.95	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99
A2065 5 14/07/10	16	0.58	0.69	0.76	0.80	0.83	0.84	0.86	0.89	0.89	0.90	0.90
	17	0.66	0.80	0.88	0.93	0.95	0.96	0.96	0.98	0.98	0.99	0.99
	18	0.64	0.78	0.88	0.93	0.98	0.99	1.01	1.05	1.05	1.07	1.07
CT065 10 21/07/10	19	0.66	0.79	0.87	0.90	0.92	0.92	0.92	0.94	0.94	0.95	0.95
	20	0.63	0.76	0.86	0.91	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99
	21	0.60	0.73	0.83	0.89	1.03	1.03	1.04	1.06	1.07	1.08	1.08
C2065 4 22/07/10	22	0.49	0.59	0.66	0.70	0.74	0.75	0.76	0.80	0.80	0.83	0.83
	23	0.47	0.57	0.64	0.68	0.72	0.73	0.75	0.80	0.81	0.88	0.88
	24	0.55	0.67	0.75	0.80	0.84	0.85	0.90	0.92	0.92	0.97	0.97

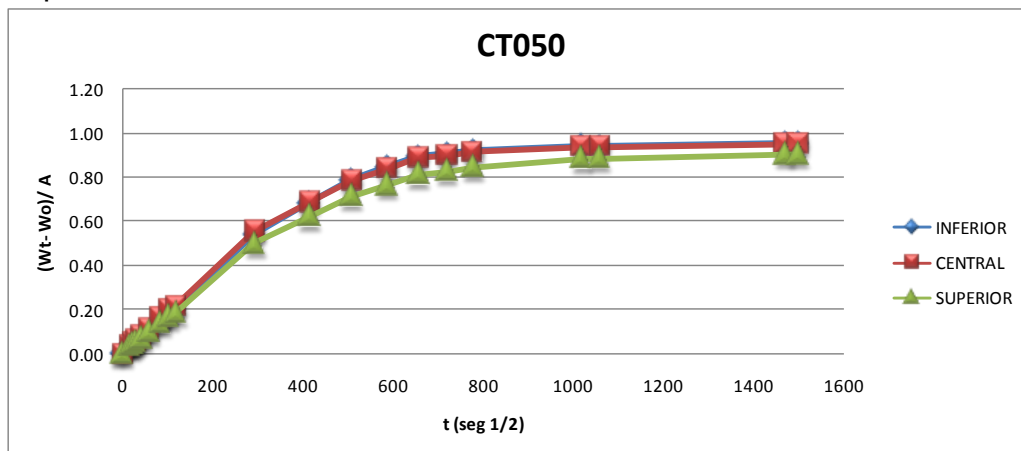
Con las tablas anteriores se obtienen los siguientes gráficos que relacionan $(Wt-Wo)/A$ respecto a la raíz cuadrada del tiempo para cada una de las mezclas estudiadas.



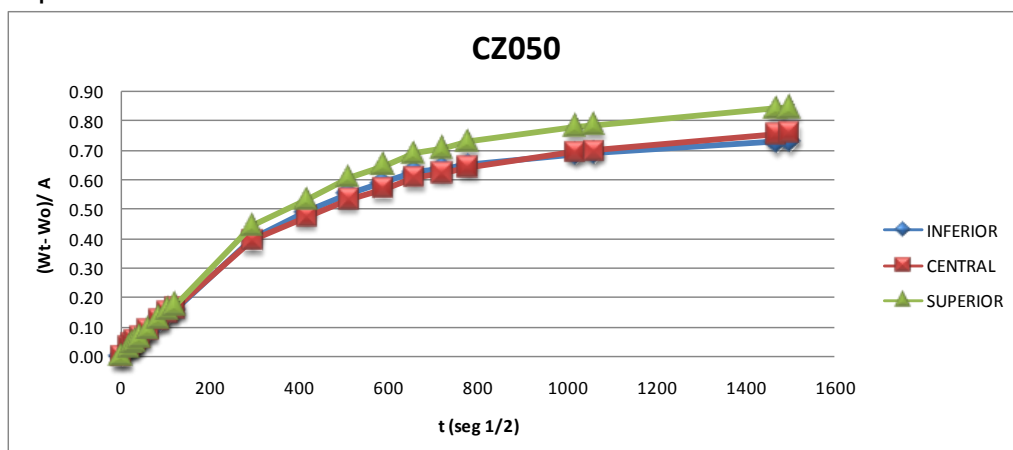
Gráfica . Relación de la diferencia de pesos en el tiempo respecto al área VS raíz del tiempo en mezcla AT050.



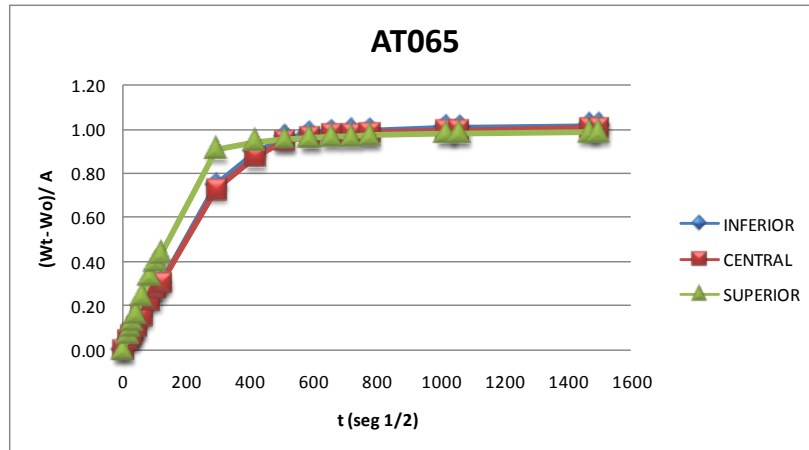
Gráfica . Relación de la diferencia de pesos en el tiempo respecto al área VS raíz del tiempo en mezcla AZ050.



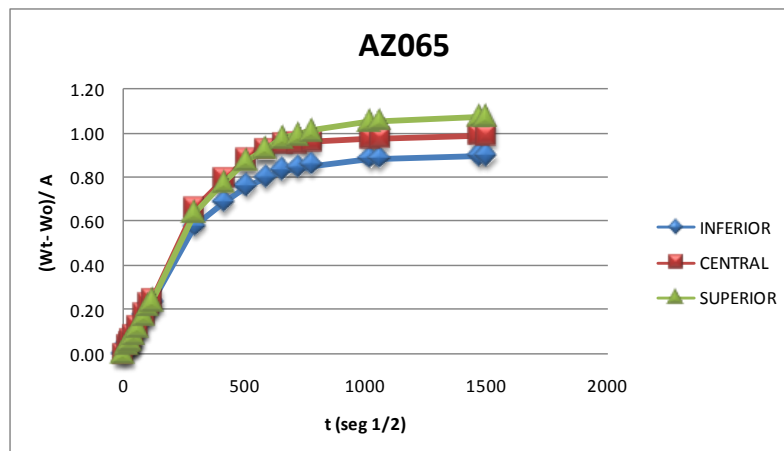
Gráfica . Relación de la diferencia de pesos en el tiempo respecto al área VS raíz del tiempo en mezcla CT050.



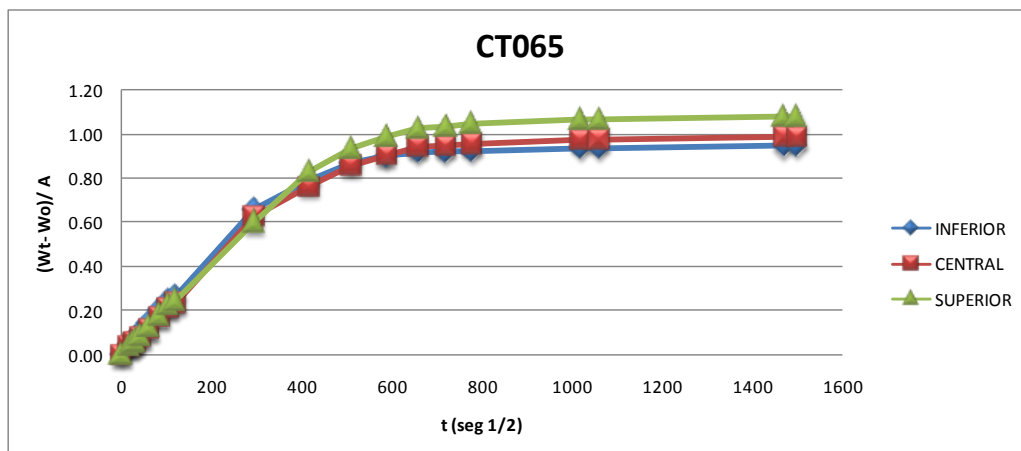
Gráfica . Relación de la diferencia de pesos en el tiempo respecto al área VS raíz del tiempo en mezcla CZ050.



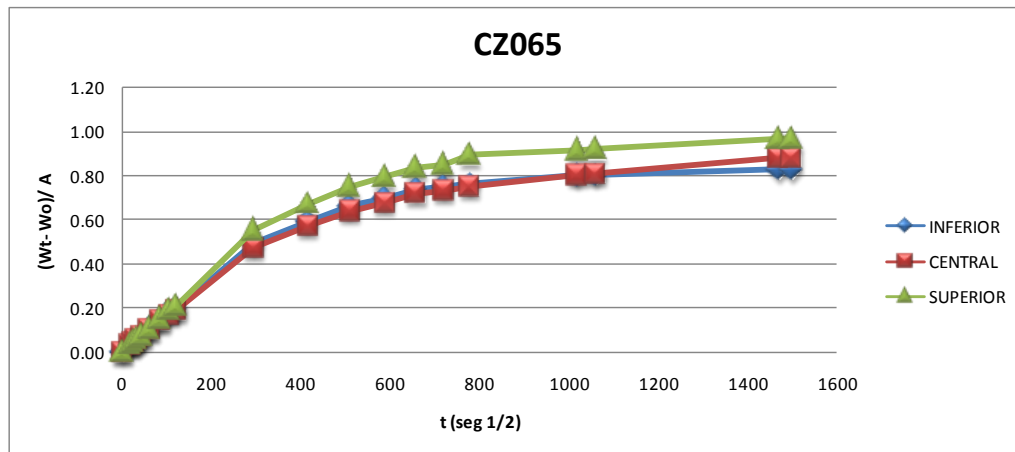
Gráfica . Relación de la diferencia de pesos en el tiempo respecto al área VS raíz del tiempo en mezcla AT065.



Gráfica . Relación de la diferencia de pesos en el tiempo respecto al área VS raíz del tiempo en mezcla AZ065.



Gráfica . Relación de la diferencia de pesos en el tiempo respecto al área VS raíz del tiempo en mezcla CT065.



Gráfica . Relación de la diferencia de pesos en el tiempo respecto al área VS raíz del tiempo en mezcla CZ065.

El coeficiente de Absorción Capilar “K” corresponde a la pendiente de la gráfica. Esta pendiente se obtiene mediante la fórmula de pendiente que toma en cuenta la influencia de las diferentes pendientes “ S_i ” en los sub-tramos L_i , que se encuentran en un tramo considerado L. La fórmula presenta una gran ventaja ya que se acerca más a la pendiente real de la gráfica, que si sólo se considerara una pendiente aritmética.

$$S = \left[\frac{L}{\frac{L_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{L_2}{\sqrt{S_2}} + \frac{L_3}{\sqrt{S_3}} + \dots + \frac{L_i}{\sqrt{S_i}}} \right]^2$$

Donde:

L = Longitud total.

L_i = Longitud del tramo i-ésimo considerado.

$\sqrt{S_i}$ = Pendiente del tramo i-ésimo considerado.

El coeficiente “m” es determinado calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior de la probeta, es decir, cuando $z=H$.

El coeficiente de porosidad efectiva (ϵ_e) se obtiene de la expresión según Fagerlund:

$$\varepsilon_e = \frac{k\sqrt{m}}{1000} \quad (\%)$$

Con la anterior información la Absorción Capilar, S, se calcula como:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (\text{mm/h}^{1/2}) \text{ o } (\text{m/s}^{1/2})$$

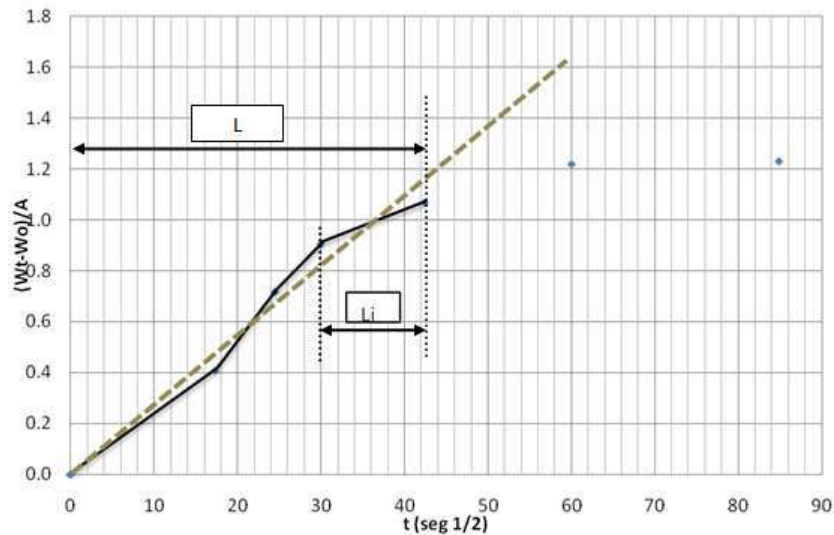


Figura . Obtención de la pendiente “S” mediante pendientes en subtramos Li.

La siguiente tabla es un resumen de los coeficientes “k”, “m”, “ ε_e ” y “s” descritos anteriormente:

Tabla . Resumen de los datos obtenidos para los coeficientes de absorción capilar, resistencia a la penetración del agua y porosidad efectiva de las mezclas en estudio.

ESPECIMEN		K $\frac{g}{cm^3 \cdot s^{-1/2}}$	m s/m^2	ϵ_t $\frac{k(m)}{1000} (\%)$	S_{400} $\frac{1}{\sqrt{m}} (m/s^{1/2})$
AT050 10 13/07/10	1	0.0177	369099323.60	0.3405	0.0000521
	2	0.0254	376163265.31	0.4921	0.0000516
	3	0.0233	369099323.60	0.4482	0.0000521
AZ050 20 10/07/10	4	0.0218	383431952.66	0.4274	0.0000511
	5	0.0239	383431952.66	0.4680	0.0000511
	6	0.0227	383431952.66	0.4446	0.0000511
CT050 35 06/07/10	7	0.0193	383431952.66	0.3780	0.0000511
	8	0.0195	369099323.60	0.3740	0.0000521
	9	0.0222	369099323.60	0.4267	0.0000521
CZ050 23 05/07/10	10	0.0200	369099323.60	0.3833	0.0000521
	11	0.0217	376163265.31	0.4212	0.0000516
	12	0.0228	369099323.60	0.4373	0.0000521
AT065 5 14/07/10	13	0.0128	431820074.97	0.2659	0.0000481
	14	0.0110	431820074.97	0.2282	0.0000481
	15	0.0094	431820074.97	0.1961	0.0000481
AZ065 5 14/07/10	16	0.0200	383431952.66	0.3924	0.0000511
	17	0.0146	369099323.60	0.2806	0.0000521
	18	0.0230	376163265.31	0.4458	0.0000516
CT065 10 21/07/10	19	0.0137	414720000.00	0.2792	0.0000491
	20	0.0171	450000000.00	0.3623	0.0000471
	21	0.0186	414720000.00	0.3796	0.0000491
CZ065 4 22/07/10	22	0.0206	383431952.66	0.4037	0.0000511
	23	0.0224	369099323.60	0.4300	0.0000521
	24	0.0196	383431952.66	0.3836	0.0000511

A continuación se presentan los resultados de Absorción después de estar los especímenes en secado en horno durante un mes y en saturación por un tiempo de un mes.

Tabla . Absorción obtenida en especímenes después de secado en horno y saturación.

MEZCLA	AT050 10 13/07/10			AZ050 20 10/07/10			CT050 35 06/07/10			CZ050 23 05/07/10		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ABSORCIÓN POR INMERSIÓN (%)	8.476	9.799	10.335	7.609	8.421	9.808	8.686	8.598	8.158	6.419	6.884	7.821
PROMEDIO	9.536			8.613			8.481			7.041		

MEZCLA	AT065 5 14/07/10			AZ065 5 14/07/10			CT065 10 21/07/10			CZ065 4 22/07/10		
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ABSORCIÓN POR INMERSIÓN (%)	10.029	9.889	9.806	7.904	8.903	10.178	8.956	10.031	10.818	7.422	8.080	9.326
PROMEDIO	9.908			8.995			9.935			8.276		

Tabla . Porosidad obtenida en especímenes con diferentes grados de hidratación.

CÁLCULO DE LA POROSIDAD EN %										
Mezcla	Grado de Hidratación del Concreto en %									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
AT050	24.260	22.378	20.496	18.614	16.732	14.850	12.968	11.086	9.204	7.322
AZ050	24.903	22.971	21.039	19.107	17.175	15.243	13.311	11.379	9.447	7.515
CT050	24.940	23.005	21.070	19.136	17.201	15.267	13.332	11.397	9.463	7.528
CZ050	24.624	22.713	20.803	18.893	16.983	15.073	13.162	11.252	9.342	7.432
AT065	30.859	29.050	27.241	25.431	23.622	21.813	20.004	18.194	16.385	14.576
AZ065	31.737	29.876	28.016	26.155	24.294	22.433	20.573	18.712	16.851	14.991
CT065	31.444	29.601	27.757	25.914	24.070	22.227	20.383	18.540	16.696	14.853
CZ065	31.340	29.503	27.666	25.828	23.991	22.154	20.316	18.479	16.641	14.804

5.8.2 Resultados de la prueba de Carbonatación.

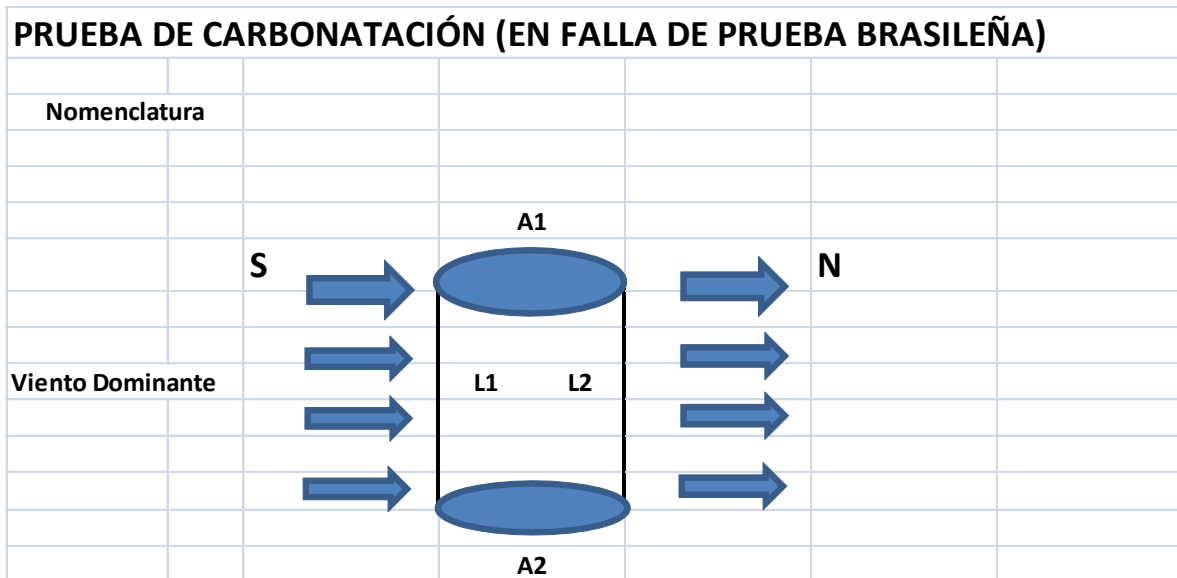


Figura . Diagrama de colocación de especímenes para ataque por carbonatación.

Tabla . Resultados de Carbonatación y Velocidad de Carbonatación promedio para cada mezcla.

ESPECIMEN	PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN PROMEDIO (mm)				TIEMPO EN AÑOS	VELOCIDAD DE CARBONATACIÓN K (mm/a ^{1/2})			
	L1	L2	A1	A2		L1	L2	A1	A2
AT050	2.67	2.44	2.33	2.00	0.5	3.77	1.26	2.08	1.39
AZ050	2.06	1.44	2.00	2.00	0.5	2.91	0.85	2.17	1.36
AT050	4.28	2.72	3.72	1.89	0.5	6.05	1.11	3.54	1.00
CZ050	2.00	1.17	1.33	0.50	0.5	2.83	0.69	1.60	0.40
AT065	5.17	2.33	4.83	2.17	0.5	7.31	0.86	5.20	0.95
AZ065	3.50	3.17	4.67	1.67	0.5	4.95	1.42	3.91	0.84
CT065	4.33	3.50	3.33	3.00	0.5	6.13	1.41	2.80	1.79
AZ050	3.67	3.17	2.83	1.00	0.5	5.19	1.39	2.40	0.65

5.8.3 Resultados de Ataque por Sulfatos y Cristalización.

Tabla . Pérdida de masa en cilindros de 10x20cm en mezclas con relación a/c de 0.5; después de cada ciclo de saturación en sulfato de sodio y secado en horno.

Mezcla	W seco	1er Ciclo	1er Ciclo	2do Ciclo	2do Ciclo	3er Ciclo	3er Ciclo	4to Ciclo	4to Ciclo	5to Ciclo	5to Ciclo
AT050 13/07/10	35	3499.20	3524.50	3301.51							
	36	3456.36	3487.32	3214.11							
	37	3447.72	3474.34	3257.78	3486.55	3256.28	3529.03	3361.11			
	38	3468.26	3502.51	3256.56	3529.17	3251.75	3522.80	3349.61			
	39	3447.55	3477.74	3263.64	3510.29	3383.47	3516.67	3296.84	3528.19	3251.90	3585.12 SE DESHIZO
	40	3474.00	3510.78	3294.69	3525.53	3281.48	3532.61	3326.75	3580.17	3221.78	2560.58 2548.84
AZ050 10/07/10	40	3450.73	3471.67	3288.71							
	41	3451.88	3477.75	3212.79							
	42	3435.72	3464.18	3230.81	3435.75	3211.69	3460.95	3281.40			
	43	3476.50	3505.45	3231.52	3423.63	3249.40	3506.09	3290.79			
	44	3486.25	3514.82	3219.58	3536.45	3379.65	3562.62	3395.41	3506.75	3220.22	3396.93 SE DESHIZO
	45	3446.32	3476.06	3282.84	3508.04	3221.91	3460.74	3289.11	3485.14	2174.92	3260.47 SE DESHIZO
CT050 06/07/10	50	3506.20	3559.38	3383.18							
	51	3494.07	3534.14	3364.49							
	52	3503.05	3542.91	3389.91	3580.51	3495.84	3563.81	3451.98			
	53	3449.79	3494.61	3330.12	3537.22	3434.06	3520.32	3302.44			
	54	3441.13	3491.62	3323.08	3533.06	3416.56	3519.58	3417.61	3430.68	3289.70	3454.90 3264.60
	55	3455.37	3509.53	3347.51	3557.63	3309.81	3549.14	3450.85	3529.76	3353.38	3438.92 3140.79
CZ050 05/07/10	33	3459.95	3487.48	3281.40							
	34	3453.42	3486.45	3308.28							
	35	3498.19	3523.81	3331.21	3507.68	3394.69	3547.93	3433.35			
	40	3485.11	35125.79	3348.76	3527.66	3437.16	3532.85	3427.74			
	42	3478.06	3513.30	3325.76	3526.44	3418.86	3542.95	3435.42	3483.50	3290.32	3442.82 3202.17
	44	3444.72	3480.82	3305.99	3506.54	3394.35	3507.13	3397.55	3466.24	3235.95	3508.53 3186.30

Tabla . Pérdida de masa en cilindros de 10x20cm en mezclas con relación a/c de 0.65; después de cada ciclo de saturación en sulfato de sodio y secado en horno.

Mezcla		Wseco	1er Ciclo	1er Ciclo	2do Ciclo	2do Ciclo	3er Ciclo	3er Ciclo	4to Ciclo	4to Ciclo	5to Ciclo	5to Ciclo
AT065 14/07/10	8	3491.89	3570.28	3378.05								
	9	3528.39	3607.37	3397.46								
	10	3423.06	3496.85	3354.32	3527.20	3305.35	3527.02	3287.65				
	30	3467.19	3545.36	3347.85	3586.29	3443.81	3572.00	3403.01				
	31	3487.08	3575.99	3388.09	3611.69	3397.77	3652.49	3404.60	3725.96	3222.69	SE DESHIZO	
	33	3408.86	3487.03	3344.73	3509.82	3347.18	3511.39	3253.95	3585.27	3268.32	3445.85	2454.92
AZ065 14/07/10	22	3459.95	3497.14	3209.75								
	23	3409.50	3450.83	3186.03								
	24	3419.16	3461.93	3147.77	3402.50	3332.17	3540.21	3270.03				
	25	3442.60	3486.02	3184.66	3408.66	3239.81	3513.21	3272.79				
	26	3457.25	3494.87	3188.36	3425.66	3263.64	3563.77	3311.13	3565.35	SE DESHIZO		
	27	3387.04	3425.00	3126.75	3380.98	3173.98	3457.57	3267.90	3532.55	3219.73	3506.20	SE DESHIZO
CT065 21/07/10	17	3446.53	3525.64	3218.39								
	18	3456.42	3514.89	3188.57								
	19	3441.68	3501.38	3239.92	3520.95	3337.57	3553.66	3425.36				
	20	3432.85	3499.83	3308.29	3528.63	3412.53	3520.60	3399.81				
	21	3442.64	3513.73	3307.15	3539.40	3322.53	3562.51	3422.54	3498.76	3225.74	3451.15	3043.12
	24	3431.83	3492.36	3271.43	3818.16	3417.26	3501.43	3339.47	3468.52	3264.74	3447.22	3214.92
CZ065 22/07/10	21	3411.14	3455.52	3185.02								
	22	3396.29	3445.15	3156.72								
	23	3414.21	3459.27	3215.38	3462.23	3297.70	3524.08	3374.91				
	24	3426.34	3479.24	3302.58	3506.29	3366.52	3502.20	3261.90				
	25	3372.48	3423.20	3146.44	3374.03	3165.80	3461.78	3246.65	1725.88	SE DESHIZO		
	26	3403.39	3453.40	3197.24	3450.26	3317.97	3489.75	3326.28	3444.41	3202.92	3410.60	2730.45

Tabla . Pérdida de masa en % en cilindros de 10x20cm después de cada ciclo de saturación en sulfato de sodio y secado en horno.

MEZCLA	1er Ciclo	2do Ciclo	3er Ciclo	4to Ciclo	5to Ciclo
AT050	5.795	4.799	4.433	6.468	26.631
AZ050	6.171	5.656	4.250	22.261	SE DESHIZO
CT050	3.411	1.397	1.636	3.676	7.117
CZ050	4.409	1.875	1.524	5.729	7.717
AT065	2.857	2.121	3.179	5.852	27.984
AZ065	7.446	5.081	4.260	4.940	SE DESHIZO
CT065	5.412	1.883	1.178	5.585	8.963
CZ065	5.980	3.449	2.987	5.890	19.773

Tabla . Resultados de Resistencia a compresión en cilindros de 10x20cm después de 1,3 y 5 ciclos de saturación en sulfato de sodio y secado en horno.

ESPECIMEN		RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Kg/cm2) 1ER CICLO	ESPECIMEN		RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Kg/cm2) 3ER CICLO	ESPECIMEN		RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Kg/cm2) 5TO CICLO
AT050	35	288.39	AT050	37	268.04	AT050	39	0.00
AT050	36	301.12	AT050	38	261.65	AT050	40	0.00
AZ050	40	352.05	AZ050	42	273.11	AZ050	44	0.00
AZ050	41	332.32	AZ050	43	204.35	AZ050	45	0.00
CT050	50	304.30	CT050	52	308.76	CT050	54	242.55
CT050	51	295.39	CT050	53	291.57	CT050	55	101.86
CZ050	33	332.95	CZ050	35	282.02	CZ050	42	123.50
CZ050	34	328.50	CZ050	40	329.13	CZ050	44	89.13
AT065	8	205.63	AT065	10	247.65	AT065	31	0.00
AT065	9	178.89	AT065	30	237.46	AT065	311	0.00
AZ065	22	236.19	AZ065	24	113.95	AZ065	26	0.00
AZ065	23	200.54	AZ065	25	190.99	AZ065	27	0.00
CT065	17	178.25	CT065	19	161.06	CT065	21	38.20
CT065	18	163.61	CT065	20	176.34	CT065	24	196.08
CZ065	21	247.65	CZ065	23	232.37	CZ065	25	0.00
CZ065	22	243.83	CZ065	24	169.98	CZ065	26	0.00

5.8.4 Resultados de Ensayo Cántabro.

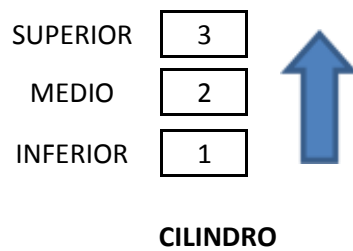


Figura . Diagrama de corte de especímenes para prueba de abrasión.

Tabla . Resultados de desgaste por abrasión para mezclas con relación a/c 0.50 en porcentaje por cada 100 ciclos de abrasión.

ESPECIMEN		0	100	200	300	400	500
AT050 53 12/07/10	1	0	5.53	12.58	16.15	28.53	32.80
	2	0	6.43	11.16	18.14	24.03	31.29
	3	0	14.97	18.90	22.47	27.02	31.53
AT050 54 12/07/10	4	0	5.05	10.58	23.75	34.75	41.54
	5	0	15.27	23.18	29.80	38.98	46.16
	6	0	7.48	11.74	15.68	21.26	27.43
AZ050 16 10/07/10	7	0	10.53	13.35	16.98	21.54	33.94
	8	0	8.00	13.45	19.03	23.12	29.31
	9	0	7.00	10.64	14.99	18.72	24.53
AZ050 17 10/07/10	10	0	8.89	12.30	19.01	29.54	41.81
	11	0	12.35	16.91	20.94	28.00	33.91
	12	0	9.04	12.60	16.79	22.21	24.66
CT050 45 07/07/10	13	0	3.84	9.99	15.86	22.11	31.01
	14	0	14.51	20.43	25.69	32.15	39.25
	15	0	8.40	13.12	18.66	25.72	30.81
CT050 46 07/07/10	16	0	7.22	11.76	14.44	20.88	28.94
	17	0	9.38	13.40	17.17	21.36	28.80
	18	0	20.66	26.37	31.63	36.08	43.01
CZ050 12 03/07/10	19	0	4.43	9.68	14.21	18.32	22.26
	20	0	18.83	31.40	41.27	46.26	71.75
	21	0	8.44	14.03	19.01	24.51	30.67
CZ050 19 03/07/10	22	0	1.37	7.79	16.17	22.26	29.68
	23	0	9.05	13.35	20.73	25.43	32.46
	24	0	18.53	23.85	29.01	35.98	42.01

Tabla . Resultados de desgaste por abrasión para mezclas con relación a/c 0.65 en porcentaje por cada 100 ciclos de abrasión.

ESPECIMEN		0	100	200	300	400	500
AT065 2 14/07/10	25	0	6.70	13.17	29.05	36.77	56.22
	26	0	18.42	25.07	32.50	41.64	60.32
	27	0	11.70	20.80	26.69	37.26	50.13
AT065 3 14/07/10	28	0	7.87	16.72	27.86	46.79	67.70
	29	0	17.08	24.40	34.30	45.32	68.26
	30	0	8.71	15.98	24.49	45.44	54.42
AZ065 1 14/07/10	31	0	16.68	24.07	36.46	84.45	117.18
	32	0	9.99	18.36	27.51	42.57	52.58
	33	0	11.05	17.97	22.99	37.56	46.53
AZ065 2 14/07/10	34	0	9.60	14.88	22.99	34.90	47.05
	35	0	10.12	20.44	28.54	34.80	55.17
	36	0	18.42	23.58	29.37	34.76	40.34
CT065 1 21/07/10	37	0	9.83	16.16	24.34	35.44	46.12
	38	0	8.54	15.53	23.14	31.86	41.43
	39	0	15.44	20.25	27.61	34.34	43.39
CT065 2 21/07/10	40	0	7.27	13.88	21.60	30.29	42.02
	41	0	16.37	23.09	29.59	37.75	50.70
	42	0	9.07	14.10	18.34	22.76	28.42
CZ065 1 22/07/10	43	0	12.39	19.15	26.49	43.47	57.83
	44	0	8.79	14.60	23.69	36.92	49.63
	45	0	21.93	30.02	36.98	48.39	59.18
CZ065 2 22/07/10	46	0	3.24	9.94	19.93	26.48	35.43
	47	0	22.47	28.97	35.71	48.38	56.16
	48	0	13.44	22.44	29.10	45.23	55.57

Tabla . Resultados de desgaste por abrasión promedio para cada mezcla en porcentaje por cada 100 ciclos de abrasión.

MEZCLA	0	100	200	300	400	500
AT050	0.00	9.12	14.69	21.00	29.09	35.12
AZ050	0.00	9.30	13.21	17.96	23.86	31.36
CT050	0.00	10.67	15.84	20.57	26.39	33.64
CZ050	0.00	10.11	16.69	23.40	28.79	38.14
AT065	0.00	11.75	19.36	29.15	42.20	59.51
AZ065	0.00	12.64	19.88	27.98	44.84	59.81
CT065	0.00	11.09	17.17	24.10	32.07	42.01
CZ065	0.00	13.71	20.85	28.65	41.48	52.30

5.8.5 Resultados de la prueba de Congelamiento y deshielo.

De la prueba de congelamiento y deshielo se obtiene los resultados del ensaye por compresión diametral realizado a los especímenes que no se les realizó la prueba y se comparan con los resultados del ensaye realizado a los especímenes sometidos al congelamiento y deshielo; de los resultados obtenidos se saca un promedio de resistencia para después obtener un cociente o índice de daño entre los especímenes sanos y los sometidos a la prueba.

Tabla . Obtención del índice de daño en especímenes sometidos a congelamiento y deshielo.

ESPECIMEN		RESISTENCIA SECO (Kg/cm ²)	PROMEDIO (Kg/cm ²)	RESISTENCIA CONGELAMIENTO (Kg/cm ²)	PROMEDIO (Kg/cm ²)	INDICE DE DAÑO
AT050 10 13/07/10	1	28.61		31.74		
	2	30.08		35.07		
	3	37.72	32.14	29.68	32.16	1.00
AZ050 20 10/07/10	4	17.85		29.64		
	5	38.05		32.68		
	6	23.10	26.33	32.02	31.45	1.19
CT050 35 06/07/10	7	39.26		40.45		
	8	55.16		40.11		
	9	33.37	42.59	42.41	40.99	0.96
CZ050 23 05/07/10	10	30.99		34.86		
	11	43.68		42.42		
	12	38.12	37.60	30.35	35.88	0.95
AT065 5 14/07/10	13	19.37		22.38		
	14	17.23		21.75		
	15	16.80	17.80	25.91	23.35	1.31
AZ065 5 14/07/10	16	17.85		17.79		
	17	21.48		26.92		
	18	24.88	21.40	22.02	22.24	1.04
CT065 10 21/07/10	19	29.07		31.24		
	20	34.65		31.65		
	21	30.75	31.49	30.46	31.12	0.99
CZ065 4 22/07/10	22	31.58		28.18		
	23	29.01		32.62		
	24	31.58	30.72	28.07	29.62	0.96

La siguiente gráfica nos muestra en los índices de daño para cada mezcla.

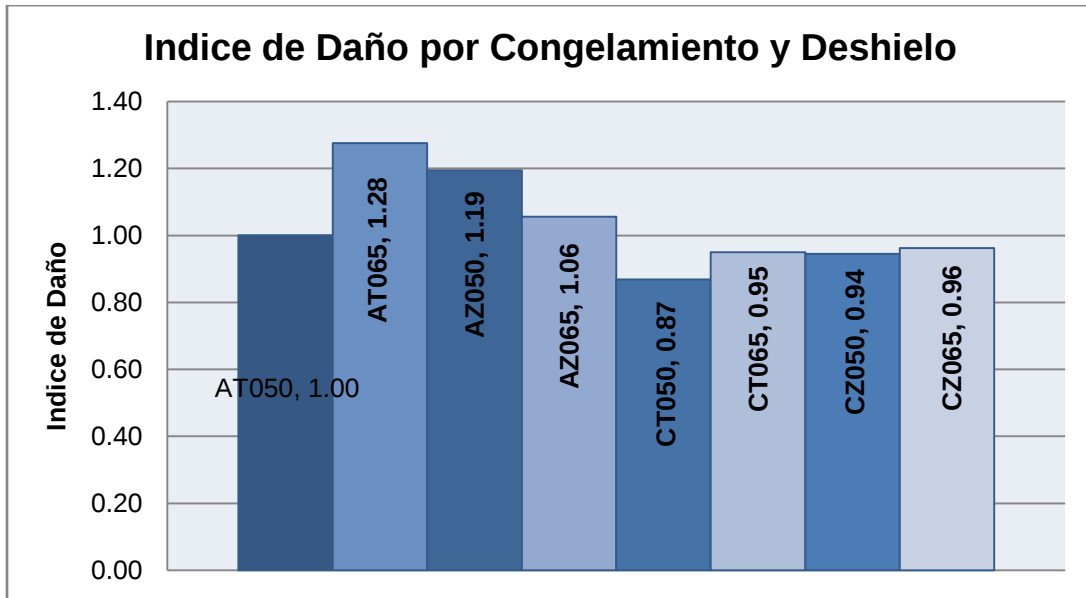


Figura . Gráfica que nos muestra el índice de daño para cada mezcla.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

consistencia en sus resultados. Las muestras de la segunda etapa indican velocidades de pulso en rangos diferentes, para muestras con $a/c = 0.50$ la velocidad esta en un rango de 3.6 a 3.9km/seg, mientras que para las muestras con $a/c = 0.65$ la velocidad esta en un rango de 3.3 a 3.6km/seg. En esta prueba no influye la morfología o geometría de la muestra analizada, pero se deben tener en cuenta los factores que pueden afectar las lecturas de velocidad, como por ejemplo, el acoplamiento de los transductores, condiciones de humedad de la muestra, las dimensiones mínimas de especímenes requeridas para esta muestra, entro otros.

La esclerometría es un método que debe ser empleado para determinar la homogeneidad del concreto más no su resistencia a la compresión ya que se basa en las propiedades de superficie del concreto y estas pueden estar afectadas por el medio ambiente, como por ejemplo puede estar carbonatada, además esta prueba da información de la capa exterior del concreto con una profundidad de hasta 5cm. El rebote del esclerómetro sí aumenta con la edad del concreto. La prueba de esclerometría es una prueba que debe aplicarse en campo solamente, ya que al usar este método en especímenes de laboratorio no se obtiene correlación por rebote.

La precarga aplicada del 15% de la carga de falla no daña los especímenes, esto se corroboró mediante la obtención de las curvas esfuerzo deformación de los cilindros precargados y de los cilindros no precargados en donde las pendientes de todos los cilindros no mostraron diferencia significativa.

La frecuencia de resonancia es la prueba más afectada por la morfología o geometría de las muestras analizadas. Por tanto, la frecuencia de resonancia debe ser empleada solamente si se tienen muestras prismáticas que cumplan con las dimensiones indicadas en la literatura, de otro modo será difícil obtener las frecuencias, además esta prueba no puede aplicarse en campo.

Debido a que las frecuencias de resonancia obtenidas en los cilindros no resultaron satisfactoriamente, por tanto los valores de los Módulos de Elasticidad Dinámicos obtenidos a partir de las frecuencias de resonancia de los cilindros (E_f) son bajos en comparación de los Módulos de Elasticidad Estáticos.

El módulo de elasticidad dinámico calculado a partir de la velocidad de pulso (Ev) presentan una tendencia ascendente respecto a la edad y son aproximadamente del mismo orden que los Módulos de Elasticidad Estáticos.

Existe una diferencia clara entre una mezcla elaborada sin llevar un control en la relación a/c y una mezcla con una relación a/c bien controlada. En un concreto con relación a/c controlada se pueden obtener tendencias en las pruebas aplicadas, esto indica que esa prueba es un parámetro que de manera indirecta da información de la calidad del concreto, como es caso de las pruebas no destructivas aplicadas en este estudio.

La geometría o morfología juega un papel de suma importancia en la obtención de las lecturas tomadas de manera no destructiva, principalmente en la determinación de la frecuencia de resonancia, en donde un cambio de dimensiones de vigas de 15cm x 15cm x 60cm a un cilindro de 15cm de diámetro x 30cm de altura o a uno de 10cm de diámetro x 20cm de altura representa un cambio en la frecuencia completamente diferente y sin tendencia alguna; en el caso de la velocidad de pulso ultrasónico, solamente es necesario cumplir con la dimensión lateral mínima de la muestra requerida para la prueba, esta dimensión no debe ser menor que la longitud de onda con que se está trabajando.

Los cilindros y vigas deben ser elaborados siguiendo las normas ASTM. El curado debe ser el mismo para todos los especímenes. Los diámetros de los cilindros deberán ser medidos con precisión, tomando el promedio de ellos. Se deberá tomar un promedio de las longitudes de los cilindros para hacer los cálculos necesarios. Los especímenes no deben presentar daños externos, en ese caso los resultados pueden no ser precisos.

De las pruebas no destructivas estudiadas la frecuencia de resonancia es la única que se debe hacer en laboratorio solamente y con muestras prismáticas de acuerdo a los resultados obtenidos; la prueba de rebote con el martillo de Schmidt es una prueba que se debe realizar en campo de acuerdo a la norma ASTM C 805 – 02; la resistividad eléctrica y la velocidad de pulso ultrasónico son pruebas que se realizan tanto en campo como en laboratorio.

Los mejores modelos de predicción obtenidos son el M6 con un factor de correlación de 0.8145 para predecir la resistencia a la compresión y el modelo M9 con un factor de correlación de 0.8911 para predecir el módulo de ruptura. Estos modelos son lineales y proporcionan mejores resultados que modelos formados por polinomios.

El mejor modelo para predecir el Módulo de Elasticidad Estático es el E2, con un factor de correlación de 0.9454, este modelo considera una variable obtenida de manera destructiva (la resistencia a la compresión) y cinco variables obtenidas de manera no destructiva (resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, frecuencia de resonancia en el modo longitudinal, el Módulo de Elasticidad Dinámico calculado a partir de la velocidad de pulso y el Módulo de Elasticidad Dinámico calculado a partir de la frecuencia de resonancia en el modo longitudinal).

El objetivo de la presente investigación se cumple, para las condiciones planteadas y con las que se realizó el trabajo, al obtener los modelos de predicción de la resistencia a la compresión, del módulo de ruptura y del Módulo de Elasticidad Estático, sin embargo queda la posibilidad de seguir investigando sobre el tema para ampliar el campo de aplicación de los resultados.

Las pruebas no destructivas tienen un campo de aplicación considerablemente amplio, tanto en ingeniería como en otras áreas del conocimiento, por tanto se recomienda continuar con investigaciones que documenten y sustenten a las técnicas no destructivas.

Se recomienda realizar pruebas no destructivas en un concreto fabricado con un cemento ordinario CPO, para contar con un estudio de referencia y analizar los cambios obtenidos en las lecturas.

Se sugiere que estos ensayos pueden servir para que, dentro de los nuevos criterios de durabilidad que se imponen en la ingeniería moderna, se califique los materiales que se emplean en el concreto con una mayor precisión. También se pueden emplear para predecir la vida útil que tendrá con el correr del tiempo el material.

7 BIBLIOGRAFÍA

AASHTO T-283-02 “Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.”

ACI 211.1 – 89. Standard Practice for Selecting Proportions Normal, Heavy weight, and Mass Concrete.

ACI 222, 2002, Informe 222R, “Protection of metals in concrete against corrosión”, American Concrete Institute, EUA.

ACI Committee 305, “Hot Weather Concreting” Manual of concrete Practice, part 2, American concrete institute.

AMAAC RA 04/2008 “Resistencia de las Mezclas Asfálticas al Daño inducido por Humedad.

Andrés A. Torres Acosta, Miguel Martínez Madrid. 2001, “Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad”, SCT, Publicación Técnica No. 181, pc.2.

ASTM C 125-02 Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.

ASTM C 127 – 88. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate.

ASTM C 128 – 88. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate.

ASTM C 136 – 84a. Standard Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.

ASTM C 138 – 81. Standard Test Method for Unit Weight, Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete.

ASTM C 143 – 90a. Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete.

ASTM C 192 – 90a. Standard Practice for Making and Curing Test Specimens in the Laboratory.

ASTM C 29/ C 29M – 90. Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate.

ASTM C 33 – 90. Standard Specification for Concrete Aggregates.

ASTM C 39. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete

ASTM C 469 – 87a. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression.

ASTM C 496 – 90. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

ASTM C 566 – 89. Standard Method for Total Moisture Content of Aggregate by Drying.

ASTM C 617. Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens.

ASTM C 78 – 84. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).

ASTM C 88-99a, “Standard Test Method for Soundness of aggregates by use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate”.

ASTM C 94 – 90. Standard Specification for Ready-Mixed Concrete.

ASTM C78 / C78M - 10 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).

ASTM-C-452-95 Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate.

Cámara Nacional del Cemento (CANACEM) “Cifras Relevantes de la Industria del Cemento en México. Recuperada el día 25 de Febrero del 2011.

Cemex Concretos, “Manual del Constructor”, Mayo 2005.

Cheryl M. Solomon, Cement Statistical Compendium, recuperado el día 25 de febrero de 2011. <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1152/2005-1152.pdf>

Cohen, M.D. y B Mather, “Sulfate Attack on Concrete-Research Needs”, ACI Material Journal, vol. 88, núm. 1, enero-febrero de 1991, pp. 62-69.

Correlación de pruebas destructivas y no destructivas para medir propiedades mecánicas del concreto hidráulico. Instituto tecnológico de Costa Rica, departamento de Construcción. Diciembre 2003.

Diplomado de Obras de Concreto que imparten la Facultad de Arquitectura de la UNAM y el IMCYC.

Diseño y Control de Mezclas de Concreto, PCA, Steven H. Kosmatka, et. Al.

Durabilidad de la Infraestructura del Concreto Reforzado Expuesta a Diferentes Ambientes Urbanos de México, Publicación Técnica n° 292 IMT.

Durabilidad de la Infraestructura del Concreto Reforzado Expuesta a Diferentes Ambientes Urbanos de México, Publicación Técnica n° 292 IMT.

E. Becker, 2000, “Comportamiento del Hormigón estructural Durante su vida de servicio”, CFP N° 407 Mar del Plata UOCRA _ CURSO.

E. Becker, 2002, Seminario sobre Patologías Habituales en el Hormigón.

E. Becker, 2003, .Seminario sobre Durabilidad del Hormigón.

E. F. Irassar, 2001, “Ataque Químico al hormigón”. AATH-Durabilidad del Hormigón Estructural.

F. González, G. Fajardo, G. Arliguie, C. Juárez, G. Escadeillas, 2008, “REALCALINIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DE CONCRETO REFORZADO CARBONATADO UTILIZANDO ELECTROLITOS DE K_2CO_3 Y Na_2CO_3 ”, XVII International Materials Congress 2008, S15-7.

Fernández Luco, L. (2000), “Durabilidad de las estructuras: corrosión inducida por el ión cloruro”, Cemento, pp. 12-16; Diciembre 2000.

Fundación ICA, “Curso Taller del Concreto”, 22 de marzo del 2000.

GEHO (1993), “Durabilidad de estructuras de hormigón - Guía de diseño C.E.B.”, Grupo Español del Hormigón, Boletín N° 12; Octubre 1993.

Historia del cemento. www.cessa.com.sv/prod.asp?id=59&p=57

Historia del concreto. www.monografias.com/trabajos/histoconcreto.

Holcim Apasco, “Curso Básico de Tecnología del Concreto”, diciembre 2007.

http://es.wikipedia.org/wiki/Difracci%C3%B3n_de_rayos_X

<http://html.rincondelvago.com/analisis-de-calidad-del-hormigon-madera-y-bloques>.

http://www.canacem.org.mx/la_camara_cifras.htm,

<http://www.imcyc.com/ct2007/dic07/ingenieria.htm>

<http://www.imcyc.com/revista/1998/nov/durabilidad.htm>

http://www.rpsqualitas.es/documentacion/downloads/instrumental/tecnicas_de_difraccion_de_rayos_x.pdf

http://www.uclm.es/area/ing_rural/Normativa/EHE08/Cap%C3%ADtuloVII_Durabilidad.pdf

http://www.uned.es/cristamine/crist_opt/cropt_mrc.htm

IMCYC, 2008, “Determinación de la resistencia a flexión del concreto”, Selección coleccionable N°16, “El concreto en la obra, problemas causas y soluciones”, diciembre 2008.

IMCYC, 2009, “Determinación de la resistencia a flexión del concreto”, Selección coleccionable N°16, “El concreto en la obra, problemas causas y soluciones”, diciembre 2008.

J. Calavera, 1996, “Patología de estructuras de Hormigón armado y pretensado”, INTEMAC, Madrid España.

J. R. Miro Recasens, “Metodología para la caracterización de los ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro.” Tesis capítulo 4, Escuela Técnica superior de ingenieros de caminos canales y puertos de Madrid, Marzo 1994.

K. Tuutti, 1982, “Corrosion of steel in concrete”, CIB, Research report 4, Stockholm.

Klaric, 2001, “Fisuración y ataques físicos al hormigón, AATH- Durabilidad del Hormigón estructural.

Kumar Metha, 2002, Greening of the Concrete Industry for sustainable development, Concrete International Magazine, July 2002, pp. 23

Le Borgne, Velásquez - Mejía, Gamboa, Martínez, “BIODETERIORATION OF CONCRETE IN THE DEEP SEWAGE SYSTEM OF MEXICO CITY “, XVII International Materials Congress 2008, S6-38.

Mather, K. y B. Mather, "Reflections on Concrete Durability and on International Conference on Durability"., *Concrete Durability / Proceedings of the Katharine and Bryant Mather International Symposium*, SP-100, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 1-9.

Normas de Construcción de la administración pública del Distrito Federal “Calidad de los materiales para obra Civil Materiales Básicos”, 1 de mayo de 2008.

Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal 2004, Sección Concretos.

Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal 2004, Sección Concretos.

normas.imt.mx/NORMAS/02%20Estructuras/02%20Mat%20Concreto%20Hid/M-MMP-2-02-058-04.pdf

normas.imt.mx/NORMAS/02%20Estructuras/02%20Mat%20Concreto%20Hid/M-MMP-2-02-059-04.pdf

normas.imt.mx/NORMAS/02%20Estructuras/02%20Mat%20Concreto%20Hid/M-MMP-2-02-058-04.pdf

normas.imt.mx/NORMAS/02%20Estructuras/02%20Mat%20Concreto%20Hid/M-MMP-2-02-059-04.pdf

normas.imt.mx/NORMATIVA/02%20Estructuras/02%20Mat%20Concreto%20Hid/N-CMT-2-02-005-04.pdf

P. Castro-Borges, P. Helene, 2007, “Service Life of Reinforced Concrete Structures. New Approach”, ECS Transactions, Vol. 3, No. 13, ISBN 978-1-56677-540-3, pp. 9-14.

PCA, Boletín de Ingeniería EB201. “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, 2004.

Rick Montani, 2000, “La carbonatación, enemigo olvidado del concreto”, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A. C., Revista Construcción y Tecnología, México.

Rodríguez Reyna S.L., Miranda Vidales J.M., Gaona Tiburcio C., Narváez Hernández L, Flores Martínez E., 2008, “EFECTOS OCASIONADOS EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO (ECA), POR LA APLICACIÓN DE DIFERENTES DENSIDADES DE CORRIENTE AL REALIZAR UNA

EXTRACCIÓN ELECTROQUÍMICA DE CLORUROS (EEC)”, XVII International Materials Congress 2008, S15-P13.

SCT, Publicación Técnica No. 292, “Durabilidad de la Infraestructura de Concreto Reforzado Expuesta a Diferentes Ambientes Urbanos de México”, Raquel López Celis, Andrés A. Torres Acosta, Miguel Martínez Madrid. 2006.

Specimens.

Trocónis de Rincón Oladis y miembros de la red DURAR.”Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. CYTED, Tercera Edición, Maracaibo, Venezuela 2000 pp. 13-14, 21, 38-40.

UNE 112-011-94, “Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio”, Norma Española.

United States Geological Survey (USGS), Minerals Information, Minerals Yearbooks and Mineral Commodity Summaries for cement at <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>

www.arqhys.com/resistencia-concreto.html

www.arqhys.com/resistencia-concreto.html

www.monografias.com

www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP16es.pdf

www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP16es.pdf

www.scielo.cl/fbpe/img/ric/v24n1/art043.jpg&imgrefurl=http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=3DS071850732009000100004%26script=3Dsci_arttext&usg=__7IK_EKYDRAvDP2pNfVWJ8aai1zs=&h=390&w=450&sz=12&hl=es&start=2&um=1&itbs=1&tbnid=lg5cgUeHE6afrM:&tbnh=110&tbnw=127&prev=/images%3Fq%3Dprueba%2Bde%2Bcorte%2Ben%2Bhormigon%26um%3D1%26hl%3Des%26lr%3D%26sa%3DG%26rlz%3D1W1SNNT_esMX377MX377%26tbs%3Disch:1

www.sct.gob.mx

www.sct.gob.mx