



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS PROFESIONAL

"Elaboración de un concreto sustentable con adición mineral
de alta temperatura como modificado de su comportamiento
físico- mecánico"

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

Ingeniero civil

PRESENTA:

Ramón Antonio Figueroa Carranza

ASESOR:

Dr. Hugo Luis Chávez García

COASESOR:

Ing. Mauricio Arreola Sánchez

Ing. Noel Díaz Gonzales

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

Morelia Michoacán, Julio de 2013



RESUMEN.

En el presente trabajo se utilizaron materiales provenientes de la demolición de la torre del Hospital General No.1 del Instituto Mexicano del Seguro Social, de Morelia, Michoacán, México, de la cual, mediante proceso de trituración posterior, se obtuvo material grueso y fino que se sustituyó en un 100% y 40% a la grava y la arena tradicional utilizada en la región de Morelia, respectivamente, en la elaboración de un nuevo concreto hidráulico, realizado así con agregados producto de la demolición de la estructura mencionada. Después de la caracterización de los materiales, se colaron cilindros de 10x20cm (sin y con adición de Metacaolín), realizando pruebas destructivas y no destructivas. Además se elaboraron vigas de 15x60cm también sin y con adición de Metacaolín, las cuales fueron probadas para determinar el módulo de ruptura. Se realizaron también cilindros de 5x10cm para la prueba de ataque por sulfatos. Por medio de estas pruebas se evalúa la factibilidad del uso del concreto reciclado como sustitución parcial del agregado natural, en la elaboración de un concreto hidráulico.

ABSTRACT.

This investigation shows the use of materials that were collected from the tower No.1 General Hospital of the Mexican Institute of Social Security, Morelia, Michoacán, Mexico, which had a crushing process, with this process it was obtained coarse and fine material; this material was replaced in 100% and 40% of the traditional gravel and sand used in the Morelia region, respectively, for the elaboration of a new hydraulic concrete, made with aggregate product of the demolition of the structure mentioned.. After the characterization of the materials we made cylinders of 10x20cm (base sample and samples with an addition of Metakaolin), _____. In addition, beams of 15x60cm were made (base sample and samples with an addition of Metakaolin), these beams were tested to rupture modulus. By those test was evaluated the feasibility of using recycled concrete as a replacement for natural aggregate in the preparation of a hydraulic concrete.

OBJETIVO.

Elaborar un concreto sustentable con un aditivo mineral Metacaolín (MK) como modificador de su comportamiento Físico-Mecánico. En base a la sustitución de materiales pétreos por agregados triturados de demolición provenientes de obras civiles que cumplieron su vida útil o que en lo contrario fueron dañadas, y con ello contribuir parcialmente con la producción de residuos.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

A mis padres por confiar en mí y apoyarme en todo proyecto sin importar lo descabellado que parezca, por sus conocimientos y lecciones de vida.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

AGRADECIMIENTOS.

A mis padres **María de Lourdes Carranza Arteaga** y **Ramón Figueroa Pérez**. A mi hermana **Itzel Figueroa Carranza** por estar conmigo y brindarme su apoyo incondicional. Por sus enseñanzas y vivencias compartidas, por ser las personas que más admiro.

A mi asesor **Dr. Hugo Luis Chávez García** por su apoyo durante la realización de la investigación, por compartir sus conocimientos y tener la gran disposición sin importar días y horarios.

A la Dra. **Elia Mercedes Alonso Guzmán**, **M.A Wilfrido Martínez Molina** y **M.I. Cindy Lara Gómez** por su apoyo y motivación al realizar el trabajo de investigación.

A mis compañeros y amigos de proyecto de tesis **Elizabeth Contreras Marín** y **Arturo Zalapa Damián** por la buena disposición, su ayuda y el buen ambiente de trabajo durante la investigación.

Al personal del laboratorio de materiales "Ing. Luis Silva Rúelas" por su colaboración y tolerancia durante el tiempo en que se desarrolló la investigación.

Al **Instituto de Investigaciones Metalúrgicas** de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por permitirnos trabajar en sus instalaciones en los inicios del proyecto.

Al **IMSS** por facilitarnos la obtención del material para el desarrollo del proyecto de investigación.

Al Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán, por el apoyo brindado para desarrollar este proyecto.

Y por último pero no menos importante a mis mejores amigos: Ivan, Sergio, Salvador, Arturo, Isaac, Luis, Mary, Karla y Shadia por su cariño, apoyo y porque sin importar a donde vaya sé que puedo contar con ellos incondicionalmente.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

"Cuando te sientas al límite a punto del colapso, grita, llora, pero que no sea lo último que hagas" ..¡¡Levántate!!

RAFC

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

ÍNDICE.

| | |
|--|-----|
| RESUMEN. | I |
| ABSTRACT..... | II |
| OBJETIVO..... | III |
| AGRADECIMIENTOS..... | V |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 2 |
| 2.1 CONCRETO..... | 2 |
| 2.1.1 <i>Ventajas y desventajas del concreto</i> | 3 |
| 2.1.2 <i>Durabilidad</i> | 4 |
| <i>Acciones químicas</i> | 5 |
| <i>Acciones físicos</i> | 6 |
| <i>Acciones Mecánicas y biológicas</i> | 6 |
| <i>Permeabilidad</i> | 6 |
| <i>Permeabilidad al agua del concreto</i> | 7 |
| <i>Permeabilidad al aire y al vapor</i> | 7 |
| <i>Carbonatación</i> | 8 |
| <i>Ataque de sulfatos sobre el concreto</i> | 8 |
| <i>Efectos del agua de mar sobre el concreto</i> | 9 |
| 2.1.3 <i>Trabajabilidad</i> | 9 |
| 2.1.4 <i>Tipos de concreto</i> | 10 |
| 2.2 CEMENTO PORTLAND..... | 11 |
| 2.2.1 <i>Cemento portland en la actualidad</i> | 12 |
| 2.2.2 <i>Tipos de cemento portland</i> | 14 |
| 2.2.3 <i>Clasificación de acuerdo a la ASTM C 150</i> | 15 |
| 2.2.4 <i>Clasificación de acuerdo a la NMX- C414- ONNCCE</i> | 15 |
| 2.3 AGREGADOS..... | 16 |
| 2.3.1 <i>Propiedades químicas de los agregados</i> | 17 |
| 2.3.2 <i>Propiedades físicas</i> | 17 |
| 2.3.3 <i>Propiedades mecánicas</i> | 18 |
| 2.4 AGUA..... | 19 |

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

| | |
|--|-----------|
| 2.5 ADITIVOS PARA CONCRETO..... | 20 |
| 2.6 METACAOLÍN (MK)..... | 23 |
| 2.6.1 Usos del metacaolín..... | 24 |
| 2.6.2 Ventajas del uso del metacaolín..... | 24 |
| 2.7 CONCRETO RECICLADO..... | 24 |
| 2.7.1 Proceso de obtención del RCA..... | 26 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 28 |
| 3.1 RECOLECCIÓN DEL MATERIAL..... | 28 |
| 3.2 PROCESO DE TRITURACIÓN..... | 28 |
| 3.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL..... | 29 |
| 3.4 ELABORACIÓN DE ESPÉCIMENES..... | 29 |
| 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL..... | 30 |
| 4.1 PRUEBAS REALIZADAS AL AGREGADO PÉTREO FINO..... | 30 |
| 4.1.1 Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas cuarteo..... | 30 |
| 4.1.2 Humedad actual en arenas..... | 32 |
| 4.1.3 Humedad superficial y humedad de absorción en arenas..... | 34 |
| 4.1.4 Densidad de la arena..... | 36 |
| 4.1.5 Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (M.V.S.S.)..... | 38 |
| 4.1.6 Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (M.V.S.V.)..... | 39 |
| 4.1.7 Análisis granulométrico en arena o Granulometría..... | 41 |
| 4.2 PRUEBAS REALIZADAS AL AGREGADO GRUESO..... | 44 |
| 4.2.1 Muestreo en gravas..... | 44 |
| 4.2.2 Cuarteo en gravas..... | 45 |
| 4.2.3 Humedad actual en gravas..... | 46 |
| 4.2.4 Humedad de absorción en gravas..... | 47 |
| 4.2.5 Densidad en gravas..... | 49 |
| 4.2.6 Determinación de la masa volumétrica seca y suelta en gravas (M.V.S.S.)..... | 50 |
| 4.2.7 Determinación de la masa volumétrica seca y varillada en gravas (M.V.S.V.)..... | 52 |
| 4.2.8 Análisis granulométrico en gravas o Granulometría..... | 53 |
| 4.3 MÉTODO DEL ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE)..... | 55 |
| 4.4 PRUEBAS AL CONCRETO FRESCO..... | 58 |
| Prueba de revenimiento..... | 58 |

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

| | |
|---|-----------|
| 4.5 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES | 59 |
| 4.5.1 <i>Elaboración de cilindros de concreto de 10 cm x 20 cm</i> | 59 |
| 4.5.2 <i>Elaboración de vigas de concreto de 15 cm x 60 cm</i> | 61 |
| 4.5.3 <i>Elaboración de cilindros de concreto de 5 cm x 10 cm</i> | 62 |
| 4.6 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS AL CONCRETO ENDURECIDO..... | 63 |
| 4.6.1 <i>Prueba estándar para determinar la velocidad de propagación de pulso a través del concreto</i> ... | 63 |
| 4.6.2 <i>Frecuencia de resonancia</i> | 66 |
| 4.6.3 <i>Resistividad eléctrica</i> | 68 |
| 4.7 PRUEBAS DESTRUCTIVAS AL CONCRETO ENDURECIDO | 70 |
| 4.7.1 <i>Resistencia a la Compresión Simple en Cilindros de Concreto</i> | 70 |
| 4.7.2 <i>Resistencia a la Flexión del Concreto</i> | 72 |
| 4.7.3 <i>Módulo de elasticidad Estático</i> | 74 |
| 4.8 ATAQUE POR SULFATOS..... | 76 |
| 5. RESULTADOS..... | 79 |
| 5.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO FINO | 79 |
| 5.1.1 <i>Humedad de absorción</i> | 79 |
| 5.1.2 <i>Densidad de la arena</i> | 79 |
| 5.1.3 <i>Masa Volumétrica Seca y Suelta (M.V.S.S)</i> | 79 |
| 5.1.4 <i>Masa Volumétrica Seca y Varillada (MVSV)</i> | 79 |
| 5.1.5 <i>Análisis granulométrico en arenas (granulometría)</i> | 80 |
| 5.2 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADO FINO RECICLADO Y FINO NATURAL..... | 80 |
| 5.3 ELABORACIÓN DE CILINDROS DE PRUEBA..... | 82 |
| 5.4 CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO..... | 83 |
| 5.4.1 <i>Humedad de absorción</i> | 83 |
| 5.4.2 <i>Densidad en gravas</i> | 83 |
| 5.4.3 <i>Masa volumétrica Seca y Suelta de una grava (M.V.S.S)</i> | 83 |
| 5.4.4 <i>Masa volumétrica Seca y Varillada de una grava (M.V.S.V)</i> | 84 |
| 5.4.5 <i>Análisis granulométrico en gravas (granulometría)</i> | 84 |
| 5.5 PROPORCIONAMIENTO POR EL MÉTODO DEL ACI..... | 84 |
| 5.6 PRUEBAS AL CONCRETO FRESCO..... | 85 |
| 5.7 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS | 85 |
| 5.7.1 <i>Velocidad de propagación de pulso</i> | 85 |
| 5.7.2 <i>Frecuencia de resonancia</i> | 86 |
| 5.7.3 <i>Resistividad Eléctrica</i> | 87 |

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

| | |
|---|-----------|
| 5.7.4 Modulo de elasticidad dinámico | 87 |
| 5.8 PRUEBAS DESTRUCTIVAS..... | 88 |
| 5.8.1 Resistencia a la compresión simple..... | 88 |
| 5.8.2 Resistencia a la flexión | 89 |
| 5.8.3 Módulo de elasticidad estático | 89 |
| 5.8.4 Ataque por sulfatos..... | 90 |
| 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 93 |
| 6.1 AGREGADO GRUESO RECICLADO..... | 93 |
| 6.2 AGREGADO FINO RECICLADO | 93 |
| 6.2.1 Pruebas destructivas a la mezcla sustitución agregado fino reciclado por arena natural..... | 94 |
| 6.3 PRUEBAS AL CONCRETO FRESCO | 94 |
| 6.3.1 Revenimiento | 94 |
| 6.4 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS..... | 95 |
| 6.4.1 Resistividad eléctrica..... | 95 |
| 6.4.2 Velocidad de pulso ultrasónico | 95 |
| 6.5 PRUEBAS DESTRUCTIVAS AL CONCRETO ENDURECIDO..... | 96 |
| 6.5.1 Compresión simple en cilindros de 10 cm x 20cm | 96 |
| 6.5.2 Módulo de ruptura en vigas prismáticas de 15cm x 60cm..... | 96 |
| 6.5.3 Ataque por sulfatos..... | 96 |
| 7. CONCLUSIONES..... | 97 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA | 98 |

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Índice tablas.

| | |
|--|----|
| <i>Tabla 1. Componentes principales del cemento portland</i> ----- | 14 |
| <i>Tabla 2. Clasificación de los cementos de acuerdo a su uso</i> ----- | 15 |
| <i>Tabla 3. Clasificación de los cementos de acuerdo a su tipo</i> ----- | 15 |
| <i>Tabla 4. Análisis Granulométrico en arenas</i> ----- | 43 |
| <i>Tabla 5. Análisis Granulométrico en gravas</i> ----- | 54 |
| <i>Tabla 6. Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción</i> ----- | 56 |
| <i>Tabla 7. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado Agua, kg/m³ concreto para TMG, mm.</i> ----- | 56 |
| <i>Tabla 8. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.</i> ---- | 57 |
| <i>Tabla 9. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.</i> ----- | 57 |
| <i>Tabla 10. Revenimientos especificados</i> ----- | 59 |
| <i>Tabla 11. Tolerancia del revenimiento</i> ----- | 59 |
| <i>Tabla 12. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica</i> ----- | 66 |
| <i>Tabla 13. Rangos aproximados de frecuencia de resonancia para especímenes de concreto cilíndricos y prismáticos (Jones, 1962).</i> ----- | 68 |
| <i>Tabla 14. Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (Durar,2000).</i> ----- | 69 |
| <i>Tabla 15. Humedad de absorción de arena reciclada.</i> ----- | 79 |
| <i>Tabla 16. Densidad de la arena reciclada.</i> ----- | 79 |
| <i>Tabla 17. Masa Volumétrica Seca y Suelta del agregado fino reciclado.</i> ----- | 79 |
| <i>Tabla 18. Masa Volumétrica Seca y Varillada del agregado fino reciclado.</i> ----- | 79 |
| <i>Tabla 19. Granulometría de arena reciclada.</i> ----- | 80 |
| <i>Tabla 20. Granulometría arena de río.</i> ----- | 81 |
| <i>Tabla 21. Caracterización de la sustitución agregado natural y concreto reciclado.</i> ----- | 82 |
| <i>Tabla 22. Resistencia a diferentes edades de especímenes de prueba.</i> ----- | 83 |
| <i>Tabla 23. Absorción en agregado grueso reciclado.</i> ----- | 83 |
| <i>Tabla 24. Densidad agregado grueso reciclado.</i> ----- | 83 |
| <i>Tabla 25. Masa Volumétrica Seca y Suelta grava reciclada.</i> ----- | 83 |
| <i>Tabla 26. Masa Volumétrica Seca y Varillada de la grava reciclada.</i> ----- | 84 |
| <i>Tabla 27. Granulometría grava reciclada.</i> ----- | 84 |
| <i>Tabla 28. Límites granulométricos del agregado grueso ,en porcentaje que pasa.</i> ----- | 84 |
| <i>Tabla 29. Datos para proporcionamiento.</i> ----- | 84 |
| <i>Tabla 30. Volumen y peso por metro cubico</i> ----- | 85 |
| <i>Tabla 32. Velocidad de propagación de pulso.</i> ----- | 85 |

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

| | |
|--|----|
| Tabla 31. Prueba de revenimiento.----- | 85 |
| Tabla 33. Frecuencia de resonancia. ----- | 86 |
| Tabla 34. Resistividad Eléctrica----- | 87 |
| Tabla 35. Módulo de elasticidad dinámico. ----- | 87 |
| Tabla 36. Resistencia a la compresión. ----- | 88 |
| Tabla 37. Resistencia a la flexión Metacaolín y Testigos. ----- | 89 |
| Tabla 38. Modulo de elasticidad estático. ----- | 89 |
| Tabla 39. Masa final de cada ciclo ataque por sulfatos. ----- | 90 |
| Tabla 40. Resistencia a la compresión (ataque por sulfatos)----- | 91 |

Índice figuras.

| | |
|---|----|
| Figura 1. Fabricación del cemento fase 1. ----- | 13 |
| Figura 2. Fabricación del cemento fase 2. ----- | 14 |
| Figura 3. Recolección del material.. ----- | 28 |
| Figura 4. Trituradora empleada en el procesamiento del material; Figura 2a. Agregado obtenido en el proceso de trituración. ----- | 28 |
| Figura 5. Cuarteo con divisor. ----- | 31 |
| Figura 6. cuarteo con palas. ----- | 31 |
| Figura 7. Secado de material con parrilla. ----- | 33 |
| Figura 8. Peso de la masa seca agregado fino. ----- | 33 |
| Figura 9. Arena reciclada saturada. ----- | 34 |
| Figura 10. prueba de secado superficial con molde troncocónico. ----- | 35 |
| Figura 11. Prueba de densidad en arenas con picnómetro. ----- | 37 |
| Figura 12. Vaciado de la arena al recipiente.; 10a. Enrasado del recipiente (M.V.S.S). ----- | 39 |
| Figura 13. Pesado de agregado fino reciclado (M.V.S.S). ----- | 39 |
| Figura 14. Varillado de la arena reciclada (M.V.S.V) ----- | 40 |
| Figura 15. Pesado de la Masa varillada de la arena reciclada (M.V.S.V). ----- | 41 |
| Figura 16. Ensayo granulométrico en arena. ----- | 42 |
| Figura 17. Cuarteo en gravas. ----- | 45 |
| Figura 18. Saturado de grava. ----- | 48 |
| Figura 19. Secado del agregado grueso con la parrilla ----- | 48 |
| Figura 20. Densidad en gravas. ----- | 49 |
| Figura 21. Tendido del material grueso reciclado. ----- | 51 |
| Figura 22. Llenado del recipiente (M.V.S.S). ----- | 51 |

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

| | |
|--|----|
| Figura 23. Varillado del agregado grueso. | 52 |
| Figura 24. Cribado del agregado grueso. | 53 |
| Figura 25. Prueba de revenimiento. | 58 |
| Figura 26. Elaboración de cilindros de 10x20cm. | 60 |
| Figura 27. Moldes para vigas 15x60cm. | 61 |
| Figura 28. Elaboración de especímenes cilíndricos 5x10cm. | 62 |
| Figura 29. Aparato de medición de velocidad de pulso ultrasónico. | 63 |
| Figura 30. Medición de la resistividad. | 70 |
| Figura 31. Prueba de resistencia a la compresión. | 72 |
| Figura 32. Prueba de resistencia a la flexión. | 74 |
| Figura 33. Determinación del módulo de elasticidad estático. | 76 |
| Figura 34. Preparación de solución de sulfato de sodio. | 77 |
| Figura 35. Especímenes sumergidos y en horno para la determinación de los ataques por sulfatos. | 78 |
| Figura 36. Granulometría de arena reciclada. | 80 |
| Figura 37. Granulometría arena de río. | 81 |
| Figura 38. Resistencia a la compresión 7,14 y 28 días (cilindros de prueba). | 82 |
| Figura 39. Velocidad de propagación de pulso. | 86 |
| Figura 40. Frecuencia de resonancia. | 86 |
| Figura 41. Resistividad eléctrica. | 87 |
| Figura 42. Módulo de elasticidad dinámico. | 88 |
| Figura 43. Resistencia a la compresión. | 88 |
| Figura 44. Resistencia a la flexión. | 89 |
| Figura 45. Módulo de elasticidad estático. | 90 |
| Figura 46. Masa final de cada ciclo ataque por sulfatos. | 90 |
| Figura 47. Resistencia a la compresión ataque por sulfatos. | 91 |
| Figura 48. Prueba a compresión simple primer ciclo sulfatos (cilindros 5cm x 10cm). | 91 |
| Figura 49. Ataque por sulfatos segundo ciclo. (Izquierda Metacaolín, derecha Testigo). | 92 |
| Figura 50. Ataque por sulfatos tercer ciclo (Izquierda Metacaolín, derecha Testigo). | 92 |
| Figura 51. Ataque por sulfato cuarto ciclo (izquierda Metacaolín, derecho testigo). | 92 |

1. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad el desarrollo urbano y la necesidad de nuevas obras de ingeniería, mantenimiento y remplazo de la infraestructura que ha cumplido su vida útil generan una demanda de recursos de la construcción significativas, lo que producen enormes cantidades de material de desperdicio y escombros que son arrojados a sitios destinados a este propósito así como: lotes, terrenos abandonados, tiraderos municipales; en consecuencia se aumenta el deterioro del paisaje y contaminación visual (Serrano y Pérez, 2011). Lo anterior se puede neutralizar al utilizar ese material en sustitución del material pétreo para la elaboración de nuevos materiales de construcción, en nuestro caso un nuevo concreto.

Hoy en día se ha adquirido mayor importancia acerca de los conceptos de ecología y medio ambiente, en consecuencia la industria de la construcción se ve afectada ya que algunas actividades involucradas pueden causar daños e incluso irreversibles a la ecología. Una tendencia actual es el reciclaje de residuos de construcción, en nuestro país hablar de reciclaje de concreto es hablar de una acción nula. Anualmente se producen 20 millones de metros cúbicos (Cruz y Velázquez, 2004).

Una manera de reutilizar el concreto desecho de la demolición es procesar los bloques para obtener materiales granulares fino y grueso (arena y grava), que pueda ser sustituto de los agregados naturales en la elaboración de un nuevo concreto.

En la presente investigación se obtuvo desechos de concreto para la generación de agregados grueso y fino, los cuales se sustituyeron respectivamente en su totalidad y parcialmente en la elaboración de un nuevo concreto. Además se realizó una segunda mezcla y se adicionó metacaolín con el propósito de modificar su comportamiento físico-mecánico. A los especímenes realizados con dichas mezclas se le hicieron pruebas destructivas y no destructivas, para ver si puede ser factible su utilización como un concreto de alta resistencia.

2. MARCO TEÓRICO

Conforme el ser humano fue asentándose en un solo sitio nació la necesidad de espacios de vivienda, adoptando como vivienda cavernas esculpidas por el paso del tiempo; con ello en la búsqueda de la comodidad, seguridad y un espacio mejor para vivir se fueron desarrollando nuevos materiales.

El empleo de materiales cementantes es muy antiguo, los egipcios ya utilizaban yeso impuro calcinado. Los griegos y romanos utilizaban ceniza calcinada y, posteriormente mezclaron cal con agua, arena y piedra triturada. Estos fueron los primeros concretos de la historia.

Muchas personas creen que el concreto fue inventado por los romanos; algunas estructuras romanas aun están en muy buena forma e incluso algunas están en uso, sin embargo, se han descubierto más pruebas de que, incluso antes de los romanos, los griegos y fenicios utilizaron concreto en una escala menor. No obstante después de la caída del imperio romano bajo la presión de los barbaros, fue necesario esperar hasta finales del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX para ver nuevos intereses en concreto y aglutinantes. Este nuevo interés dio lugar a la concesión de patentes sobre cemento portland por Joseph Aspdin. (Claude Aïtcin,2007)

2.1 Concreto

Es un material mezclado de dos componentes: agregados y pasta. La segunda está compuesta por cemento portland y agua, une los agregados (grava y arena) creando un masa similar a una roca.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Algunos autores definen al concreto:

Según Martínez (2007) lo define como una roca artificial hecha por el hombre. Elaborado con cemento, agregados gruesos y fino, agua y en ocasiones aditivos.

Es una mezcla básicamente de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une a los agregados: arena, grava o piedra triturada, para formar una masa semejante a una roca (Kosmatkha y Panarese, 1992).

En sus inicios la primera exigencia planteada fue la de su resistencia a la compresión, así como satisfacer la resistencia al agua; posteriormente al elaborar concreto armado otros aspectos adicionales fueron tomados en cuenta como el módulo de elasticidad, la estabilidad dimensional, la tenacidad etc.

Con la llegada de la década de los 70 vinieron a aparecer síntomas de deterioro en las estructuras hechas con concreto armado a pesar de que se le había considerado como un material invulnerable fue ahí cuando se intensificaron los estudios sobre durabilidad.

2.1.1 Ventajas y desventajas del concreto

Hablar del concreto es hablar de la historia y el desarrollo del hombre, con el transcurso del tiempo fue desarrollando métodos de elaboración, aplicación y usos. Por lo antes mencionado es que aun tiempo después de su descubrimiento, hoy en día se puede considerar como rey universal de los materiales de construcción. Moreno (2012) presenta ventajas y desventajas del concreto:

Ventajas:

- Ofrece bajo costo

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

- Debido al carácter plástico que posee fresco, permite conseguir elementos estructurales de cualquier forma
- Posee una gran resistencia al agua sin un serio deterioro a diferencia de la madera y el acero.
- Elevada resistencia mecánica a la compresión y, aunque posee menor resistencia a la tracción, permite aumentarla embebiendo acero.
- Está formado por materiales abundantes y baratos mismos que podemos encontrar en cualquier parte de nuestro planeta.

Desventajas:

- Es un material pesado con relación peso/resistencia elevada.
- Tiene anisotropía.
- Sensibilidad a agentes agresivos físicos y químicos.
- Tiene baja resistencia a la flexión.
- Es sensible a cambios volumétricos por contracción debidos a acciones térmicas, hidráulicas o mecánicas, esto genera agrietamientos en su volumen.

2.1.2 Durabilidad

El comité 201 del ACI define la durabilidad del concreto con cemento portland como "La capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, es decir, el concreto durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio, cuando se exponga a su medio ambiente".

Las propiedades de los materiales se verán afectados con el tiempo esto debido al contacto de su microestructura con el ambiente que lo rodea. Los procesos que pueden provocar una baja en la durabilidad del concreto están en dependencia de la calidad de los materiales, forma de dosificación, fabricación y mantenimiento. La durabilidad está íntimamente relacionada con la compacidad, porosidad y su permeabilidad. Se puede decir

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

que de estas propiedades depende en gran medida la vida útil de una construcción de concreto armado.

Las características del concreto y su deterioro son dadas debido de forma general a acciones combinadas de distintos agentes agresivos, los cuales pueden clasificarse en:

Acciones químicas

Al ser agentes muy agresivos para el concreto se debe de tomar mucha precaución desde la concepción del proyecto de una construcción. Este tipo de agentes influyen negativamente en la durabilidad del concreto se consideran como:

- Corrosión del acero embebido en el concreto.
- Lixiviación de la pasta de cemento.
- Reacciones expansivas que incluyen el ataque de sulfato.
- Reacción álcali-agregado.

De acuerdo a lo antes mencionado los agentes químicos que provocan deterioro en el concreto son: el aire y otros gases (en ambiente natural o contaminada), aguas agresivas (puras de mar, industriales, negras agrícolas, negras urbanas), productos químicos orgánicos e inorgánicos y suelos.

La reacción de la portlanita $[Ca(OH)_2]$ con el CO_2 producen una disminución en el pH del concreto, si la basicidad del concreto se ve afectada, se disminuye la protección que este le da al acero posibilitando el fácil ataque de otros agentes; esta acción transforma el acero en óxido de hierro por efectos de la corrosión, en este proceso es común que aparezcan manchas, agrietamientos y fisuras. El aumento en la corrosión del acero embebido en el concreto puede presentar el fenómeno de cristalización que es la disminución de la resistencia del acero llevándola a este a la fractura. Los procesos

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

degradantes antes mencionados conducen en todos los casos a la baja durabilidad o al desplome de la estructura en caso extremo (O' Reilly, 2007).

Acciones físicos

Los efectos físicos más comunes que afectan la durabilidad son: el agrietamiento debido a la presión de la cristalización de las sales en los poros, la exposición a temperaturas extremas (heladas y fuego), así como el desgaste de la superficie.

Acciones Mecánicas y biológicas

Generalmente son de las que más conocimiento se tiene. Estas acciones están dadas por cargas, sobrecargas, impactos, vibraciones etc. Lo anterior puede estar provocadas por efectos naturales como viento y agua o por acciones artificiales que pueden afectar el comportamiento futuro del elemento estructural. Todos estos aspectos deben ser consideradas en el proyecto. Las acciones biológicas son generados por microorganismos, fungicidas y bacterias.

Permeabilidad

Neville (1998) define la permeabilidad como la facilidad con la cual los líquidos y los gases viajan a través del concreto.

Desde el punto de vista de la durabilidad es importante lograr una baja permeabilidad en el tiempo menor posible; una mezcla con baja relación agua/cemento es de gran ventaja porque la etapa en la cual los capilares se segmentan se logra en un periodo más corto de curado. El uso de un agregado más poroso aumenta la permeabilidad del concreto, al igual que una interrupción del curado de humedad por un periodo de secado también provoca un incremento en la permeabilidad. Por otro lado al curar el concreto a

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

vapor es por lo común mayor que la del concreto curado por humedad , excepto para aquel sujeto a un largo ciclo de temperatura de curado.

Permeabilidad al agua del concreto

La pasta de cemento endurecido se compone de partículas conectadas por solo una fracción pequeña de la superficie. Razón por la cual, una parte del agua está dentro del capó de fuerza de la fase solida (está absorbida). A pesar de la alta viscosidad presentada por esta agua, es móvil y toma parte del flujo de agua en el concreto. La permeabilidad no depende solamente de su porosidad, sino también del tamaño, distribución, forma, y continuidad de los poros.

La permeabilidad de la pasta de cemento varia con el proceso de hidratación. La permeabilidad disminuye rápidamente con el progreso de hidratación debido a que los espacios anteriormente ocupados por agua son llenados por la lechada al endurecerse. En una pasta madura, la permeabilidad depende del tamaño, forma y concentración de gel y de si los poros capilares son o no discontinuos (Neville. 1999)

La permeabilidad además de los aspectos antes mencionados también se ve afectada por las propiedades del cemento. El empleo de un cemento grueso tiende a producir pasta de cemento endurecido con porosidad mayor que si se empleara un cemento más fino.

Permeabilidad al aire y al vapor

El aire, algunos gases y el vapor de agua pueden penetrar con gran facilidad dentro del concreto, este aspecto es importante respecto a la durabilidad sujeta a distintas condiciones de exposición. Es de gran interés en estructuras tales como tanques de aguas negras y purificadores de gas, y en recipientes de presión en reactores nucleares.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Carbonatación

El estudio del comportamiento en el concreto se basa generalmente suponiendo que el medio ambiente es aire que no reacciona con la pasta del cemento hidratado, sin embargo, la realidad es que en el aire hay CO_2 , el cual en presencia de la humedad reacciona con el cemento hidratado.

La carbonatación no causa deterioro del concreto pero tiene efectos importantes, uno de ellos es la contracción por carbonatación. Con respecto a la durabilidad, la carbonatación reduce el pH del agua en los poros en la pasta de cemento portland endurecido de valores entre 12.6 y 13.5 hasta 9. La reducción del pH influye en que el acero embebido en la pasta de cemento en hidratación forma una capa de pasividad delgada de óxido que se adhiere al acero y da protección completa contra la reacción de oxígeno y agua; una disminución alcanza la cercanía de la superficie de acero de refuerzo, la película de óxido protectora es removida y da lugar a la corrosión(Neville,1999).

Ataque de sulfatos sobre el concreto

El ataque de los sulfatos por lo general comienza en los bordes y esquinas, seguido de grietas y astillamientos. Las sales sólidas no atacan al concreto, es cuando se disuelven que pueden reaccionar con la pasta de cemento hidratado. Los más comunes son los sulfatos de sodio, potasio, magnesio y calcio, presentados en el suelo o en el agua freática; de esta última normalmente son de origen natural, pero también pueden venir de fertilizantes o de efluentes industriales.

El ataque del sulfato ocasiona la formación de sulfato de calcio (yeso) y sulfoaluminato de calcio (estringita), ocupando ambos un mayor volumen que los componentes a los que remplazan, por lo tanto se expande y fractura el concreto endurecido, comúnmente se le llama expansión retrasada de etringita. La extensión del sulfato depende de su concentración y de la permeabilidad del concreto.

Efectos del agua de mar sobre el concreto

La exposición al agua del mar de un concreto puede estar sujeto a varias reacciones físicas y químicas. Esto incluye ataque químico, corrosión del acero de refuerzo, ataque de congelación y deshielo, exposición a la sal, etc. La intensidad de los ataques mencionados dependen de donde este localizado el concreto con respecto al nivel del mar. El agua marina no ataca expandiendo el concreto, Neville (1998) menciona que el yeso y la estringita son más solubles en soluciones de cloruro que en agua, por lo que no hay fractura sino un aumento en la porosidad y por consiguiente una disminución de la resistencia.

El concreto sometido a secado y humedad constantemente es atacado más severamente que el concreto que se mantiene inmerso. Un daño adicional es el causado por la ruptura del concreto que rodea el acero de refuerzo que se ha corroído debido a la acción electroquímica presentada por la absorción de sales.

2.1.3 Trabajabilidad

La trabajabilidad Steven et al (2004) como la facilidad de colocación, consolidación y acabado del concreto fresco y el grado que resiste a la segregación.

La ASTM C125 la define como la propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una cantidad mezclada de concreto fresco con una pérdida mínima de homogeneidad. Entiéndase por *manipular* las operaciones en la edad temprana de colocación, compactación y acabado.

La trabajabilidad adecuada para la buena colocación del concreto se controla por los métodos de colocación, tipo de consolidación y tipo de concreto; distintos tipos de colocación requieren diferentes grados de trabajabilidad.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Hay distintos factores que influyen en la trabajabilidad los cuales se muestran a continuación:

1. El método y duración de transporte.
2. Cantidad y características de los materiales cementantes.
3. Consistencia del concreto (revenimiento).
4. Tamaño, forma y textura superficial de los agregados (gruesos y finos).
5. Aire incluido.
6. Cantidad de agua.
7. Temperatura del concreto y del aire.
8. Aditivos.

La trabajabilidad es una propiedad clave que debe satisfacer el concreto. Sin importar la sofisticación del procedimiento de diseño de la mezcla y otras consideraciones como los costos: con ello, una mezcla que no puede colocarse fácilmente o compactarse totalmente, no podrá rendir la resistencia esperada y cumplir con las características de durabilidad (Steven et al, 2004).

2.1.4 Tipos de concreto

El concreto se puede clasificar en tres grandes categorías de acuerdo a su peso unitario:

- **Concreto de peso normal.** Es el concreto más común, contiene arena natural y grava o agregados de roca triturada, de peso aproximado 2400 kg/m^3 .
- **Concreto ligero.** Este término es utilizado en concretos que pesan menos de 1800 kg/m^3 . Se aplica donde se desea una relación más alta de resistencia contra peso; esto se lleva a cabo usando algunos agregados naturales o piropocados con densidad más baja.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

- **Concreto pesado.** Se utiliza en lugares de alta exposición a efectos físicos, químicos y mecánicos, como por ejemplo para escudos contra radiación. Se produce con agregados de alta densidad y generalmente pesa más de 3200 kg/m^3 .

La clasificación por resistencia se divide en tres categorías generales. Esta clasificación prevalece en Europa y otros países, no se practica en los Estados Unidos de América. Metha y Monteiro (1998) los clasifican en:

- **Concreto de baja resistencia.** Menos de 20 MPa (204 kg/m^2) de resistencia a la compresión.
- **Concreto de resistencia moderada.** De 20 a 40 MPa (204 a 408 kg/m^2) de resistencia a la compresión.
- **Concreto de alta resistencia.** Más de 40 MPa (408 kg/m^2) de resistencia a la compresión.

2.2 Cemento Portland

El cemento en general puede describirse como un material con propiedades adhesivas y cohesivas, las cuales le dan su capacidad de aglutinar. Los cementos que se utilizan en la fabricación de concretos tienen la capacidad de fraguar y endurecerse bajo o sumergidos en el agua, debido a que experimentan una reacción química con esta, por lo tanto, se denominan cementos hidráulicos. Dichos cementos están compuestos principalmente por silicatos y aluminatos de cal. (Neville, 1999)

En 1756, John Smeaton fue comisionado para reconstruir el faro de Eddystone, en Inglaterra, descubriendo que el mejor mortero se obtenía mezclando puzolana con caliza, lo que contenía una alta cantidad de material arcilloso; por lo que fue Smeaton el primero en conocer las propiedades químicas de la cal hidráulica. A partir de esto, se desarrollaron otros tipos de cementos hidráulicos, uno de ellos el "cemento romano" fabricado por James Parker calcinando caliza arcillosa que vinieron a culminar la patente del "cemento portland"

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

que obtuvo en 1824 Joseph Aspdin, un ladrillero, albañil y constructor de Leeds. Para 1845 se creó el prototipo del cemento moderno por Isaac Johnson, quien quemó una mezcla de arcilla y caliza hasta formar clinker, con lo que se produjo la reacción necesaria para formar un compuesto cementante. (Neville, 1999)

Para 1871, 500 barriles de cemento Portland Inglés fueron enviados a EUA. Las exportaciones inglesas aumentaron hasta un pico de 3 millones de barriles, alrededor de 510 toneladas. La primer planta productora en EUA fue construida en 1865 en Akron, Pensilvania, pero fue hasta 1890 que las producciones de cemento Portland fue mayor que la producción de cemento natural. En 1896, las exportaciones comenzaron a disminuir debido a las producciones locales en EUA. En 1900, la producción mundial de CP estaba en el orden de los 10 millones de toneladas. (Claude Aïtcin,2007)

El nombre de cemento Portland, concebido originalmente debido a que al endurecerse presentaba un color semejante a la piedra de Portland, una caliza obtenida en una cantera de Dorset (Neville, 1999). Por primera vez en la historia de los materiales para la construcción se pudo fabricar un aglutinante artificial capaz de endurecer bajo el agua, haciendo posible producir una roca artificial y fuerte como muchas rocas naturales (Claude Aïtcin,2007).

2.2.1 Cemento portland en la actualidad

Se produce por la pulverización del clinker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio. El clinker además contiene algunos aluminatos de calcio, ferroaluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) los cuales se muelen en conjunto para la obtención del producto final. Durante la fabricación se hacen análisis químicos para garantizar la calidad de los materiales. La materia prima de los materiales son de:

- **Origen arcilloso.** Obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza.
- **Origen puzolánico.** Esta puede ser de origen volcánico u orgánico.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Este puede fabricarse por dos vías, seca y húmeda. La primera la molienda y mezcla son llevadas a cabo con materiales en estado seco; mientras que por la vía húmeda los materiales son mezclados con agua en forma de lechada. En otros aspectos los procesos húmedos y secos son muy similares. Después del mezclado, se pone la materia prima en la parte superior del horno, esta pasa a lo largo del horno en una tasa controlada por la inclinación y la velocidad de de rotación del horno, para esta fase el combustible ya se ha forzado a la parte inferior del horno alcanzando temperaturas de 1400°C a 1550°C transformando químicamente el material en clínker. Posterior a esto el clínker se enfría y se pulveriza, durante este proceso se agrega una cantidad pequeña de yeso para manejar los tiempos de fraguado y se obtenga un mejoramiento de las propiedades de contracción. En el molino, el clínker es molido finamente que puede pasar por n tamiz de 45 micrómetros (malla No. 325) dando como resultado el cemento portland (Kosmatka et al 2004).

En la figura 1 se presenta en general el proceso para la producción del cemento portland, ya sea la producción por la vía seca o húmeda.

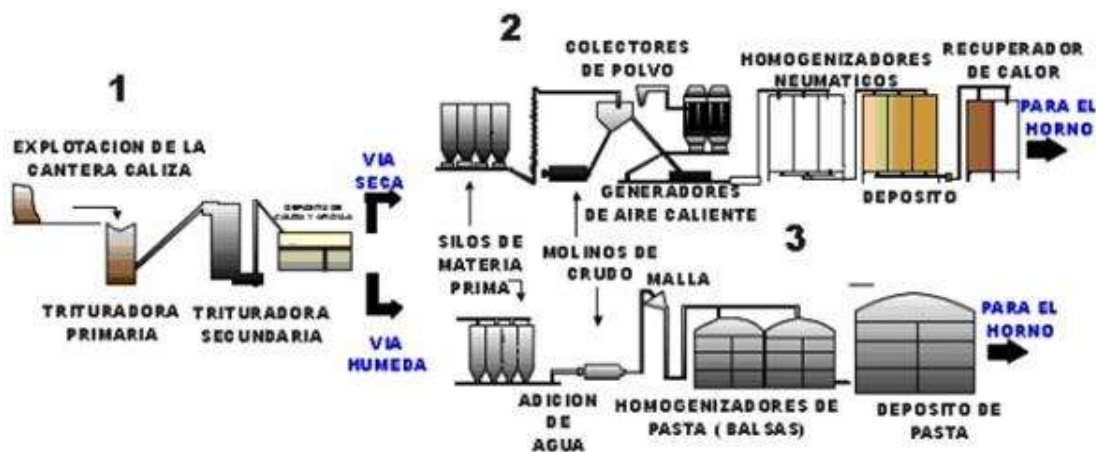


Figura 1. Fabricación del cemento fase 1.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico



Figura 2. Fabricación del cemento fase 2.

2.2.2 Tipos de cemento portland

Existen diferentes tipos de cemento portland con la finalidad de satisfacer distintos requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas.

Los cementos portland hidráulicos están compuestos principalmente por silicatos y aluminatos de cal:

| Nombre | Abreviatura |
|------------------------|-------------|
| Silicato Tricálcico | C_3S |
| Silicato Dicálcico | C_2S |
| Aluminato Tricálcico | C_3A |
| Aluminato Tetracálcico | C_4AF |

Tabla 1. Componentes principales del cemento portland

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

2.2.3 Clasificación de acuerdo a la ASTM C 150

Las ASTM C 150 especificaciones de norma para el cemento portland designa ocho tipos de cemento, empleando números romanos como se muestra a continuación:

| Cemento | Uso |
|---------------------|--|
| Tipo I | Cemento de uso general |
| Tipo II | Utilizado en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede provocar agrietamientos. |
| Tipo III | Cemento de alta resistencia a edades tempranas y rápido fraguado. |
| Tipo IV | Se emplea donde se deban minimizar la tasa y la cantidad de calor generado por la hidratación |
| Tipo V | Se utiliza en concretos expuestos a la acción severa de sulfatos. |
| Tipo IA, IIA y IIIA | Se utiliza en la fabricación de concretos con una resistencia a congelamiento y deshielo mayor |

Tabla 2. Clasificación de los cementos de acuerdo a su uso

Nota. Los cementos tipo IA, IIA y IIIA son cementos con aire incluido, durante su producción, se muelen pequeñas cantidades de material incluso de aire junto con el clínker.

2.2.4 Clasificación de acuerdo a la NMX- C414- ONNCCE

La NMX- C 414- ONNCCE de acuerdo con esta norma hay seis tipos básicos de cementos como se muestran en la tabla 2.

| Cemento | Tipo |
|---------|---|
| CPO | Cemento Portland Ordinario |
| CPP | Cemento Portland Puzolánico |
| CPEG | Cemento Portland con Escoria Granular de Alto Horno |
| CPC | Cemento Portland Compuesto |
| CPS | Cemento Portland con Humo de sílice |
| CEG | Cemento con Escoria Granulada de Alto horno |

Tabla 3. Clasificación de los cementos de acuerdo a su tipo

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Además se pueden clasificar por su resistencia: 20, 30, 40 la cual es la resistencia mínima mostrada a los 28 días de 20, 30 y 40 MPa (200, 300 y 400 Kg/cm²). Existen dos clases más: 30R y 40R, que también presentan resistencia a la compresión de 20 y 30 MPa a la edad de 3 días respectivamente. Así mismo la norma nos indica que el tiempo de fraguado inicial para los cementos antes mencionados es de 45 minutos.

2.3 Agregados

Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: gruesos y finos. Los finos pueden ser arenas naturales o artificiales (manufacturados) con partículas de hasta 9.5mm; los agregados gruesos son las partículas retenidas en la malla no 4. El tamaño máximo del agregado grueso comúnmente empleado es el de 3/4 o 1 pulgada.

Al menos tres cuartas partes del volumen del concreto son ocupados por los agregados, por lo que la calidad de estos es de suma importancia; los agregados no solo pueden limitar la resistencia del concreto, ya que agregar material pobre no pueden formar parte de un concreto resistente, además, sus propiedades afectan la durabilidad como el comportamiento estructural del concreto. Los agregados eran considerados como materiales inertes que era repartido por toda la pasta de cemento con fines económicos. Sin embargo, no son realmente inertes ya que sus propiedades físicas, térmicas y a veces químicas, influyen en el comportamiento del concreto (Neville,1999).

La fuente de materiales debe de localizarse a una distancia razonable del sitio de construcción y para su elección se debe tener presente que sus propiedades difieren de un lugar a otro: pueden variar en la mineralogía de sus componentes o de las condiciones físicas de las partículas como, la distribución de tamaños, forma, textura, etc. (Instituto del Concreto, 1997).

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Mencionada la importancia de los agregados en el desempeño del concreto debe cuidarse las condiciones en que se encuentren; se dice que un material es limpio si están exentos de excesos de limo, arcilla y materia orgánica (J.C. McCormack,2002).

2.3.1 Propiedades químicas de los agregados

Entre las exigencias que se deben solicitar a los agregados para evitar su reacción en la masa del concreto son: evitar sustancias presentes agresivas y componentes geológicos o mineralógicos agresivos.

- **Epitaxia.** Es la única reacción química favorable en los agregados conocidos hasta el momento, daña mejor adherencia entre los agregados y la pasta de cemento, conforme pasa el tiempo
- **Reacción álcali-agregado.** La sílice presente en algunos agregados reacciona con los álcalis del cemento creando con esto expansiones, destrucción de la masa y pérdida de características resistentes (instituto del concreto, 1997)

2.3.2 Propiedades físicas

Estas propiedades tienen mayor importancia en el comportamiento mecánico de la mezcla son:

- **Granulometría.** Composición en porcentaje de diversos tamaños de agregados de una muestra, suele indicarse de manera decreciente por una cifra que representa, el porcentaje parcial de cada tamaño que paso o quedo retenido en diferentes mallas que se usan obligatoriamente para esta medición.
- **Porosidad y absorción.** Entre más poroso sea un material menos resistencia presentara, esto se verá reflejado también en la absorción. Por otra parte entre menos absorbente sea el agregado es más compacto y de mejor calidad.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

- **Masa unitaria.** La masa unitaria compacta es otro buen índice para conocer la calidad del agregado, ya que entre mejor sea la granulometría mayor es el valor numérico de la masa (Instituto del concreto, 1997)
- **Forma.** Esta parte afecta a la trabajabilidad del concreto, la forma del agregado depende de la roca que lo originó. La forma del agregado puede afectar directa o indirectamente el comportamiento del concreto, ya que se relaciona con la trabajabilidad. Las formas alargadas y escamosas son perjudiciales haciendo con ellos un concreto muy pobre, viéndose reflejados en los porcentajes de cemento, la resistencia y durabilidad.
- **Textura.** Es de suma importancia por su influencia en la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento al fraguarse, así como los efectos en las propiedades del concreto endurecido, como lo son: la densidad, resistencia a la compresión, cantidad requerida de agua, entre otros.

2.3.3 Propiedades mecánicas

- **Resistencia.** El agregado grueso por su tamaño de grano dentro de la masa de la mezcla va a ir relacionado con la resistencia del concreto, aun más que el agregado fino. Una de las posibilidades de falla de la masa es por medio del agregado grueso, por lo que se busca que el agregado no falle antes que la pasta endurecida. Dicha falla se puede presentar por que anteriormente durante su explotación se indujo a una falla, por el otro lado puede suceder que sus propiedades sean deficientes, además, si se trata de un agregado triturado fallara por un inadecuado proceso de trituración.
- **Dureza.** Esta propiedad depende de la constitución mineralógica, su estructura y la procedencia del agregad. En concretos a utilizar como pavimentos o revestimientos

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

de canales, la dureza del agregado es una propiedad muy importante en la selección de los materiales.

- **Resistencia a la falla por impacto:** Esta propiedad depende mucho de la roca de origen, así como el manejo de los agregados, si estos son débiles ante la carga de impacto se pueden alterar su granulometría y disminuir la calidad del concreto a elaborar con dichos materiales.
- **Adherencia.** Esta parte es la unión que existe en la zona de contacto entre el agregado y la pasta. La resistencia será mayor si la adherencia entre la pasta endurecida y el agregado es buena. Algunos factores que darán buena adherencia son: la calidad de la pasta y en cuestión del agregado, su tamaño, forma, rigidez y textura.

2.4 Agua

Es un ingrediente esencial en la elaboración de concreto debido a su desempeño en estado fresco y endurecido. Tiene papel importante al proveer la relación agua/cemento de acuerdo con las necesidades de trabajabilidad y resistencia. Por lo que para cualquier empleo en la elaboración del concreto y durante el curado, no solo importa la cantidad sino la calidad química y física (Moreno,2012).

El agua debe ser limpia libre de materia orgánica y sustancias que puedan afectar el desempeño del endurecimiento, curado o calidad del concreto. El agua de mar puede utilizarse para fabricar concreto simple ya que por su alto contenido de cloruros provoca corrosión en varillas de acero (Parker y Ambrose, 2008)

Prácticamente cualquier agua que sea potable, así como aquella que no presente sabor u olor se la puede usar como agua de mezcla para la preparación del concreto. Sin embargo, se pueden emplear algunas aguas que no se consideren potables (Kosmatka et al 2004).

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

El empleo del agua para la fabricación del concreto como agua de mezclado es adicionada junto con los agregados y el cemento con la finalidad de hidratar y dar fluidez a la mezcla; el agua vertida debe ser adecuada ya que dependiendo de la cantidad adicionada la fluidez será mayor o menor. Al endurecerse el concreto una cantidad de agua formara parte de la estructura y el exceso permanecerá como agua libre, si se agrega agua de mas la porción de agua libre aumentara con lo cual la porosidad incrementara también, debido a que al paso del tiempo el agua libre se evapora dejando así vacios (Moreno,2012).

Una vez fraguado el concreto, es necesario mantenerlo húmedo para garantizar que se complete la hidratación del cemento, a esto se le llama curado. El objetivo de curar el concreto es mantener saturado hasta que los espacios que inicialmente estaban saturados de agua lleguen hasta un nivel deseado con los productos de hidratación del cemento (Moreno,2012).

Además de emplear el agua para mezclar y el curado otro de los usos dentro de la aplicación en el concreto es para el lavado de agregados obtenidos durante el proceso de trituración, esto con la finalidad de retirar impurezas y excesos de finos presentes en los conglomerados de los que provienen, así como las partículas finas formadas durante la trituración. En este proceso también el agua tiene que ser muy libre de contaminantes para no introducir impurezas a los materiales procesados (Moreno,2012).

2.5 Aditivos para concreto

Los aditivos son aquellos ingredientes adicionados además del cemento portland, agregados y del agua; se pueden integrar durante el mezclado o inmediatamente antes, esto con el objetivo de mejorar algunas de sus características. Sin embargo, no se considera como aditivo a aquel material que forme parte de un cemento, como un cemento portland-puzolana, portland-escoria; esto nos lleva a interpretar que un aditivo es aquel que se incorpora individualmente, teniendo control sobre su dosificación (Moreno,2012).

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Con lo anterior resulta apropiada la definición hecha por el comité ACI 116(26) que menciona que un aditivo es un material distinto del agua, agregados, el cemento hidráulico y las fibras de refuerzo, que se utilizan como ingrediente de un concreto o mortero, añadiéndolo a la revoltura antes o durante el mezclado.

Los aditivos pueden ser orgánicos e inorgánicos en cuanto a la composición pero su carácter químico es su característica esencial. Así mismo pueden ser utilizados en estado líquido o sólido, aunque el primero es el que se acostumbra más ya que un líquido se puede dispersar rápidamente de una manera más uniforme durante el mezclado. Las dosis a emplear en la elaboración del concreto, que está dado generalmente por un porcentaje de la masa del cemento es especificado por el fabricante, sin embargo, muchas veces varían de acuerdo con las circunstancias (Neville,1999).

Las principales razones para el uso de aditivos son:
(Kosmatka et al,2004).

1. Reducción del costo de la construcción de concreto.
2. Obtención de propiedades más efectivas.
3. Mantenimiento de calidad durante las etapas de mezclado, transporte, colado y curado.
4. Superar ciertas emergencias durante la operaciones de mezclado, transporte, colocación y curado.

La eficacia de los aditivos adicionados al concreto dependen de varios factores tales como: el tipo, la marca, cantidad del material cementante, forma, granulometría y proporción de los agregados, así como el tiempo de mezclado y la temperatura del concreto.

Según Montoya (2000) algunos de los aditivos más importantes son:

1. **Aceleradores.** Son productos añadidos al concreto que adelantan el fraguado o el endurecimiento y, en general ambos procesos a la vez.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

2. **Retardadores.** Utilizados para retardar el fraguado del concreto. Son de gran utilidad cuando se requiere recorrer largas distancias del transporte del concreto fresco.
3. **Plastificantes y fluidificantes.** Estos aditivos aumentan la docilidad y trabajabilidad del concreto, o bien reducir el agua de amasados de los concretos en beneficios de su resistencia.
4. **Airantes.** Incluyen en la masa del concreto una gran cantidad de pequeñas burbujas de aire con un diámetro aproximado de 20-200 micras, todas ellas uniformemente repartidas. Esto hace que mejore la resistencia a las heladas y a los agentes agresivos.
5. **Impermeabilizantes.** Utilizados para hacer más pequeña la red capilar del concreto.
6. **Otros.** Endurecedores de superficie, colorantes, inhibidores de corrosión, insecticidas, expansivos, etc.

Los aditivos minerales por lo general se agregan al concreto en grandes cantidades; estos además de reducir costos y el aumento de la trabajabilidad del concreto pueden emplearse con éxito para mejorar la resistencia del concreto al agrietamiento térmico, contrarrestar la expansión álcali-agregado y los ataques a los sulfatos.

La ASTM C 168, cubre tres siguientes clases de aditivos minerales:

- **Clase N.** Puzolanas naturales o calcinadas tales como lutitas, turbas y cenizas volcánicas y materiales calcinados como las arcillas.
- **Clase F.** Ceniza volante generalmente producida por la quema de carbón de antracita o bituminoso.
- **Clase C.** Ceniza volante generalmente producida por la quema de lignito o de carbón subbituminoso (además de ser puzolánica esta ceniza volante es cementante)

2.6 Metacaolín (MK)

La obtención del metacaolín de la de los Caolines que son rocas formadas fundamentalmente por minerales del grupo del Caolín como son la caolinita, dickita, nacrita y halloysita, acompañados por impurezas de cuarzo, mica, anatasa, rutilo, ilmenita y pequeñas cantidades de turmalina, zircón y otros minerales pesados. Para su utilización en algunas de sus aplicaciones, deben ser refinados y procesados, para aumentar su blancura, pureza u otras características comerciales importantes (Bernabé, 2012).

Es un material silicoaluminatos activado que se obtiene mediante la calcinación a 650-800°C de una arcilla llamada caolín (Sabir,2001). El material crudo utilizado en la fabricación del metacaolín es el caolín. El caolín es una arcilla mineral fina, blanca que tradicionalmente es utilizado en la fabricación de porcelana. Considerado un producto de síntesis, manufacturado mediante la calcinación del caolín, de gran finura (hasta 1-2 μm) y con elevada actividad puzolánica. Se ha demostrado en un gran número de estudios que el MK proporciona mejoras significativas en la resistencia (De Silva & Glasser, 1993).

El metacaolín obtenido por medio de un proceso térmico es de carácter amorfo y de alta reactividad, que al mezclarse con el cemento actúa como puzolana y concede a los concretos y morteros excelentes propiedades. Algunas características importantes que aporta el MK mediante la incorporación a las mezclas (mortero y concreto) está un significativo incremento de las resistencias mecánicas (compresión y flexión), una baja en la permeabilidad y porosidad capilar, control del agrietamiento, etc. (Mejía de Gutiérrez. et al, 2006).

Caldarone (1994) menciona la mejora sustancial en el desempeño mecánico y en la durabilidad de las mezclas elaboradas con metacaolín, esto debido a la reacción química presentada con el hidróxido de calcio, procedente de la hidratación del cemento para formar silicatos de calcio, sílico-aluminatos y aluminatos de calcio hidratados.

2.6.1 Usos del metacaolín

Siddique (2008) menciona algunos de los usos del metacaolín dentro de las mezclas de concreto.

- Alto rendimiento, alta resistencia y concreto ligero.
- Concreto premezclado para fines arquitectónicos, civiles, industriales y fines estructurales.
- Fibrocementos y productos de ferrocemento.
- Fibra de vidrio de concreto armado.
- Morteros, estucos, material de reparación.
- Mejor acabado, color y apariencia.

2.6.2 Ventajas del uso del metacaolín

- Aumento de la resistencia a la compresión y flexión.
- Reducción en la permeabilidad.
- Aumento en la resistencia a ataques químicos
- Mayor durabilidad.
- Reducción de los efectos de la reactividad álcali-sílice.
- Reducción de contracción debido a empacamiento de las partículas, haciendo más denso el concreto.
- Manejabilidad

2.7 Concreto reciclado

El empleo del concreto reciclado data de tiempos posteriores a la segunda guerra mundial, los europeos presentaban la problemática de la acumulación de escombros en las ciudades destruidas. Particularmente en Gran Bretaña y Alemania. Gluzhge en 1946 investigó en Rusia el uso de desechos de concreto como agregado, encontrando que los

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

agregados contaban con un peso específico menor que el agregado natural, obteniendo concretos con menor resistencia a la compresión (Cruz y Velázquez, 2004)

El uso de residuos de la construcción como una fuente de agregados para la producción de concreto nuevo se ha vuelto más común en las últimas décadas (Katz,2003).

El agregado de concreto reciclado generalmente tiene una mayor absorción y una masa específica relativa menor que el agregado convencional. Esto debido a la alta absorción de la pasta de cemento endurecido en el agregado de concreto reciclado. Los resultados en la absorción típicamente van de 3-10%. Al tener una mayor absorción en el agregado reciclado demandara más agua para que se mantenga la trabajabilidad y el revenimiento.

Oikonomou (2005) cita a RILEM (1994) menciona que hay tres tipos de agregados de concreto reciclado (RCA):

- **Tipo I.** Consiste principalmente en escombros de mampostería.
- **Tipo II.** Aquel que únicamente es escombros de concreto.
- **Tipo III.** Consiste en una mezcla de agregados reciclados (máximo 20%) y agregados naturales (mínimo 80%).

Cuando se desconoce la calidad del concreto viejo (relación agua/cemento, origen de los agregados, tipo), así como la diferenciación de sus propiedades durante la ejecución, el tiempo, el conocimiento y las pruebas del agregado de concreto reciclado, Oikonomou (2005) menciona la categorización en cuatro distintas que se nombran a continuación:

- a) Datos históricos de RCA. Se hace referencia a la composición, edad, mampostería, características petrográficas y datos de viejas estructuras.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

- b) Características físicas. Principalmente la absorción de agua, gravedad específica, cantidad de cloruros, sulfatos, cantidad de ingredientes, contenidos extraños y posible reacción álcali-sílice.
- c) Características mecánicas. Pruebas de resistencia a la abrasión/degradación por el uso de la máquina de L.A.
- d) Las características ambientales. Especialmente casos donde el agregado de concreto reciclado crea lixiviados.

2.7.1 Proceso de obtención del RCA.

El proceso de obtención del agregado de concreto reciclado se puede enunciar de la siguiente manera:

1. **Recolección de material.** Obtención del material de desecho provenientes de obras dañadas o que han cumplido su vida útil.
2. **Proceso de trituración.** Reducción del material obtenido para posterior clasificarlo en material grueso y fino.
3. **Caracterización de los materiales.** Estudio de las propiedades del RCA.
4. **Elaboración de nuevo concreto.** Sustitución de agregados convencionales por los obtenidos del concreto reciclado en la elaboración de un nuevo concreto.

2.7.2 Empleo del concreto reciclado

Los agregados provenientes del reciclo del concreto (RCA) son ya utilizados en algunos países para varias aplicaciones de la ingeniería civil como: materiales de recubrimiento en pavimentos estabilización del suelo, mejora de sub-base, producción de concreto, etc.

Oikonomou (2005) menciona que en las especificaciones Europeas para los agregados elaboradas por CEN TC 154 que entraron en vigor a finales del año 2003, no

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

hace mención a los agregados de concreto reciclado, estas especificaciones se mantuvieron hasta el 2010, sin embargo, se puede ayudar de la organización nacional de estandarización. Un ejemplo de ello existe en el Reino Unido en donde el protocolo de producción de nuevo concreto permite hasta una sustitución mayor del 20% de agregados de concreto reciclado.

3. METODOLOGÍA

3.1 Recolección del material

Se llevo a cabo de la Torre del Hospital General Regional (HGR) No.1 del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), asentada en la avenida Héroes de Nocupétaro de la ciudad de Morelia, Michoacán. Entre los cuales se levantaron bloques al azar de un tamaño aproximado a 15cm. (Figura 1).



Figura 3. Recolección del material..

3.2 proceso de trituración

El proceso de trituración se llevo a cabo en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) de la Ciudad de Morelia Michoacán. La maquina empleada para este proceso fue una Denver de quijada de 5x10 pulgadas (figura 2).

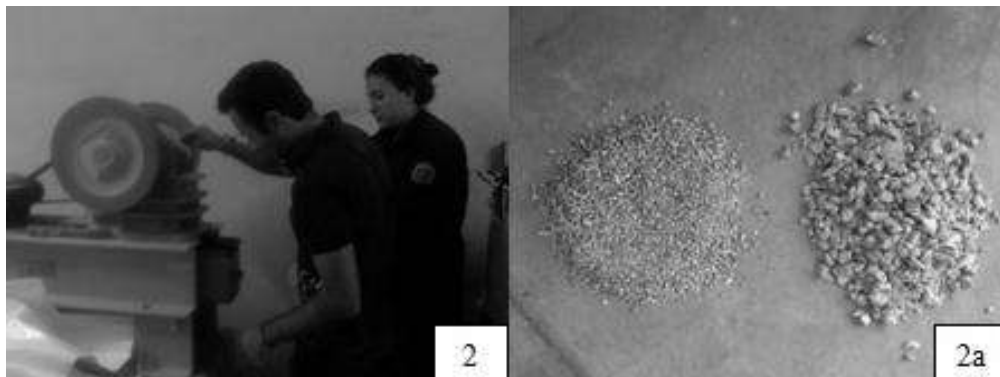


Figura 4. Trituradora empleada en el procesamiento del material; Figura 2a. Agregado obtenido en el proceso de trituración.

3.3 Caracterización del material

El proceso de caracterización se llevó a cabo en el laboratorio de materiales "Luis Silva Rúelas" de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Una vez separado el material como grava y arena se pasó a realizar distintas pruebas para su evaluación de calidad, entre las pruebas para caracterización de material se realizó: Granulometría, densidad específica, absorción, Masa Volumétrico Seco Suelto (MVSS), Masa Volumétrico Seco Varillado (MVSV), Modulo de finura (arenas) y tamaño máximo (gravas).

3.4 Elaboración de especímenes

Con los valores resultantes de la caracterización del material y lo dictado en la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004, se realizaron cilindros de prueba de 10x20cm para ver en relación a la compresión axial como se comportaban. Dichos cilindros se diseñaron por el método del ACI para un $f'c$ de 350kg/cm^2 .

Dentro del proceso de investigación se realizaron especímenes con adición de metacaolín en un porcentaje de 15% respecto a la masa de cemento (Rojas, 2010). En pruebas previas a la elaboración de los cilindros se observó la baja trabajabilidad de la mezcla por lo que se optó utilizar un fluidificante 8 gramos por cada kilo de cemento.

A los especímenes cilíndricos se les realizaron pruebas a compresión axial y ensayos no destructivos tales como: Velocidad de pulso ultrasónico, resonancia magnética y resistividad eléctrica; las evaluaciones de los resultados se tomaron a las edades de 14, 28,60 y 90 días.

Además se hicieron tres vigas testigos y tres con aditivo con dimensiones de 15 x 60cm a las cuales se les hizo módulo de ruptura a la edad de 28 días.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Pruebas realizadas al agregado pétreo fino

4.1.1 Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas cuarteo.

Objetivo. Obtener una muestra representativa y del tamaño adecuado, para la prueba de que se trate, de la muestra obtenida en el campo.

Equipo.

- Charolas grandes de lámina.
- Palas de boca recta.
- Cucharones.
- Balanza o báscula.
- Divisor de muestras.

Procedimiento

Se mencionan dos de tres métodos usuales para efectuar el cuarteo de las muestras.

Método “A” Cuarteo Mecánico.

Procedimiento para divisor de muestras.

Se toma la muestra previamente puesta en una charola ancha y se vacía sobre la parte superior del divisor, procurando repartirla en toda la longitud del divisor.

El material recibido en uno de los recipientes se elimina o se reintegra a la bolsa de donde se extrajo. Si se desea una muestra más pequeña, entonces el material que ha quedado en uno de los recipientes se vierte en una charola, para posteriormente vaciar la charola sobre el divisor, se repite este proceso de división y eliminación hasta lograr la muestra del tamaño que se requiera.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico



Figura 5. Cuarteo con divisor.

Método “B” Cuarteo Manual.

Procedimiento por cuarteo con palas.

1. Se vacía la muestra de material en uno de los extremos de la charola grande.
2. Se cambia el material al extremo opuesto, este cambio deberá hacerse por medio del paleado, tratando de revolver todo el material, además se procurará apilar el material en forma cónica. Este procedimiento se repite tres veces.
3. Una vez terminado el paso anterior el material apilado en forma cónica se aplanar la parte superior por medio de la cara posterior de la pala y después se divide el material trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie horizontal aplanada del material, eliminando las dos porciones opuestas, el material sobrante nos servirá para realizar las pruebas correspondientes. Si se desea disminuir el tamaño de la muestra se repite el procedimiento anterior señalado.



Figura 6. cuarteo con palas.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Especificaciones.

Las muestras de campo de agregado fino se encuentran superficialmente secas se deben reducir en tamaño por el método “A”. Las muestras de campo que se reduzcan por el método “B” deben encontrarse húmedas superficialmente de no ser así se deben humedecer y después deben ser remezcladas.

Prueba referenciada a la norma NMX-C-170-1997-ONNCCE

4.1.2 Humedad actual en arenas.

Objetivo. Determinar el porcentaje de humedad que contiene una arena en el momento que se va a utilizar para elaborar una mezcla, para así poder realizar la corrección correspondiente por humedad.

Equipo.

- Muestra representativa de arena de 500 gramos aproximadamente.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Parrilla eléctrica.
- Charolas metálicas.
- Espátulas.
- Cristal.

Procedimiento.

De la muestra representativa se pesan 300 gramos registrando este valor como masa inicial de la muestra o masa húmeda actual (Mh), posteriormente, esta muestra se coloca en una charola metálica sobre la parrilla eléctrica para hacer el secado del material moviéndolo

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

esta con la espátula en forma constante para que el secado sea homogéneo hasta eliminar completamente la humedad del material.



Figura 7. Secado de material con parrilla.

Para saber cuándo el material ya está seco, se coloca el cristal sobre el material y en el momento que ya no se empañe esto significa que el material ya está seco. Procediendo a dejar enfriar el material a temperatura ambiente y pesarlo. Este peso se registrará como masa final o masa seca de la muestra (M_s).



Figura 8. Peso de la masa seca agregado fino.

Cálculos

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

Dónde:

M_h : Masa de la muestra en gramos.

M_s : Masa seca del material en gramos.

$M_h - M_s$: Masa de agua que contenía el material.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Prueba referenciada a la norma NMX-C-166-ONNCCE-2006

4.1.3 Humedad superficial y humedad de absorción en arenas.

Objetivos. Determinar la capacidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje.

Equipo.

- Una muestra representativa de aproximadamente 2 kilogramos.
- Una balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Una parrilla eléctrica.
- Charolas metálicas.
- Un cono metálico (truncocónico)
- Un pisón.
- Una espátula.

Procedimiento.

1. La muestra de 2 kg se pone a saturar durante 24 horas, como mínimo. Dicha muestra se obtiene mediante alguno de los métodos de reducción de muestras.



Figura 9. Arena reciclada saturada.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

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

Se coloca la arena en la charola y se coloca en la parrilla eléctrica para realizar la eliminación de agua que tiene en exceso, esto es, hacer el secado de la arena en forma superficial.

Para saber cuándo la arena está seca superficialmente se coloca el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena en tres capas distribuyendo 25 golpes dados con el pisón, dando 12 a la primera, 8 a la segunda y 5 a la tercera. Inmediatamente se retira el cono y si la arena trata de disgregarse quiere decir, que ya está seca superficialmente y si la arena mantiene la forma del cono significa que todavía tiene agua en exceso por lo tanto hay que seguir secando el material hasta que se obtenga el secado superficial. Conforme vaya perdiendo la humedad la muestra hay que realizar más continuamente el procedimiento con el cono para evitar que se seque en exceso.



Figura 10. prueba de secado superficial con molde troncocónico.

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

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

4. La muestra de 300 gramos, se coloca en una charola para secarla hasta peso constante, o sea, hasta eliminar completamente el agua.
5. Para saber cuándo el material está seco se coloca el cristal sobre el material, si no lo empañamos retiramos el material y lo dejamos enfriar un poco, procediendo a pesarlo y registrar el valor obtenido como masa seca del material (M_s), si todavía se empaña el cristal hay que seguir secando el material para secarlo completamente.

Cálculos:

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

Dónde:

M_h : Masa saturada y superficialmente seca (gramos).

M_s :Masa seca del material (gramos).

Prueba referenciada a la norma NMX-C-165-ONNCCE-2004

4.1.4 Densidad de la arena

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

Equipo.

- Muestra representativa de arena de aproximadamente 1000 gramos.
- Charolas.
- Espátulas.
- Parrilla eléctrica.
- Molde tronco cónico.
- Pisón.
- Probeta.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

- Frasco.
- Vidrio.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento.

- Utilizando la probeta.

1. Se pone a saturar la arena en una charola durante 24 horas al término de este tiempo se seca superficialmente utilizando el procedimiento descrito en la prueba de humedad de absorción con el molde tronco cónico.

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



Figura 11. Prueba de densidad en arenas con picnómetro.

3. Posteriormente se coloca la arena dentro de la probeta, procurando que no salpique agua ya que esto puede causar un error en la prueba, agitando un poco la probeta para expulsar el aire atrapado, esta operación va a provocar un aumento en el volumen de agua y vamos a registrar este valor como volumen final V_f .

Cálculos.

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

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

Dónde:

DA: Densidad de la arena en gr/cm^3 ó gr/ml .

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Ma: Masa de la arena saturada y superficialmente seca en gramos.

Vf-Vi: Volumen colocado dentro de la probeta en cm^3 ó en ml.

4.1.5 Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (M.V.S.S)

Objetivo. Determinar la masa por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural.

Equipo.

- Una muestra de arena completamente seca.
- Un recipiente de masa y volumen conocido.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una balanza o báscula.
- Un cucharón y una pala.

Procedimiento.

Se vacía arena dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros, distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.

Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo.

La masa obtenida anteriormente se le resta el peso del recipiente para obtener la masa de la arena.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico



Figura 12. Vaciado de la arena al recipiente.; 10a. Enrasado del recipiente (M.V.S.S).



Figura 13. Pesado de agregado fino reciclado (M.V.S.S).

Cálculos.

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

Dónde:

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

M: Masa de la arena (gramos).

V: Volumen del recipiente (cm³).

Prueba referenciada a la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004

4.1.6 Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (M.V.S.V.).

Objetivo. Obtener la masa por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Equipo.

- Una muestra de arena completamente seca.
- Un recipiente de peso y volumen conocido.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una balanza o báscula. Un cucharón y una pala.

Procedimiento.

Se procede a llenar el recipiente con arena a volteo dejándola caer a una altura aproximada de 5 centímetros, el llenado del recipiente debe de hacerse en tres capas dando a cada capa de arena 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material.



Figura 14. Varillado de la arena reciclada (M.V.S.V)

Debe cuidarse que la varilla no penetre de más en la capa anterior al dar los golpes. Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.

Después de haber realizado los pasos anteriores se pesa el recipiente con el material y se le resta el peso del recipiente para así obtener la masa neta del material.



Figura 15. Pesado de la Masa varillada de la arena reciclada (M.V.S.V).

Cálculos.

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

Dónde:

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

M: Masa de la arena (gramos).

V: Volumen del recipiente (cm³).

Prueba referenciada a la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004

4.1.7 Análisis granulométrico en arena o Granulometría

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

Equipo.

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

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

- Hojas de papel.

Procedimiento.

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos.
2. Se seca la muestra hasta peso constante, a una temperatura de no mayor de 110°C.
3. Cuando el material este seco y frío, se toman 500 gramos, pesados al décimo de gramo.
4. Se colocan las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100 y charola), se coloca la muestra de 500 gramos y se tapa.
5. Se agita el juego de mallas durante un tiempo de 10 minutos como mínimo, el agitado puede ser a mano o mecánicamente.
6. Se procede a pesar el material retenido en cada una de las mallas con aproximación al décimo de gramo, anotando los pesos en el registro correspondiente. Para lo cual se invertirán las mallas con todo cuidado y utilizando cepillo de alambre las mallas 4, 8, 16 y 30 para desalojar el material que se encuentra entre los espacios de la malla, mientras que las mallas 50 y 100 se limpiarán con cepillo de cerdas.
7. En una superficie horizontal y limpia se colocan siete hojas de papel y sobre ellas se coloca el material retenido en cada una de las mallas previamente pesado, esto para tenerlo como testigo si es que surge algún error.



Figura 16. Ensayo granulométrico en arena.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

| ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO ARENA | | | | |
|--------------------------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| MALLA | MASA RETENIDA (g) | % RETENIDO | % ACUMULATIVO | % QUE PASA |
| 8 | | | | |
| 16 | | | | |
| 30 | | | | |
| 50 | | | | |
| 100 | | | | |
| CHAROLA | | | | |
| TOTAL | | | | |

Tabla 4. Análisis Granulométrico en arenas

1. Se anotan los pesos en las respectivas mallas en la columna (1).
2. El retenido de la columna (2) se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{peso retenido}}{\text{suma del peso retenido}} * 100$$

3. El % acumulativo se calcula a partir de los datos de la columna (2) como sigue:
% acumulativo de la malla= % retenido malla + % acumulativo malla anterior
4. El % que pasa se calcula de la siguiente manera:

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

5. Módulo de finura:

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

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Recomendaciones y especificaciones.

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

Prueba referenciada a la norma NMX-C-077-ONNCCE-1997

4.2 Pruebas realizadas al agregado grueso

4.2.1 Muestreo en gravas

Objetivo. Obtener una muestra representativa de este material para llevarla al laboratorio y realizarle las pruebas correspondientes para su estudio respectivo.

Equipo.

- Medio de transporte.
- Costales.
- Palas.
- Cucharones.
- Bolsas de plástico.

Procedimiento.

1. Dependiendo del estudio que se va a realizar se debe elegir el tamaño de la muestra, por ejemplo para realizar estudios para un proporcionamiento se debe obtener una muestra de 50 kilogramos aproximadamente.
2. Si el muestreo se realiza en los bancos de material se debe de tomar éste del frente que se vaya a utilizar en la obra respectiva, por lo que de nada nos servirá hacer un estudio de un material equivocado o del que no se vaya utilizar.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

3. La muestra debe reunir las características de todo el material en general, para que esta sea realmente representativa, (tamaño, colores, formas, Etc.).
4. También el muestreo se puede realizar en los camiones que suministran a las obras, así mismo del que se encuentra en las obras, esto nos sirve para verificar la calidad de los materiales.

Prueba referenciada a la norma NMX-C-030-ONNCCE-2004

4.2.2 Cuarteo en gravas.

OBJETIVO. Obtener una muestra representativa y del tamaño adecuado para realizar la prueba correspondiente al material de estudio.

Equipo.

- Palas.
- Charolas.
- Escoba.
- Cepillo.
- Cuarteador de muestras.

Procedimiento.



Figura 17. Cuarteo en gravas.

Para realizar el cuarteo de gravas existen dos métodos:

1. Cuarteo por paleado.
2. Cuarteo con el divisor de muestras

Prueba referenciada a la norma NMX-C-170-1997-ONNCCE.

4.2.3 Humedad actual en gravas

Objetivo. Determinar la cantidad de agua que contiene una grava, en estado natural, es decir, en el momento que va a ser utilizada.

Equipo.

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

Procedimiento.

1. Se toma una muestra representativa de 400 a 500 g. y se determina su masa, registrándola como masa húmeda M_h .
2. Enseguida se coloca en la charola para exponerlo en la fuente de calor para eliminar el agua que contiene la grava moviéndola constantemente con la espátula para que el secado sea uniforme. Cuando aparentemente este seca colocamos el cristal sobre ella para hacer la verificación del secado, si se empaña el cristal o se le forman gotas de agua quiere decir que el material todavía está húmedo y por lo tanto debemos seguir moviéndolo hasta que se seque completamente, para darnos cuenta de esto repetimos la operación con el vidrio.
3. Cuando está seca la grava la retiramos de la fuente de calor y la dejamos enfriar un poco, posteriormente la pesamos para determinar la masa seca (M_s) en gramos.

$$\% H. ACTUAL = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Dónde:

% H. ACTUAL: Porcentaje de humedad.

Mh: Masa húmeda de la grava en gramos.

Ms: Masa seca de la grava en gramos.

Prueba referenciada a la norma NMX-C-166-ONNCCE-2006.

4.2.4 Humedad de absorción en gravas

Objetivo. Determinar la capacidad máxima de absorción de una grava expresándola en porcentaje respecto a su peso seco.

Equipo.

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

Procedimiento.

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

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico



Figura 18. Saturado de grava.

2. Enseguida con una franela se seca superficialmente una muestra de grava de aproximadamente 300 gramos anotando este valor como (Mh) masa saturada y superficialmente seca.
3. Se procede a colocar este material en una charola para secarlo en la parrilla eléctrica, para saber cuándo se eliminado completamente la humedad se coloca el vidrio sobre el material y si no empaña o se forman gotas de agua se retira, se deja enfriar un poco y se procede a pesarlo registrando como masa seca (Ms).



Figura 19. Secado del agregado grueso con la parrilla

Cálculos.

$$\% H. ABSORCIÓN = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Dónde:

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

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

M_s = Masa seca de la grava en gramos.

Prueba referenciada a la norma NMX-C-165-ONNCCE-2004.

4.2.5 Densidad en gravas.

Objetivo. Determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en masa por unidad de volumen.

Equipo.

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

Procedimiento.

1. Se toma una muestra de grava saturada y superficialmente seca de 300 gramos, para obtenerlo se deja saturando la grava retenida en la malla 3/8 y que pasa la 3/4 durante 24 horas, secándola superficialmente con una franela, esta masa se registra como el masa de la muestra (M).
2. Se llena el picnómetro hasta el nivel del orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar la muestra de grava dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada. Cuando se haya terminado de colocar la grava dentro del picnómetro



Figura 20. Densidad en gravas.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

esperamos a que escurra el agua desalojada y tendremos en la probeta el volumen del agua que corresponde al volumen (V) de las partículas de grava.

Cálculos.

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

Dónde:

D=densidad en g/cm³

M= masa de la grava en g

V= volumen de la grava cm³

Prueba referenciada a la norma NMX-C-077-ONNCCE-1997

4.2.6 Determinación de la masa volumétrica seca y suelta en gravas (M.V.S.S.)

Objetivo. Determinar la masa por unidad de volumen cuando la grava se encuentra en estado natural seco y suelto.

Equipo.

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

Procedimiento.

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

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico



Figura 21. Tendido del material grueso reciclado.

2. Cuando el material este completamente seco, se continúa con el siguiente procedimiento.

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



Figura 22. Llenado del recipiente (M.V.S.S).

4. Enseguida se procede a enrasarlo con la varilla punta de bala o con la mano que es más práctico ya que esta enrasado se pesa obteniendo así la masa del recipiente más la masa del material.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Cálculos.

$$M.V.S.S. = \frac{\text{Masa de la grava}}{\text{Volumen de la grava}}$$

Prueba referenciada a la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004

4.2.7 Determinación de la masa volumétrica seca y varillada en gravas (M.V.S.V.)

Objetivo. Obtener la masa de la grava por unidad de volumen cuando es sometida a cierto grado de compactación.

Equipo.

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

Procedimiento.

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



Figura 23. Varillado del agregado grueso.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Cálculos.

$$M.V.S.V. = \frac{\text{Masa de la grava compactada}}{\text{Volumen de la grava}}$$

Prueba referenciada a la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004

4.2.8 Análisis granulométrico en gravas o Granulometría

Objetivo. Obtener la distribución de los tamaños de las partículas de la grava así, como el tamaño máximo (T.M.) de la grava, valor que se utiliza para el CÁLCULO del diseño de mezclas.

Equipo.

- Muestra aproximadamente 15 kilogramos en estado suelto.
- Juego de mallas: 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", y N° 4.
- Juego de charolas para recibir el material que se retiene en cada una de la mallas.
- Balanza con aproximación al gramo.
- Recipiente de 10 litros.

Procedimiento.

1. Se seca previamente la muestra de grava, enseguida se llena el recipiente de 10 litros, previamente destarado, la grava que se utilizó para llenar el recipiente se pesa y se obtiene la masa de la muestra registrándose como masa de la muestra (Mm).
2. Enseguida se pasa la grava a través de las mallas colocándolas de la mayor a la menor, agitándolas con la mano para que las



Figura 24. Cribado del agregado grueso.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

partículas de menor tamaño pasen a la malla siguiente, cuando se haya terminado con la muestra de grava, al realizarle este procedimiento se elabora una tabla como a continuación se indica, registrando las masas retenidas en cada una de las mallas correspondientes.

Cálculos.

| ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO GRAVAS | | | | |
|--------------------------------|-------------------|------------|---------------|------------|
| MALLA | MASA RETENIDA (g) | % RETENIDO | % ACUMULATIVO | % QUE PASA |
| 1" | | | | |
| 3/4" | | | | |
| 1/2" | | | | |
| 3/8" | | | | |
| 1/4" | | | | |
| No.4 | | | | |
| TOTAL | | | | |

Tabla 5. Análisis Granulométrico en gravas

1. Al realizar la suma de las masas parciales retenidas debe ser igual al peso de la muestra inicial, teniendo una tolerancia de ± 1 % del peso de la muestra.
2. El porcentaje retenido se calcula con:

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

3. El porcentaje acumulativo se calcula de la siguiente manera:

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

4. El porcentaje de la malla que pasa:

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

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

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

Prueba referenciada a la norma NMX-C-077-ONNCCE-1997

4.3 Método del ACI (American Concrete Institute)

El diseño de las mezclas de concreto involucra: (1) en el establecimiento de características específicas y (2) en la elección de proporciones de materiales disponibles para la producción del concreto con las propiedades requeridas y la mayor economía. Los métodos de proporcionamiento evolucionaron desde el método volumétrico arbitrario (1: 2: 3 –cemento: arena: agregado grueso) a principios del siglo XX (Abrams 1918) hasta los métodos actuales de masa y volumen absoluto, descritos en el ACI comité 211, Práctica Estándar de Elección de las Proporciones para el Concreto Normal, de Densidad Elevada y Masivo (ACI 211.1).

Para este caso se utilizó el proporcionamiento del método del ACI. Este procedimiento propuesto por el comité ACI 211, está basado en el empleo de tablas; para el diseño se requiere conocer las características de los materiales a emplear en la elaboración del concreto, como lo es: Peso específico del cemento, módulo de finura de la arena, peso específico de la arena, absorción de la arena, humedad de la arena, peso específico de la grava, tamaño máximo de la grava, peso volumétrico de la grava, absorción de la grava y la humedad de la grava. Se presenta el procedimiento de diseño de mezclas de concreto:

1. se selecciona un revenimiento de acuerdo al tipo de construcción.

| Tipos de construcción | Revenimiento, cm. | |
|--|-------------------|--------|
| | Máximo* | Mínimo |
| Muros de cimentación y zapatas, cajones de cimentación y muros de sub-estructura sencillos | 7.5 | 2.5 |
| Vigas y muros reforzados | 10 | 2.5 |
| Columnas para edificios | 10 | 2.5 |

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

| | | |
|--------------------|-----|-----|
| Pavimentos y losas | 7.5 | 2.5 |
| Concreto masivo | 7.5 | 2.5 |

Tabla 6. Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción

*Pueden incrementarse en 2.5 cm cuando los métodos de compactación no sean mediante vibrado

2. Elección del tamaño máximo del agregado. En ningún caso el tamaño máximo debe exceder 1/5 de la menor dimensión entre los costados de las cimbras, 1/3 del espesor de las losas, ni 3/4 del espacio mínimo entre varillas de refuerzo individual.

3. Cálculo del agua de mezclado y el contenido del aire. La cantidad de agua por volumen unitario de concreto requería para producir determinado revenimiento.

| Revenimiento, cm. | 9.5 | 12.5 | 19 | 25 | 38 | 50 | 75 | 150 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Concreto sin aire incluido | | | | | | | | |
| De 2.5 a 5.0 | 207 | 199 | 190 | 179 | 166 | 154 | 130 | 113 |
| De 7.5 a 10 | 228 | 216 | 205 | 193 | 181 | 169 | 145 | 124 |
| De 15 a 17.5 | 243 | 228 | 216 | 202 | 190 | 178 | 160 | --- |
| Cantidad aprox. de aire atrapado | 3 | 2.5 | 2 | 1.5 | 1 | 0.5 | 0.3 | 0.2 |
| Concreto con aire incluido | | | | | | | | |
| De 2.5 a 5.0 | 181 | 175 | 168 | 160 | 150 | 142 | 122 | 107 |
| De 7.5 a 10 | 202 | 193 | 184 | 175 | 165 | 157 | 133 | 119 |
| De 15 a 17.5 | 216 | 205 | 197 | 174 | 174 | 166 | 154 | --- |
| Promedio recomendado de aire por incluir por exposición | | | | | | | | |
| Exposición ligera | 4.50 | 4.00 | 3.50 | 3.00 | 2.50 | 2.00 | 1.50 | 1.00 |
| Exposición moderada | 6.00 | 5.50 | 5.00 | 4.50 | 4.50 | 4.00 | 3.50 | 3.00 |
| Exposición severa | 7.50 | 7.00 | 6.00 | 6.00 | 5.50 | 5.00 | 4.50 | 4.00 |

Tabla 7. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado Agua, kg/m³ concreto para TMG, mm.

4. Se selecciona la relación agua/ cemento, y la resistencia a la compresión del concreto.

| Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm ² | Relación agua/cemento por peso | |
|--|--------------------------------|----------------------------|
| | Concreto sin aire incluido | Concreto con aire incluido |
| 420 | 0.41 | -- |
| 350 | 0.48 | 0.40 |

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

| | | |
|-----|------|------|
| 280 | 0.57 | 0.48 |
| 210 | 0.68 | 0.59 |
| 140 | 0.82 | 0.74 |

Tabla 8. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.

5. Cálculo del consumo de cemento. La cantidad de cemento por volumen unitaria de concreto rige por las determinaciones expuestas en el tercero y cuarto paso. El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado, dividido entre la relación agua/cemento.

6. Se estima la cantidad de grava con el MF obtenido en las pruebas de caracterización del material, el tamaño máximo del agregado grueso.

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

Tabla 9. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

7. Conociendo los consumos de agua, cemento y grava, el material restante que completa un metro cúbico de concreto debe consistir en arena y aire que pueda quedar incluido.

8. Ajuste por humedad del agregado. Las cantidades de agregado que realmente deben pesarse para el concreto deben considerar la humedad del agregado. Generalmente el

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

agregado contiene humedad, y sus pesos secos deben incrementarse con el porcentaje de agua, tanto absorbida como superficial. El agua de mezclado que se añade al lote debe de reducirse en cantidad igual a la humedad total menos la absorción.

9. Corrección por contaminación por tamaños y que consiste en el contenido de gruesos que existen en los finos y el contenido de finos que existen en los gruesos, para mantener las características de trabajabilidad.

4.4 Pruebas al concreto fresco

Prueba de revenimiento

Esta prueba se realiza conforme a lo marcado en la norma NMX- C- 157-1987; nos ayuda a medir la facilidad del colocado, manejar y compactar el concreto. Para su determinación se utiliza un molde sin fondo de forma troncocónica, con dos asas para manipularlo, con unas dimensiones interiores específicas.

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 se enrasa la superficie.



Figura 25. Prueba de revenimiento.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Se desmolda inmediatamente, levantando el cono despacio entre 3 y 5 segundos en la vertical sin sacudirlo, se voltea el cono y medimos el punto medio de la masa asentada.

La tabla 8 y 9 muestran respectivamente los revenimientos especificados y la tolerancia del revenimiento.

| 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 10. Revenimientos especificados

| Revenimiento especificado | Tolerancia(cm) |
|---------------------------|----------------|
| Menor de 5cm | ±1.5 |
| De 5 a 10 cm | ±2.5 |
| Mayor de 10 cm | ± 3.5 |

Tabla 11. Tolerancia del revenimiento

4.5 Elaboración de especímenes

Se llevaron a cabo dos mezclas, una testigo, la cual sólo contenía aditivo fluidificante de la marca Sika en polvo, y la otra además de este mismo fluidificante se le añadió fibra deshidratada de Cactus Opuntia Blanco, en las proporciones que ya se han mencionado anteriormente.

4.5.1 Elaboración de cilindros de concreto de 10 cm x 20 cm

La mezcla para estos cilindros se elaboró en una revolvedora mecánica con capacidad para un bulto de cemento, la cual se encuentra en el laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

A estos cilindros se les hicieron pruebas de: velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica, resonancia magnética, módulo de elasticidad y resistencia a la compresión simple.

Equipo.

1. Varilla lisa punta de bala de 5/8" de diámetro.
2. Moldes cilíndricos de metal.
3. Mazo de goma.
4. Cucharón.

Procedimiento.

Se llenan los cilindros en dos capas, de aproximadamente igual volumen, con la ayuda del cucharón. Se aplican 25 golpes con la varilla punta de bala al concreto en cada capa, dichos golpes se dan de una manera distribuida y tratando que la varilla penetre por toda la capa, para garantizar una buena compactación. Se dan 15 golpes a cada cilindro distribuidos en el exterior del molde con el mazo, esto para eliminar las burbujas de aire atrapadas en el concreto. Una vez que se termina de llenar y compactar la segunda capa se procede a enrasar mediante el rodamiento de la varilla punta de bala sobre la superficie de la mezcla. Cabe señalar que los moldes se engrasan previo al colado, esto para facilitar el desmoldado.



Figura 26. Elaboración de cilindros de 10x20cm.

4.5.2 Elaboración de vigas de concreto de 15 cm x 60 cm

Estas vigas se elaboraron para llevar a cabo la prueba de módulo de ruptura.

Equipo.

1. Varilla punta de bala de 5/8" de diámetro.
2. Moldes prismáticos de acero de 15 cm x 60 cm.
3. Cucharón.
4. Mazo de goma.

Procedimiento.

Se engrasan los moldes antes del colado para facilitar el desmolde de las muestras. El colado de las vigas se lleva a cabo en dos capas, con la ayuda del cucharón, a cada una de ellas se le aplican 90 golpes distribuidos por toda la mezcla con la varilla punta de bala, esto para compactar el concreto. También se le dan de 15 a 20 golpes con el mazo de goma a los especímenes por la parte exterior, esto para eliminar las burbujas de aire atrapadas en el concreto. Una vez terminada la segunda capa, se engrasa la superficie de la mezcla rodando la varilla punta de bala sobre la superficie.



Figura 27. Moldes para vigas 15x60cm.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

4.5.3 Elaboración de cilindros de concreto de 5 cm x 10 cm.

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

Equipo.

1. Varilla lisa punta de bala de 3/8" de diámetro.
2. Moldes cilíndricos de metal.

Procedimiento.

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



Figura 28. Elaboración de especímenes cilíndricos 5x10cm.

4.5.4 Curado de los especímenes

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

4.6 Pruebas no destructivas al concreto endurecido

4.6.1 Prueba estándar para determinar la velocidad de propagación de pulso a través del concreto

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

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

Calculo:

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

Dónde:

V= Velocidad del pulso longitudinal

L= Longitud del camino

T= Tiempo transcurrido a través del espécimen

Equipo.

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



Figura 29. Aparato de medición de velocidad de pulso ultrasónico.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

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

Aplicación.

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

- Determinación de la uniformidad del concreto en una zona, así como encontrar defectos en el mismo.
- Estimación de espesores de concreto mediante el método indirecto.
- Correlación entre la velocidad y la resistencia, como medida de aseguramiento de calidad.
- Estimación del módulo de elasticidad y el módulo de elasticidad, módulo de Poisson para el concreto.
- Determinación de la resistencia residual después de daño por incendio, entre otros.

Procedimiento.

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

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Se pueden utilizar las siguientes configuraciones:

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

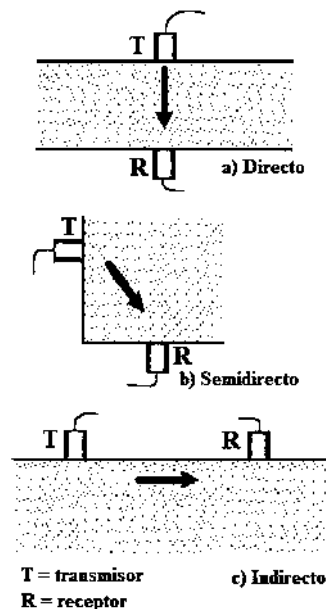


Figura 3. Configuraciones para medir la velocidad de pulso (Malhotra and Carino, 2004).

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

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

- Humedad y temperatura del concreto.
- Distancia.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

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

Chávez (2011) cita a Malhotra(1985) sobre la base de la medición de la velocidad ultrasónica la cual se clasifica en categorías con base a intervalos de velocidad presentada en la tabla 10.

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

Tabla 12. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica

En base a los valores obtenidos en la velocidad de pulso se puede determinar el módulo de elasticidad dinámico con la siguiente fórmula:

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

Dónde:

E= Módulo de elasticidad Dinámico, MN/m²

V= Velocidad de pulso ultrasónico, Km/s

Q= Densidad del concreto, Kg/m³

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

4.6.2 Frecuencia de resonancia

El método se utiliza para determinar el módulo de elasticidad dinámico, el modulo dinámico de rigidez y el valor dinámico de Poisson en especímenes prismáticos y cilíndricos de concreto. Por medio del método se detectan cambios significativos en el

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

módulo de elasticidad dinámica de las muestras de laboratorio así como las de campo que se han expuesto a la intemperie o a algún contacto de deterioro.

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

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



Figura 4. Sonómetro para determinar la frecuencia de resonancia

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

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

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

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

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

| 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 |

Tabla 13. Rangos aproximados de frecuencia de resonancia para especímenes de concreto cilíndricos y prismáticos (Jones, 1962).

4.6.3 Resistividad eléctrica

Es una propiedad de cada material, esta corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables como el tipo de cemento, adiciones inorgánicas, relación agua/cemento, porosidad de la estructura, etc. La unidad de medida para

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

representar la resistividad eléctrica es el ohm-cm u ohm-m. se puede utilizar en el laboratorio sobre testigos extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo (Chávez,2011).

Procedimiento

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

$$\rho = R_c \left(\frac{A}{L} \right)$$

Dónde:

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

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

A = Área transversal del espécimen en cm^2 .

L = Longitud del espécimen en cm.

De esta manera la resistividad eléctrica está dada por:

| Resistividad del concreto (ρ) $K\Omega$ -cm | Pronostico de corrosión |
|--|-------------------------|
| $\rho > 200$ | Poco riesgo |
| $200 > \rho > 10$ | Riesgo moderado |
| $\rho > 10$ | Alto riesgo |

Tabla 14. Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (Durar,2000).



Figura 30. Medición de la resistividad.

4.7 pruebas destructivas al concreto endurecido

4.7.1 Resistencia a la Compresión Simple en Cilindros de Concreto.

Objetivo.

Determinar la resistencia que presenta el concreto al ser sujeto a una carga de compresión simple.

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

Equipo.

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

Procedimiento.

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

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

2. Una vez obtenido el diámetro del espécimen, se coloca en la máquina de prueba, la cual tiene que tener las placas de apoyo totalmente limpias, se centrará el eje vertical del cilindro al centro de la placa de apoyo.
3. Se ajusta la platina superior a la cara del espécimen de manera que la carga se aplique constante.
4. Se nivela y se pone en ceros la máquina. Se aplica la carga a una velocidad constante de 1.4 a 3.1 kg/cm²/seg. Esta velocidad puede ser un poco mayor en la primera mitad de la carga total del espécimen, tomar en cuenta que por ningún motivo se suspenda la aplicación de la carga, cuando el espécimen ya se aproxime a la carga de falla.
5. Se continúa la carga del espécimen hasta la falla registrándola y observando su tipo de falla y la apariencia del material.

CÁLCULO.

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

Dónde:

P = es la carga de ruptura en kg.

A = Área de la sección transversal del espécimen en cm².

E = Esfuerzo que resiste el espécimen en kg/cm².

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

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

Dónde:

% Resistencia = Porcentaje de Resistencia.

R = resistencia real a cierta edad en días y en kg/cm².

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

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



Figura 31. Prueba de resistencia a la compresión.

4.7.2 Resistencia a la Flexión del Concreto.

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

Equipo.

- Máquina de prueba.
- Accesorios para la flexión.
- flexómetro.

Procedimiento.

1. El espécimen debe de voltearse sobre uno de sus lados, respecto a la posición original en la que fue colado, con ello aseguraremos que la carga se reciba en un área lisa.
2. Se centran los apoyos inferiores y posteriormente los superiores, quedando así un tercio central en el espécimen, entre los apoyos.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

3. Si no se tiene un buen contacto con los apoyos interiores será necesario pulir, cabecear o calzar el espécimen con tiras de madera o acero las superficies de contacto.
4. Se aplica la carga, la cual deberá aplicarse en forma uniforme de modo que no produzca impacto, puede aplicarse rápidamente hasta poco menos del 50 % de carga de ruptura, después se aplicara de manera que el esfuerzo en la fibra externa no exceda de 10 kg/cm²/min.
5. Se determinaran las dimensiones del espécimen, ancho y peralte promedio del espécimen en la sección de falla, deberá hacerse mediciones redondeando al 0.25 cm.

Cálculos.

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

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

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

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

Dónde:

R = Módulo de ruptura en kg/cm².

P = Carga de ruptura en kg.

L = Claro en cm.

b = Ancho promedio en cm.

d = Peralte promedio en cm.

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

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



Figura 32. Prueba de resistencia a la flexión.

4.7.3 Módulo de elasticidad Estático.

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

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

Equipo.

- Máquina de prueba.
- Medidor de deformaciones longitudinales.
- Nivel de burbuja.

Procedimiento.

1. Se determina las dimensiones del cilindro, altura y diámetro.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

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

Cálculos.

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

Dónde:

E= módulo de elasticidad en kg/cm².

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

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

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



Figura 33. Determinación del módulo de elasticidad estático.

4.8 Ataque por sulfatos

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

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

Solución de sulfato de sodio

Se prepara una solución saturada de sulfato de sodio por disolución de un USP o igual grado de sal en agua a una temperatura de 36°, adicionando 350g/litro de sulfato de sodio en un tiempo de 20 minutos, posterior a eso se agita la mezcla por 20 minutos más. Se deja la solución a una temperatura de 21°-16° durante al menos 48 horas antes de su uso.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico



Figura 34. Preparación de solución de sulfato de sodio.

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

Procedimiento

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

Después de realizar lo dictado en el punto cinco el proceso se repite desde el punto uno hasta completar los cinco ciclos. Una vez concluidos los ciclos se comparan los pesos

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

finales de cada ciclo para observar la pérdida de masa en cada ciclo. Además de analizar el comportamiento de la resistencia a la compresión simple con el paso de los ciclos.



Figura 35. Especímenes sumergidos y en horno para la determinación de los ataques por sulfatos.

5. RESULTADOS

5.1 Caracterización del agregado fino

5.1.1 Humedad de absorción

| Muestra | Masa saturada (gr) | Masa seca (gr) | % H. Absorción |
|---------|--------------------|----------------|----------------|
| 1 | 194.6 | 164.7 | 18.15 |
| 2 | 181.6 | 153.4 | 18.38 |
| | | promedio | 18.27 |

Tabla 15. Humedad de absorción de arena reciclada.

5.1.2 Densidad de la arena

| Muestra | Masa (gr) | Volumen (ml) | Densidad (kg/cm ³) |
|---------|-----------|--------------|--------------------------------|
| 1 | 302 | 140 | 2.16 |
| 2 | 301.1 | 130 | 2.32 |
| | | promedio | 2.24 |

Tabla 16. Densidad de la arena reciclada.

5.1.3 Masa Volumétrica Seca y Suelta (M.V.S.S)

| Muestra | Peso | Volumen | M.V.S.S |
|---------|---------------|---------------|--------------|
| 1 | 3155.0 | 2783.0 | 1.134 |
| 2 | 3205.0 | 2783.0 | 1.152 |
| | | Promedio | 1.1427 |

Tabla 17. Masa Volumétrica Seca y Suelta del agregado fino reciclado.

5.1.4 Masa Volumétrica Seca y Varillada (MVSV)

| Muestra | Peso | Volumen | M.V.S.V |
|---------|---------------|---------------|--------------|
| 1 | 3555.0 | 2783.0 | 1.277 |
| 2 | 3655.0 | 2783.0 | 1.313 |
| | | Promedio | 1.2954 |

Tabla 18. Masa Volumétrica Seca y Varillada del agregado fino reciclado.

5.1.5 Análisis granulométrico en arenas (granulometría)

| Malla | Masa retenida (grs) | % Retenido | % Acumulativo | % que pasa |
|---------|---------------------|------------|---------------|------------|
| 4 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 8 | 213.3 | 42.65 | 42.65 | 57.35 |
| 16 | 127.6 | 25.51 | 68.17 | 31.83 |
| 30 | 85.1 | 17.02 | 85.18 | 14.82 |
| 50 | 30 | 6.00 | 91.18 | 8.82 |
| 100 | 23.8 | 4.76 | 95.94 | 4.06 |
| 200 | 9.7 | 1.94 | 97.88 | 2.12 |
| Charola | 10.6 | 2.12 | 100.00 | 0.00 |
| Suma | 500.1 | 100.00 | | |
| MF | 2.83 | | | |

Tabla 19. Granulometría de arena reciclada.

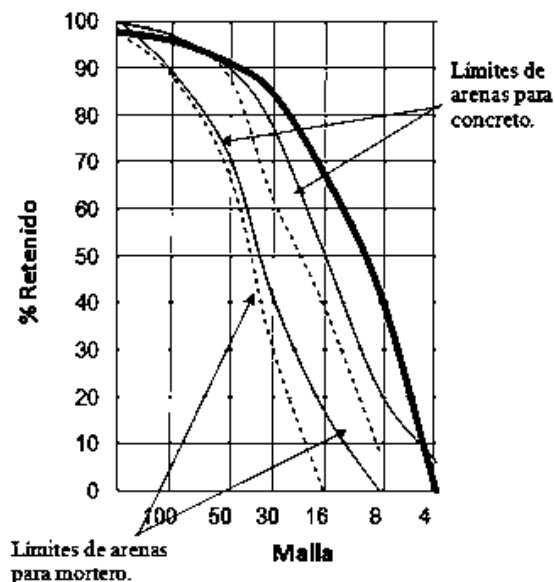


Figura 36. Granulometría de arena reciclada.

5.2 Caracterización de agregado fino reciclado y fino natural

De acuerdo con los valores obtenidos en la densidad, % de absorción, M.V.S.V y M.V.S.S se tomó la decisión de buscar una mezcla entre agregado de concreto reciclado y

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

un agregado natural de río para con ello obtener un mejoramiento en sus propiedades. Primero se realizó el estudio granulométrico a la arena de río (tabla 18) y con los resultados obtenidos se pasó a realizar distintas sustituciones al agregado fino reciclado. Los remplazos fueron tomados en base al agregado natural. Los resultados obtenidos en las pruebas de densidad, % de absorción, masas volumétricas sueltas y varilladas, así como su módulo de finura son presentados en la tabla 19

| Malla | Masa retenida (grs) | % Retenido | % Acumulado | % que pasa |
|---------|---------------------|------------|-------------|------------|
| 4 | 9.5 | 1.90 | 1.90 | 98.10 |
| 8 | 19.3 | 3.86 | 5.76 | 94.24 |
| 16 | 24 | 4.80 | 10.56 | 89.44 |
| 30 | 113.3 | 22.66 | 33.21 | 66.79 |
| 50 | 261.8 | 52.35 | 85.56 | 14.44 |
| 100 | 63.5 | 12.70 | 98.26 | 1.74 |
| 200 | 6 | 1.20 | 99.46 | 0.54 |
| Charola | 2.4 | 0.48 | 99.94 | 0.06 |
| Suma | 499.8 | 99.94 | | |
| MF | 2.33 | | | |

. Tabla 20. Granulometría arena de río.

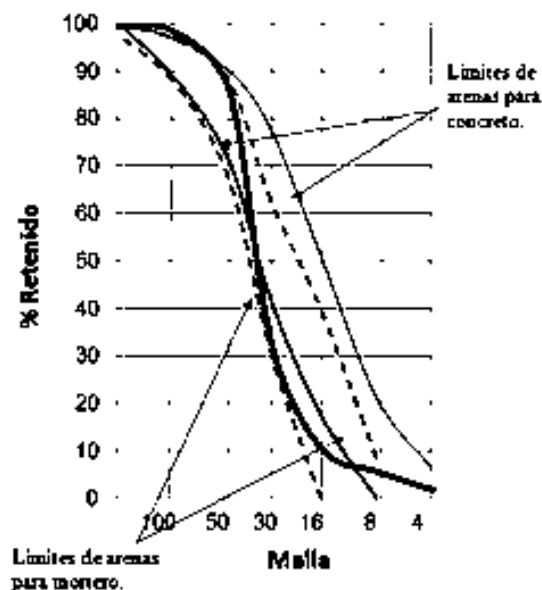


Figura 37. Granulometría arena de río

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

| Sustitución arena natural | Densidad arena (kg/cm ³) | % de absorción. | M.V.S.V. (kg/m ³) | M.V.S.S. (kg/m ³) | M.F. |
|---------------------------|--------------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------|
| 40 | 2.31 | 10.93 | 1410.3 | 1280.2 | 2.96 |
| 50 | 23.1 | 8.88 | 1433.1 | 1322.2 | 2.67 |
| 60 | 2.29 | 6.12 | 1449.8 | 1341.4 | 2.85 |
| 70 | 2.27 | 6.08 | 1.4534 | 1.345 | 2.5 |
| 80 | 2.40 | 6.04 | 1391.6 | 1291.4 | 2.06 |

Tabla 21. Caracterización de la sustitución agregado natural y concreto reciclado.

5.3 Elaboración de cilindros de prueba

En base a los resultados obtenidos de la caracterización del material en sustituciones, se pasó a realizar especímenes de prueba para obtener una comparativa en base a su resistencia a la compresión, a 7, 14 y 28 días. Los resultados son mostrados en la tabla 22 y figura 28.

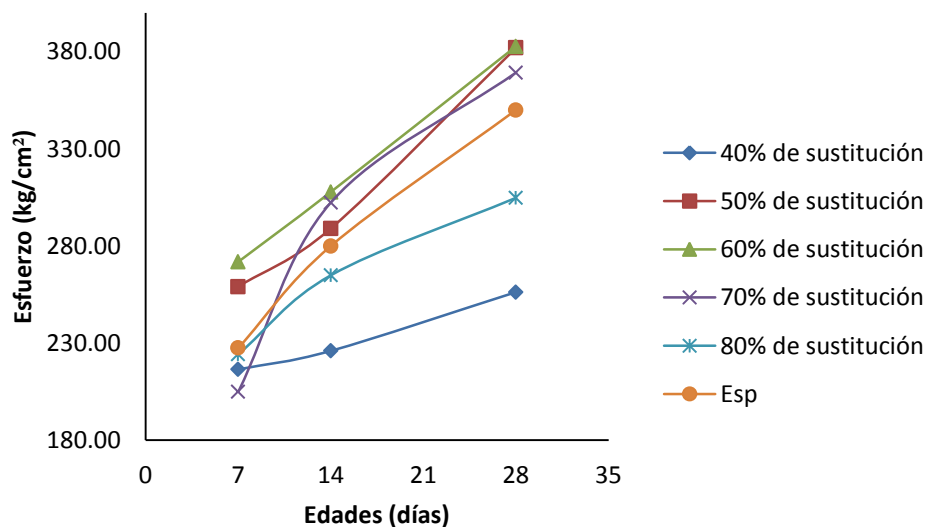


Figura 38. Resistencia a la compresión 7,14 y 28 días (cilindros de prueba)

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

| % sustitución | 7 | 14 | 28 |
|---------------|--------|--------|--------|
| 40 | 216.45 | 226.00 | 256.24 |
| 50 | 259.10 | 289.03 | 381.97 |
| 60 | 271.84 | 307.81 | 382.77 |
| 70 | 204.99 | 302.39 | 369.24 |
| 80 | 224.25 | 264.90 | 304.78 |
| Esperado | 227.50 | 280.00 | 350.00 |

Tabla 22. Resistencia a diferentes edades de especímenes de prueba.

5.4 Caracterización del agregado grueso

5.4.1 Humedad de absorción

| Muestra | Peso saturado (gr) | Peso seco (gr) | Absorción (%) |
|---------|--------------------|----------------|---------------|
| 1 | 368 | 335 | 9.85 |
| 2 | 318.7 | 290.9 | 9.56 |
| | | Promedio | 9.7 |

Tabla 23. Absorción en agregado grueso reciclado.

5.4.2 Densidad en gravas

| Muestra | Peso (gr) | Volumen (ml) | Densidad (kg/cm ³) |
|---------|-----------|--------------|--------------------------------|
| 1 | 301 | 130 | 2.31 |
| 2 | 300 | 131 | 2.29 |
| | | Promedio | 2.3 |

Tabla 24. Densidad agregado grueso reciclado.

5.4.3 Masa volumétrica Seca y Suelta de una grava (M.V.S.S)

| peso (gr) | volumen | M.V.S.S (kg/cm ²) |
|-----------|---------|-------------------------------|
| 12400.0 | 10600.0 | 1.170 |

Tabla 25. Masa Volumétrica Seca y Suelta grava reciclada.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

5.4.4 Masa volumétrica Seca y Varillada de una grava (M.V.S.V)

| peso (gr) | volumen | MVSV (kg/cm ²) |
|----------------|----------------|-------------------------------|
| 13400.0 | 10600.0 | 1.264 |

Tabla 26. Masa Volumétrica Seca y Varillada de la grava reciclada.

5.4.5 Análisis granulométrico en gravas (granulometría)

| Malla | Masa retenida (grs) | % Retenido | % Acumulado | % que pasa |
|------------|---------------------|------------|-------------|------------|
| 1' | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 3/4' | 36 | 0.32 | 0.32 | 99.68 |
| 1/2' | 816 | 7.32 | 7.64 | 92.36 |
| 3/8' | 2697 | 24.19 | 31.84 | 68.16 |
| No. 4 | 7598 | 68.16 | 100.00 | 0.00 |
| Pasa No. 4 | 0 | 0.00 | 100.00 | 0.00 |
| Suma | 11147 | 100.00 | | |

Tabla 27. Granulometría grava reciclada.

En la norma NMX-C-111-ONNCCE-2004 "agregados para concreto hidráulico, especificaciones y métodos de prueba" aparecen los límites de granulometría de acuerdo al tamaño máximo nominal para nuestro caso en el que el tamaño máximo es de 1/2" se presenta a continuación los límites, para un tamaño nominal de 1/2" a No 4.

| Malla | 3/4" | 1/2" | 3/8" | No 4 | No 8 |
|-------------------|------|----------|---------|--------|-------|
| % que pasa | 100 | 90 a 100 | 40 a 70 | 0 a 15 | 0 a 5 |

Tabla 28. Límites granulométricos del agregado grueso, en porcentaje que pasa.

5.5 Proporcionamiento por el método del ACI

| Materiales | P.V.S.S. (g/cm ³) | P.V.S.V. (g/cm ³) | Da (g/cm ³) | MF | TM |
|------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------|------|
| Cemento | | | 3.15 | | |
| Arena | | | 2.29 | 2.85 | |
| Grava | 1.160 | 1.260 | 2.31 | | 1/2" |

Tabla 29. Datos para proporcionamiento.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

| Materiales | Peso | Volumen (lts) | Peso sin corrección | Peso corregido |
|--------------|------------|---------------|---------------------|----------------|
| Cemento | 450 | 142.857143 | 450 | 450 |
| Arena | 730.212597 | 318.87013 | 730.212597 | 712.760516 |
| Grava | 686.7 | 297.272727 | 686.7 | 649.591419 |
| Agua | 216 | 216 | 216 | 270.560662 |
| Vol. de aire | --- | 25.000 | | |

Tabla 30. Volumen y peso por metro cubico

A la mezcla se le adiciono metacaolín un 15% con relación a la masa del cemento (67.5 kg/m^3), como se observó una perdida en la trabajabilidad se agregó un fluidificante en polvo de la marca Sika 8 gramos por cada kilogramo de cemento (3.6 kg/m^3).

5.6 pruebas al concreto fresco



Tabla 31. Prueba de revenimiento.

El resultado a la prueba de revenimiento para la mezcla del testigo resulto de 5cm por otra parte el resultado para la mezcla adicionada con metacaolín fue igual a 2cm.

5.7 pruebas no destructivas

5.7.1 Velocidad de propagación de pulso

| | 14 | | 28 | | 60 | | 90 | |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | T | Mk | T | Mk | T | Mk | T | Mk |
| Velocidad de pulso (m/s) | 3663.00 | 3842.46 | 3786.98 | 3710.58 | 3744.44 | 3830.19 | 3738.32 | 3914.85 |

Tabla 32. Velocidad de propagación de pulso.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

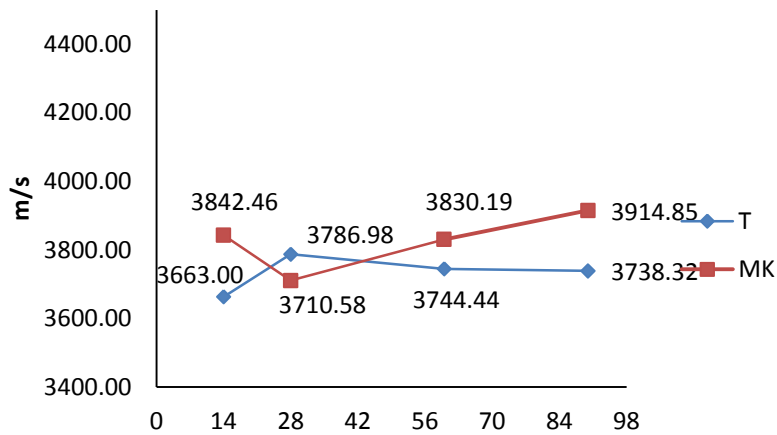


Figura 39. Velocidad de propagación de pulso.

5.7.2 Frecuencia de resonancia

| | 14 | | 28 | | 60 | | 90 | |
|----------------------------------|--------|--------|------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | T | Mk | T | Mk | T | Mk | T | Mk |
| Frecuencia de resonancia (Hertz) | 1351.5 | 1317.5 | 1788 | 1734.5 | 1826.75 | 1764.75 | 1409.25 | 1186.75 |

Tabla 33. Frecuencia de resonancia.

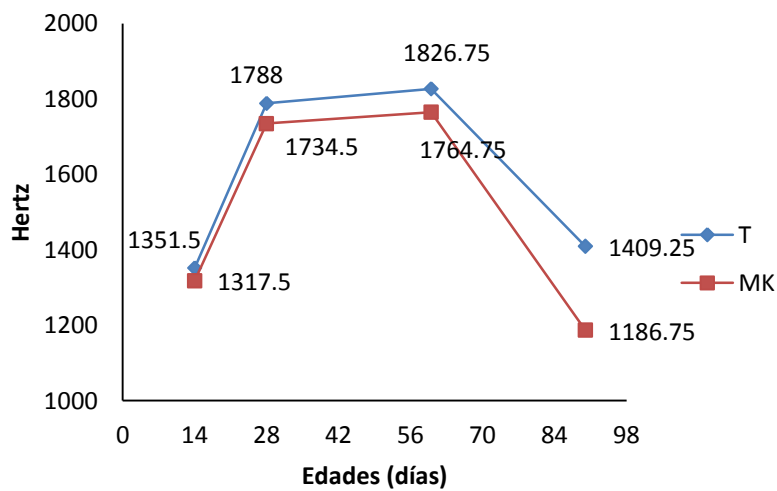


Figura 40. Frecuencia de resonancia.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

5.7.3 Resistividad Eléctrica

| | 14 | | 28 | | 60 | | 90 | |
|--|---------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| | T | Mk | T | Mk | T | Mk | T | Mk |
| Resistividad Eléctrica (Ω -cm) | 4830.20 | 5321.07 | 4974.19 | 18358.68 | 6806.78 | 24641.87 | 6937.68 | 25819.96 |

Tabla 34. Resistividad Eléctrica

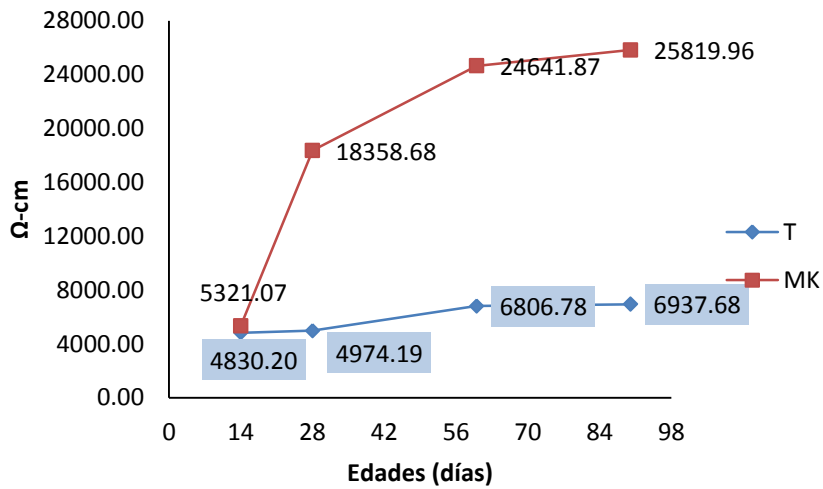


Figura 41. Resistividad eléctrica.

5.7.4 Modulo de elasticidad dinámico

| | 14 | | 28 | | 60 | | 90 | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | T | Mk | T | Mk | T | Mk | T | Mk |
| Módulo dinámico (Kg / cm ²) | 277919.7 | 228902.9 | 291239.1 | 278875.2 | 294164.3 | 287496.9 | 292791.3 | 318080.1 |

Tabla 35. Módulo de elasticidad dinámico.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

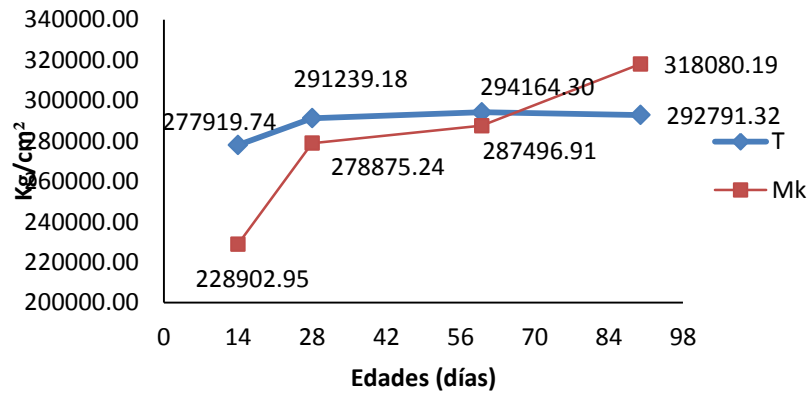


Figura 42. Módulo de elasticidad dinámico.

5.8 Pruebas destructivas

5.8.1 Resistencia a la compresión simple

| | Edad | | | |
|----|----------|--------|--------|--------|
| | 14 | 28 | 60 | 90 |
| | Esfuerzo | | | |
| Mk | 530.38 | 453.31 | 628.18 | 516.84 |
| T | 298.81 | 338.17 | 408.17 | 420.26 |
| D | 280.00 | 350.00 | 385.00 | 402.50 |

Tabla 36. Resistencia a la compresión.

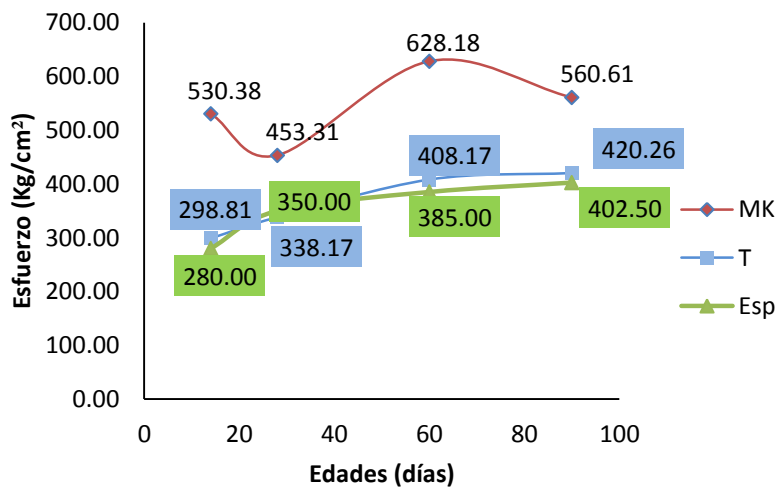


Figura 43. Resistencia a la compresión.

5.8.2 Resistencia a la flexión

| Mk-28 Días | | | T-28 Días | | |
|------------|---------------|-------------------------|-----------|---------------|-------------------------|
| espécimen | Carga Max(kg) | R (Kg/cm ²) | espécimen | Carga Max(kg) | R (Kg/cm ²) |
| 1 | 4780 | 63.73 | 1 | 4220 | 56.27 |
| 2 | 4790 | 63.87 | 2 | 4250 | 56.67 |
| 3 | 4400 | 58.67 | 3 | 4390 | 58.53 |

Tabla 37. Resistencia a la flexión Metacaolín y Testigos.

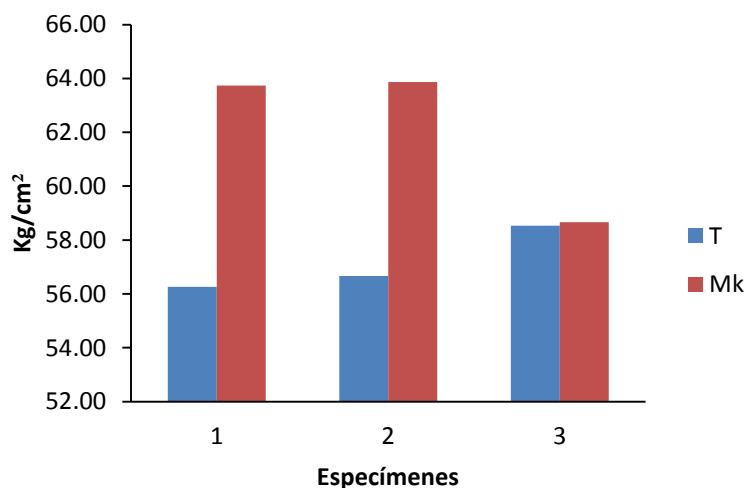


Figura 44. Resistencia a la flexión.

5.8.3 Módulo de elasticidad estático

| | 28 | | 60 | | 90 | |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | T | Mk | T | Mk | T | MK |
| Módulo estático (kg/cm ²) | 422113.23 | 438732.23 | 426502.82 | 490915.03 | 507429.84 | 517360.50 |

Tabla 38. Módulo de elasticidad estático.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

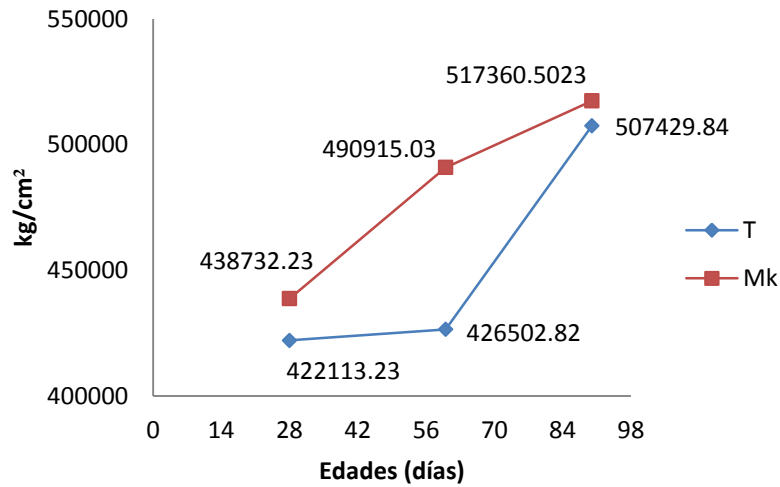


Figura 45. Módulo de elasticidad estático.

5.8.4 Ataque por sulfatos

| | | Masa final de cada ciclo (g) | | | | | |
|----------|--|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | Inicial | 1er ciclo | 2do ciclo | 3er ciclo | 4to ciclo | 5to ciclo |
| Testigos | | 430.30 | 388.9 | 375.9 | 398.1 | 398.6 | 380.6 |
| | | 423.10 | 385.7 | 404.5 | 387.6 | 408 | 392.3 |
| | | 450.20 | 374.9 | 381.6 | 399.8 | 389.1 | 368 |
| MK | | 427.50 | 408.5 | 394.8 | 391.80 | 394.7 | 385.40 |
| | | 422.30 | 400.6 | 408.5 | 403.80 | 391.6 | 388.30 |
| | | 453.90 | 394.5 | 404.1 | 401.70 | 377.4 | 392.60 |

Tabla 39. Masa final de cada ciclo ataque por sulfatos.

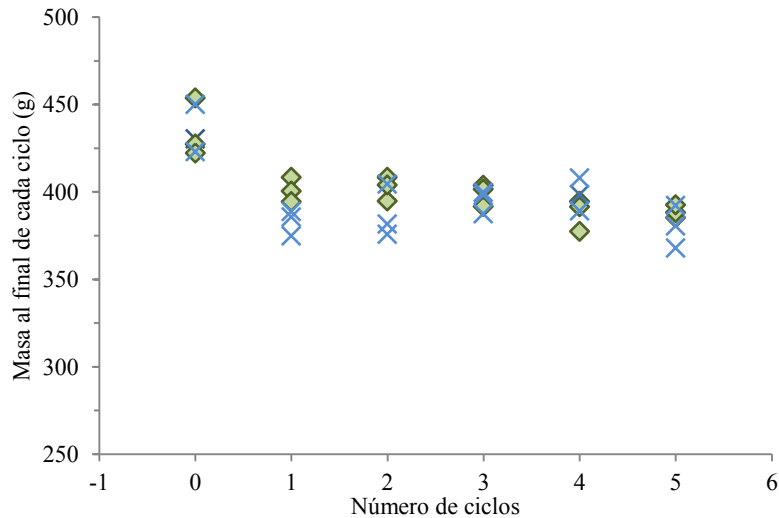


Figura 46. Masa final de cada ciclo ataque por sulfatos.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

| | | Resistencia a la Compresión simple (Kg/cm ²) | | | | | |
|----------|--|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | Inicial | 1er ciclo | 2do ciclo | 3er ciclo | 4to ciclo | 5to ciclo |
| Testigos | | 362.11 | 440.03 | 370.77 | 235.80 | 138.53 | 69.26 |
| | | 334.10 | 425.26 | 409.98 | 217.47 | 110.52 | 27.50 |
| | | 374.33 | 381.46 | 319.33 | 311.69 | 197.10 | 6.62 |
| MK | | 537.82 | 446.65 | 415.08 | 430.35 | 203.72 | 186.91 |
| | | 485.36 | 524.07 | 465.50 | 398.78 | 201.17 | 241.41 |
| | | 551.06 | 538.33 | 505.73 | 268.91 | 182.84 | 143.11 |

Tabla 40. Resistencia a la compresión (ataque por sulfatos)

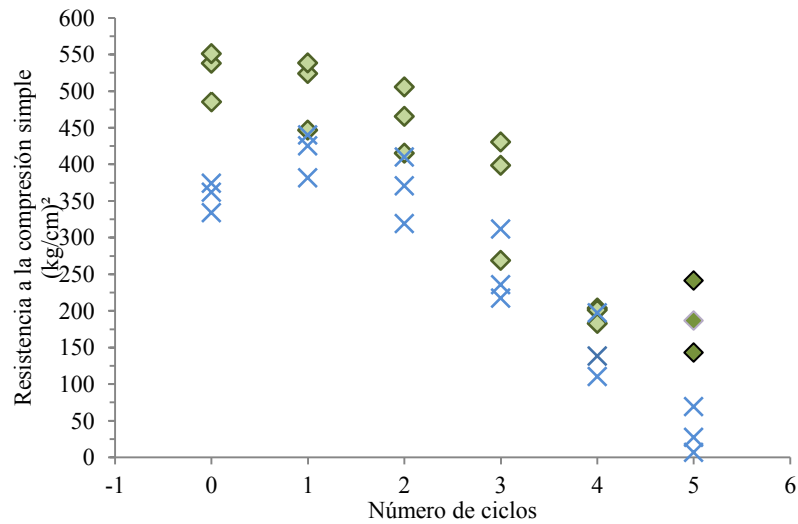


Figura 47. Resistencia a la compresión ataque por sulfatos.



Figura 48. Prueba a compresión simple primer ciclo sulfatos (cilindros 5cm x 10cm).

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico



Figura 49. Ataque por sulfatos segundo ciclo.(Izquierda Metacaolín, derecha Testigo).



Figura 50. Ataque por sulfatos tercer ciclo (Izquierda Metacaolín, derecha Testigo).



Figura 51. Ataque por sulfato cuarto ciclo (izquierda Metacaolín, derecho testigo)

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Agregado grueso reciclado

La densidad del agregado grueso de 2.31 g/cm^3 resulta ser relativamente baja a la propuesta por Kosmatka (2004) para agregados naturales (2.4 g/cm^3 - 2.9 g/cm^3), por lo que para este caso no habría mayor problema al utilizarse. El porcentaje de absorción resultó de 9.71% este porcentaje es alto a comparación del propuesto por Kosmatka (2004) de 0.2% - 4% en agregados naturales. En base al alto porcentaje de absorción se debe cuidar a la hora del diseño de la mezcla en la corrección por absorción, ya que de no ser así el desempeño del concreto afectaría en su desempeño. Para los resultados de la masa volumétrica seca suelta y varillada se tienen valores de 1.17 g/cm^3 y 1.26 g/cm^3 respectivamente son cercanas a las comúnmente utilizadas en mezclas con agregados naturales (1.2 g/cm^3 a 1.75 g/cm^3), por lo que la mezcla no se vería afectada por el uso del agregado reciclado.

En cuanto a la granulometría se refiere, cumplió con lo especificado en la norma NMX-C-111 para muestras con tamaño máximo de 1/2". Estos resultados determinaron el empleo de usar el agregado grueso reciclado en sustitución total de la grava natural.

6.2 Agregado fino reciclado

Kosmatka (2004) menciona el rango de la densidad de los agregados finos para ser utilizados estos oscilan entre 2.4 g/cm^3 a 2.9 g/cm^3 . La arena reciclada resultó estar por debajo de estos valores ya mencionados, siendo de 2.24 g/cm^3 . La humedad de absorción obtenida fue de 18.27%, esto está muy por encima del valor presentado por Kosmatka (2004) con valores de 0.2% a 4% para agregados gruesos naturales. En cuanto a las masas volumétricas secas y varilladas con valores respectivamente de 1.14 g/cm^3 y 1.30 g/cm^3 sucede lo mismo siendo los valores de 1.17 g/cm^3 y 1.26 g/cm^3 .

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Cabe mencionar que en el análisis granulométrico se encontró un exceso de partículas gruesas, incrementando el módulo de finura (MF) a 3.83, este valor es alto comparado con el establecido en la norma NMX-C-111 de 3.3. Debido al MF superior al de la norma se decidió buscar una mezcla sustituyendo agregado fino reciclado por arena natural, en porcentajes del 10-80%. Se observó que al disminuir el porcentaje de agregado reciclado el módulo de finura descendió, al igual que su densidad.

6.2.1 Pruebas destructivas a la mezcla sustitución agregado fino reciclado por arena natural.

Al realizar la prueba de resistencia a la compresión simple a los especímenes elaborados con las diferentes sustituciones (10-80%) a una edad de 28 días, presentaron un aumento a medida que el porcentaje de agregado reciclado fino, no obstante en un porcentaje de sustitución alto como 80% la resistencia disminuyó, por lo que se observa que los extremos superiores e inferiores afectan su desempeño a la compresión.

6.3 Pruebas al concreto fresco

6.3.1 Revenimiento

Para la mezcla del testigo y la adicionada con MK fueron respectivamente 5cm y 2 cm, dichos valores son bajos respecto a la norma NMX-C-156, en la que se habla de una tolerancia de ± 2.5 cm para un revenimiento de 10 cm. Al presentar valores tan bajos en el revenimiento, la trabajabilidad y consistencia de la mezcla se ve afectada; esto se atribuye a la alta absorción de los agregados reciclados, además de la absorción adicional que al agregar el Mk se da por parte de la mezcla.

6.4 Pruebas no destructivas

6.4.1 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica presento incrementos con relación a la edad de prueba dando el máximo para el testigo un valor de 6938 omh-cm y 25819.96 para los especímenes adicionados con metacaolín. En este caso el testigo se encontraría en zona de alto riesgo en el pronóstico de corrosión al ser menor a 10,000 Ω -cm. Por otra parte la mezcla adicionada con Mk se encuentra en riesgo moderado al encontrarse mayor a 10,000 Ω -cm pero menor a 200,000 Ω -cm (DURAR, 2000).

6.4.2 Velocidad de pulso ultrasónico

Las dos mezclas (T y Mk) en cuanto a la velocidad de pulso mostraron un incremento en los resultados siendo la adicionada con metacaolín la que obtuvo el valor más alto (3914.85 m/s) a comparación de los 3765 m/s del testigo. Ambas mezclas quedan dentro del rango de 3001-4000 m/s que marca el manual DURAR (2000) para un concreto de alta calidad. Esto significa que el concreto reciclado y el adicionado con metacaolín tienen buena homogeneidad ya que las ondas recorren a una buena velocidad por el material.

6.4.3 Frecuencia de resonancia

6.4.4 Módulo de elasticidad dinámico

6.4.5 Módulo de elasticidad estático

El módulo de elasticidad estático su tendencia fue a la alza conforme a la edad, a los 90 días los especímenes testigos presentaron un valor de 507,430 kg/cm² y de 517,360.50 kg/cm² para la mezcla con adición de Mk. Esto nos indica que las muestras con adición de Mk tendrá una menor deformación a medida que aumenta la carga.

6.5 Pruebas destructivas al concreto endurecido

6.5.1 Compresión simple en cilindros de 10 cm x 20cm

En esta prueba se obtuvieron buenos resultados por parte de las dos mezclas ya que se obtuvieron resultados por encima de lo esperado en su proyección, sin embargo, para la edad de 28 días el testigo no llegó a su valor esperado de 350 kg/cm^2 , por otra parte, los especímenes con adición de Mk estuvo por arriba con un valor de 453 kg/cm^2 . Al aumentar la edad el testigo tuvo resultados de 408 kg/cm^2 a los 60 días y 420 kg/cm^2 a los 90 días, mientras que con adición de Mk fueron de 628 kg/cm^2 y 560 kg/cm^2 a 90 días.

6.5.2 Módulo de ruptura en vigas prismáticas de 15cm x 60cm

Para el módulo de ruptura se dieron valores favorables comparados con los propuestos por Kosmatka (2004), los cuales están en un rango de 37 kg/cm^2 a 50 kg/cm^2 , para el f_c de 350 kg/cm^2 . Las vigas con adición de Mk tuvo un valor máximo de 63.87 kg/cm^2 , por encima del 58.53 kg/cm^2 del testigo.

6.5.3 Ataque por sulfatos

Durante esta prueba se observó la degradación de los especímenes conforme se cumplieron los ciclos, ambas mezclas completaron los 5 ciclos de la prueba. Se pudo ver en los primeros periodos un incremento en su volumen, esto debido a la penetración de los cristales de sulfato. En los ciclos finales se vio una disminución en su peso y resistencia a la compresión.

7. CONCLUSIONES

Los agregados granulares de concreto reciclado pueden ser utilizados en la elaboración de un nuevo concreto, por las pruebas de caracterización se vio factible utilizar en sustitución de 100% el agregado grueso, no fue así para la arena reciclada la cual se tuvo que sustituir solo en un 40%. Al saber que se pueden utilizar los agregados de concreto reciclado, resulta ser factible para contribuir a la solución parcial de la alta producción de este tipo de contaminante.

El uso del metacaolín como aditivo en un porcentaje de 15% en base a la masa de cemento tuvo buenos resultados, en las cuatro edades que se realizaron las pruebas se localizó por arriba de lo marcado en la literatura para un concreto convencional. Debido a la baja fluidez y trabajabilidad por la alta absorción del agregado, así como por la absorción adicional presentada por el aditivo (Metacaolín) se tuvo que agregar un aditivo fluidificante. Los especímenes elaborados con dichos materiales (testigo y con adición de metacaolín) arrojaron buenos resultados en la prueba de compresión y módulo de ruptura, siendo la mezcla con metacaolín la que más resistencia presento, con esto se propone para investigaciones futuras una reducción en el cemento.

En cuanto a las pruebas no destructivas presentaron una variación entre una mezcla y otra, por una parte el testigo resulto no apto para ser utilizado en zonas donde pueda ser expuesta a efectos de corrosión en caso de uso de acero de refuerzo; mientras que los especímenes adicionados con metacaolín resultaron con un riesgo moderado, por lo que se podría utilizar siempre y cuando se utilice un recubrimiento que evite o retrase el proceso de corrosión.

Como conclusión general se cumplió el objetivo de elaborar un concreto utilizando materiales provenientes de estructuras que han cumplido su vida útil, al adicionar un aditivo mineral de alta temperatura (metacaolín) se logró obtener una mejora en el comportamiento físico-mecánico.

8. BIBLIOGRAFÍA

Amnon Katz Properties of concrete made with recycled aggregate from artially hydrated old concrete. 2003.

Almaral J.L., Almeraya F., Arredondo S.P., Castorena J.H., Corral R., Gómez J.M. y Neri M.A. (2011). *Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Concrete with Recycled Concrete Aggregates and Supplementary Cementing Materials*. Int. J. Electrochem. Sci., 613 – 621

ACI Committee 228, (1998), *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*, ACI 228.2R-98, American Concrete Institute, Farmington Hills MI.

ASTM C 215-02, (2003), *Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens*, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA.

ASTM Test Designation C 597-02, (2003), *Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete*, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, West Conshohocken, PA.

Babu G., Martínez S. (2008). *Evolución reciente de la industria de cemento: un estudio comparativo entre México y la India*, PORTES, revista mexicana de estudios sobre la Cuenca del Pacífico, Volumen 2, Número 3, 165-202.

Bernabé C.(2012) "Adiciones minerales de alta temperatura a morteros de cemento como modificadores de comportamiento físico- Mecánico"

Casuccio M., Torrijos M., Giaccio G., Zerbino R. (2007). *Failure mechanism of recycled aggregate concrete*. Construction and Buildings Materials.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Chávez H. L. (2012), *Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a la caracterización del concreto hidráulico elaborado con agregados volcánicos y cemento CPC 30R RS*. Tesis de doctorado, Centro de Investigaciones y desarrollo del estado de Michoacán, Morelia.

Corinaldesi V., Moriconi G. (2009). *Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete*. *Constructions and Buildings Material*.

Cruz J., Velázquez R. (2004). *Concreto reciclado*, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Instituto Politécnico Nacional, México D. F.

Chan J., Solís R., Moreno E. (2003). *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*. *Ingeniería*, vol. 7, núm. 2, mayo-agosto, pp. 39-46, Universidad Autónoma de Yucatán México.

Espinoza, J. A.; Martínez, W & Navarro, L. M. (2001). *Análisis de materiales, Resistencia de materiales (3ed)*. Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.

Gambhir M. (2004). *Concrete Technology*, Ed. McGraw-Hill, tercera edición, New Delhi.

Gómez-Soberón J. (2002). *Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate, an experimental study*. *Cement and Concrete Research* 32, 1301–1311.

Levy S., Helene P. (2004). *Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development*. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 1975 - 1980.

Martínez I., Mendoza C. (2006). *Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados*. *INGENIERÍA investigación y Tecnología* VII. 3. 151 – 164.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Medina E. (2007). *Construcción de estructuras de hormigón armado: edificación*. Ed. Delta, Publicaciones Universitarias, 2da edición. Madrid, España.

Mejía de Gutiérrez, R. *et al.*, 2006. Influencia de la adición de metacaolín a morteros y hormigones. *Boletín Geológico y Minero*,

Moreno, Gibran. (2012) “Diseño por Durabilidad de Mezclas de Concreto Hidráulico variando los agregados pétreos. Evaluación de Resultados mediante Pruebas Destructivas y no Destructivas”.

Neville, A. M. (1999), *Tecnología del Concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. México, Distrito Federal.

NMX-C-030ONNCCE-2004. Industria de la construcción – Agregados – *Muestreo*.

NMX-C-083-ONNCCE-2002. Industria de la construcción – Concreto – *Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto – Método de prueba*.

NMX-C-109-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – Concreto – *Cabeceo de especímenes cilíndricos*.

NMX-C-073-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – Agregados – *Masa Volumétrica – Método de prueba*.

NMX-C-077-ONNCCE-1997. Industria de la construcción – Agregados para concreto – *Análisis granulométrico – Método de prueba*.

NMX-C-109-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – Concreto hidráulico – *Determinación del cabeceo de especímenes*.

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

NMX-C-111-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – *Agregados para concreto hidráulico* – Especificaciones y métodos de prueba.

NMX-C-122-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – *Agua para concreto* – Especificaciones.

NMX-C-156-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – Concreto – *Determinación del revenimiento en el concreto fresco.*

NMX-C-159-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – Concreto – *Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.*

NMX-C-164-ONNCCE-2002. Industria de la construcción – Agregados – *Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso.*

NMX-C-165-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – Agregados – *Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino* – Método de prueba.

NMX-C-170-ONNCCE-1997. Industria de la construcción – Agregados – *Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas.*

NMX-C-199-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – *Aditivos para concreto* – Terminología y clasificación en concreto hidráulico y mortero.

NMX-C-303-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – Concreto hidráulico – *Determinación de la resistencia a la flexión estática usando una viga simple con carga en el centro del claro.*

Elaboración de un concreto reciclado con adición mineral de alta temperatura como modificador de su comportamiento físico- mecánico

Norma ambiental para el Distrito Federal NADF-007-RNAT-2004, que establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción en el distrito federal.

Torres A. A., Martínez W., Lomelí Ma. G., Pérez A. (2010), *Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto*, Publicación Técnica No. 328, Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.

Kosmatka S., Kerkhoff B., Panarese W., Tanesi J. (2004), *Diseño y Control de Mezclas de Concreto (1ed)*. Portland Cement Association.

Kumar P., Monteiro P. (1998), *CONCRETO, Estructura, propiedades y materiales*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. México, Distrito Federal.

Pierre-Claude A. (2008). *Binders for Durable and Sustainable Concrete*, Ed. Taylor & Francis, Ney York, E.U.A.

Red Durar (2000), *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*, 2a ed., Río de Janeiro: CYTED.

Rojas E., (2010) " *avances en el diseño y caracterización d recubrimientos geopoliméricos para disminuir la corrosión en estructuras de concreto reforzado, de alta resistencia*

Sabir, B. B.; Wild, S.; Bai, J.: "Metakaolin and calcined clay as pozzolans for concrete: a review", *Cement and Concrete Composites*, vol. 23 (2001).

