



Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo



Facultad de Ingeniería Civil

“Correlación de propiedades mecánicas de concreto diseñado en condiciones estrictas de laboratorio contra concreto elaborado de manera empírica”.

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTA

José Wilbert Viveros Ramos

ASESOR DE TESIS

Marco Antonio Ornelas Mondragón

COASESOR DE TESIS

Elia Mercedes Alonso Guzmán

Morelia Michoacán, febrero de 2018.



Dedicatorias

A mi hermosa y amorosa madre, sin duda alguna la persona más llena de amor y valor en mi vida.

A mis hermanos quienes residen de forma ilegal en Estados Unidos de América, ya que pese a que la distancia nos separa el alma sigue amando, aunque el cuerpo no esté presente.

A mis pequeñas sobrinas quienes están llenas de vida, de futuro y de amor, tengo un compromiso con ellas.

A mis familiares quienes me han acompañado hasta este momento de mi vida, este momento se comparte con todos.

A mi nación.

Al creador.

Dedica el corazón



Agradecimientos

Agradecer a mi madre ya que nunca se rindió incluso cuando el creador se lo exigió; hubo un tiempo y lugar donde unos pequeños dormían en una casa de madera en medio de una tormenta, el viento era helado y la lluvia lejos de ser armoniosa era escandalosa, aun así, ninguno de los pequeños lloró de frío o hambre, porque su madre los cobijaba con su amor. Te amamos mami así de arto.

A mis hermanos, quienes me ayudaron durante todo este tiempo incluso aunque yo no se los pidiera, es mi oportunidad de ayudar de regreso, los mega amo con toda mi alma.

A mis familiares, por su apoyo pese a las difíciles circunstancias de tiempo, distancia y salud, muchas gracias, pronto podremos estar un rato juntos para darnos cuenta que nunca hemos estado separados.

A mis amigos aquellos que sacrificaron su tiempo para escuchar y para aconsejar, gracias por aguantarme los amo, aunque no lo demuestre como debiera.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por permitirme la oportunidad de mejorar como persona.

A mis amigos y compañeros de trabajo del Laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas, quienes nunca se negaron a compartir el conocimiento, los amo mil a todos sin ninguna excepción.

A la Dra. Elia Mercedes y la M. I. Cindy Lago por su constante respaldo durante mi estancia en el Laboratorio de Materiales, tratare de compensar su apoyo de manera satisfactoria.

A mis familiares y conocidos que no pudieron llegar en vida a este momento, los llevo en el alma.

A mi nación.

Al creador.

Una disculpa a todos, que no les pueda dar lo mejor de mí no significa que no los ame.



Resumen

Es muy común hacer la elaboración de concreto en campo, esto por ventajas tales como la rapidez y la comodidad que obtienen los obreros en obras pequeñas como la de una casa habitación, pero descuidando detalles como la calidad de los materiales y del mismo concreto. Estos concretos tienen más contenido de arena que de grava contrario a los resultados de cualquier concreto diseñado por algún método de diseño.

Según una investigación realizada por la empresa inmobiliaria SOFTEC en junio de 2015 “de un millón de viviendas que se construyen en México anualmente el 63% es autoconstruida”. Es importante mencionar que en este tipo de vivienda es donde se utiliza este tipo de concretos.

Un concreto de buena calidad garantiza no solo su desempeño ante los esfuerzos mecánicos sino también la vida útil de los elementos colados, de ahí la importancia en la utilización de métodos de diseño de concreto.

En este trabajo se simuló mezclas de concreto hechas con un proporcionamiento empírico utilizado por albañiles en Michoacán frente a una mezcla control la cual tiene un proporcionamiento producto de un diseño de mezclas de concreto.

Se podrá apreciar como las condiciones de colado, curado, calidad de los materiales y cantidad de materiales repercuten directamente en el comportamiento del concreto a diferentes edades de prueba en ensayos destructivos y no destructivos.

Palabras clave: *elaboración, mezclas de concreto, calidad, proporcionamiento, pruebas destructivas.*



Abstract

It's very common to make concrete at workplace, this because the workers can get advantages like comfort and quickness in some small works, but in this process the workers omit details like materials quality, concrete's durability and quality. The concrete is done with more content of sand than crushed stones, what is contrary of the results of any proportion checked in a design method.

According to an investigation done for the company SOFTEC in June 2015 63% of one million houses done in Mexico are self-building. It's important to mention that in this of houses where is more common the use of this kind of concrete.

A concrete with a good quality can guarantee not just a performance in mechanical stress, but also the life of use in elements elaborated with this material, that's the reason of the use of design methods for concrete.

In this investigation concrete done with an empiric mix used for masons in Michoacán were simulated, and a control mix with prepared with a concrete design method.

Conditions of elaboration, curing, quality materials and proportion of material impact directly in the concrete behavior at different ages in destructive and non-destructive tests.

Keywords: *elaboration, concrete mixtures, quality, proportioning of mixtures, destructive testing.*



ÍNDICE

Dedicatorias	1
Agradecimientos	2
Resumen.....	3
Abstract.....	4
ÍNDICE.....	5
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE GRÁFICAS	8
ÍNDICE DE IMÁGENES	9
Objetivos	10
1. Introducción	11
2. Justificación.....	14
3. Marco teórico	16
3.1. Antecedentes Históricos.....	17
3.2. Componentes del concreto.....	18
3.2.1. Cemento.....	19
3.2.2. Agregados pétreos	23
3.2.3. Agua.....	24
3.3. Curado del concreto	25
3.4. Patologías del concreto	26
3.4.1. Carbonatación.....	28
4. Materiales de estudio.....	29
4.1. Cemento	30
4.2. Arena.....	30
4.3. Grava.....	30
4.4. Agua.....	31
5. Desarrollo experimental	32
5.1. Diseño de Mezcla de concreto por el método del ACI	33
5.1.1. Procedimiento para el diseño de mezclas de concreto por el método del ACI	33
5.2. Ensayes en cemento	36
5.2.1. Densidad del cemento	36
5.2.2. Consistencia normal	37



5.2.3. Tiempos de fraguado.....	38
5.2.4. Diseño de mezcla	39
5.3. Ensayes en arena.....	40
5.3.1. Muestreo en arena.....	40
5.3.2. Cuarteo en arena	41
5.3.3. Masa volumétrica seca suelta en arena.....	41
5.3.4. Masa volumétrica seca varillada en arena	43
5.3.5. Densidad en arena.....	45
5.3.6. Humedad de absorción en arena.....	46
5.3.7. Granulometría en arena	47
5.3.8. Colorimetría en arena	48
5.3.9. Sedimentación en arena.....	49
5.4. Ensayes en grava.....	50
5.4.1. Muestreo en grava	50
5.4.2. Cuarteo en grava.....	51
5.4.3. Masa volumétrica seca suelta en grava.....	51
5.4.4. Masa volumétrica seca varillada en grava	52
5.4.5. Densidad en grava	53
5.4.6. Humedad de absorción en grava.....	54
5.4.7. Granulometría en grava	56
5.5. Ensayes en agua	57
5.6. Ensayes en concreto fresco	58
5.6.1. Determinación del revenimiento en concreto fresco	58
5.6.2. Elaboración de cilindros de concreto.....	60
5.7. Ensayes en concreto endurecido	61
5.7.1. Curado de especímenes	61
5.7.2. Cabeceo de especímenes	62
5.7.3. Ensaye de compresión simple.....	63
5.7.4. Ensaye de resistividad eléctrica.....	64
5.7.5. Ensaye de velocidad de pulso ultrasónico	65
5.7.6. Ensaye de profundidad de carbonatación	66
6. Resultados	69



6.1.	Resultados de ensayos en cemento	70
6.1.1.	Resultados de densidad en cemento	70
6.1.2.	Resultados de consistencia normal en cemento.....	70
6.1.3.	Resultados de tiempos de fraguado en cemento.....	70
6.2.	Resultados de ensayos en arena	71
6.2.1.	Resultados de Masa volumétrica seca suelta en arena	71
6.2.2.	Resultados de Masa volumétrica seca varillada en arena.....	71
6.2.3.	Resultados de Densidad en arena	71
6.2.4.	Resultados de Humedad de absorción en arena.....	72
6.2.5.	Resultados de Granulometría en arena	72
6.2.6.	Resultados de Colorimetría en arena	74
6.2.7.	Resultados de Sedimentación en arena.....	74
6.3.	Resultados de ensayos en grava	75
6.3.1.	Resultados de Masa volumétrica seca suelta en grava	75
6.3.2.	Resultados de Masa volumétrica seca varillada en grava.....	75
6.3.3.	Resultados de Humedad de absorción en Grava	76
6.3.4.	Resultados de Densidad en grava	76
6.3.5.	Resultados de Granulometría en grava	76
6.4.	Resultados de ensayos en agua	78
6.5.	Resultado de diseño de mezclas.....	79
6.5.1.	Mezcla con diseño del método del ACI.....	79
6.5.2.	Mezclas diseñadas de manera empírica.....	79
6.6.	Resultados de ensayos en concreto fresco	80
6.6.1.	Resultados de revenimiento.....	80
6.7.	Resultados de ensayos en concreto endurecido	80
6.7.1.	Resultados de ensayos de resistividad eléctrica.....	81
6.7.2.	Resultados de ensayos de velocidad de pulso ultrasónico.....	84
6.7.3.	Resultados de ensayos de carbonatación	87
6.7.4.	Resultados de ensayos de compresión simple	88
7.	Análisis de resultados.....	91
8.	Conclusión.....	97
9.	Referencias.....	99



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Producción de cemento en México.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2. Requerimientos de Agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3. Relaciones Agua/Cemento para la resistencia a la compresión del concreto. ...</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 4. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen del concreto</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 5. Tabla de materiales por metro cúbico de concreto.</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 6. Resultados de Densidad en cemento CPC-30R3RS.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 7. Resultados de Consistencia normal en cemento.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 8. Resultados de Tiempos de fraguado en cemento.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 9. Resultados de Masa volumétrica seca suelta en arena.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 10. Resultados de Masa volumétrica seca varillada en arena.</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 11. Resultados de Densidad en arena.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 12. Resultados de Humedad de absorción en arena.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 13. Resultados de Granulometría en muestra 1 de arena.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 14.. Resultados de Granulometría en muestra 2 de arena.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 15. Resultados de Masa volumétrica seca suelta en grava.</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 16. Resultados de Masa volumétrica seca varillada en grava.</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 17. Resultados de Humedad de absorción en grava.</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 18. Resultados de Densidad en grava.</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 19. Resultados de granulometría en grava.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 20. Resultados de calidad de agua.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 21. Resumen de características de materiales para concreto.</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 22. Resumen de cantidades de materiales por m³ de concreto mezcla control.</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 23. Cantidades de materiales por m³ de concreto diseñado de manera empírica Mezcla A.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 24. Cantidades de materiales por m³ de concreto diseñado de manera empírica Mezcla B.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 25. Resultados de ensaye de revenimiento en concreto.</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 26. Resumen de condiciones de especímenes.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 27. Resistencia a la compresión simple teórica y obtenida.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 28. Comparación de costo por m³ de concreto.</i>	<i>96</i>

ÍNDICE DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1. Gráfica granulométrica de muestra 1 de arena.</i>	<i>73</i>
<i>Gráfica 2. Gráfica granulométrica de muestra 2 de arena.</i>	<i>73</i>
<i>Gráfica 3 . Gráfica granulométrica de muestra de grava.</i>	<i>77</i>
<i>Gráfica 4. Resultados de ensaye de resistividad eléctrica en Mezcla A.....</i>	<i>81</i>
<i>Gráfica 5. Resultados de ensaye de resistividad eléctrica en Mezcla B.....</i>	<i>82</i>
<i>Gráfica 6. Comparativa de resultados del ensaye de resistividad eléctrica.</i>	<i>83</i>
<i>Gráfica 7. Resultados de ensaye de velocidad de pulso ultrasónico en Mezcla A de 28 a 90 días.....</i>	<i>84</i>



Gráfica 8. Resultados de ensaye de velocidad de pulso ultrasónico en Mezcla A de 90 a 540 días.....	84
Gráfica 9. Resultados de ensaye de velocidad de pulso ultrasónico en Mezcla B de 28 a 90 días.....	85
Gráfica 10. Resultados de ensaye de velocidad de pulso ultrasónico en Mezcla B de 90 a 540 días.....	85
Gráfica 11. Comparativa de resultados del ensaye de velocidad de pulso ultrasónico.	86
Gráfica 12. Resultados de ensaye de carbonatación en especímenes no curados.	87
Gráfica 13. Resultados del ensaye de compresión simple en Mezcla A de 3 a 90.	88
Gráfica 14. Resultados del ensaye de compresión simple en Mezcla A de 90 a 540 días.	88
Gráfica 15. Resultados del ensaye de compresión simple en Mezcla B de 3 a 90 días.	89
Gráfica 16. Resultados del ensaye de compresión simple en Mezcla B de 90 a 540.	89
Gráfica 17. Comparativa de resultados del ensaye de compresión simple.	90

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Localización del banco Cerritos.	30
Imagen 2. Muestreo de material almacenado.	41
Imagen 3. Masa volumétrica seca suelta en arenas.	43
Imagen 4. Masa volumétrica seca varillada en arenas.	44
Imagen 5. Probeta y picnómetro para medir diferencia de volumen.	46
Imagen 6. Ensaye de colorimetría con arena del banco "Cerritos".	49
Imagen 7. Frascos con arena para ensaye de sedimentación.....	50
Imagen 8. Enrasado de recipiente.....	53
Imagen 9. Secado de grava para ensaye de absorción.	55
Imagen 10. Tamizado de grava.	57
Imagen 11. Llenado de molde cónico.	59
Imagen 12. Medición del revenimiento en concreto fresco.	60
Imagen 13. Moldes cilíndricos de 10 y 15 cm de diámetro.	61
Imagen 14. Curado de especímenes cilíndricos.....	62
Imagen 15. Espécimen cilíndrico de concreto sometido al ensaye de compresión.	64
Imagen 16. Resistómetro utilizado para medir la resistencia eléctrica.	65
Imagen 17. Equipo para la medición de velocidad de pulso ultrasónico.	66
Imagen 18. Espécimen de concreto con efectos de carbonatación.....	68
Imagen 19. Comparativa del material con la tabla colorimétrica.	74
Imagen 20. Resultado de Sedimentación en arena.	74



Objetivos

El objetivo principal es simular la elaboración de mezclas de concreto con proporcionamiento empírico y estudiar sus propiedades físicas y mecánicas, y compararlas con una mezcla de concreto en la cual el proporcionamiento obtenido es resultado de un diseño por el método del American Concrete Institute (ACI).

Además de dicha comparación también se utilizará la normativa mexicana vigente de calidad de materiales para concluir que tan adecuado es el uso en la construcción de cualquiera de las mezclas estudiadas, sin descuidar el aspecto de la durabilidad.



1. Introducción



El concreto es un material muy utilizado por el ser humano esto es porque hoy día el concreto es fundamental y necesario en la construcción de cualquier obra civil gracias a las ventajas que se pueden obtener de su utilización.

Tales ventajas han facilitado la construcción de obras civiles con diseños más eficientes y a su vez más duraderas, una de las principales ventajas es la trabajabilidad que tiene en estado fresco ya que podemos moldear elementos estructurales de acuerdo a los proyectos en los que se trabaje.

Otra razón por la cual es muy utilizado en la construcción es porque tiene un buen comportamiento ante esfuerzos a compresión, por lo cual ha sido y es tan utilizado en la industria de la construcción.

Pero resulta un tanto erróneo referirnos al concreto como un material ya que está compuesto por varios materiales en su mayoría pétreos como arena, grava, agua y un cementante; el cementante más utilizado en la fabricación de concreto hidráulico es el cemento portland el cual es un cementante hidráulico, de ahí la utilización del agua en la fabricación de concreto hidráulico.

Podemos referirnos así al concreto como un compuesto de materiales pétreos más un cementante, entonces para la obtención de una pasta de concreto hidráulico endurecido de buena calidad debemos cuidar entre otros aspectos la calidad de los materiales pétreos utilizados en el mismo sin descuidar la calidad del cementante, el agua, y la metodología de diseño.

A finales del siglo XIX se comenzó a implementar el uso de acero en elementos de concreto para mejorar el comportamiento de los mismos ante diferentes acciones tales como la flexión, obteniendo resultados muy satisfactorios, a esta unión entre el acero y el concreto se le llamo “concreto reforzado” y abrió la posibilidad a los constructores de poder diseñar y construir obras civiles más útiles y seguras.

Es así como mayormente se usan elementos de concreto reforzado, los cuales pueden ser colados en obra o de forma industrial (prefabricados), en estos últimos se tiene un mayor control tanto en los materiales, así como en el proceso de colado (proceso constructivo) por el cuidado de condiciones ambientales tales como la lluvia, el sol, temperaturas de ambiente y temperaturas de fraguado, dichas condiciones pueden dañar o modificar las propiedades de los elementos de concreto endurecido.

Para el colado de elementos hechos en obra se pueden tener dos casos, uno cuando se utiliza concreto premezclado y la otra cuando se hace el concreto en sitio, técnicamente ambos concretos tienen que cumplir con la calidad necesaria.

Cuando se tiene un control de calidad en la construcción se puede estar revisando la calidad del concreto en los elementos colados y observar si es aceptable o no de acuerdo a lo proyectado por el constructor. En el caso de obras pequeñas como una casa habitación, aunque es necesario, no es costoso tener un control de calidad o la supervisión de un Ingeniero dejando así el proyecto en manos de albañiles los cuales muchas veces no tienen



el conocimiento necesario para construir y mucho menos para conocer el comportamiento del concreto.

Los albañiles comúnmente recurren a usar mezclas empíricas de concreto teniendo ellos como prioridad la trabajabilidad del concreto en estado fresco, y es ahí donde pueden surgir muchas variantes principalmente en la resistencia del concreto a compresión, ya que dependiendo de la calidad de los pétreos se podrían obtener muchas resistencias, de las cuales muchas pueden ser o no las necesarias para el correcto funcionamiento de nuestro elemento de concreto reforzado. Otro aspecto que es de suma importancia para poder tener un concreto de buena calidad es el curado del mismo, un buen curado del concreto ayuda a que el mismo alcance la resistencia de proyecto, así como también mejora el comportamiento ante acciones del medio ambiente que puedan degradar las propiedades de la pasta endurecida de concreto.

Hoy día la resistencia de nuestros elementos de concreto es de suma importancia para el constructor, pero la tendencia hoy día es la de revisar la calidad del mismo tras el paso de los años durante toda la vida útil, esto explicado de forma más simple es el diseño por durabilidad de los materiales en este caso del concreto.

Teniendo en cuenta la durabilidad del material hay ciertos ensayos de laboratorio que proporcionan una idea de la calidad de este parámetro, entre ellos tenemos ensayos como: resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y carbonatación, todas estas se realizaron en la experimentación de este trabajo. De esta manera se puede deducir que ante la ausencia de mano de obra calificada en la construcción, no solo se estaría descuidando la resistencia del concreto si no también la durabilidad, lo que terminará repercutiendo en el funcionamiento de los elementos de concreto durante su vida útil.



2. Justificación



En el estado de Michoacán la adquisición de “casas tipo” son una tendencia cada vez más usual entre los habitantes gracias a las facilidades de pago, créditos y otras oportunidades que hacen de las mismas una buena opción para los interesados en adquirir una vivienda de manera rápida.

La calidad del proceso constructivo y de los materiales utilizados en las “casas tipo” es regulado por los constructores de las mismas. Muchas veces los dueños de estas viviendas suelen hacer modificaciones o remodelaciones donde ya no se tiene el mismo control de calidad.

Lo anterior también pasa cuando se busca construir una casa y se evita la mano de obra especializada para economizar el costo del proyecto, dejando la calidad del proceso constructivo y de los materiales a cargo de albañiles los cuales muchas veces no tienen la experiencia ni el criterio necesario para la ejecución del proyecto.

En este trabajo se busca revisar la calidad del concreto hecho de manera empírica por los albañiles en Michoacán, y revisar la resistencia a compresión de las mezclas estudiadas.

También se revisarán las propiedades de las mezclas cuando se han sometido a curado por inmersión contra su exposición a la intemperie en ensayos destructivos como: resistencia a la compresión; ensayos no destructivos como: velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica; y ensayos de durabilidad como: carbonatación.

De esta manera se podrá revisar si las resistencias obtenidas son ideales para la construcción de elementos de concreto reforzado; los resultados obtenidos en los ensayos de durabilidad se compararán con la literatura especificada para revisar el comportamiento del concreto ante la agresión por agentes ambientales.



3. Marco teórico



3.1. Antecedentes Históricos

En cuanto al diseño de concreto hidráulico hoy en día se tienen muchos métodos para el diseño del mismo, así como técnicas para mejorar tanto su comportamiento como su mantenimiento.

Esto es posible gracias a la utilización de tecnologías que nos facilitan conocer las características físico-mecánicas de los componentes del concreto.

En el pasado los primeros en hacer uso de algún cementante fueron los egipcios, estos utilizaron yeso calcinado como mortero el cual era usado principalmente para el relleno de grietas y para obtener una superficie más lisa en las piezas de mampostería colocadas en las construcciones.

Tiempo después los griegos y romanos añadieron otros materiales tales como arena, limo y roca produciendo así lo más cercano a lo que hoy llamamos concreto. También los romanos mezclaron el limo con ceniza volcánica produciendo así lo que hoy conocemos como cemento puzolánico este teniendo un mejor comportamiento en construcciones proyectadas para estar en contacto con el agua.

El uso del cemento disminuyó durante la edad media y de igual manera no hubo gran avance en la investigación de las propiedades del mismo, fue hasta el año de 1756 cuando John Smeaton fue comisionado para la reconstrucción del faro Eddystone en Inglaterra. John Smeaton descubrió un mejor comportamiento del mortero al utilizar una mezcla de puzolana, caliza, arcilla, arena y escoria machacada de hierro. Mezcló estos ingredientes y los utilizó en un proceso constructivo de mamposteo; algunas literaturas citan al producto de la mezcla de estos materiales como concreto, teniendo así en cuenta que desde los romanos no se había hecho uso del concreto hasta dicha fecha.

En la actualidad se cuentan con muchas tecnologías que nos facilitan conocer las características de los componentes del concreto, esto ha permitido tener un cierto control sobre el diseño de las mezclas.

Aun así, los métodos hoy en día utilizados para el diseño de mezclas de concreto son empíricos y esto muchas veces se puede reflejar al revisar la calidad de concreto ya endurecido y compararla con la proyectada por el diseñador.

En cualquier obra civil es de gran importancia asegurar la calidad del concreto y esto se puede facilitar haciendo el diseño con alguno de los métodos como las Curvas de Abrams o el método propuesto por el Instituto Americano del Concreto (ACI).

El concreto como material de construcción es fundamental en cualquier obra civil, y hay diferentes formas de adquirirlo dependiendo de las necesidades del constructor puede ser premezclado, mezclado en obra o en su defecto elementos de concreto prefabricado, estos últimos pueden ser elementos que por su complejidad requieren un estricto control de calidad tanto en el proceso constructivo como en la calidad del mismo concreto.



Las viviendas autoconstruidas han sido una opción viable para los usuarios en México, y a su vez más que una opción también se puede ver como una costumbre, ya que pese a que hoy día se tienen muchas facilidades para adquirir una casa tipo muchas familias descartan esta opción por los requisitos que piden los bancos o por que los constructores de este tipo de viviendas enfocan su diseño en costos, ganancias y regulaciones locales, dejando de lado la comodidad y las necesidades de la gente.

Según una investigación realizada por la empresa inmobiliaria SOFTEC en junio de 2015 “de un millón de viviendas que se construyen en México anualmente el 63% es autoconstruida”. (SOFTEC 2015)

Tomando esta nota como referencia podemos ver que las viviendas autoconstruidas son muy utilizadas en México, y cuando los usuarios optan por adquirir una casa tipo muchas veces es necesario hacer remodelaciones las cuales pueden ir desde pintura hasta la construcción de habitaciones, estas últimas requieren de mano de obra especializada, pero por tratarse de obras pequeñas el usuario recurre a la contratación de albañiles o a hacer uso de sus propios conocimientos en la construcción.

Como resultado de esto las viviendas autoconstruidas presentan muchos defectos tanto en el proceso constructivo como en la calidad de los materiales utilizados; enfocándonos en el concreto, este la mayoría de las veces es elaborado por los albañiles de manera empírica y sin recurrir a algún método de diseño. Los albañiles se enfocan principalmente en la trabajabilidad de la mezcla fresca descuidando así la calidad final del concreto endurecido.

Es muy común que la calidad de los concretos hechos de esta manera sea muy relativa, con mucha dispersión de la resistencia en diferentes partes de los elementos colados y con muy poca durabilidad.

3.2. Componentes del concreto

El concreto es el resultado de la combinación de materiales pétreos como grava y arena con un cementante en combinación de reacción con agua, este cementante es generalmente de origen artificial y específicamente cuando se habla de concreto hidráulico el cementante usado generalmente es el cemento portland.

Se busca que la matriz de pasta endurecida en su mayoría este hecha de material sólido, tratando de evitar los poros, a menos que estos últimos estén proyectados por alguna necesidad específica del proyecto.

Aproximadamente un 80% de la masa de concreto endurecida se conforma del agregado pétreo, este a su vez se clasifica dentro de la mezcla según su granulometría en: arena y grava. El principal fin del agregado pétreo en la pasta para obtener el concreto hidráulico es dar resistencia. De aquí él porque es tan importante la calidad de los agregados pétreos, y la única forma de tomar este aspecto en cuenta en el comportamiento del concreto es mediante la utilización de algún método de diseño.



El cementante compone solo el 20% de la masa de concreto, aunque su proporción es mucho más pequeña en comparación con los agregados pétreos es de suma importancia en la mezcla de concreto.

La función principal del cementante es generar reacción con el agua para adquirir propiedades adhesivas y cohesivas útiles para la unión de los agregados, y así formar una masa sólida y con resistencia ante esfuerzos a compresión.

Dependiendo de las necesidades del constructor también se puede hacer uso de aditivos o sustituciones para mejorar algunas características del concreto como el tiempo de fraguado, la fluidez de la mezcla fresca, disminuir el consumo de cemento o disminuir el calor producido por la hidratación de la pasta fresca, etc.

De los aditivos, así como de las sustituciones no se hablará mucho ya que no se hizo uso de ninguno, ya que en la práctica los albañiles muy rara vez recurren a la utilización de los mismos.

3.2.1. Cemento

3.2.1.1. El cemento en México

A principios del siglo XX el cemento en México se empleaba como insumo artesanal para la fabricación de mosaicos, y como mortero para la reparación de grietas presentes en otros materiales de construcción. Pese a la existencia de materia prima en México en ese entonces no había producción de cemento aun, y todo lo consumido era importado (Vásquez B. y Corrales S 2016).

En esa época se hicieron los primeros intentos para la producción de cemento con la utilización de hornos verticales, uno de ellos en Santiago Tlatelolco y otro en Dublán, Hidalgo; pero no fueron exitosos. Tiempo después se establecieron tres fábricas de cemento, Hidalgo en Nuevo León, Cruz Azul en Hidalgo y Tolteca en Hidalgo (Vásquez B. y Corrales S 2016).

Después de la revolución en 1920, las tres empresas ya establecidas volvían a actividades; y se crearon entonces las compañías cementeras de Cementos Landa y Cementos Monterrey (Vásquez B. y Corrales S 2016).

Para el año de 1946 ya había en México seis empresas dedicadas a la fabricación de cemento en el estado de Hidalgo, una en Monterrey, una en Puebla y la de Apaxco en el Estado de México (Vásquez B. y Corrales S 2016).

En el año de 1951 la industria nacional de cemento ya producía cerca de 1,500,000 toneladas de cemento, la escases de energía eléctrica, combustible y materias prima fueron factores perjudiciales para la producción de cemento en México (Vásquez B. y Corrales S 2016).



A partir de la década de los 90's realizaron importantes reacomodos mediante adquisiciones y adquisiciones que resultaron de suma importancia para entender el reparto del mercado, el comportamiento de los precios y la competencia de los mercados internacionales en la actualidad (Vásquez B. y Corrales S 2016).

3.2.1.2. Componentes del Cemento Portland

A continuación, se describen los principales componentes del cemento Portland.

Clinker de cemento Portland.

El Clinker del cemento Portland se obtiene de la sinterización de una mezcla homogénea de materias primas como la caliza, arcilla, arena y otros componentes. Esta mezcla se calienta hasta llegar a los rangos de la temperatura de sinterización y se forman nuevos compuestos (Sanjuán M. y Chinchón S. 2015).

El clínter de cemento portland es un material hidráulico que debe estar constituido al menos en dos tercios de su masa por silicatos de calcio $[3CaO SiO_2]$ y $[2CaO SiO_2]$, estando constituido el resto por fases del Clinker conteniendo aluminio, hierro y por otros compuestos (Sanjuán M. y Chinchón S. 2015).

Escoria granulada de alto horno

La escoria granulada de horno alto se obtiene por enfriamiento rápido de una escoria fundida de composición adecuada, obtenida por la fusión del mineral de hierro en un horno alto y está constituida al menos en dos tercios de su masa por escoria vítrea y posee propiedades hidráulicas cuando se activa de manera adecuada (Sanjuán M. y Chinchón S. 2015).

La escoria granulada de horno alto debe estar constituida al menos en dos tercios de su masa por la suma de óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y dióxido de silicio (SiO₂). El resto contiene óxido de aluminio (Al₂O₃) junto con pequeñas cantidades de otros compuestos (Sanjuán M. y Chinchón S. 2015).

Puzolanas

De las adiciones que pueden incorporarse al cemento para mejorar alguna de sus propiedades destaca la puzolana natural, que confiere al cemento mayor durabilidad química ya que ofrece una mayor resistencia a los ataques por aguas puras, carbónicas, agresivas o con débil acidez. Los materiales puzolánicos no endurecen por sí mismos cuando se amasan con agua, pero finamente molidos y en presencia de agua reaccionan, a temperatura ambiente, con el hidróxido de calcio disuelto $[Ca(OH)_2]$ para formar compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia. Estos compuestos son similares a los que se forman durante el endurecimiento de los materiales hidráulicos. Las puzolanas están compuestas esencialmente por dióxido de silicio reactivo (SiO₂) y óxido de aluminio (Al₂O₃). El resto contiene óxido de hierro (Fe₂O₃) y otros óxidos (Sanjuán M. y Chinchón S. 2015).



Cenizas volantes

Las cenizas volantes se obtienen por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por los flujos gaseosos de hornos alimentados con carbón pulverizado en las centrales termoeléctricas. Las cenizas obtenidas por otros métodos no deberán emplearse en los cementos. Por tanto, no se pueden emplear cenizas de co-combustión ni de lecho fluidizado. Las cenizas volantes pueden ser de naturaleza silícea o calcárea. Las primeras tienen propiedades puzolánicas; las segundas pueden tener, además, propiedades hidráulicas (Sanjuán M. y Chinchón S. 2015).

Esquisto calcinado

El esquisto calcinado, particularmente el bituminoso, se produce en un horno especial a temperaturas de aproximadamente 800°C. Debido a la composición del material natural y al proceso de producción, el esquisto calcinado contiene fases del Clinker, principalmente silicato bicálcico y aluminato monocálcico. También contiene proporciones mayores de óxidos puzolánicamente reactivos, especialmente dióxido de silicio, además de pequeñas cantidades de óxido de calcio libre y de sulfato de calcio (Sanjuán M. y Chinchón S. 2015).

Caliza

La caliza actúa como un elemento de relleno en el cemento ya que no participa en las reacciones de endurecimiento de los componentes hidráulicos activos. Sin embargo, como consecuencia de sus propiedades físicas, especialmente su distribución de tamaño de partículas, mejora las propiedades de la pasta de cemento tanto fresca como endurecida. Este efecto se basa en el relleno de espacios vacíos entre las partículas del cemento (Sanjuán M. y Chinchón S. 2015).

Humo de sílice

El humo de sílice se origina por la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos de arco eléctrico, para la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio, y consiste en partículas esféricas muy finas conteniendo al menos el 85 % en masa de dióxido de silicio amorfo. Suele tener una marcada reactividad puzolánica ya que reacciona con el hidróxido cálcico para formar hidratos de silicato cálcico (Sanjuán M. y Chinchón S. 2015).

3.2.1.3. Producción y Consumo en México

Hoy día la industria nacional del cemento en México es dominada por seis empresas: Cemex, Grupo Cementos de Chihuahua, Cemento Moctezuma, Holcim-Apasco, Cruz Azul y Cementos Fortaleza. De estas seis empresas Cemex domina el 50% en producción y ventas (Vásquez B. y Corrales S 2016).

Estas empresas controlan el mercado de manera interdependiente ya sea poniendo barreras a productos y empresas extranjeras y con el manejo de los costos y producción. Es por esto que hay bajos niveles en las importaciones de cemento en México (Vásquez B. y Corrales S 2016).



Tomando en cuenta desde el 2005 la mayor tasa de crecimiento en la producción de cemento se registró en el 2006 con un 7.7%, registrándose después una disminución de la misma teniendo así una tasa de crecimiento de -4.3% para el 2013 la cual ha sido la más baja desde el 2005 (Vásquez B. y Corrales S 2016).

En el 2009 se presentaron declives tanto en la producción como en las exportaciones estas últimas disminuyeron hasta en un 52%, esto se vincula con la crisis económica que inicio en los Estados Unidos en el año 2008 y que no solo afecto a la industria del cemento sino también a la industria de la construcción y por lo tanto a la economía de México. La economía mexicana se comenzó a recuperar a partir del año 2013 aun así tanto la construcción como la producción de cemento siguieron presentando tasas negativas de crecimiento (Vásquez B. y Corrales S 2016).

México como país destaca tanto en producción, consumo y exportación de cemento, en el 2015 en México se produjeron 44.9 millones de toneladas de cemento y por primera vez en 10 años creció una tasa del 7%, pese a esto la exportación de este insumo se ha visto en declive desde el 2012 (Vásquez B. y Corrales S 2016).

Para el 2005 la producción de cemento fue de 39.7 millones de toneladas, mientras que el consumo nacional per cápita fue de 384.1 kilos por habitante, y aunque la producción en el 2015 fue mucho mayor el consumo per cápita se redujo a 375.5 kilos por habitante (Vásquez B. y Corrales S 2016).

En los efectos de la crisis económica del 2008 se ve cómo el consumo per cápita en el 2009 fue de 396 kilogramos, esto por las presiones de recuperación a través de la inversión en estructura e ingeniería (Vásquez B. y Corrales S 2016).

En México y en el mundo, en obras de gran auge como puentes, presas y edificios se necesita de grandes volúmenes de cemento, esto hace que solo las empresas con el capital suficiente para producirlo y transportarlo hasta el consumidor puedan competir en el mercado mexicano del cemento (Vásquez B. y Corrales S 2016).

En la Tabla 1 se muestra un resumen tanto de la producción, así como el consumo de cemento en México.



Tabla 1. Producción de cemento en México.

Año	Producción del cemento (millones de toneladas)	Tasa de crecimiento, producción (%)	Consumo per cápita (kilos por habitante)
2005	39.7	-	384.1
2006	42.7	7.7	413.7
2007	43.4	1.6	420.5
2008	42.3	-2.6	409.5
2009	40.9	-3.2	396.3
2010	39.2	-4.2	349.2
2011	40.6	3.6	361.6
2012	41.6	2.5	370.5
2013	39.8	-4.3	354.6
2014	41.9	5.3	373.3
2015	44.9	7	375.5

(Vásquez B. y Corrales S 2016)

3.2.2. Agregados pétreos

Es necesario definir algunos conceptos utilizados en este trabajo para facilitar el entendimiento de los mismos más adelante.

Cuando nos referimos a agregado se habla de un conjunto de materiales de composición mineral natural o artificiales, utilizados en la fabricación de concreto hidráulico.

Para la fabricación de concreto hidráulico es necesario clasificar los agregados en grava y arena esta clasificación depende del tamaño de las partículas, la grava son aquellas partículas cuyo tamaño es mayor a 6.35mm; y la arena son aquellas partículas cuyo tamaño esta entre 6.35 mm y 0.127 mm, todo material con partículas con tamaño por debajo de 0.127 mm es definido como material fino.

Los agregados utilizados para la fabricación de concreto hidráulico se pueden obtener mediante la explotación de bancos material, depósitos que afloran a la superficie o del material que es arrastrado por el caudal de los ríos.

De esta manera los clasificaremos en este trabajo como: triturados, volcánicos y de río.

3.2.2.1. Agregados pétreos triturados

Estos agregado son de origen natural y se distinguen principalmente por el proceso de obtención de los tamaños, ya que para poder obtener los tamaños requeridos para la fabricación de concreto hidráulico es necesario extraer el material de la roca madre, triturarlo y cribarlo a través de tamices de diferentes tamaños para poder clasificarlo. Este tipo de material es el que presenta mejores propiedades mecánicas tales como densidad apta para su uso en concreto, resistencia mecánica, y por el proceso de trituración las partículas adquieren



formas aristadas que mejoran la adherencia con la matriz cementante. Una desventaja de la utilización de este agregado es que se tendría un concreto con una masa volumétrica alta o mayor al proyectado.

3.2.2.2. Agregados pétreos volcánicos

A diferencia de los agregados pétreos triturados, los agregados pétreos volcánicos se obtienen de material depositado en la superficie, este material solo es transportado mediante maquinaria o bandas hasta los tamices para poder cribarlo y clasificarlo.

Los agregados pétreos de origen volcánico regularmente tienen buenas características para su uso en la fabricación de concreto hidráulico, presentan densidades aptas, un buen comportamiento mecánico, y aunque no llevan un proceso de trituración tienen buena adherencia con la matriz del cemento. Una desventaja de estos agregados es que dependiendo de la zona de explotación la calidad de los pétreos puede variar bastante, teniendo de esta manera agregados con un alto contenido de poros y baja resistencia mecánica. Aun así, este tipo de material es el más comercial en tiendas de materiales para la construcción, ya que los albañiles en México lo utilizan mucho en la construcción de obras.

3.2.2.3. Agregados pétreos de río

Al igual que los agregados pétreos volcánicos los agregados pétreos de río se obtienen de un depósito solo que en este caso de un depósito fluvial y se clasifican los tamaños con el uso de cribas y bandas.

Regularmente este tipo de material presenta buenas características mecánicas, pero el proceso de intemperismo al que es sometido por el caudal del río da como resultado agregados redondeados los cuales tienen poca adherencia con la matriz de cemento. Aunque no es recomendable el uso de este tipo de agregados es muy común su uso en zonas donde es la única opción para la fabricación de concreto hidráulico.

Para tener un concreto de calidad óptima con la utilización de este tipo de agregado es necesario mejorar la adherencia con la matriz cementante, esto se puede hacer con un mayor consumo de cemento, aunque la cuantificación de este se haría de manera empírica ya que los métodos actuales para el diseño de concreto hidráulico no contemplan la forma de los agregados.

3.2.3. Agua

El agua es un componente esencial en las mezclas para concreto ya que permite que el cemento tenga una reacción ligante con los agregados incluidos en la mezcla.

Para cada diseño de concreto hay una cantidad de agua necesaria para la hidratación del cemento, el resto se utiliza para aumentar la fluidez de la pasta, para la lubricación de los agregados y para poder obtener la manejabilidad proyectada en las mezclas de concreto fresco. El agua que queda dentro de la mezcla se evapora con el fraguado del mismo quedando espacios vacíos llamados poros los cuales no dan ningún aporte a la resistencia



final del concreto, por esto es importante que cuando se necesite una mezcla fluida no se haga adición de agua, sino agregando aditivos fluidificantes.

Es fundamental el control del agua en la mezcla durante la preparación y colocación ya que alterar este contenido de agua implicaría una modificación de las propiedades proyectadas del concreto endurecido.

De aquí que el contenido de agua determine la resistencia del concreto, así como su durabilidad, concretos con altos contenidos de agua pueden tener resistencias a compresión bajas y pueden ser fácilmente atacados por agentes externos. Concretos con bajo contenido de agua tienen resistencias a compresión más elevadas y una matriz más densa siendo así más difícilmente afectados por agentes externos teniendo así una mejor durabilidad.

El agua usada en la elaboración de concreto debe ser apta para el consumo humano, no debe tener sustancias como aceites, ácidos y materia orgánica. Por lo cual se puede decir que casi cualquier agua natural que pueda beberse y que no tenga sabor ni olor es útil para la mezcla de concreto.

Es posible usar agua extraída de fuentes naturales cuando no se tiene de una red de abastecimiento, la desventaja es que puede estar contaminada con un alto contenido de sales y materia orgánica. Las aguas superficiales a menudo pueden estar altamente contaminadas con: aceite, arcilla, sedimentos, hojas y desechos producto de la actividad humana, todo esto hace que resulte inadecuada su utilización sin un pretratamiento para la elaboración de concreto.

El agua de mar puede ser utilizada en concreto sin acero de refuerzo, esto para evitar que las sales contenidas en el agua afecten el desempeño de las varillas.

3.3. Curado del concreto

El curado del concreto es un proceso sumamente importante ya que la calidad proyectada del mismo depende tanto del diseño como del cuidado que se tuvo durante el curado.

Se deben garantizar que los elementos colados con concreto estén durante un tiempo apropiado en condiciones de humedad y temperatura aptas para que se le permita la reacción química entre el cemento y el agua (hidratación del cemento).

Los factores que se ven directamente afectados por el curado son la contracción, la resistencia y la durabilidad. Un concreto con un mal curado puede verse afectado en la disminución de su resistencia y en la durabilidad teniendo así un concreto no aceptable.

Hoy día se tiene gran variedad y marcas de cementos utilizados en la elaboración de concreto, todos estos son susceptibles a la calidad del curado, ya que para poder presentarse una generación de hidróxido de calcio y la actividad puzolánica, se debe tener agua en cantidad y tiempo suficiente.



En el cemento se puede tener adiciones como cenizas volantes, escoria de alto horno, humo de sílice; todas estas pueden mejorar las características del concreto si se tiene un buen proceso de curado, pero si por el contrario se tiene un mal curado o un curado nulo pueden verse afectadas las propiedades de estas adiciones o incluso desaparecer.

Hay muchos factores presentes en obra que pueden afectar el curado del concreto en los elementos de colados con concreto por mencionar algunos tales como:

- **Tiempo de curado.** Mientras más tiempo se curen nuestros elementos de concreto mejor calidad tendrá el concreto.
- **Temperatura ambiente de curado.** La temperatura ideal del agua de curado es de 10 a 27°C (Gutiérrez L. 2003). Esta temperatura se puede ver directamente afectada por la temperatura de la zona.
- **Método de curado.** Muchas veces se dificulta el proceso de curado debido al elemento, ya que no es lo mismo el curado en una zapata que en una columna. Sin importar cuál sea el método lo ideal es siempre mantener permanente la humedad en el elemento, para facilitar este proceso se pueden usar aditivos sellantes que mantengan la humedad dentro del elemento, pero estos, aunque son muy útiles no garantizan el tiempo húmedo de los elementos.
- **Dimensiones y secciones de los elementos colados.** En medida que los elementos tengan grandes áreas expuestas a la intemperie, se facilitará la pérdida de humedad.
- **Temperatura del concreto.** En medida que aumenta la temperatura del concreto es más fácil la pérdida de humedad.

Cabe mencionar que de los factores anteriormente mencionados pocos o ninguno son supervisados en construcciones donde no se cuenta con la participación de mano especializada, lo mismo sucede en viviendas autoconstruidas. Y ya que de igual manera no se tiene un control de calidad en este tipo de obras la calidad de los elementos colados con concreto no se revisa. De esta manera los defectos en el concreto se pueden hacer notar una vez que estas construcciones ya están en uso, dando como resultado obras poco duraderas y seguras.

3.4. Patologías del concreto

Como cualquier otro material de construcción el concreto también se puede ver afectado por el paso del tiempo, y un buen comportamiento de este puede ser proyectado por el fabricante.

El concreto se verá principalmente afectado por las sustancias químicas presentes en el ambiente y por las introducidas en la matriz con el agua o los agregados.

Ambas formas de daño pueden ser evitadas tanto cuidando la calidad del agua y los agregados, y revisando el diseño por durabilidad.

Cuando a un diseño por durabilidad se refiere se habla de disminuir lo más posible la cantidad de poros contenidos en el concreto, ya que es a través de estos donde se propagan las sustancias dañinas del mismo tanto las contenidas y las presentes en el medio ambiente.



En el proceso de mezclado del concreto se introduce una cierta cantidad de aire, junto con el agua toman espacio en la mezcla fresca de concreto, como ya se mencionó el agua se evapora dejando espacios vacíos en todas direcciones.

Los poros se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Poros por aire atrapado. Se originan en el proceso de mezclado, son relativamente grandes e incluso pueden ocasionar huecos u oquedades.
- Poros por aire incorporado. Son poro producto de la incorporación de aire con el uso de aditivos.
- Poros capilares. Este tipo de poros no se pueden ver a simple vista, se encuentran interconectados de manera aleatoria a través de la pasta, estos influyen directamente en la resistencia mecánica y la permeabilidad aumentando así la vulnerabilidad de la pasta.
- Poros de gel. Estos poros se presentan en el gel producto de la hidratación del cemento.

Siendo los poros capilares los que facilitan la introducción de sustancias agresivas al concreto, es importante evitarlos ya que un concreto con un alto contenido de estos poros puede ser fácilmente afectado por factores como:

- Congelamiento y deshielo.
- Ambientes químicamente agresivos.
- Corrosión del acero de refuerzo en concreto reforzado.
- Reacciones químicas en los agregados.
- Reacción química con la pasta endurecida.

La identificación de un concreto que está siendo afectado por agentes externos puede ser fácil, el problema muchas veces reside en la reparación ya que esta puede ir de la mano en una corrección completa del proyecto, por ejemplo, un nivel freático que afecte a las columnas.

Algunos de los fenómenos presentes en un concreto dañado pueden ser:

- Decoloración de la superficie del concreto.
- Ampollas en el concreto.
- Agrietamiento por contracción plástica.
- Desgaste de la superficie.
- Descaramiento de la superficie.
- Eflorescencia
- Abrasión

Todos estos fenómenos se presentan cuando el concreto ya está siendo atacado y es necesario tomar medidas de reparación.



Finalmente se puede decir que la durabilidad de un concreto es inversamente proporcional al contenido de poros no introducidos de manera artificial.

Para este trabajo se hicieron ensayos de durabilidad tales como: velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica y carbonatación; de estos ensayos solo el de carbonatación nos da un índice directo del fenómeno de degradación en el concreto, el resto de los ensayos nos da un índice de contenido de poros y su calidad al comparar los datos con normativa vigente.

3.4.1. Carbonatación

En concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. Sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia adentro desde la superficie expuesta del concreto, y asalta al acero de refuerzo causando la corrosión.

La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutro.

El concreto, con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo ahogado contra la corrosión. Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino.

Cuando progresa la carbonatación hacia la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH (por debajo de 9.5), es posible que empiece la corrosión, resultando finalmente en el agrietamiento y astillamiento del concreto. Aunque la difusión del dióxido de carbono a través de los poros de concreto pueda requerir años antes de que ocurra el daño por corrosión, puede ser devastadora y muy costosa de reparar.

La carbonatación es una condición relativamente sencilla de identificar y diagnosticar. La manera más fácil de detectar la carbonatación en una estructura es romper un pedazo de concreto (preferentemente cerca de un borde) en donde se sospeche que hay carbonatación. Después de soplar todo el polvo residual del espécimen o del substrato, se pulveriza una solución de 1 o 2 por ciento de fenoltaleína en alcohol sobre el concreto. Las áreas carbonatadas del concreto no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor de 9 a 9.5 adquirirán un color rosado brillante. Este cambio muy apreciable de color muestra cuán profundamente ha progresado el "frente" de carbonatación dentro del concreto. El aumento de carbonatación depende, en gran medida, del contenido de humedad y permeabilidad del concreto.

Un recubrimiento bajo del concreto y defectos de superficie tales como grietas y pequeños hoyos proporcionan una ruta directa al acero de refuerzo. Del mismo modo, los pequeños hoyos pueden, a veces, dar como resultado la pérdida del recubrimiento protector del concreto.



4. Materiales de estudio

4.1. Cemento

Las marcas cementeras de las que se ha hablado en este trabajo dominan el mercado mexicano, pero sus ventas se ven favorecidas dependiendo de la zona donde se comercie su producto. Para el caso de Michoacán, por ejemplo, el cemento más comercializado es el Tolteca de Cemex, es por esta razón que se ha elegido este mismo tipo de cemento ya que también es muy común su consumo en obras de baja índole como casas autoconstruidas.

El cemento en estudio es un CPC-30-R-RS “Tolteca Extra” el cual se adquirió en presentación de costales de 50 kg.

4.2. Arena

En tiendas de venta de materiales para la construcción es muy común encontrar arena volcánica siendo esta la opción de más fácil acceso y económica para los compradores. Por esta razón se eligió este tipo de arena para el estudio, y así poder comparar las mezclas de concreto elaboradas con este material.

Se obtuvo un total de 2m^3 de arena de origen volcánico del banco de “Cerritos” ubicado en la localidad de Cerritos Michoacán, muestreada de acuerdo a la norma de muestreo NMX-C-030-ONNCCE, 2004

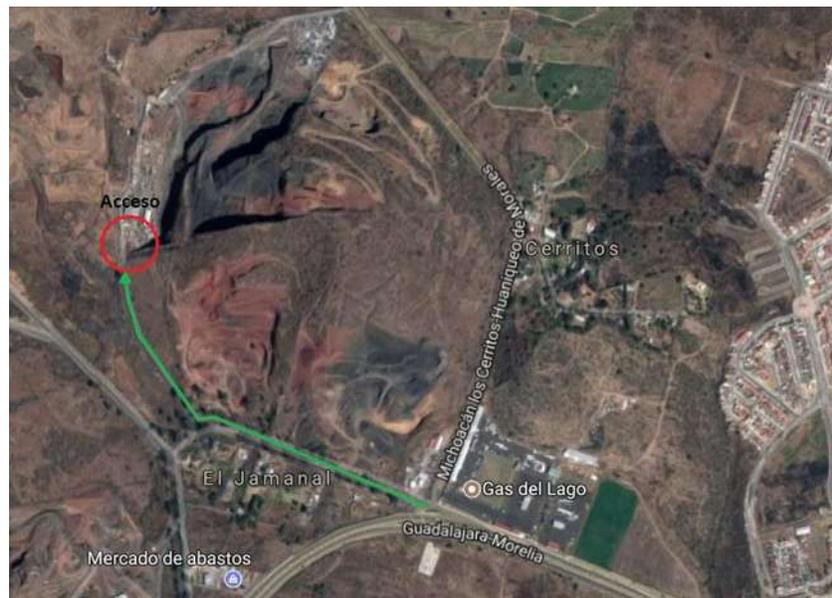


Imagen 1. Localización del banco Cerritos.

4.3. Grava

Como ya se explicó anteriormente los agregados de origen volcánico son los más comercializados en Michoacán por su economía y accesibilidad. La grava de origen volcánico siempre está presente en la construcción de casas pequeñas y la mayoría de las



veces la experiencia de los albañiles basta para que tengan un criterio para identificar una grava de una calidad aceptable para sus obras.

La grava en estudio para este trabajo es de origen volcánico con un tamaño máximo tentativo de $\frac{3}{4}$ ", obteniendo una muestra de 1.5m^3 directamente del banco "Cerritos" ubicado en la localidad de Cerritos Michoacán.

4.4. Agua

Ya se mencionó en el "Capítulo 3.2.3." la calidad del agua a utilizar puede ser la misma para el consumo humano. El uso de un agua con tal calidad puede encarecer la producción de concreto, por lo cual se utilizó el agua suministrada en el laboratorio la cual tiene la calidad necesaria para la producción de concreto.

Las características del agua serán analizadas en capítulos posteriores.



5. Desarrollo experimental



5.1. Diseño de Mezcla de concreto por el método del ACI

El Instituto Americano del Concreto por sus siglas en inglés ACI desarrolló un método para el diseño de mezclas de concreto el cual es muy utilizado hoy día por profesionales en el campo de la construcción.

Cabe mencionar que este método es empírico y no garantiza del todo la calidad de la mezcla del concreto.

Es importante tener características de los agregados como:

- Masa volumétrica suelta y varillada.
- Humedad de absorción y humedad actual.
- Densidad
- Módulo de finura en el caso de la arena.
- Tamaño máximo en el caso de la grava.

Para el caso del cementante:

- Densidad
- Masa volumétrica.

Y las características del concreto a diseñar:

- Resistencia de diseño f'_c .
- Revenimiento de diseño.
- Contenido de aire.
- Desviación estándar. (El proyectista decide si es necesario la utilización de la desviación estándar)

El diseño de mezclas de concreto con el uso de este método está basado en la utilización de ciertas tablas que se explicarán a continuación.

5.1.1. Procedimiento para el diseño de mezclas de concreto por el método del ACI

1. En la Tabla 2 se entra con el valor del revenimiento de proyecto y el tamaño máximo de la grava, para obtener la cantidad de agua en kilogramos por cada metro cúbico de concreto.



Tabla 2. Requerimientos de Agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.

Revenimiento, mm	Agua en Kg por metro cúbico para tamaño máximo nominal del agregado indicado							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
Concreto sin aire incluido								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
% de aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-
Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo al nivel de exposición								
Exposición ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición severa	7.5	7	6	6	6	5	4.5	4

Fuente: ACI 211

- En base a la resistencia de diseño se selecciona la relación agua-cemento de la Tabla 3.

Tabla 3. Relaciones Agua/Cemento para la resistencia a la compresión del concreto.

Resistencia a la compresión a los 28 días		Relación Agua/Cemento en masa	
MPa	Kg/cm ²	Sin aire incluido	Con aire incluido
40	408	0.42	-
35	357	0.47	0.39
30	306	0.54	0.45
25	255	0.61	0.52
20	204	0.69	0.6
15	153	0.79	0.7

Fuente: ACI 211

- Cálculo del contenido de cemento.

Una vez seleccionada la relación agua/cemento y ya que se tienen la cantidad de agua por metro cúbico de concreto se procede a calcular el contenido de cemento por metro cúbico con la siguiente ecuación:



$$\frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = \text{Rel}(A/C)$$

Siendo $\text{Rel}(A/C)$ el valor obtenido de la Tabla 3.

Conociendo el agua y $\text{Rel}(A/C)$ como valores reales solo se despejan de la ecuación quedando de la siguiente manera:

$$\text{Cemento} = \frac{\text{Agua}}{\text{Rel}(A/C)}$$

4. Cálculo del contenido de agregado grueso.

Para determinar el contenido de agregado grueso entramos a la Tabla 4 con el tamaño máximo nominal de la grava y con el módulo de finura de la arena.

Tabla 4. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen del concreto

Tamaño máximo nominal del agregado		Volumen de agregado grueso varillado en seco por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura del agregado			
plg	mm	2.4	2.6	2.8	3
3/8	9.5	0.5	0.48	0.46	0.44
1/2	12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4	19	0.66	0.64	0.62	0.6
1	25	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2	37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
2	50	0.78	0.76	0.74	0.72
3	75	0.82	0.8	0.78	0.76
6	150	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: ACI 211

Una vez que se obtiene el volumen del agregado grueso (V) y con el valor de la masa volumétrica varillada en grava ($MVSVG$) se puede calcular el contenido del mismo en kilogramos por metro cúbico (W), como se muestra a continuación:

$$W = (V) \times (MVSVG) = Kg$$

5. Cálculo del contenido de agregado fino.

En este punto solo falta la cantidad de arena a utilizar, para eso se hace un resumen de los datos ya obtenidos de los materiales en masa y con la ayuda de la densidad de los mismo se obtiene el volumen.



Para obtener el volumen del material basta con dividir su masa entre la densidad.

$$Material_{Volumen} = \left(\frac{Material_{Masa}}{Densidad} \right)$$

De esta manera se llena la cuarta columna de la tabla excepto por la arena. Como ya sabemos el cálculo es para un metro cúbico, así es como a un metro cúbico restamos el total de todos los materiales y el sobrante será el contenido de arena en volumen.

$$Arena_{Volumen} = 1 - (Cemento_{Volumen} + Grava_{Volumen} + Agua_{Volumen} + Aire_{Volumen})$$

Para obtener el contenido en masa solo se multiplica por su correspondiente valor de densidad, respetando las unidades utilizadas.

$$Arena_{Peso} = (Arena_{Volumen}) \times (Densidad)$$

6. Resumen por metro cúbico de concreto.

Se hace un resumen con el contenido de materiales con ayuda de la Tabla 5.

Tabla 5. Tabla de materiales por metro cúbico de concreto.

	Masa	Densidad	Volumen
	kg	kg/m ³	m ³
Cemento			
Arena			
Grava			
Agua			
Aire			
total:		-	1

5.2. Ensayes en cemento

5.2.1. Densidad del cemento

Una de las propiedades más importantes del cemento es la densidad ya que esta es utilizada para la dosificación de mezclas de concreto, dicha propiedad es ignorada o muchas veces desconocida por los albañiles, dejando en manos del productor de cemento la densidad de su producto, pero en cuanto a un diseño de concreto resulta esencial la utilización de este valor como referencia de la calidad del cemento utilizando. El método de ensaye seguido es el establecido en la norma mexicana: NMX-C-152-ONNCCE, 2010, Determinación de la densidad.

Equipo:

- Frasco de Le Chatelier.



- Muestra representativa de cemento.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- 250 ml de petróleo.
- Un recipiente con agua.
- Termómetro.
- Embudo de material no absorbente.

Procedimiento:

- Se vierte el petróleo en el frasco de Le Chatelier hasta el nivel entre 0 y 1ml, tratando de que no quede adherido a las paredes del frasco y liberando las burbujas del fondo del frasco; el fondo del frasco se sumerge en un recipiente con agua.

Nota: La temperatura del agua en el recipiente no debe de variar más de 0.2°C al momento de tomar la temperatura inicial y la final.

- Se toma la lectura del líquido en la parte inferior del menisco y se anota como lectura inicial L_i (ml).
- Se pesan 60 gramos de cemento hidráulico M_c (g).
- Se agrega el cemento lentamente de forma vertical cuidando, que no se hagan obstrucciones.
- Se le coloca el tapón al frasco, se inclina y se rueda horizontalmente para liberar el aire atrapado en el cemento y baje el que haya quedado atrapado en las paredes.
- Se toma la lectura de la parte inferior del menisco registrándola como lectura final L_f (ml).

$$Densidad = \frac{MC}{L_f - L_i}; \left(\frac{gr}{cm^3}\right)$$

5.2.2. Consistencia normal

La prueba de consistencia normal se usa para conocer la cantidad de agua necesaria en porcentaje con respecto a una masa de cemento bien hidratada y así poder realizar los ensayos de sanidad del cemento y tiempos de fraguado. Se utiliza la aguja del aparato Vicat para revisar si la mezcla tiene la cantidad de agua suficiente.

Según el método de ensayo la cantidad de agua suficiente contenida en la masa de cemento se presenta cuando la aguja del aparato Vicat penetra 10 mm durante 30 segundos la masa de cemento hecha. Esta prueba esta especificada en la norma mexicana: NMX-C-059-ONNCCE, 2013, Determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos.

Equipo:

- Muestra representativa de cemento.
- Agua limpia.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.



- Recipiente para mezclar.
- Probeta graduada de 100 y 200ml con aproximación a 1 y 2 ml respectivamente.
- Aparato Vicat.
- Cristal liso.
- Espátula

Procedimiento:

- Se coloca el anillo cónico del aparato Vicat en la superficie del mismo, se nivela la aguja y se ajusta la lectura del aparato en ceros.
- De la muestra representativa se pesan 350 gramos de cemento y se ponen en el recipiente en forma de cráter con ayuda de la espátula.
- Para comenzar se puede proponer un porcentaje para medir el agua a utilizar, se recomienda 30%, este volumen se vacía dentro del recipiente en el cráter de cemento.
- Para permitir que el cemento absorba toda el agua, se deja reposar durante máximo 60 segundos.
- Después de transcurridos los 60 segundos se realiza el amasado de la mezcla de la siguiente manera.
 - Durante 30 segundos se homogeniza la pasta de cemento presionándola con las manos.
 - En otros 30 segundos se forma una esfera y se pasa de mano en mano 6 veces.
 - En los últimos 30 segundos se vierte la pasta del cemento en el anillo cónico, el cual tiene que estar sobre el cuadro de cristal del aparato Vicat, y se retira el excedente.
- Una vez lleno el anillo con la pasta se coloca debajo de la aguja previamente ajustada en ceros, y se suelta la aguja contando el tiempo con ayuda de un cronómetro, pasado 30 segundos se mide la penetración de la aguja.
- La penetración de la aguja debe de ser de 10 milímetros con una tolerancia de ± 1 milímetro, si es el caso se dice entonces que se encontró la consistencia normal, si no es así se tiene que realizar otros tanteos.

5.2.3. Tiempos de fraguado

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química que genera calor la cual provoca el endurecimiento de la mezcla. En este proceso la mezcla comienza a endurecer perdiendo su plasticidad y haciéndola difícil de moldear; a esto se la llama fraguado inicial de la mezcla. A medida que se sigue endureciendo la mezcla, se presenta un nuevo estado donde la mezcla ha alcanzado propiedades de endurecimiento muy apreciables; a este estado se le llama fraguado final.

Es así como puede definirse como tiempo de fraguado de una mezcla, al lapso necesario para que una mezcla pase del estado fluido a sólido.

Equipo:

- Aparato de Guillmore.



Procedimiento:

- Con la pasta que se obtuvo del ensaye de consistencia normal, se aplanó la muestra de la pasta sobre un cristal en forma de círculo de aproximadamente 12cm de diámetro y 1cm de espesor.
- Para determinar el tiempo de fraguado inicial se coloca el cristal con la mezcla debajo de la aguja de mayor área, se deja caer la aguja del aparato Guillmore sobre la superficie de la pasta y cuando está ya no deje marca alguna se mide desde el tiempo en que entro el agua en contacto con el cemento. Para el caso del fraguado final se hace el mismo procedimiento solo que en este caso se utilizará la aguja con menor área del aparato.

Se recomienda revisar la penetración cada 15 minutos para el fraguado inicial y después de 5 horas cada media hora para el fraguado final.

5.2.4. Diseño de mezcla

El diseño de una mezcla de concreto se encarga de lograr una buena dosificación de las cantidades de los componentes del concreto, considerando un buen manejo del costo y los requisitos de trabajabilidad en estado fresco, resistencia, durabilidad, masa y apariencia del concreto en estado endurecido.

El diseño de mezclas se considera un proceso de selección de los componentes del concreto para obtener un concreto con la calidad proyectada. Se puede considerar a la dosificación como un factor que influye directamente con la calidad del concreto, así que el proceso de dosificación del concreto debe ser tan simple como sea posible; por ejemplo los albañiles en obra usan dosificaciones sin referencia alguna, y cuando se evalúan dichas dosificaciones en referencia a propiedades medibles en el concreto como la resistencia, su variabilidad es muy amplia incluso en especímenes de la misma mezcla y difícilmente se comportan de manera constante.

Para determinar los componentes y las cantidades de los mismos en la dosificación del concreto se tiene que conocer los requisitos y especificaciones del concreto proyectado. La determinación de las cantidades de los materiales a utilizar se basa en datos de calidad de los mismos. Cuando no se disponen de dichos datos se pueden realizar estimaciones preliminares.

Los datos de calidad de los materiales son: granulometría, masa volumétrica, absorción, tamaño máximo del agregado, módulo de finura, densidad, etc.

Como ya se mencionó en capítulos anteriores actualmente todos los métodos de dosificación de mezclas de concreto son empíricos y no garantizan la calidad del concreto por lo cual hoy día es muy común que incluso al usar estos métodos para la dosificación los constructores revisan constantemente si la calidad del concreto es concorde con la analizada en el método de dosificación.



Para el diseño de la mezcla testigo de este proyecto se utilizó el método establecido por el Instituto Americano del Concreto por sus siglas en inglés ACI.

Y las mezclas empíricas se elaboraron con las dosificaciones más comúnmente usadas por los albañiles en la ciudad de Morelia.

5.3. Ensayes en arena

5.3.1. Muestreo en arena

Es importante hacer un buen muestreo del material a ensayar ya que el material caracterizado teóricamente tiene que ser representativo del material usado, tratando de garantizar una distribución completa y homogénea de todas las partículas.

El muestreo de agregados esta especificado por la norma (NMX-C-030-ONNCE-2004), *Muestreo de agregados*, la cual también se usó como referencia para el correcto muestreo de material pétreo en este proyecto.

La norma especifica el procedimiento de muestreo a realizar dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el material en el depósito. Para este caso el material se muestreo estando ya almacenado, para lo cual la norma nos especifica lo siguiente:

Equipo:

- Palas
- Costales
- Medio de transporte

Procedimiento:

- Tomar porciones aproximadamente iguales de diferente nivel y directriz del almacén (Ver imagen 2).
- Todas las muestras simples tomadas se mezclan para formar una sola muestra compuesta, esta tiene que ser representativa del material almacenado.
- La muestra se lleva al laboratorio para su posterior análisis.

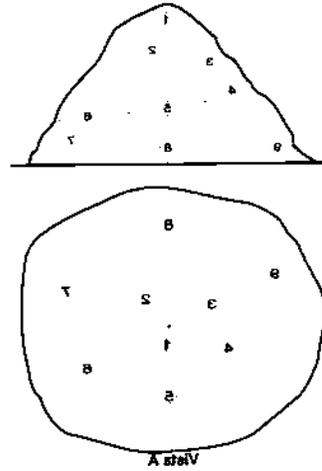


Imagen 2. Muestreo de material almacenado.

Fuente: NMX-C-030-ONNCE-2004

5.3.2. Cuarteo en arena

El muestreo del material a analizar se complementa con el cuarteo de las muestras obtenidas, de esta manera se asegura que la muestra obtenida este completamente homogénea y que por lo tanto sea representativa del material muestreado.

Equipo:

- Palas
- Divisor de muestras
- Recipientes y charolas

Procedimiento:

- Se vacía el material seco en una superficie limpia.
- Con las palas se pasa el material de un lado a otro formando un montículo cónico.
- Se repite el paso anterior tres veces y se aplanan con la parte plana de la pala.
- Se divide el material en cuatro partes en forma de cruz.
- De las cuatro partes se toman dos en forma cruzada para su uso, y las otras dos se regresan al recipiente o se desechan.

5.3.3. Masa volumétrica seca suelta en arena

La importancia de la determinación de la masa volumétrica suelta se refiere a conocer la masa del agregado por unidad de volumen sin tener un acomodo de sus partículas.



El procedimiento descrito en este ensaye esta referenciado con la norma “Masa volumétrica” (NMX-C-073-ONNCCE-2004).

Equipo:

- Palas
- Cucharón
- Varilla punta de bala.
- Recipiente con masa y volumen conocido.
- Báscula con aproximación al gramo.

Procedimiento:

- Se distribuye el material y se realiza el procedimiento de cuarteo hasta dejar dividida la muestra en cuatro partes.
- Se coloca el recipiente en el centro de las muestras y se llena con el cucharón tomando de dos de las muestras cruzadas, dejando caer el material a no más de 5 cm por arriba de la arista superior del recipiente.
- Una vez lleno se enrasa la superficie con la varilla punta de bala y se limpia el recipiente de los excesos de material que pudieron quedar adheridos.
- Se coloca el recipiente en la báscula y se pesa el material más la masa del recipiente registrándolo como masa total.

$$M.V.S.S. = \frac{M}{V}; \left(\frac{gr}{cm^3} \right)$$

Donde:

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

M: La masa neta de la arena descartando la masa del recipiente. (g)

V: El volumen del recipiente. (cm³)



Imagen 3. Masa volumétrica seca suelta en arenas.

5.3.4. Masa volumétrica seca varillada en arena

La importancia de la determinación de la masa volumétrica varillada se refiere a conocer la masa del agregado por unidad de volumen teniendo un acomodo de las partículas.

El procedimiento descrito en este ensaye esta referenciado con la norma (NMX-C-073-ONNCCE-2004), Masa volumétrica.

Equipo:

- Palas
- Cucharón
- Varilla punta de bala.
- Recipiente con masa y volumen conocido.
- Báscula con aproximación al gramo.

Procedimiento:

- Se distribuye el material y se realiza el procedimiento de cuarteo hasta dejar dividida la muestra en cuatro partes.
- Se coloca el recipiente en el centro de las muestras y se llena en tres capas, cada capa de un tercio de la altura del recipiente.
- Después del llenado de cada capa se dan 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en todo el material.
- Una vez hecho esto con las tres capas se enrasa con la varilla punta de bala y se retiran los excesos adheridos a la superficie del recipiente.



- Se coloca el recipiente en la báscula y se registra la masa total de la arena más el recipiente.

$$M.V.S.V. = \frac{M}{V}; \left(\frac{g}{cm^3}\right)$$

Donde:

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

M: Masa total de la arena descartando la masa del recipiente. (g)

V: El volumen del recipiente. (cm³)



Imagen 4. Masa volumétrica seca varillada en arenas.



5.3.5. Densidad en arena

Este ensaye es de mera importancia para la dosificación de las mezclas de concreto y para conocer la calidad de la arena, valores altos de densidad en arena se presentan en arenas de buena calidad y con bajo contenido de poros.

El procedimiento descrito en esta prueba esta referenciado por la norma: (NMX-C-165-ONNCCE-2014), Determinación de la densidad relativa y absorción del agregado fino.

Equipo:

- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Parrilla
- Charolas metálicas.
- Molde troncocónico.
- Pisón
- Espátula
- Probeta
- Picnómetro

Procedimiento:

- Se pone la muestra a saturar durante 24 horas, esta muestra se obtiene mediante el procedimiento de cuarteo.
- Se seca el material en la charola colocándola en la parrilla para retirar el exceso de agua.
- Para saber cuándo ya se retiró el exceso de agua se coloca el molde troncocónico, se llena el molde con la arena en tres capas dando 12 golpes con el pisón a la primera capa, 8 golpes en la segunda y 5 golpes en la tercera.
- Inmediatamente se retira el molde y si la arena se disgrega ligeramente quiere decir que esta seca superficialmente.
- En la probeta se coloca un volumen inicial de agua registrándolo (VI) en cm^3 .
- Se pesa una muestra de arena seca superficialmente de entre 200 y 300 gramos registrándola como masa de la muestra (MA).
- Este material se coloca dentro de la probeta y se registra el desplazamiento de volumen en la probeta como (VF) en cm^3 .

$$\text{Densidad} = \frac{MA}{VF - VI}; \left(\frac{g}{\text{cm}^3} \right)$$



Imagen 5. Probeta y picnómetro para medir diferencia de volumen.

5.3.6. Humedad de absorción en arena

En este ensaye se obtiene la cantidad de agua que puede absorber el agregado y se expresa en porcentaje, valores altos de este dato nos indica que el agregado absorbe mucha agua y es inversamente proporcional al valor de la densidad.

El procedimiento descrito en esta prueba esta referenciado por la norma: (NMX-C-165-ONNCCE-2014), Determinación de la densidad relativa y absorción del agregado fino.

Equipo:

- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Parrilla
- Charolas metálicas.
- Molde troncocónico.
- Pisón
- Espátula

Procedimiento:

- Se pone la muestra a saturar durante 24 horas, esta muestra se obtiene mediante el procedimiento de cuarteo.
- Se seca el material en la charola colocándola en la parrilla para retirar el exceso de agua.



- Para saber cuándo ya se retiró el exceso de agua se coloca el molde troncocónico, se llena el molde con la arena en tres capas dando 12 golpes con el pisón a la primera capa, 8 golpes en la segunda y 5 golpes en la tercera.
- Inmediatamente se retira el molde y si la arena se disgrega ligeramente quiere decir que esta seca superficialmente.
- Cuando la arena esta seca superficialmente se pesa una muestra de 300 gramos, registrándolo como masa saturada y superficialmente seca (MH).
- Se coloca la muestra en la charola para secarla en la parrilla hasta retirar por completo la humedad.
- Cuando el material ya este seco se retira de la parrilla y se deja enfriar.
- Se pesa con ayuda de la balanza registrando el valor como masa seca del material (MS).

$$\% \text{ de humedad de absorción} = \left(\frac{MH - MS}{MS} \right) \times 100; (\%)$$

5.3.7. Granulometría en arena

El ensaye de granulometría nos permite conocer los tamaños de las partículas de los agregados, así como la distribución de los mismo, también se obtiene el módulo de finura de la arena el cual es usado en los métodos de dosificación de mezclas de concreto.

La distribución de los tamaños de las partículas se encuentra establecido por norma, la cual especifica las características de la arena en caso de ser usada para concreto o mortero.

El procedimiento descrito esta referenciado en la norma: (NMX-C-077-ONNCCE -1997), Análisis granulométrico.

Equipo:

- Juego de mallas del número 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200.
- Charola y tapa para mallas.
- Espátulas
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Raf-Tap

Procedimiento:

- Se toma una muestra representativa seca de arena de aproximadamente 500 gramos.
- Se ordenan las mallas con las de mayor abertura en la parte superior y en descenso hasta colocar la malla número 200 y se coloca la charola.
- Se coloca la muestra de 500 gramos en la parte superior de la malla No. 4 y se coloca la tapa.
- Se coloca el juego de mallas en el Raf-Tap y se deja agitar durante un tiempo de 10 minutos.
- Se pesa el material retenido de cada una de las mallas registrándolo como masa retenida.



Registro:

MALLA	MASA RETENIDA (g)	%RETENIDO	%ACUMULATIVO	%QUEPASA
4				
8				
16				
30				
50				
100				
200				
CHAROLA				
SUMA				

$$\% \text{ RETENIDO} = \left(\frac{\text{peso retendio}}{\text{suma de los pesos retenidos}} \right) \times 100M; (\%)$$

El %ACUMULATIVO es el resultado de los valores acumulados del %RETENIDO.

$$\% \text{ QUEPASA} = 100 - \% \text{ ACUMULATIVO}; (\%)$$

$$M. F. = \left(\frac{\sum (\% \text{ ACUMULATIVO de malla \#8 a malla \#100})}{100} \right); (\%)$$

5.3.8. Colorimetría en arena

Este ensaye se hace para determinar la cantidad de materia orgánica contenida en el agregado, y pese a que no se hace de manera cuantitativa el resultado nos permite saber que tan apta es el agregado para ser usado en la elaboración de concreto.

El procedimiento descrito a continuación esta referenciado en el manual de “Análisis de materiales”.

Equipo:

- Frasco de cristal transparente graduados a cada 25 cm³.
- Sosa cáustica.
- Agua destilada.
- Charolas
- Tabla colorimétrica.

Procedimiento:



- Se realiza la solución con 3 gramos de sosa cáustica por cada 97 ml de agua destilada.
- Se agrega la arena hasta los 133 ml.
- Se llena el frasco con la solución de sosa más agua hasta los 206 ml.
- Se tapa el frasco y se agita fuertemente durante dos minutos, y posteriormente se deja reposar durante 24 horas.
- Transcurrido el tiempo se compara el color del líquido de la botella con la tabla colorimétrica.

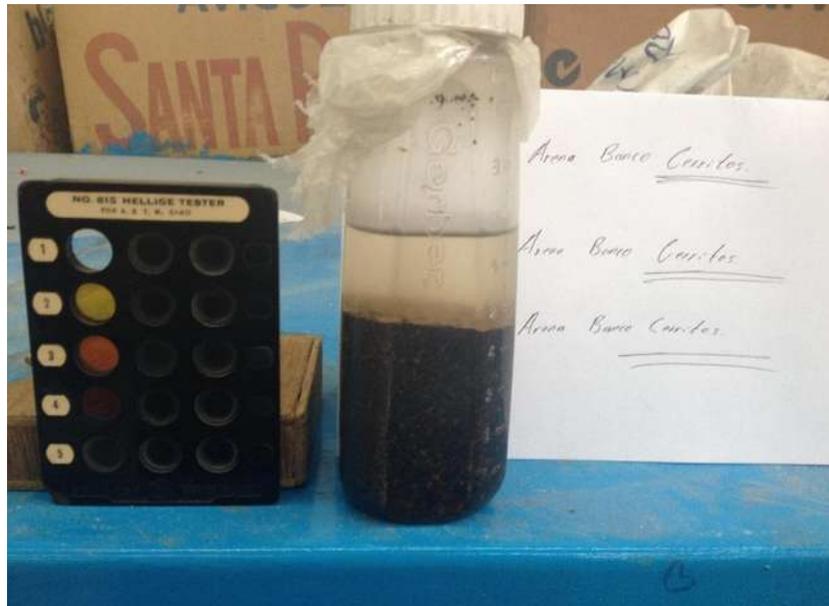


Imagen 6. Ensayo de colorimetría con arena del banco "Cerritos".

5.3.9. Sedimentación en arena

En este ensaye se puede determinar de manera cualitativa la cantidad de finos contenidos en la arena.

El procedimiento descrito a continuación esta referenciado en el manual de "Análisis de materiales".

Equipo:

- Frasco graduado a 414, 444 y 828 ml.
- Agua

Procedimiento:

- Se coloca la arena seca dentro del frasco hasta la marca de 414 ml.
- Se llena con agua hasta la marca de 828 ml.

- Se tapa el frasco y se agita durante dos minutos cuidando de dejar todo el material en suspensión.
- Se deja reposar el frasco durante 24 horas.
- Transcurrido el tiempo se revisa que el nivel de material fino no supere la marca de 444ml.

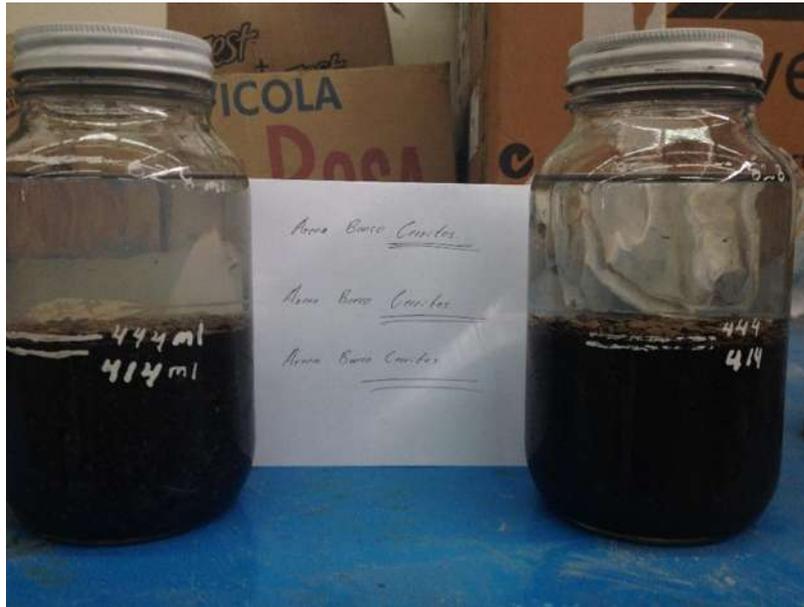


Imagen 7. Frascos con arena para ensaye de sedimentación.

5.4. Ensayes en grava

5.4.1. Muestreo en grava

Es importante hacer un buen muestreo del material a ensayar ya que el material analizado teóricamente tiene que ser representativo del material usado, tratando de garantizar una distribución completa y homogénea de todas las partículas.

El muestreo de agregados esta especificado por la norma: *Muestreo de agregados*, NMX-C-030-ONNCE,2004, la cual también se usó como referencia para el correcto muestreo de material en este proyecto.

La norma especifica el procedimiento de muestreo a realizar dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el material en el lugar. Para este caso el material se muestreó estando ya almacenado, para lo cual la norma nos especifica lo siguiente:

Equipo:

- Palas
- Costales



- Medio de transporte

Procedimiento:

- Tomar porciones aproximadamente iguales de diferente nivel y directriz del almacén (Ver imagen 2).
- Todas las muestras simples tomadas se mezclan para formar una sola muestra compuesta, esta tiene que ser representativa del material almacenado.
- La muestra se lleva al laboratorio para su posterior análisis.

5.4.2. Cuarteo en grava

El muestreo del material a analizar se complementa con el cuarteo de las muestras obtenidas, de esta manera se asegura que la muestra obtenida este completamente homogénea y que por lo tanto sea representativa del material muestreado.

Equipo:

- Palas
- Divisor de muestras
- Recipientes y charolas

Procedimiento:

- Se vacía el material seco en una superficie limpia.
- Con las palas se pasa el material de un lado a otro formando un montículo cónico.
- Se repite el paso anterior tres veces y se aplanan con la parte plana de la pala.
- Se divide el material en cuatro partes en forma de cruz.
- De las cuatro partes se toman dos en forma cruzada para su uso, y las otras dos se regresan al recipiente o se desechan.

5.4.3. Masa volumétrica seca suelta en grava

La importancia de la determinación de la masa volumétrica suelta se refiere a conocer la masa del agregado por unidad de volumen sin tener un acomodo de sus partículas.

El procedimiento descrito en este ensaye esta referenciado con la norma: *Masa volumétrica*, NMX-C-073-ONNCCE,2004.

Equipo:

- Palas
- Cucharón
- Varilla punta de bala.
- Recipiente con masa y volumen conocido.
- Báscula con aproximación al gramo.



Procedimiento:

- Se distribuye el material y se realiza el procedimiento de cuarteo hasta dejar dividida la muestra en cuatro partes.
- Se coloca el recipiente en el centro de las muestras y se llena con el cucharón tomando de dos de las muestras cruzadas, dejando caer el material a no más de 5 cm por arriba de la arista superior del recipiente.
- Una vez lleno se enrasa la superficie con la varilla punta de bala y se limpia el recipiente de los excesos de material que pudieron quedar adheridos.
- Se coloca el recipiente en la báscula y se pesa el material más la masa del recipiente registrándola como masa total.

$$M.V.S.S. = \frac{M}{V}; \left(\frac{g}{cm^3}\right)$$

Donde:

M.V.S.S.: Masa volumétrica seca suelta. (g/cm^3)

M: Masa total de la arena descartando la masa del recipiente. (g)

V: El volumen del recipiente. (cm^3)

5.4.4. Masa volumétrica seca varillada en grava

La importancia de la determinación de la masa volumétrica varillada se refiere a conocer la masa del agregado por unidad de volumen teniendo un acomodo de las partículas.

El procedimiento descrito en este ensaye esta referenciado con la norma: *Masa volumétrica*, NMX-C-073-ONNCCE,2004.

Equipo:

- Palas
- Cucharón
- Varilla punta de bala.
- Recipiente con masa y volumen conocido.
- Báscula con aproximación al gramo.

Procedimiento:

- Se distribuye el material y se realiza el procedimiento de cuarteo hasta dejar dividida la muestra en cuatro partes.



- Se coloca el recipiente en el centro de las muestras y se llena en tres capas, cada capa de un tercio de la altura del recipiente.
- Después del llenado de cada capa se dan 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en todo el material.
- Una vez hecho esto con todas las tres capas se enrasa con la varilla punta de bala y se retiran los excesos adheridos a la superficie del recipiente.
- Se coloca el recipiente en la báscula y se registra la masa total de la arena más el recipiente.

$$M.V.S.V. = \frac{M}{V}; \left(\frac{gr}{cm^3}\right)$$

Donde:

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

M: Masa total de la arena descartando la masa del recipiente. (g)

V: El volumen del recipiente. (cm³)



Imagen 8. Enrasado de recipiente.

5.4.5. Densidad en grava

Este ensaye es de suma importancia para la dosificación de las mezclas de concreto y para conocer la calidad de la grava, valores altos de densidad en grava representan buena calidad y con bajo contenido de poros.

El procedimiento descrito en esta prueba esta referenciado por la norma: *Determinación de la densidad relativa y absorción del agregado grueso*, NMX-C-164-ONNCCE, 2014.



Equipo:

- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Parrilla
- Charolas metálicas.
- Espátula
- Probeta
- Picnómetro
- Franela

Procedimiento:

- Se pone la muestra a saturar durante 24 horas, esta muestra se obtiene mediante el procedimiento de cuarteo.
- Se seca el material superficialmente con la ayuda de una franela.
- En la probeta se coloca un volumen inicial de agua registrándolo (VI) en cm^3 .
- Se pesa una muestra de grava seca superficialmente de entre 200 y 300 gramos registrándola como masa de la muestra (MA).
- Este material se coloca dentro de la probeta y se registra el desplazamiento de volumen en la probeta como (VF) en cm^3 .

$$\text{Densidad} = \frac{MA}{VF - VI}; \left(\frac{g}{\text{cm}^3} \right)$$

5.4.6. Humedad de absorción en grava

En este ensaye se obtiene la cantidad de agua que puede absorber el agregado y se expresa en porcentaje, valores altos de este dato nos indica que el agregado absorbe mucha agua y es inversamente proporcional al valor de la densidad.

El procedimiento descrito en esta prueba esta referenciado por la norma: *Determinación de la densidad relativa y absorción del agregado grueso*, NMX-C-164-ONNCCE-2014.

Equipo:

- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Parrilla
- Charolas metálicas.
- Franela
- Espátula

Procedimiento:

- Se pone la muestra a saturar durante 24 horas, esta muestra se obtiene mediante el procedimiento de cuarteo.
- Se seca superficialmente el material con ayuda de la franela.



- Cuando la grava esta seca superficialmente se pesa una muestra de 300 gramos, registrándolo como masa saturada y superficialmente seca (MH).
- Se coloca la muestra en la charola para secarla en la parrilla hasta retirar por completo la humedad.
- Cuando el material ya este seco se retira de la parrilla y se deja enfriar.
- Se pesa con ayuda de la balanza registrando el valor como masa seca del material (MS).

$$\% \text{ de humedad de absorción} = \left(\frac{MH - MS}{MS} \right) \times 100; (\%)$$



Imagen 9. Secado de grava para ensaye de absorción.



5.4.7. Granulometría en grava

El ensaye de granulometría nos permite conocer los tamaños de las partículas de los agregados, así como la distribución de los mismos, también se obtiene el tamaño máximo en el caso del estudio en grava, el cual es usado en los métodos de dosificación de mezclas de concreto.

La distribución de los tamaños de las partículas se encuentra normado por la norma NMX-C-077-ONNCCE,1997 la cual especifica las características de la grava en caso de ser usada para concreto.

El procedimiento descrito en esta norma esta referenciado en la norma: *Análisis granulométrico*, NMX-C-077-ONNCCE,1997.

Equipo:

- Juego de mallas del número 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", y No 4.
- Charola y tapa para mallas.
- Espátulas
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento:

- Se toma una muestra representativa seca de grava de aproximadamente 15 kilogramos.
- Se ordenan las mallas con las de mayor abertura en la parte superior y en descenso hasta colocar la malla número 4, y finalmente se coloca la charola.
- Se coloca la muestra en partes y se hace pasar por toda la serie de mallas, hasta pasar toda la muestra.
- Se pesa el material retenido de cada una de las mallas registrándolo como masa retenida.

Registro:

MALLA	MASA RETENIDA (g)	%RETENIDO	%ACUMULATIVO	%QUEPASA
2"				
1 1/2"				
1"				
3/4"				
1/2"				
1/4"				
No 4				
Pasa No 4				
SUMA				

$$\% \text{RETENIDO} = \left(\frac{\text{peso retendio}}{\text{suma de los pesos retenidos}} \right) \times 100; (\%)$$

El %ACUMULATIVO es el resultado de los valores acumulados del %RETENIDO.

$$\% \text{QUEPASA} = 100 - \% \text{ACUMULATIVO}; (\%)$$

El tamaño máximo será el primero y solo el primero que tenga un valor mayor al 5% en el porcentaje retenido, comenzando desde la maya de 2”.



Imagen 10. Tamizado de grava.

5.5. Ensayes en agua

En este caso el agua usada proviene de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. La cual se tomó del suministro sin ser sometida a algún proceso de mejoramiento de calidad de la misma. Generalmente se utiliza el agua potable, es decir, que sea líquida, transparente, inodora, incolora e insípida según lo dictado por la norma: *Agua para concreto*, NMX-C-122-ONNCCE, 2004.



5.6. Ensayes en concreto fresco

5.6.1. Determinación del revenimiento en concreto fresco

El revenimiento es una medida de la fluidez del concreto medido con respecto a la disminución de altura de un cono hecho con la mezcla fresca en base a lo especificado en la norma: *Determinación del revenimiento en el concreto fresco*, NMX-C-156-ONNCCE, 2010.

El método de ensaye descrito en este trabajo esta referenciado en la norma antes mencionada.

Equipo:

- Palas
- Cucharones
- Placa de material no absorbente.
- Charola
- Metro
- Varilla punta de bala.
- Molde cónico

Procedimiento

- Se toma una muestra de concreto fresco y se mezcla con ayuda de las palas o cucharones, para mantener homogénea la mezcla.
- Se coloca la placa de material no absorbente en una superficie limpia y sin pendiente, asegurándonos de que la placa no se mueva.
- Se humedece la superficie de la placa y se coloca el molde cónico también humedecido colocando los pies sobre las orejas del molde, esto para evitar en lo más posible el movimiento del molde.



Imagen 11. Llenado de molde cónico.

- Se llena el molde en tres capas cada una del mismo volumen, la primera a 7 cm de altura, la segunda a 15 cm y la última a la superficie del molde.
- Se dan 25 golpes entre cada capa con la varilla punta de bala, tratando de penetrar no más una pulgada en la capa anterior.
- Se retira el exceso de la última capa después de los golpes con la varilla y se enrasa con la misma varilla.
- Se toma el cono con las manos sin mover el cono a los lados y se retira de manera vertical.
- Se gira y se coloca el cono sobre la superficie de la placa a un lado de la mezcla, se coloca la varilla sobre el mismo de manera horizontal y se mide la distancia entre el extremo inferior de la varilla y la superficie de la mezcla.

Se reporta la longitud medida en cm para su comparación y clasificación del concreto según su fluidez en estado fresco.



Imagen 12. Medición del revenimiento en concreto fresco.

5.6.2. Elaboración de cilindros de concreto

Para la elaboración de cilindros de concreto es de gran importancia seguir una normativa con la cual se pueda comparar. Los especímenes bien elaborados en base a una normativa nos servirán para obtener información del concreto utilizado, principalmente en los ensayos de compresión simple.

El procedimiento para el llenado de los cilindros está referenciado en la norma mexicana: *Elaboración y curado de especímenes de ensayo*, NMX-C-159-ONNCCE, 2016.

Equipo:

- Moldes cilíndricos de 15x30cm.
- Varilla punta de bala.
- Cucharón
- Marro de goma.
- Enrasador

Procedimiento:

- Se toma el concreto del recipiente de mezclado procurando que sea representativo de la revoltura total. Con ayuda del cucharón se mezcla el concreto fresco en el recipiente para conservar la homogeneidad en la mezcla.
- Se llenan los moldes cilíndricos en tres capas cada una a un tercio del volumen, dando 25 golpes a la mezcla con la varilla punta de bala después de cada capa y 12 golpes con el marro distribuyéndolos en el diámetro del cilindro.



- Después de dar los golpes con la varilla y el marro en la última capa, se procede a realizar el enrasado del sobrante de mezcla con ayuda del enrasador o la varilla punta de bala.
- Se coloca una tapa no reactiva ni absorbente al molde para evitar la pérdida de humedad de la mezcla.



Imagen 13. Moldes cilíndricos de 10 y 15 cm de diámetro.

5.7. Ensayes en concreto endurecido

5.7.1. Curado de especímenes

El curado es el procedimiento para mantener la humedad en los especímenes a ensayar. De esta manera se trata de evitar la pérdida fugaz de humedad en los materiales cementantes. La importancia del curado de los especímenes es de mera importancia en el comportamiento del concreto.

El procedimiento para el curado de los especímenes esta referenciado en la norma mexicana: *Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio*, NMX-C-159-ONNCCE,2016.

Equipo:

- Pila de curado con agua

Procedimiento:

- Los especímenes deben ser descimbrados no antes de 20 horas ni después de 48 horas a partir de la hora de colado.



- Durante las primeras 24 horas los especímenes deben ser curados en ambiente húmedo a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.
- Después de 24 horas los especímenes ya descimbrados deben ser curados con humedad relativa del 95% mínima a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Se recomienda hacer uso de la pila de agua y cuidar que la temperatura del agua este dentro del rango permisible por la norma.



Imagen 14. Curado de especímenes cilíndricos.

5.7.2. Cabeceo de especímenes

El cabeceo de los especímenes se hace con el fin de garantizar una superficie plana, horizontal y perpendicular con los lados del espécimen. De esta manera se asegura que la distribución de la carga en el área de contacto será uniforme.

El procedimiento para el cabeceo de especímenes esta referenciado en la norma mexicana: *Cabeceo de especímenes*, NMX-C-109-ONNCCE,2013.

Equipo:

- Platos metálicos con compuesto para cabeceo.
- Alineador para cabeceo.
- Escuadra metálica.
- Recipiente para fundir azufre.
- Azufre
- Parrilla



Procedimiento:

- Se coloca el recipiente para fundir el azufre en la parrilla hasta que este alcance una temperatura de $140^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$, evitando su contacto con la humedad.
- El plato de cabeceo debe ser precalentado para evitar fuertes variaciones de humedad en el material de cabeceo.
- Se aceita ligeramente la superficie del palto que entrará en contacto con el azufre para evitar la adherencia con el mismo.
- Se coloca el azufre fundido en el plato y con ayuda de las guías del alineador se baja cuidadosamente el espécimen cilíndrico hasta tocar la superficie del azufre fundido
- Se deja en reposo hasta que el azufre se endurezca y se retira del plato.
- Se repiten los mismos pasos con la 2^a cara del cilindro.
- Una vez que el cilindro este cabeceado por ambas caras, se tiene que revisar la perpendicularidad de las caras permitiendo un máximo de 0.5° de inclinación de las mismas.

5.7.3. Ensaye de compresión simple

Conocer la resistencia a compresión del concreto es la característica más representativa de este material, y este trabajo se enfoca en gran parte en conocer y comparar los resultados con la normativa de construcción.

El procedimiento realizado en esta prueba esta referenciado en la norma mexicana: *Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes* NMX-C-083-ONNCCE,2014.

Equipo:

- Máquina universal de ensayos Forney.

Procedimiento:

- Se mide la sección del espécimen en la zona donde se le aplicará la carga.
- Se coloca el espécimen previamente cabeceado en el lugar de aplicación de carga de la máquina de ensayos.
- Se ajusta las placas de la máquina y se selecciona el rango de aplicación de la carga.
- Se comienza con la aplicación de la carga cuidando de que al momento de tocar la placa con la sección del espécimen no se provoque ningún impacto en el mismo.
- Se continua con la aplicación de la carga en el espécimen procurando que la velocidad de aplicación sea de 1.4 a 3.1 kgf/cm²/seg. Procurando evitar los cambios bruscos de aplicación de carga.



Imagen 15. Espécimen cilíndrico de concreto sometido al ensaye de compresión.

5.7.4. Ensaye de resistividad eléctrica

Para los ensayes que proporcionan un índice de durabilidad en el concreto se tiene el ensaye de resistividad eléctrica. Básicamente se mide la resistencia que tiene un espécimen de concreto saturado de agua para así calcular su resistividad y comparar con alguna normativa.

Este ensaye se realiza con la ayuda de un resistómetro. El procedimiento realizado en este ensaye esta referenciado en el Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado de La red durar (2000).

Equipo:

- Resistómetro

Procedimiento:

- Se mide el diámetro de la sección del espécimen.
- Se conectan los cables transmisores al equipo y a las placas metálicas.
- Se coloca el espécimen en medio de las placas metálicas.
- Con ayuda del equipo se transmite una corriente eléctrica y se mide la resistencia de la misma a través del espécimen.

Se tiene que asegurar que el espécimen este completamente saturado antes de comenzar con el ensaye.

$$p = Re \frac{A}{L}$$

Donde:

p : Resistividad eléctrica. ($K\Omega\text{-cm}$)

R_e : Resistencia eléctrica. ($K\Omega$)

A : Área transversal del espécimen. (cm^2)

L : Longitud del espécimen. (cm)



Imagen 16. Resistómetro utilizado para medir la resistencia eléctrica.

5.7.5. Ensaye de velocidad de pulso ultrasónico

Este ensaye consiste en hacer pasar una onda de sonido a través de un medio sólido, para este trabajo se toma en cuenta la velocidad que tarda en cruzar la onda por el espécimen para relacionarlo con la cantidad de poros contenidos y la homogeneidad del mismo, para así compararlo con la normativa.

El procedimiento usado en este ensaye esta referenciado en el Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado de La red durar (2000).

Equipo:

- Equipo de medición de velocidad de pulso ultrasónico.

Procedimiento:

- Se conecta el equipo con el transmisor y el receptor.
- Utilizando el menú del equipo se procede a realizar la calibración del mismo.
- Se coloca gel en ambos lados exteriores del espécimen.

- Se coloca tanto el transmisor como el receptor en los extremos del espécimen cuidando que la sección de los transmisores quede completamente llena de gel.
- Se manda el pulso y se registra la velocidad marcada por el equipo una vez que esta no varíe.



Imagen 17. Equipo para la medición de velocidad de pulso ultrasónico.

5.7.6. Ensaye de profundidad de carbonatación

La carbonatación es la reducción del pH del concreto a valores por debajo de 10 por efecto del CO₂ presente en el ambiente que envuelve a los elementos de concreto. El concreto afectado por la carbonatación deja de brindar protección al acero de refuerzo provocando la oxidación del mismo y por consecuencia un deterioro de los elementos de concreto reforzado.

Equipo:

- Instrumento de medición: vernier, regla o flexómetro.
- Material para la limpieza de la superficie del espécimen.
- Solución de fenolftaleína (1g de fenolftaleína + 49g de alcohol + 50g de Agua).
- Aspersor

Procedimiento:

- Se toma un espécimen que fue ensayado previamente de manera destructiva como compresión simple, para tener facilidad de visualizar el interior del mismo.
- Con ayuda del aspersor se rocía la solución de fenolftaleína sobre la superficie del espécimen.
- Una vez que cambie la tonalidad del concreto se mide la profundidad de carbonatación desde el exterior.



Es importante mencionar que la parte sana del concreto tomará una tonalidad purpura, y la parte afectada no cambiará en la tonalidad de manera apreciable.

Para el cálculo de la velocidad de carbonatación primero se calcula la constante de carbonatación ($\text{mm.año}^{-0.5}$) de la siguiente manera:

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}}$$

Donde:

K_{CO_2} : Constante de carbonatación. ($\text{mm.año}^{-0.5}$)

X_{CO_2} : Profundidad de carbonatación. (mm)

t : tiempo en años.

De esta manera si se conoce la profundidad a la que se encuentra el acero de refuerzo se puede calcular el tiempo en el que haga contacto con el concreto carbonatado con la siguiente expresión:

$$t = \left(\frac{e_c}{K_{CO_2}} \right)^2$$

Donde:

K_{CO_2} : Constante de carbonatación. ($\text{mm.año}^{-0.5}$)

e_c : Profundidad del acero de refuerzo. (mm)

t : Tiempo en años.



Imagen 18. Espécimen de concreto con efectos de carbonatación.



6. Resultados



6.1. Resultados de ensayos en cemento

6.1.1. Resultados de densidad en cemento

La norma mexicana NMX-C-152, 2010 establece un rango de 2.9 a 3.15 en la densidad de cemento.

Tabla 6. Resultados de Densidad en cemento CPC-30R3RS.

	Muestra 1	Muestra 2
Li (ml):	0.5	0.5
Lf (ml):	20.9	20.6
Masa (g):	60.0	60.0
Densidad(g/cm ³):	2.94	2.99
Promedio(g/cm ³):	2.97	

6.1.2. Resultados de consistencia normal en cemento

Los valores habituales de consistencia normal del cemento pueden oscilar entre 26 y 33%.

Tabla 7. Resultados de Consistencia normal en cemento.

Material	Cemento
Consistencia normal (%):	32

6.1.3. Resultados de tiempos de fraguado en cemento

La norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE, 2014 establece un tiempo de fraguado inicial mínimo de 45 minutos, y un tiempo de fraguado final máximo de 600 minutos.

Tabla 8. Resultados de Tiempos de fraguado en cemento.

Tiempos de fraguado	Inicial (min):	160
	Final (min):	313



6.2. Resultados de ensayos en arena

6.2.1. Resultados de Masa volumétrica seca suelta en arena

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos en el ensaye de masa volumétrica seca suelta en la arena estudiada, con un promedio entre dos muestras de 1230 kg/m³.

Tabla 9. Resultados de Masa volumétrica seca suelta en arena.

	Muestra 1	Muestra 2
Masa bruta (g):	5350	5390
Tara (g):	1945	1945
Masa neta (g):	3405	3445
Volumen (cm ³):	2783	2783
M. V. S. S. (g/cm ³):	1.22	1.24
Promedio (g/cm ³):	1.23	
M.V.S.S. (kg/m ³):	1230	

6.2.2. Resultados de Masa volumétrica seca varillada en arena

En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos en el ensaye de Masa volumétrica seca varillada en la arena estudiada, con un promedio entre dos muestras de 1300 kg/m³.

Tabla 10. Resultados de Masa volumétrica seca varillada en arena.

	Muestra 1	Muestra 2
Masa bruta (g):	5520	5600
Tara (g):	1945	1945
Masa neta (g):	3575	3653
Volumen (cm ³):	2783	2783
M. V. S. V. (g/cm ³):	1.28	1.31
Promedio (g/cm ³):	1.30	
M.V.S.V. (kg/m ³):	1300	

6.2.3. Resultados de Densidad en arena

Tabla 11. Resultados de Densidad en arena.

	Muestra 1	Muestra 2
Masa Sup. Seca (g):	300.0	300.0
Volumen desalojado (cm ³):	116	120
Densidad (g/cm ³):	2.59	2.50
Promedio (g/cm ³):	2.54	



6.2.4. Resultados de Humedad de absorción en arena

En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos en el ensaye de Humedad de absorción en la arena estudiada, con un promedio entre dos muestras de 6.29%.

Tabla 12. Resultados de Humedad de absorción en arena.

	Muestra 1	Muestra 2
Masa Sup. Seca (g):	300.0	300.0
Masa Seca (g):	282.0	282.5
Agua Absorbida (g):	18.0	17.5
% Absorción:	6.38	6.19
Promedio (%):	6.29	

6.2.5. Resultados de Granulometría en arena

Tabla 13. Resultados de Granulometría en muestra 1 de arena.

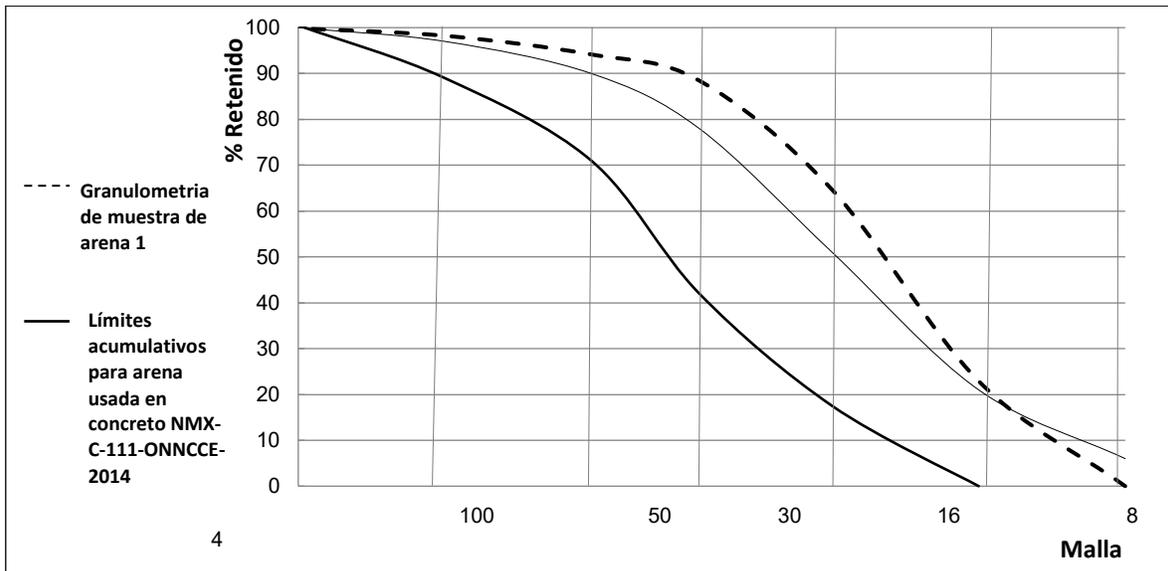
Malla	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulativo	% Que pasa	Límites NMX-C-111-ONNCCE-2014
8	67.80	17.03	17.03	82.97	100-80
16	166.80	41.91	58.94	41.06	85-50
30	102.20	25.68	84.62	15.38	60-25
50	25.50	6.41	91.02	8.98	30-10
100	20.17	5.07	96.09	3.91	10-2
200	10.16	2.55	98.64	1.36	-
Charola	5.40	1.36	100.00	0.00	-
Suma	398.03	100			
Módulo de Finura:		3.48			

Tabla 14.. Resultados de Granulometría en muestra 2 de arena.

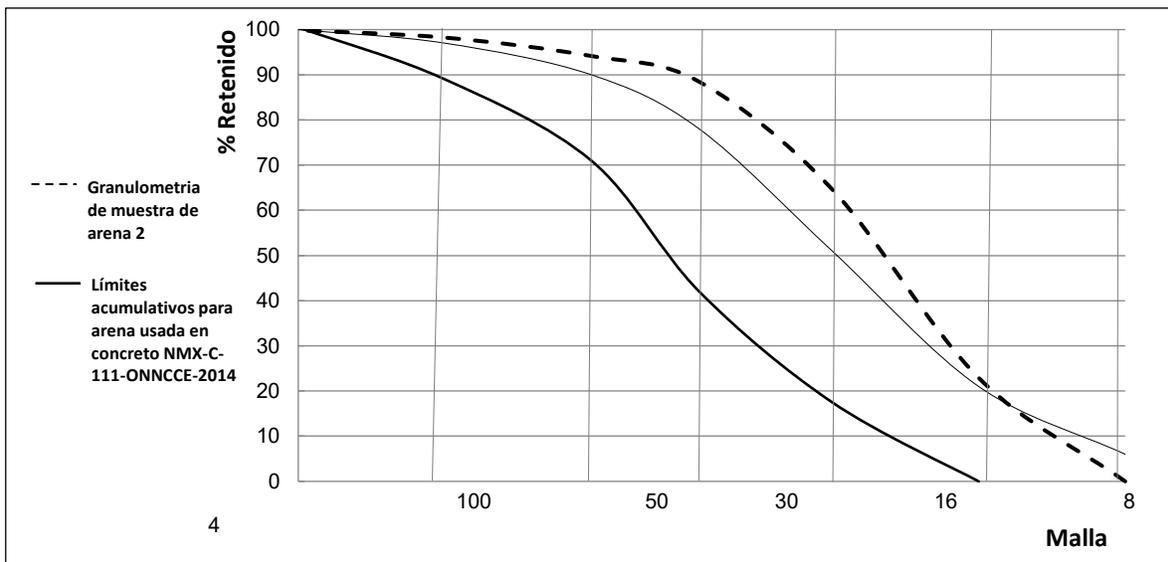
Malla	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulativo	% Que pasa	Límites NMX-C-111-ONNCCE-2014
8	91.20	22.91	22.91	77.09	100-80
16	166.10	41.73	64.64	35.36	85-50
30	94.70	23.79	88.44	11.56	60-25
50	22.80	5.73	94.16	5.84	30-10
100	16.20	4.07	98.23	1.77	10-2
200	6.40	1.61	99.84	0.16	-
Charola	3.40	0.85	100.00	0.00	-
Suma	400.80	100.00			
Módulo de Finura:		3.68			



Gráfica 1. Gráfica granulométrica de muestra 1 de arena.



Gráfica 2. Gráfica granulométrica de muestra 2 de arena.



El valor promedio de Modulo de finura de ambas muestras es de 3.57.

La norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014, establece los siguientes parámetros de 2.30 a 3.10 en valores de módulo de finura en agregado fino.

La Tabla 4 establece utilizada en la dosificación por el método del ACI tiene un rango de 2.4 a 3.0 en valores de módulo de finura.

6.2.6. Resultados de Colorimetría en arena



Imagen 19. Comparativa del material con la tabla colorimétrica.

La tonalidad de la mezcla líquida (Imagen 19) está entre 1 y 2 según la tabla colorimétrica, por lo cual se dice que el contenido de material orgánico contenido en la arena no es perjudicial.

6.2.7. Resultados de Sedimentación en arena



Imagen 20. Resultado de Sedimentación en arena.



Se aprecia que la sedimentación de finos (Imagen 20) no supera la marca de los 444 ml, por lo cual se dice que el contenido de finos no es perjudicial.

6.3. Resultados de ensayos en grava

6.3.1. Resultados de Masa volumétrica seca suelta en grava

En la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos en el ensaye de Masa volumétrica seca suelta en la grava estudiada, con un promedio entre dos muestras de 1080 kg/m^3 .

Tabla 15. Resultados de Masa volumétrica seca suelta en grava.

	Muestra 1	Muestra 2
Masa bruta (g):	14400	14400
Tara (g):	2930	2930
Masa neta (g):	11470	11470
Volumen (cm ³):	10600	10600
M. V. S. S. (g/cm ³):	1.08	1.08
Promedio (g/cm ³):	1.08	
M. V. S. S. (kg/m ³):	1080	

6.3.2. Resultados de Masa volumétrica seca varillada en grava

En la Tabla 16 se muestran los resultados obtenidos en el ensaye de Masa volumétrica seca varillada en la grava estudiada, con un promedio entre dos muestras de 1160 kg/m^3 .

Tabla 16. Resultados de Masa volumétrica seca varillada en grava.

	Muestra 1	Muestra 2
Masa bruta (g):	15200	15200
Tara (g):	2930	2930
Masa neta (g):	12270	12270
Volumen (cm ³):	10600	10600
M. V. S. V. (g/cm ³):	1.16	1.16
Promedio (g/cm ³):	1.16	
M. V. S. V. (kg/m ³):	1160	



6.3.3. Resultados de Humedad de absorción en Grava

En la Tabla 17 se muestran los resultados obtenidos en el ensaye de Humedad de absorción en la grava estudiada, con un promedio entre dos muestras de 5.03%.

Tabla 17. Resultados de Humedad de absorción en grava.

	Muestra 1	Muestra 2
Masa Sup. Seca (g):	400.0	400.0
Masa seca (g):	379.6	382.1
Agua Absorbida (g):	20.4	17.9
% Absorción:	5.37	4.68
Promedio (%):	5.03	

6.3.4. Resultados de Densidad en grava

En la Tabla 18 se muestran los resultados obtenidos en el ensaye de Densidad en la grava, con un promedio entre dos muestras de 2.03 g/cm³.

Tabla 18. Resultados de Densidad en grava.

	Muestra 1	Muestra 2
Masa Sup. Seca (g):	195.0	200.0
Volumen desalojado (cm³):	400	400
Densidad (g/cm³):	2.05	2.00
Promedio (g/cm³):	2.03	

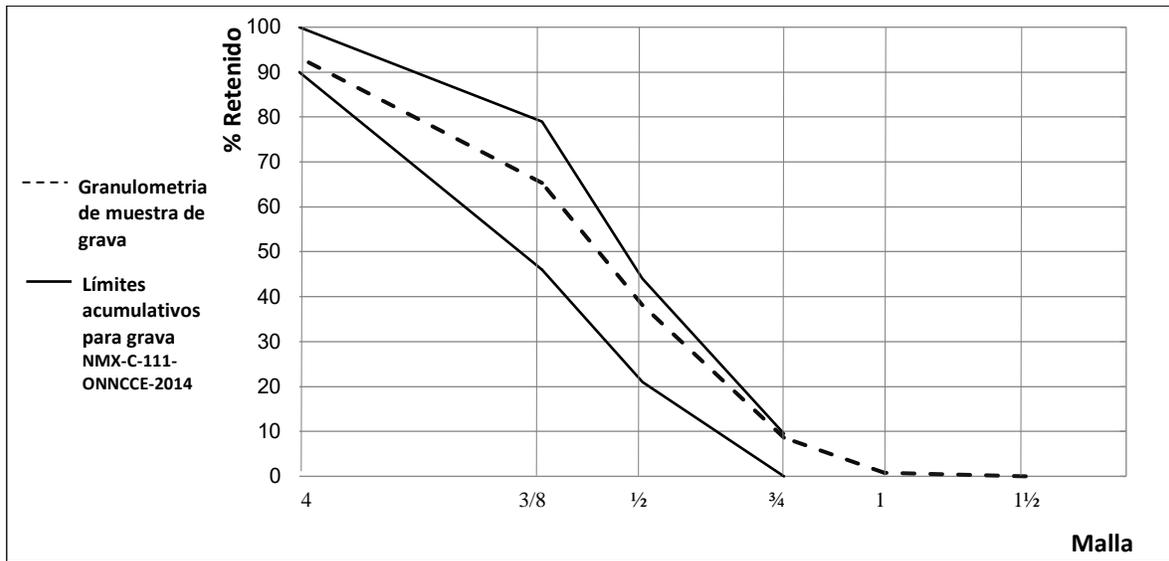
6.3.5. Resultados de Granulometría en grava

Tabla 19. Resultados de granulometría en grava.

Malla	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulativo	% Que pasa	Límites NMX-C-111-ONNCE-2014
1"	90.0	0.79	0.79	99.21	100
3/4"	890.0	7.81	8.60	91.40	100-75
1/2"	3360.0	29.50	38.10	61.90	65-25
3/8"	3100.0	27.22	65.32	34.68	-
1/4"	3180.0	27.92	93.24	6.76	10-0
No. 4	540.0	4.74	97.98	2.02	5-0
Pasa No. 4	230.0	2.02	100.00	0.00	
Suma	11390.0	100.00			
Tamaño máximo		3/4"			



Gráfica 3 . Gráfica granulométrica de muestra de grava.



La distribución granulométrica de las partículas de la grava está dentro de los límites establecidos por la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014.



6.4. Resultados de ensayos en agua

Los resultados de la calidad del agua utilizada en esta investigación se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados de calidad de agua.

Muestra:	Agua potable de la red de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo			
Sitio de muestreo:	Laboratorio de Materiales			
Fecha de muestreo:	18 de mayo de 2014			
Norma de referencia:	(NMX-C-122-ONNCCE, 2004)			
Parámetro:	Resultado	Limite permisible (NMX-C-122- ONNCCE, 2014)	Unidades	Método utilizado
pH	7.86	>6	U pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Temperatura	29.8	-	°C	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad eléctrica	456	-	µs/cm	NMX-AA-093-SCFI-2001
Sólidos disueltos totales	352	3500	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
Oxígeno disuelto	3.37	-	mg/L	NMX-AA-012-SCFI-2001
Sulfatos	5	3000	mg/L	NMX-AA-074-1981
Cloruros	13.36	400	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001
Dureza Cálctica	21	-	mg/L CaCO ₃	Volumétrico
Sales de magnesio	5	100	mg/L	Volumétrico



6.5. Resultado de diseño de mezclas

6.5.1. Mezcla con diseño del método del ACI

De esta manera se resumen las características de los materiales a utilizar en la tabla 21.

Tabla 21. Resumen de características de materiales para concreto.

	MVSS kg/m ³	MVSV kg/m ³	Densidad g/cm ³	H. Actual %	H. Absorción %	M.F.	T.M.
Arena	1230.5	1305.0	2.54	1.20	6.288	3.57	-
Grava	1080.0	1157.0	2.0255	1.05	5.025	-	3/4"
Cemento	1490.0	-	3.1	-	-	-	-

En la tabla 22 se muestran los resultados del diseño de mezclas por el método del ACI para un concreto con $f'c$: 250 kg/cm² (25 .48 MPa) y un revenimiento de 12 cm.

Tabla 22. Resumen de cantidades de materiales por m³ de concreto mezcla control.

	Masa (kg)	Volumen (m ³)
Cemento	339.32	0.109
Arena	715.68	0.281
Grava	768.42	0.379
Agua	209.40	0.209
Aire	-	0.02

6.5.2. Mezclas diseñadas de manera empírica

Tabla 23. Cantidades de materiales por m³ de concreto diseñado de manera empírica Mezcla A.

1:5:3 y 29L de agua		
	Masa (kg)	Volumen (m ³)
Cemento	438.21	0.142
Arena	876.42	0.346
Grava	525.85	0.259
Agua	254.16	0.254



Tabla 24. Cantidades de materiales por m³ de concreto diseñado de manera empírica Mezcla B.

1:5:3 y 22L de agua		
	Masa (kg)	Volumen (m ³)
Cemento	466.85	0.151
Arena	933.71	0.368
Grava	560.23	0.276
Agua	205.40	0.205

6.6. Resultados de ensayos en concreto fresco

6.6.1. Resultados de revenimiento

Tabla 25. Resultados de ensaye de revenimiento en concreto.

Mezcla	Revenimiento obtenido
Mezcla control	13
Mezcla A	17.5
Mezcla B	11.6

6.7. Resultados de ensayos en concreto endurecido

Los especímenes obtenidos de las mezclas coladas se sometieron a curado por inmersión y expuestos a la intemperie como queda resumido en la tabla 26.

Tabla 26. Resumen de condiciones de especímenes.

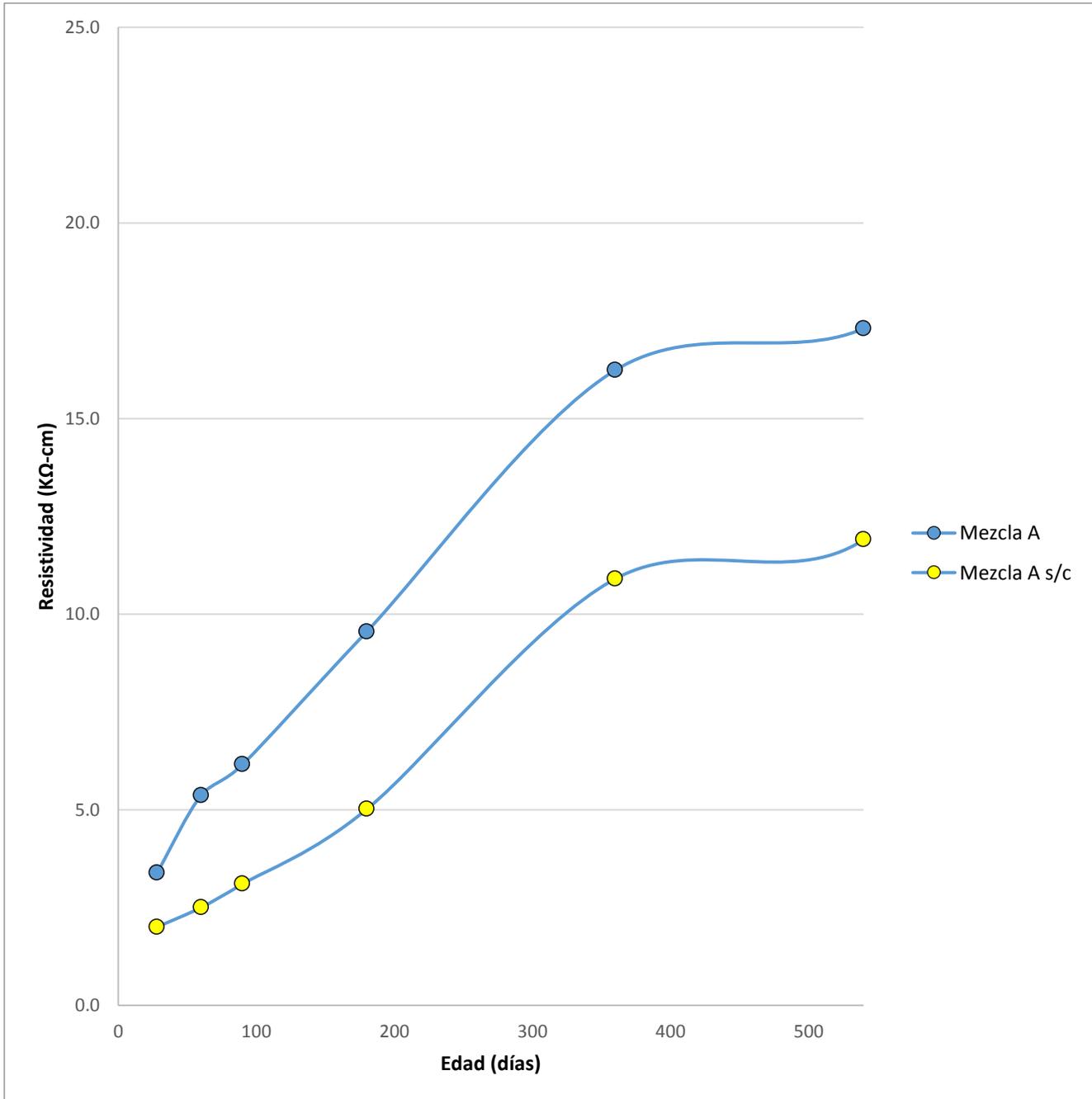
Mezcla	Condición
Mezcla control	Curado por inmersión
Mezcla A	Curado por inmersión
Mezcla A S/C	Expuestos a la intemperie
Mezcla B	Curado por inmersión
Mezcla B S/C	Expuestos a la intemperie



6.7.1. Resultados de ensayos de resistividad eléctrica

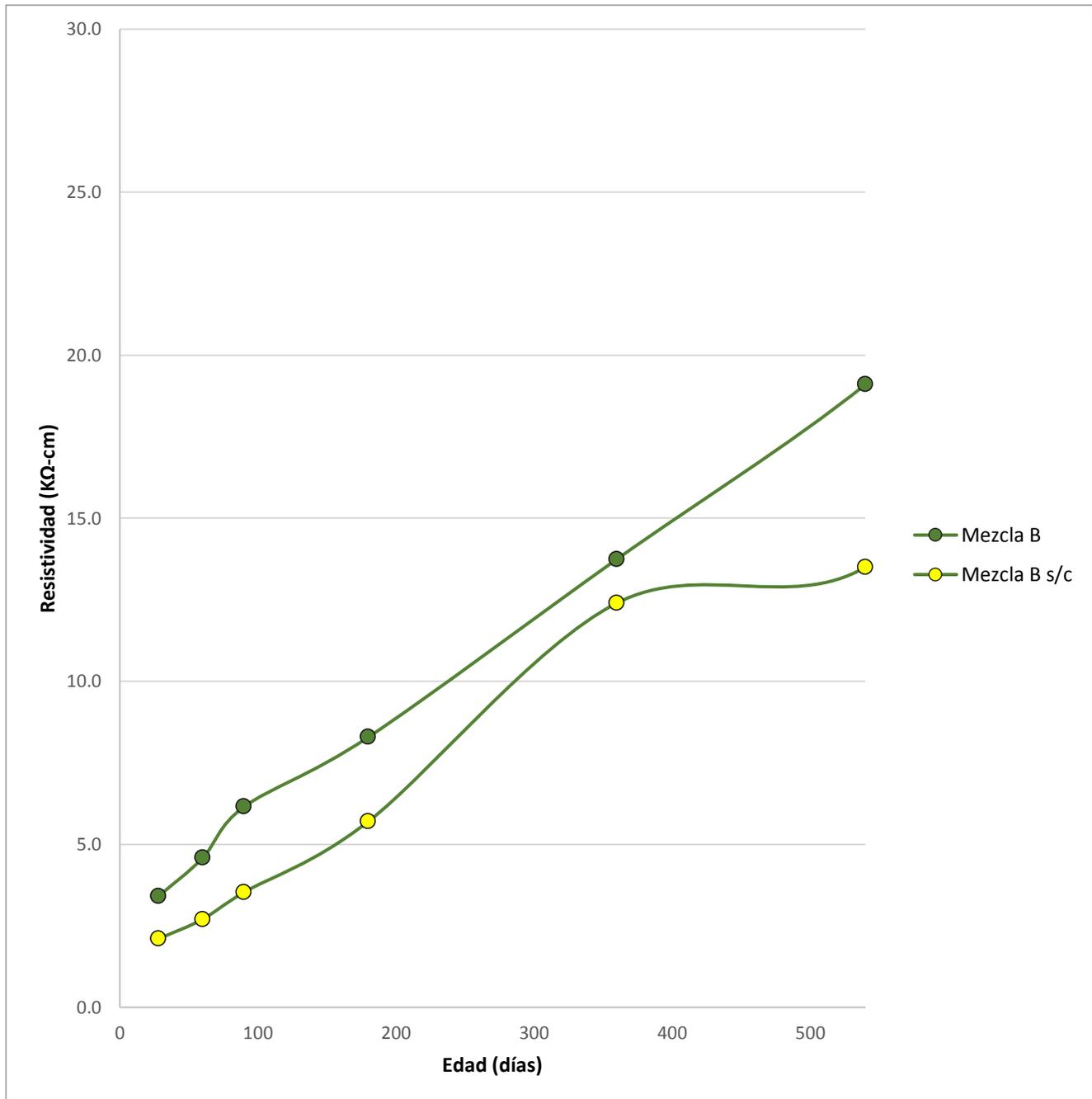
En las Gráficas 4, 5, y 6 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de Resistividad eléctrica, a diferentes edades.

Gráfica 4. Resultados de ensayo de resistividad eléctrica en Mezcla A.



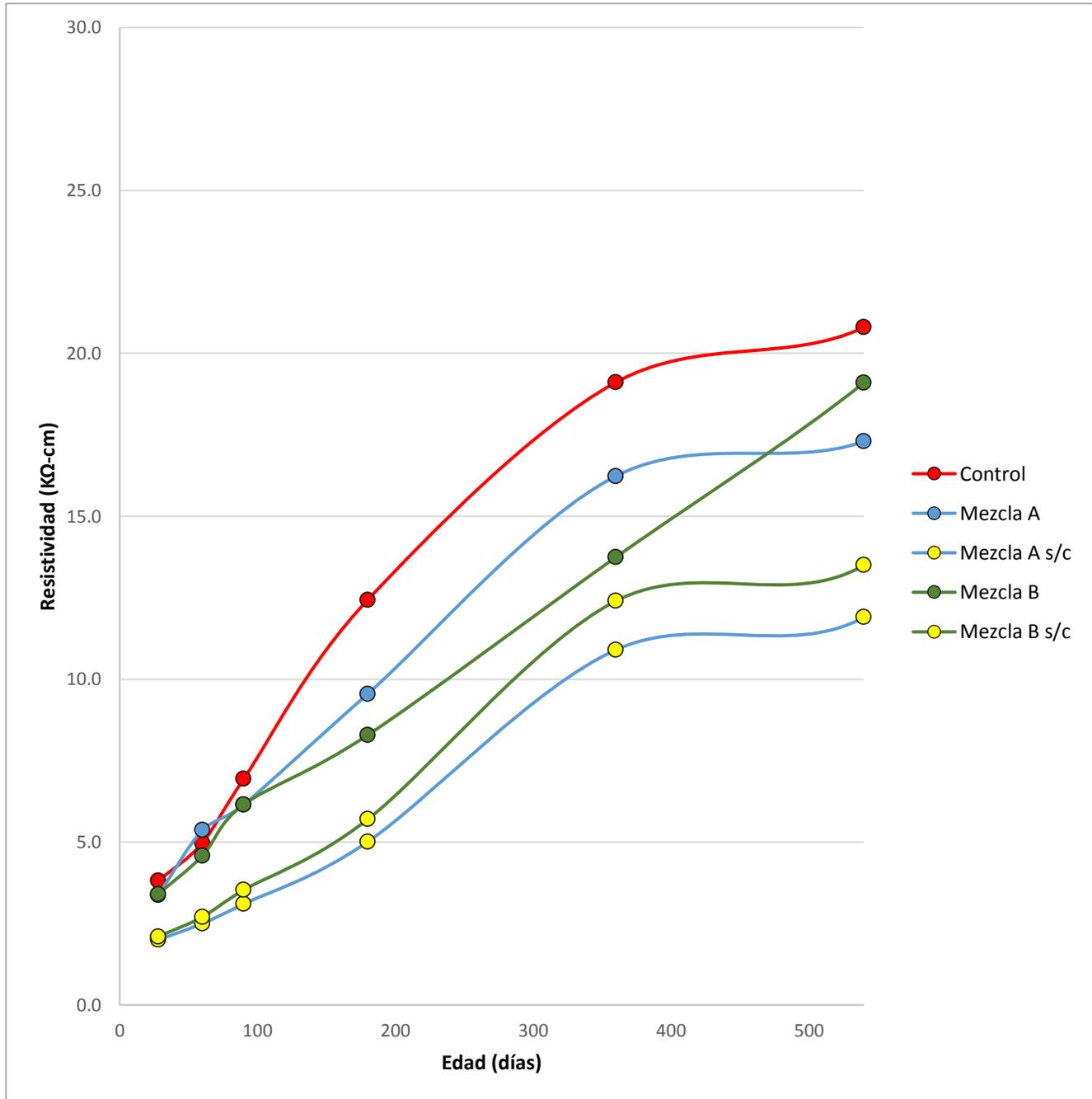


Gráfica 5. Resultados de ensaye de resistividad eléctrica en Mezcla B.





Gráfica 6. Comparativa de resultados del ensaye de resistividad eléctrica.

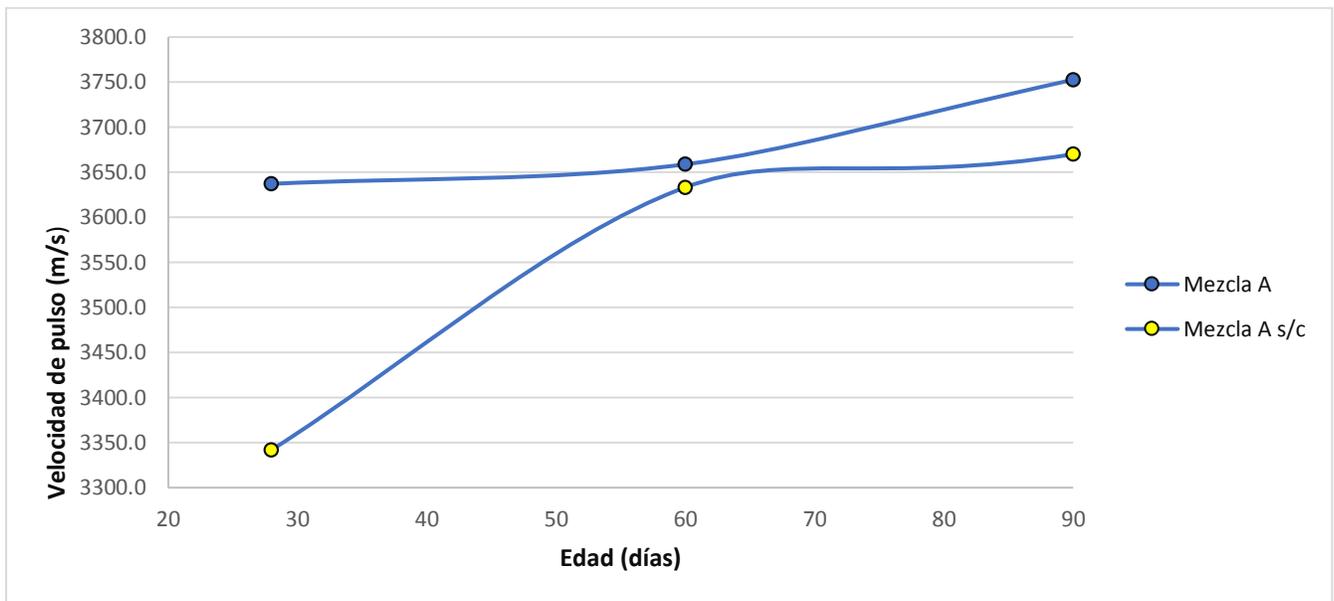




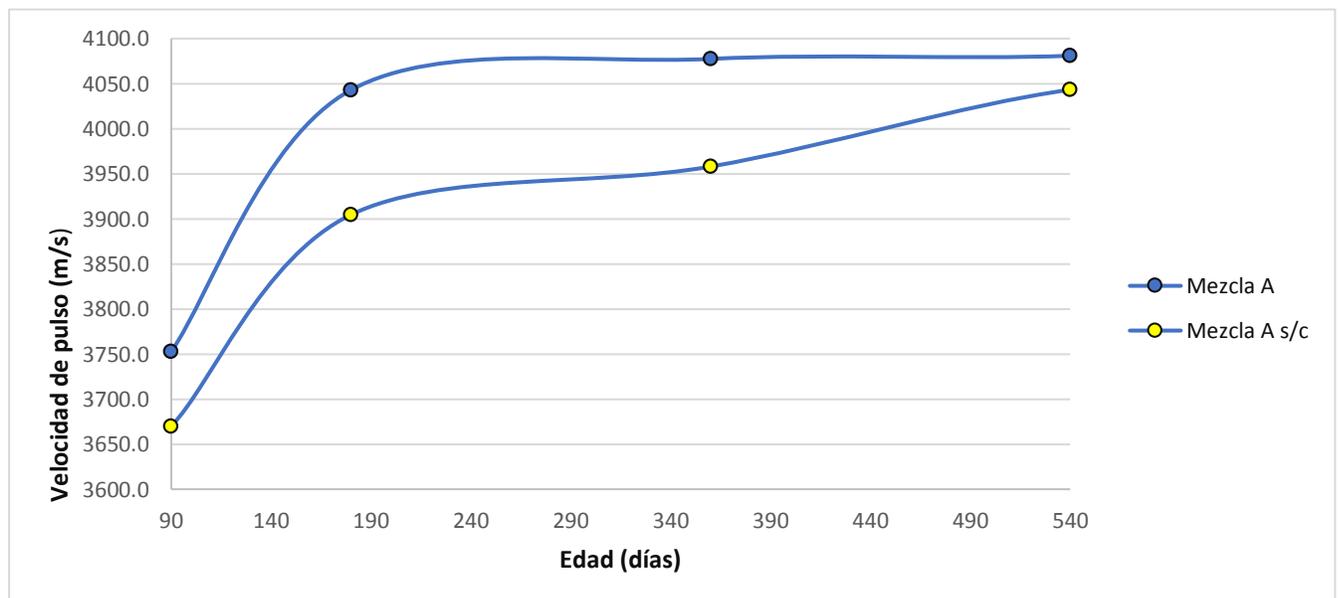
6.7.2. Resultados de ensayos de velocidad de pulso ultrasónico

En las Gráficas 7 a 11 se muestran los resultados obtenidos en el ensaye de Velocidad de pulso ultrasónico, a diferentes edades.

Gráfica 7. Resultados de ensaye de velocidad de pulso ultrasónico en Mezcla A de 28 a 90 días.

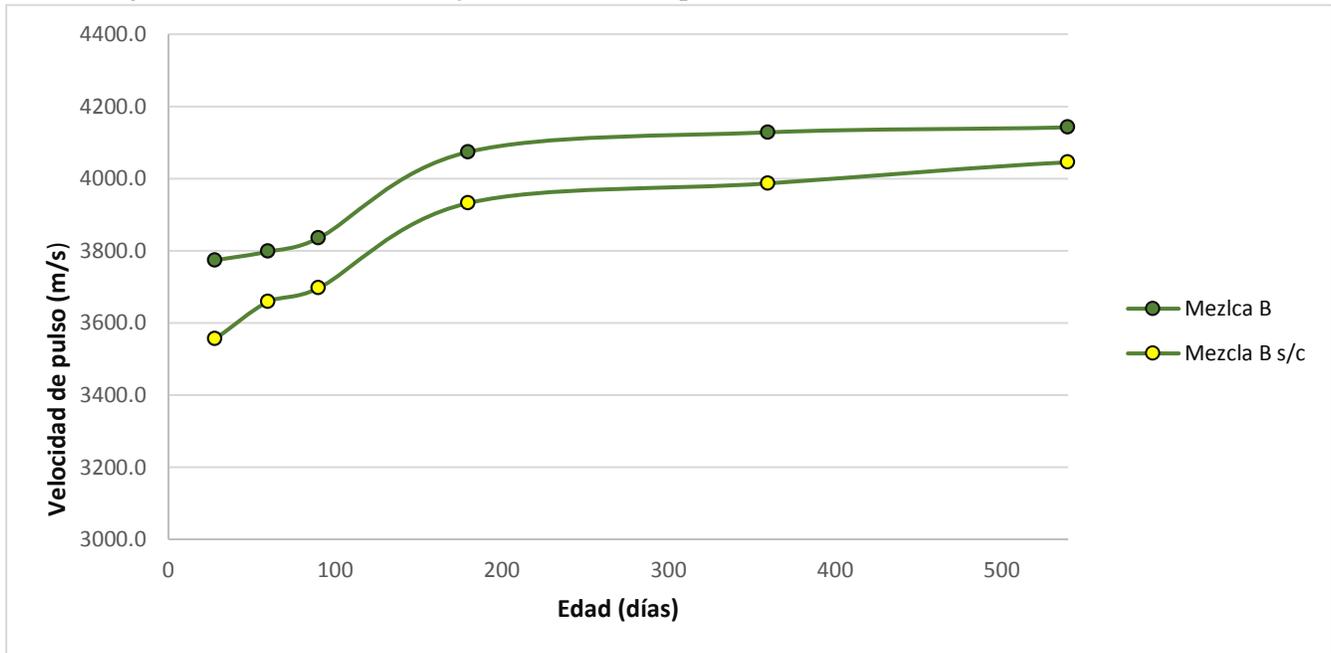


Gráfica 8. Resultados de ensaye de velocidad de pulso ultrasónico en Mezcla A de 90 a 540 días

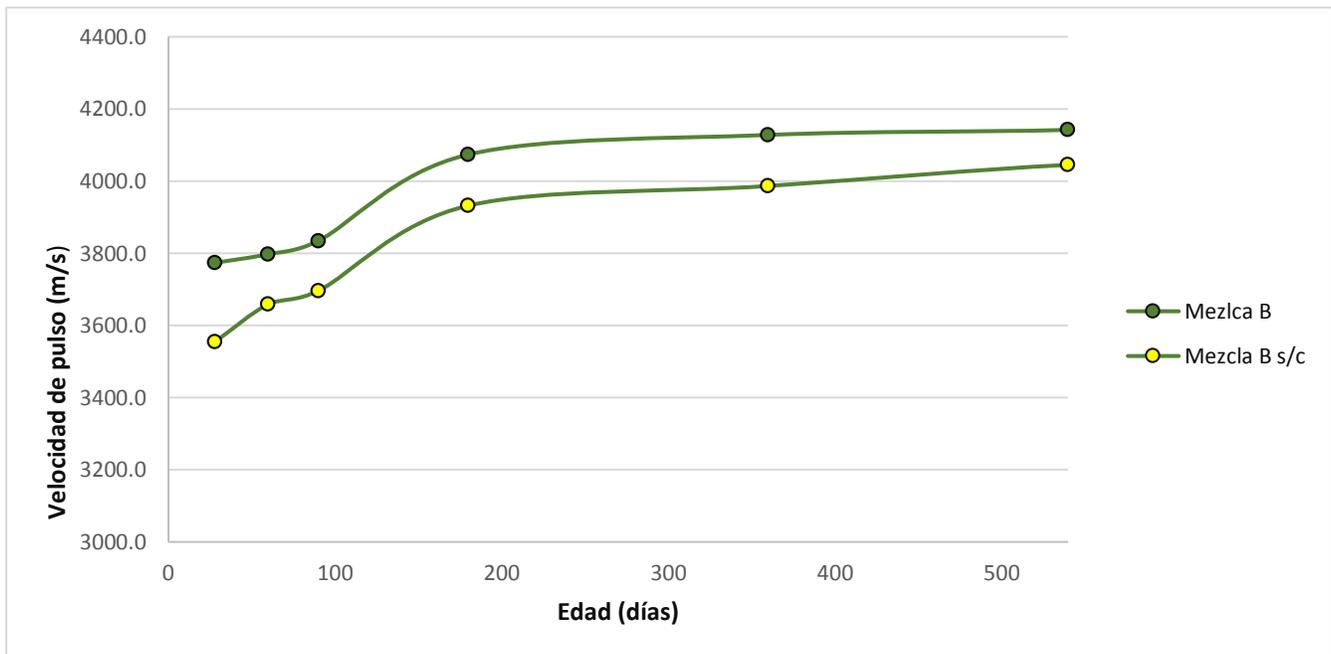




Gráfica 10. Resultados de ensaye de velocidad de pulso ultrasónico en Mezcla B de 28 a 90 días.

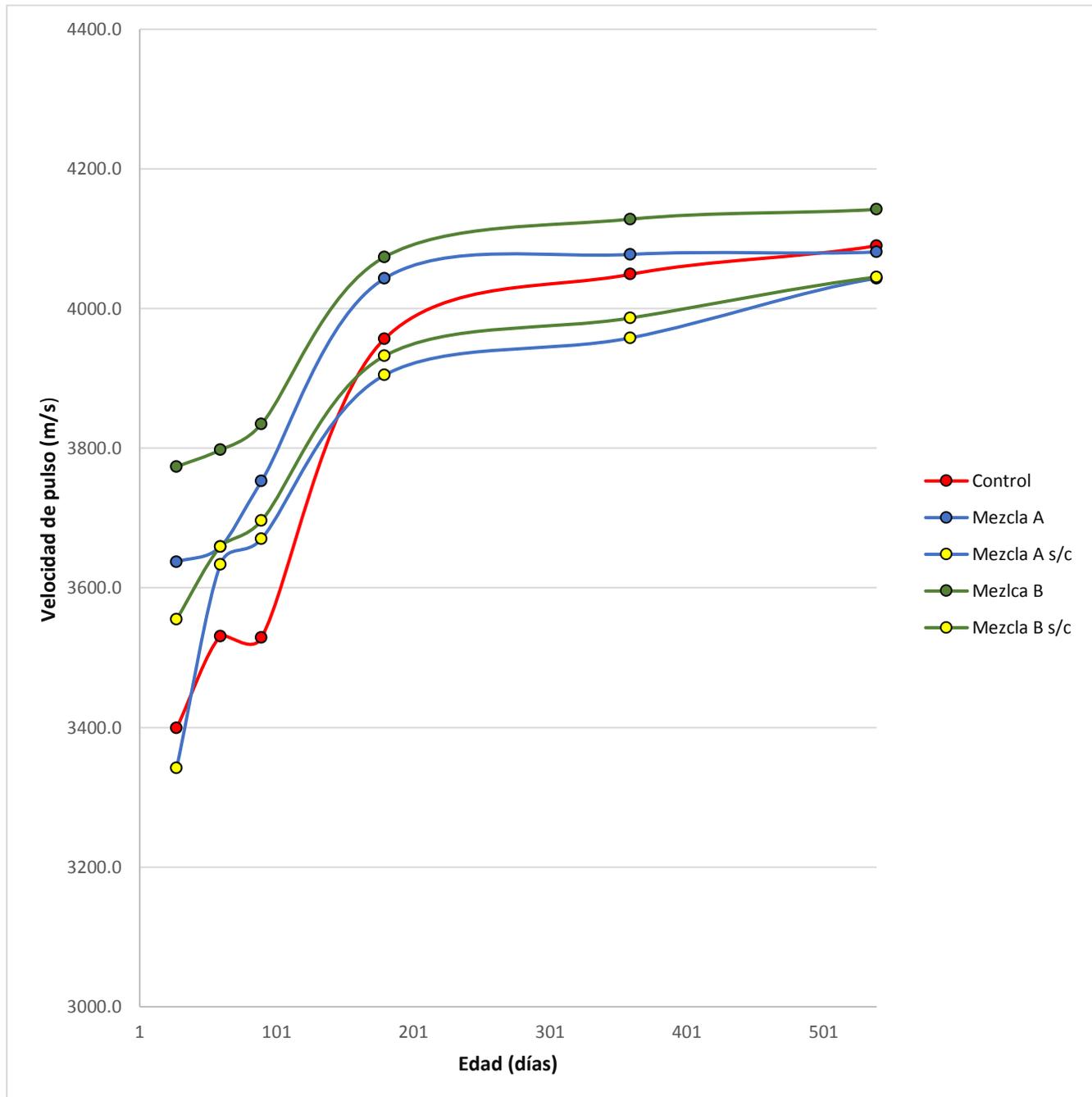


Gráfica 9. Resultados de ensaye de velocidad de pulso ultrasónico en Mezcla B de 90 a 540 días.





Gráfica 11. Comparativa de resultados del ensaye de velocidad de pulso ultrasónico.



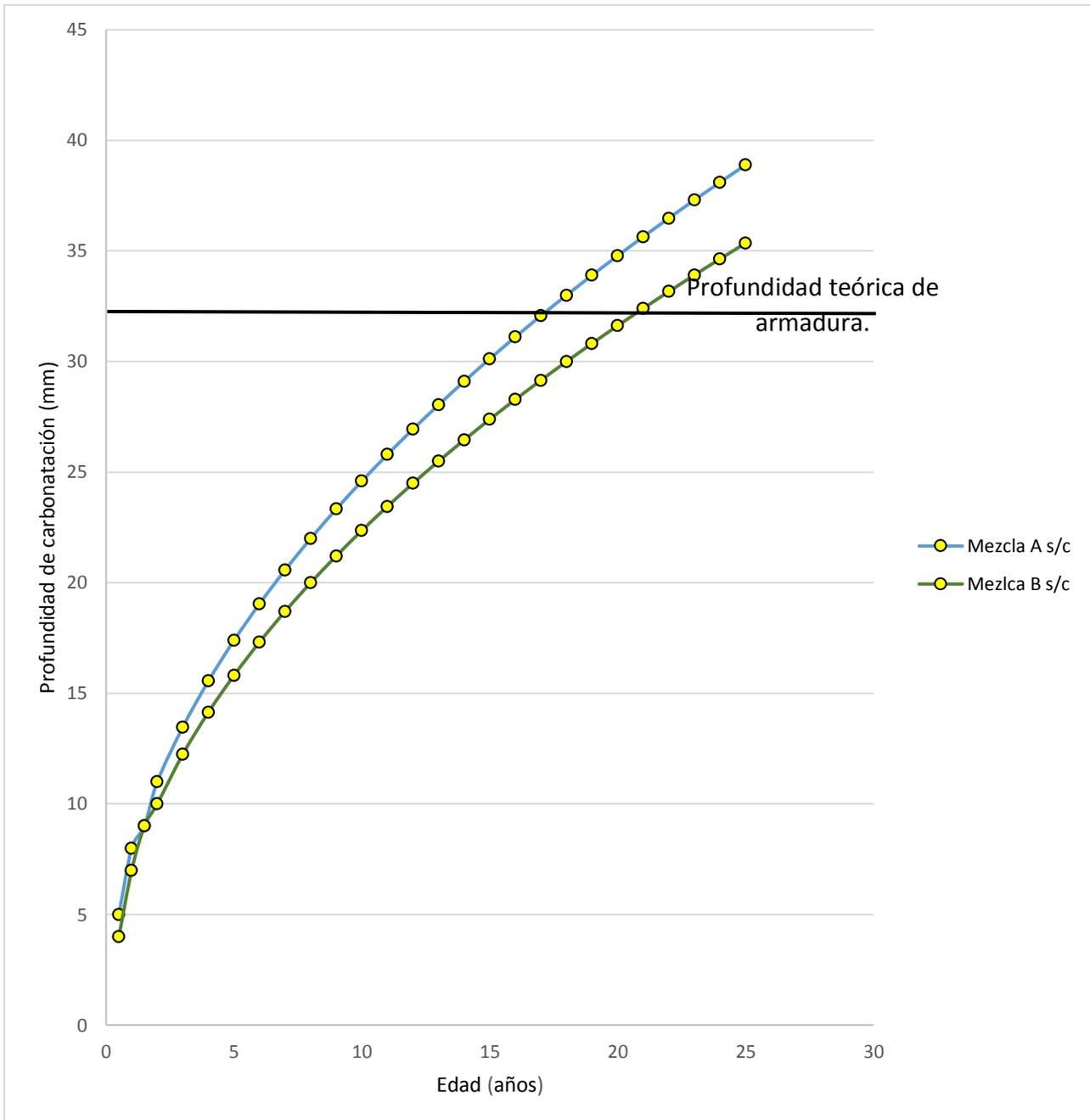


6.7.3. Resultados de ensayos de carbonatación

En la Gráfica 12 se muestran los resultados del ensayo de carbonatación proyectado a 25 años de vida útil del concreto.

Solo los especímenes expuestos a la intemperie fueron ensayados en esta prueba.

Gráfica 12. Resultados de ensayo de carbonatación en especímenes no curados.

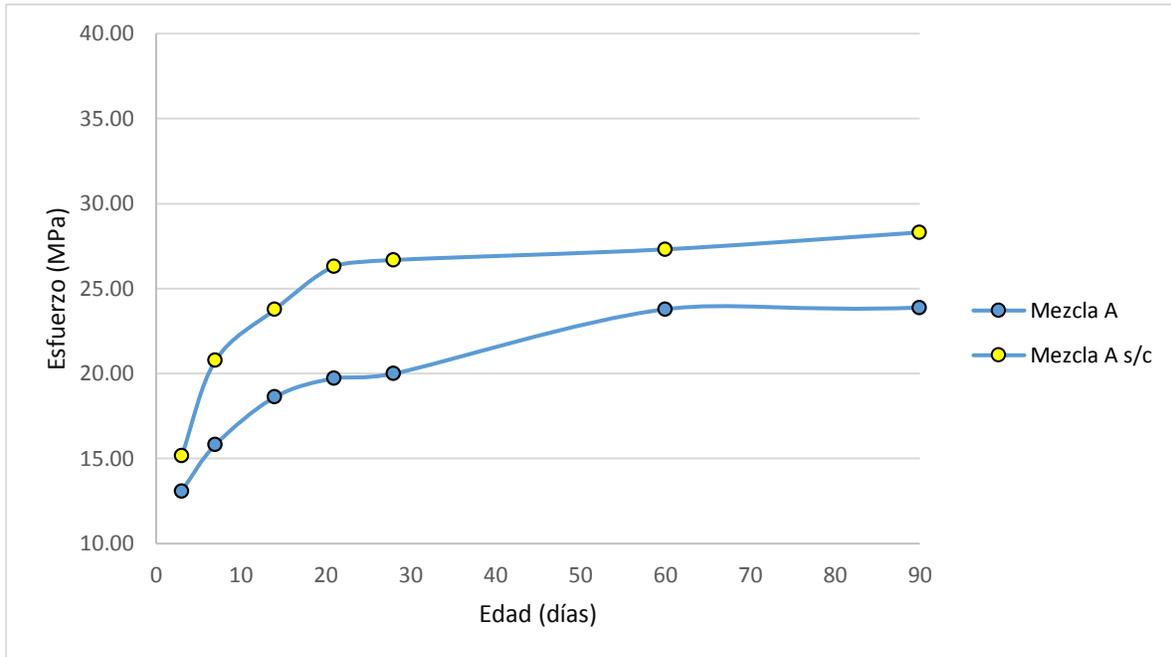




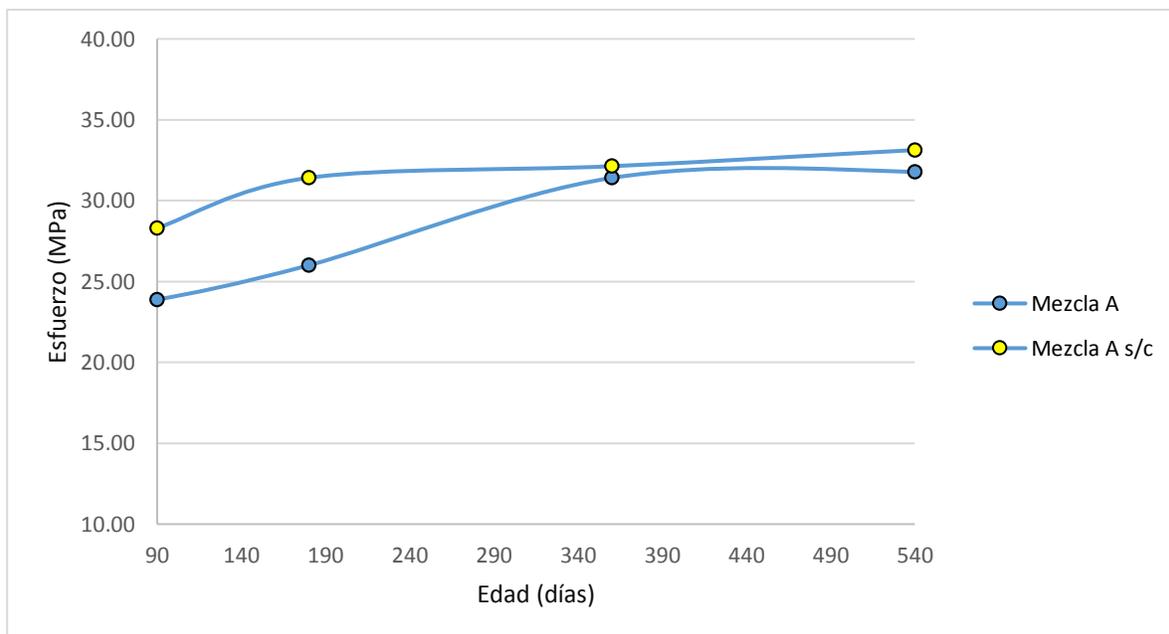
6.7.4. Resultados de ensayos de compresión simple

En las gráficas 13 a 17 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de Compresión simple, a diferentes edades.

Gráfica 13. Resultados del ensayo de compresión simple en Mezcla A de 3 a 90.

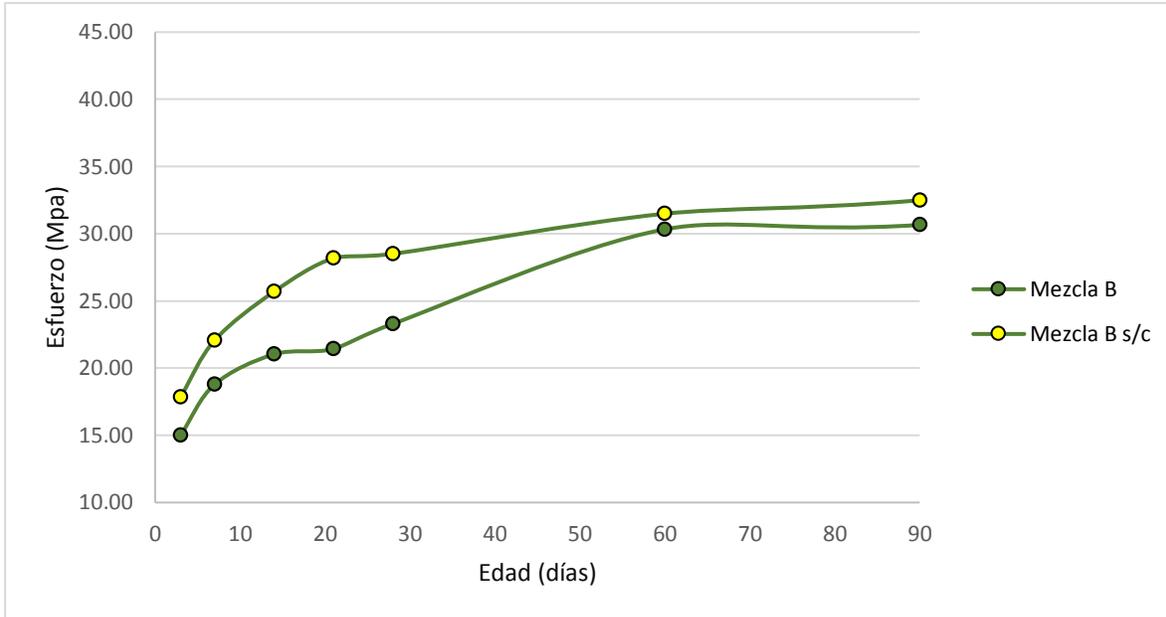


Gráfica 14. Resultados del ensayo de compresión simple en Mezcla A de 90 a 540 días.

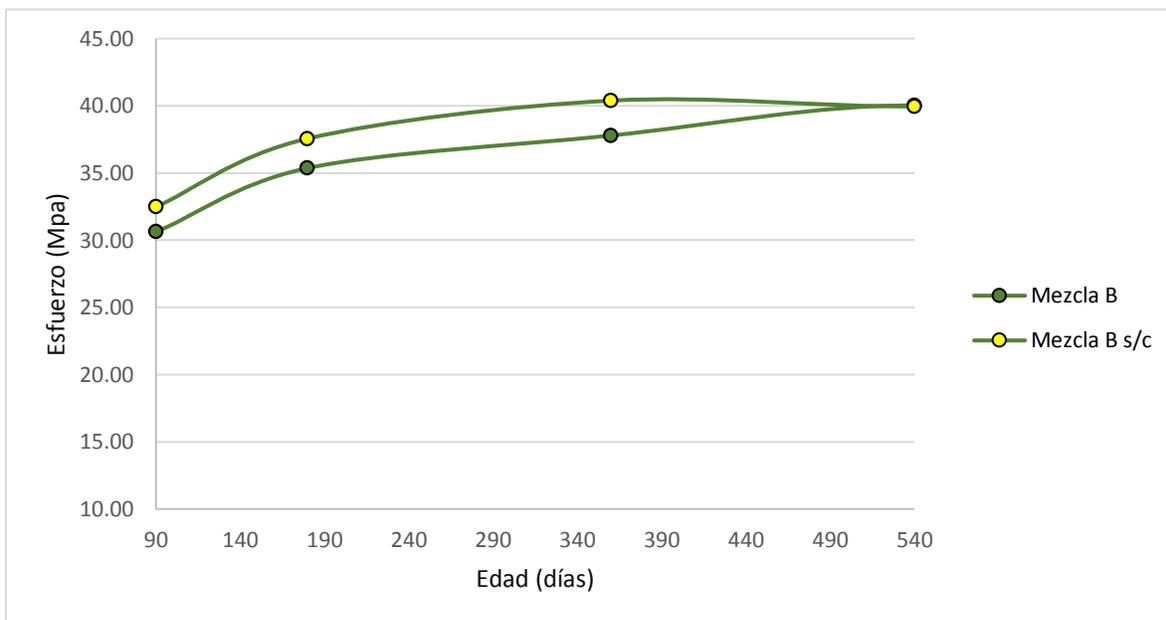




Gráfica 15. Resultados del ensayo de compresión simple en Mezcla B de 3 a 90 días.

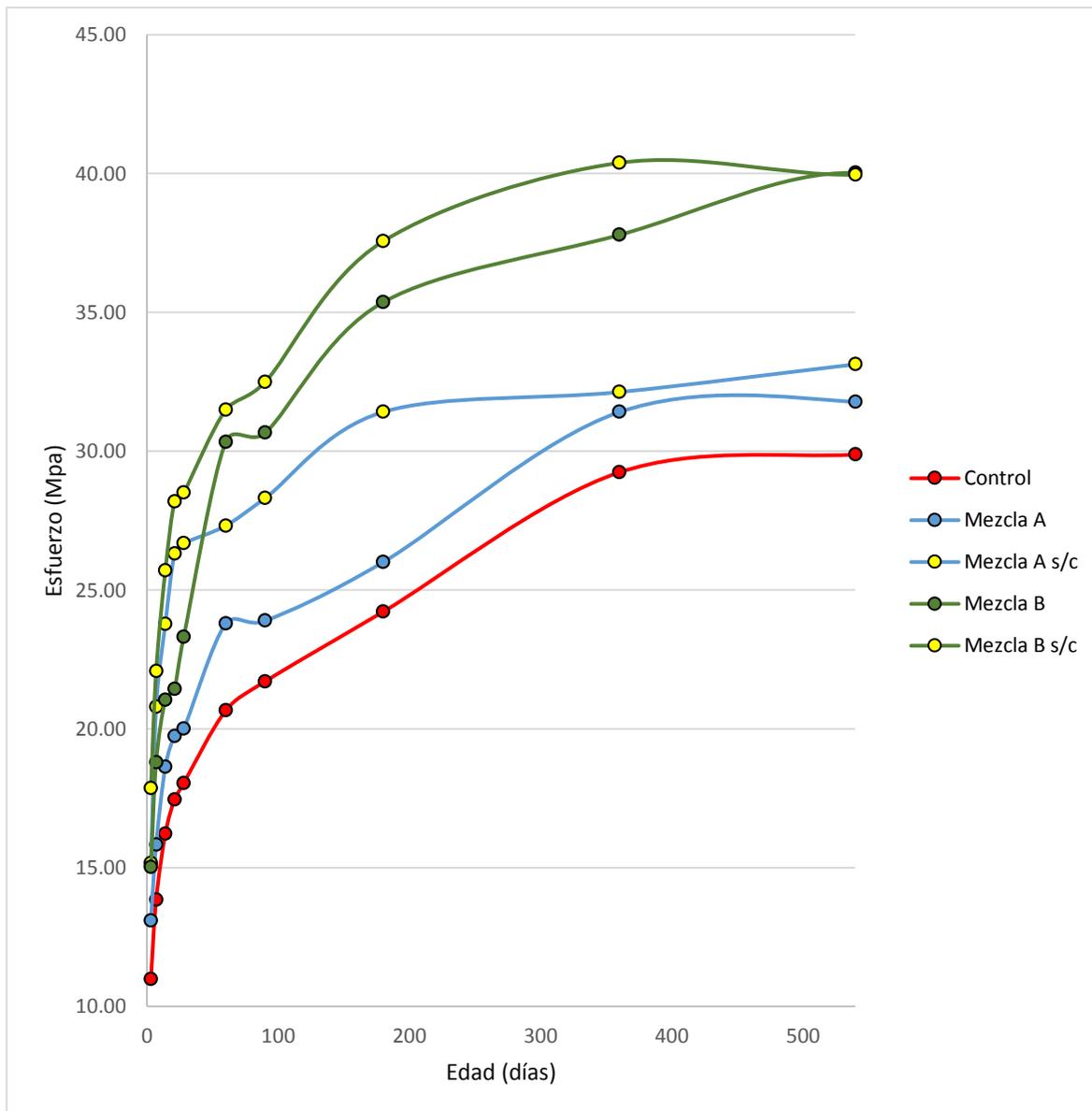


Gráfica 16. Resultados del ensayo de compresión simple en Mezcla B de 90 a 540 días.





Gráfica 17. Comparativa de resultados del ensaye de compresión simple.





7. Análisis de resultados



- **Calidad de los agregados**

La arena y grava utilizados en la elaboración de concreto para este proyecto presentaron buenas características de calidad en densidad, absorción, masas volumétricas y contenido de materia orgánica. En el caso de los resultados de granulometría en arenas es necesario hacer un ajuste de los tamaños de las partículas ya que el módulo de finura y la distribución de tamaños están fuera de los límites establecidos por la norma mexicana: NMX-C-111-ONNCCE,2014.

- **Diseño de mezclas**

El módulo de finura obtenido esta fuera de lo límites permitidos por la norma mexicana: NMX-C-111-ONNCCE-2014, y se optó por no realizar un ajuste granulométrico ya que se trata de simular las condiciones de los materiales cuando son utilizados en obra. Por esta razón para obtener el volumen del agregado en la mezcla control fue necesario extrapolar fuera de lo indicado en la Tabla 4, resultando así un contenido de arena muy similar al contenido de grava, tal como se observa en la Tabla 22.

En cuanto a las mezclas realizadas de manera empírica, revisando el contenido de cementante y agua, para la mezcla A se puede apreciar una relación agua/cemento de 0.58 si se revisa este valor en la Tabla 3, se supone una resistencia de 26.4 MPa a los 28 días.

En cuanto a las mezclas realizadas de manera empírica, revisando el contenido de cementante y agua, para la mezcla B se puede apreciar una relación agua/cemento de 0.44 si se revisa este valor en la Tabla 3, se supone una resistencia de 37 MPa a los 28 días.

- **Colado de Mezclas**

Es importante mencionar algunos detalles presentados durante el proceso de colado de los especímenes cilíndricos:

- Por cada mezcla se hicieron dos coladas, una para los cilindros de 10cm x 20cm y otra para los especímenes de 15cm x 30cm.
- El agua contenida en la pila de curado fue tomada, por lo tanto, el nivel de la misma disminuyo dejando expuesta una parte de la sección de los especímenes a edades tempranas.
- Los especímenes colocados en la pila estuvieron en contacto con la formación de algas, por lo cual fue necesario una constante limpieza y la utilización de cal para evitar la futura aparición de la misma.

Lo antes mencionado puede afectar principalmente en el desempeño de los especímenes en el ensaye de compresión simple.

- **Resistividad eléctrica**

En el ensaye de resistividad eléctrica hay un notorio cambio respecto a los especímenes que no se curaron por inmersión teniendo a los 540 días en la “Mezcla A s/c” una resistividad de 11.9 KΩ-cm y en la “Mezcla B s/c” una resistividad de 13.5 KΩ-cm.



Los especímenes que se curaron por inmersión a los 540 días en la “Mezcla A” alcanzaron una resistividad de 17.3 K Ω -cm y en la “Mezcla B” alcanzaron una resistividad de 19.1 K Ω -cm.

En el caso de la “Mezcla A” la resistividad de los especímenes curados por inmersión fue mayor en un 45.0% y en la “Mezcla B” de un 41.5% respecto a los especímenes expuestos a la intemperie.

La “Mezcla control” es la que presenta el mejor comportamiento ya que a los 540 días alcanzo una resistividad de 20.8 K Ω -cm.

El comportamiento de todas las mezclas se estabiliza a partir de los 360 días de edad excepto por la Mezcla B la cual muestra una tendencia a continuar aumentando (ver Gráfica 6).

Comparando los resultados con Red Durar “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”, donde se indican los siguientes límites:

$P > 200 \text{ K}\Omega\text{-cm}$, bajo riesgo a la corrosión.

$200 > P > 10 \text{ K}\Omega\text{-cm}$, riesgo moderado a la corrosión.

$P < 10 \text{ K}\Omega\text{-cm}$, alto riesgo a la corrosión.

Donde:

P : Resistividad (K Ω -cm).

Al comparar los resultados se aprecia que todas las mezclas tienen un riesgo moderado a la corrosión.

- **Velocidad de pulso ultrasónico**

En el ensaye de velocidad de pulso ultrasónico hay un cambio menor respecto a los especímenes que no se curaron por inmersión teniendo a los 540 días en la “Mezcla A s/c” una velocidad de 4043 m/s y en la “Mezcla B s/c” una velocidad de 4045 m/s.

En el caso de los especímenes que se curaron por inmersión a los 540 días, en la “Mezcla A” alcanzaron una velocidad de 4081 m/s y en la “Mezcla B” alcanzaron una velocidad de 4142 m/s.

La “Mezcla control” alcanzo una velocidad de 4090 m/s, un 1.27% menor a la “Mezcla B”, esta última fue la que alcanzo el mejor comportamiento en el ensaye de velocidad de pulso ultrasónico.

Comparando los resultados con Red Durar “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”, donde se indican la calidad del concreto dependiendo de los valores obtenidos.



Velocidad de propagación

Calidad del concreto

< 2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001 a 4000 m/s	Alta
> 4000 m/s	Durable

Al comparar con los datos se aprecia que a los 540 días todas las mezclas son durables.

- **Carbonatación**

Es importante mencionar que el ensaye de carbonatación solo se le realizó a los especímenes que estuvieron expuestos a la intemperie desde el día del desmolde ya que teóricamente estos simulan las condiciones a las que son expuestos los elementos de concreto hidráulico en campo.

Suponiendo una profundidad del acero de refuerzo a 25 mm, “la Mezcla A s/c” permitirá una carbonatación a esta profundidad a los 10 años del colado.

Para la “Mezcla B s/c” la profundidad de carbonatación alcanzará los 25 mm a los 13 años de colado el elemento.

Esto repercute en la vida útil del elemento colado hasta en 10 años; la durabilidad de este se verá fuertemente afectada por la pérdida de la capa pasiva que evita la corrosión del acero estructural.

- **Compresión simple**

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las resistencias teóricas de proyecto a los 28 días de las muestras coladas.

Partiendo de los datos en la Tabla 27 y comparando con los resultados obtenidos en el ensaye a compresión; la “Mezcla control” solo alcanzó los 18.4 MPa (70%) de resistencia a los 28 días de edad, y a los 540 días alcanzó una resistencia de 29.87 MPa.

La “Mezcla A” alcanzó una resistencia de 20 MPa (68%) de resistencia a los 28 días de edad, y a los 540 días alcanzó una resistencia de 31.77 MPa.

Así mismo la “Mezcla A s/c” alcanzó una resistencia de 26.68 MPa (100%) de resistencia a los 28 días de edad, y a los 540 días alcanzó una resistencia de 33.13 MPa.

La “Mezcla B” alcanzó una resistencia de 23.30 MPa (58.79%) de resistencia a los 28 días de edad, y a los 540 días alcanzó una resistencia de 40.02 MPa.

Así mismo la “Mezcla B s/c” alcanzó una resistencia de 28.5 MPa (70.1%) de resistencia a los 28 días de edad, y a los 540 días alcanzó una resistencia de 39.96 MPa.



Es importante mencionar que las condiciones de humedad en las que fueron ensayadas los especímenes no fueron similares, ya que los especímenes expuestos a la intemperie en ocasiones estaban completamente secos en comparación con los especímenes curados por inmersión; lo cual pudo provocar un cambio en la resistencia a compresión.

Mezcla	Relación A/C	Resistencia teórica a los 28 días (MPa)	Resistencia obtenida a los 28 días (MPa)
Mezcla control	0.61	25.48	18.4
Mezcla A	0.58	26.40	20
Mezcla B	0.44	37.00	23.3

Tabla 27. Resistencia a la compresión simple teórica y obtenida.

- **Análisis de costos**

Para comparar el costo por metro cúbico de concreto en cada mezcla estudiada se hace un resumen en la Tabla 28, en la cual se muestra cuál de las tres mezclas es la más económica.

Revisando los datos de la columna “Costo total por m³” de la Tabla 28 se ve que la “Mezcla control” es la más económica, ya que es más costoso producir un metro cúbico de concreto de la “Mezcla A” en un 22.75%; y en el caso de la “Mezcla B” es más costoso en un 30.54%.

El “Concreto premezclado” tiene un costo aproximado de \$1,600 pesos por metro cúbico en Morelia a inicios del año 2018, un 24.90 % mas costoso que la “Mezcla control”. Es importante mencionar que la calidad de un concreto premezclado va garantizada por el fabricante.

Los costos analizados en la “Tabla 28” son actualizados al mes de enero del 2018, los valores en la columna de “Aumento de costo respecto a la Mezcla control” no se modificarán al presentarse un aumento en el costo de los materiales.



Tabla 28. Comparación de costo por m3 de concreto.

-Mezcla	Material	Unidad	Costo unitario	Cantidad	Costo Material	Costo total por m3	Aumento de costo respecto a la Mezcla Control
Mezcla Control	Cemento	tn	\$3,100.00	0.339	\$1,050.90	\$1,281.24	---
	Arena	m ³	\$330.00	0.281	\$92.73		
	Grava	m ³	\$330.00	0.379	\$125.07		
	Agua	m ³	\$60.00	0.209	\$12.54		
Mezcla A	Cemento	tn	\$3,100.00	0.438	\$1,357.80	\$1,572.69	22.75%
	Arena	m ³	\$330.00	0.346	\$114.18		
	Grava	m ³	\$330.00	0.259	\$85.47		
	Agua	m ³	\$60.00	0.254	\$15.24		
Mezcla B	Cemento	tn	\$3,100.00	0.467	\$1,447.70	\$1,672.52	30.54%
	Arena	m ³	\$330.00	0.368	\$121.44		
	Grava	m ³	\$330.00	0.276	\$91.08		
	Agua	m ³	\$60.00	0.205	\$12.30		
Concreto premezclado	Cemento	tn	-	-	-	\$1,600.00	24.90%
	Arena	m ³	-	-	-		
	Grava	m ³	-	-	-		
	Agua	m ³	-	-	-		



8. Conclusión



Teniendo en cuenta los datos obtenidos a edades tardías en el caso del ensaye de compresión simple se aprecia que la “Mezcla B s/c” es la que alcanza la mayor resistencia. No hay que dejar de lado que es la que contiene más cemento por lo cual es un tanto lógico dicho comportamiento, también hay que mencionar que al momento del ensaye los especímenes de la “Mezcla B s/c” tenían un menor contenido de humedad en comparación con los curados por inmersión.

A los 28 días solo la “Mezcla A” alcanzó el 100% de resistencia teórica de proyecto.

En cuanto a durabilidad la mezcla control es la que obtuvo los mejores resultados en el ensaye de resistividad eléctrica, y en velocidad de pulso ultrasónico esta ligeramente por debajo de la mezcla B en solo un 0.22%

Hay que tomar en cuenta que en la “Mezcla control” se utilizó un agregado fino con características de granulometría que no cumplen con la normativa referenciada, de ahí su posible mal desempeño en el ensaye de compresión simple.

Para el ensaye de carbonatación se optó por solo realizarse en los especímenes expuestos a la intemperie ya que de esta manera se simulan las condiciones de campo a las que son expuestas los elementos de concreto estructural. Los resultados apuntan que las mezclas tanto la “Mezcla A s/c” y la “Mezcla B s/c” permitirán una pérdida de la capa pasiva en el acero de refuerzo a una edad de 10 y 13 años respectivamente, afectando directamente la vida útil de la obra.

Revisando la Tabla 28 podemos ver que tanto la “Mezcla A” y la “Mezcla B” son más costosas que la Mezcla control esto sumado a que es necesario dar mantenimiento a los elementos de concreto apunta a que al momento de utilizar estas mezclas en campo no solo estamos usando mezclas con resistencia sobrada sino que además son más costosas y tendrán una menor vida útil.

Se recomienda que siempre se haga uso de los métodos establecidos para el control de calidad de los materiales a utilizar en la dosificación de concreto y hacer un correcto diseño del mismo, de esta manera se garantiza un concreto de calidad, duradero y económico (en cuanto la economía del país lo permita), teniendo como prioridad el objetivo del ingeniero quien siempre debe encontrar la forma de hacer más con menos.



9. Referencias



- Álvaro N. J. (2010), *Influencia de la Morfología de Pétreos: Volcánicos, Triturados y Cantos Rodados; correlacionando matemáticamente los Módulos de Elasticidad, Estático y Dinámico, en cilindros de concreto de 10cm x 20cm*. Tesis licenciatura, UMSNH, Morelia Michoacán, México, pg 211-213.
- American Society for Testing and Materials, 2003, *ASTM-C-33-03, Standard Specification for Concrete Aggregates*, United States.
- Blancas V. (2017), *Evaluación físico-mecánica y por criterios de durabilidad de matrices cementicias con sustituciones orgánica*. Tesis licenciatura, UMSNH, Morelia Michoacán, México, pg 43-51, 71-77, 87-90.
- Colegio de Ingenieros Civiles de Michoacán, A., (1999), *Reglamento de Construcción del Estado de Michoacán*. Morelia, Mich: s.n.
- Gutiérrez L. (2003), *El concreto y otros agregados para la construcción*. Colombia: Centro de publicaciones, Universidad Nacional de Colombia.
- Hermida G. (2013), *Concreto impermeable, una mirada reciente. Sika informaciones técnicas*. México. Sika Mexicana.
- Holcim. *Concretos de calidad hechos en obra*. Holcim Apasco, México
- Navarro L., Martínez W. y Espinoza A. (2011), *Análisis de materiales, Resistencia de materiales*, Tercera edición. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo: Michoacán, México
- Neville A.M., 1999, *Tecnología del Concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC), primera edición, editorial Trillas, México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2004, *Norma Mexicana NMX-C-030-ONNCCE, 2004. Industria de la Construcción-Agregados-Muestreo*. México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2015, *Norma Mexicana NMX-C-057-ONNCCE, 2015. Industria de la Construcción-Cementantes hidráulicos-Determinación de la consistencia Normal*. México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2013, *Norma Mexicana NMX-C-059-ONNCCE, 2013. Industria de*



la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Determinación del Tiempo de Fraguado de Cementantes Hidráulicos (Método de vicat). México.

- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2004, *Norma Mexicana NMX-C-073-ONNCCE, 2004. Industria de la Construcción-Agregados-Masa Volumétrica-Método de Prueba.* México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 1997, *Norma Mexicana NMX-C-077-ONNCCE, 1997. Industria de la Construcción-Agregados para Concreto-Análisis Granulométrico-Método de Prueba.* México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2002, *Norma Mexicana NMX-C-083-ONNCCE, 2002. Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la Resistencia a la Compresión de cilindros de Concreto-Método de Prueba.* México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2013, *Norma Mexicana NMX-C-109-ONNCCE-2013, s.f. Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico-Cabeceo de Especímenes.* México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2004, *Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE, 2014. Industria de la Construcción-Agregados para Concreto Hidráulico-Especificaciones y Métodos de Prueba.* México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2004, *Norma Mexicana NMX-C-122-ONNCCE, 2004. Industria de la Construcción-Agua para Concreto-Especificaciones.* México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2010, *Norma Mexicana NMX-C-152-ONNCCE, 2010. Industria de la Construcción-Cemento Hidráulico-Determinación de la Densidad.* México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2010, *Norma Mexicana NMX-C-156-ONNCCE, 2010. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco.* México
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2016, *Norma Mexicana NMX-C-159-ONNCCE, 2016. Industria De La Construcción – Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo.* México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2014, *Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE, 2014. Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos-Métodos y Especificaciones.* México.



- Red Durar (Durabilidad de la Armadura), (2000), Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, CYTED, 3ra. edición, México.
- Sanjuán M. y Chinchón S. (2015), Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland. *Publicaciones de la Universidad de Alicante*. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/273127822>, el 13 de diciembre de 2017.
- SOFTEC (2015), Viviendas de autoconstrucción. *La jornada*. Recuperado de: <http://www.jornada.unam.mx/ultimas/2015/06/20/el-63-del-millon-de-viviendas-que-se-construyen-al-ano-son-de-autoconstruccion-consultora-6843.html>, el 10 de noviembre de 2017.
- Solís R., Moreno E. y Vázquez C. (2011), Diferencias en la resistencia de concretos sujetos a curados húmedos y al ambiente en clima cálido subhúmedo. *Concreto y cemento, investigación y desarrollo*. Volumen 3, pg 25-36
- Tranquilino F. (2017), *Evaluación de morteros de cemento sustituidos con cenizas puzolánicas para mitigar el fenómeno de corrosión en estructuras de concreto en rehabilitación*. Tesis licenciatura, UMSNH, Morelia Michoacán, México, pg 50-51, 91-94.
- Trujillo I. (2016), *Comparativa de concreto hidráulico sometido a curado por inmersión y curado a la intemperie*. Tesis licenciatura, UMSNH, Morelia Michoacán, México, pg 14-16.
- Vaca L. A. (2017), *Compósitos con matrices cerámicas base cemento portland con geomateriales substituidos por residuos orgánicos*. Tesis licenciatura, UMSNH, Morelia Michoacán, México, pg 25-30, 31-39.
- Vázquez B. y Corrales S. (29 de abril del 2016), Industria del cemento en México análisis de sus determinantes. *Revista problemas del desarrollo*. Recuperado de: <http://probdes.iiec.unam.mx>, el 13 de diciembre de 2017.