



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Licenciatura en Ingeniería Civil

Comportamiento mecánico y propiedades físicas de mezclas de concreto hidráulico elaboradas con ceniza de bagazo de caña y concreto reciclado.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:
Viviana Herrera Martínez

DIRECTOR DE TESIS:
Marco Antonio Navarrete Seras

CO-DIRECTOR:
Cipriano Bernabé Reyes

Morelia Michoacán, enero de 2021.



CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	ii
ÍNDICE DE TABLAS	iv
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	1
1 ABSTRACT	2
2 JUSTIFICACIÓN	3
3 HIPÓTESIS	4
4 OBJETIVOS	4
4.1 General	4
4.2 Particulares	4
5 ANTECEDENTES	5
5.1 Fundamentos generales de un Concreto.....	5
5.1.1 Definición y antecedentes	5
6 DESARROLLO EXPERIMENTAL	27
6.1 Organigrama de Actividades.....	27
6.2 Caracterización del Material Inerte.....	28
6.2.1 Cuarteo.....	28
6.2.2 Determinación de la densidad en arenas y gravas.....	29
6.2.3 Método de prueba para determinar la masa volumétrica seca suelta en arenas y gravas	34
6.2.4 Humedad actual en arenas y gravas	35
6.2.5 Humedad de absorción en arenas y gravas	36
6.2.6 Método de prueba para determinar la masa volumétrica seca varillada en arenas y gravas	42
6.3 Análisis del agua.....	46
6.4 Materiales de estudio	46
6.5 Proporcionamiento de material para un metro cúbico de concreto	47



6.5.1	Procedimiento de cálculo ACI	47
6.5.2	Concreto Reciclado	54
6.5.3	Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)	55
6.5.4	Resistividad Eléctrica	56
7	Aditivos.....	58
7.1	Tipos de aditivos	59
8	RESULTADOS	62
8.1	Caracterización del material pétreo.....	62
8.1.1	Arena “La Unión”-Joyitas.....	62
8.1.2	Análisis de la Grava Triturada de Tracsa	63
8.1.3	Análisis del concreto reciclado	65
8.2	Cantidades obtenidas del proporcionamiento	66
8.3	Caracterización del agua de mezclado	67
8.3.1	Resultados de la prueba a compresión	68
8.3.2	Velocidad de pulso Ultrasónico	70
8.3.3	Resistividad Eléctrica	74
9	CONCLUSIONES.....	79
10	BIBLIOGRAFÍA	80

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Producción del cemento gris en México en el periodo 2000-2012 (Cámara Nacional del Cemento, 2014).....	7
Ilustración 2 Consumo de cemento por habitante (Cámara Nacional del Cemento, 2014).....	7
Ilustración 3 Materias primas y compuestos que aportan al cemento (Cámara Nacional del Cemento, 2014).....	8



Ilustración 4 Esquema general del proceso de producción del cemento (Cámara Nacional del Cemento, 2014).....	9
Ilustración 5 Cemento gris CPC 30R RS Utilizado para la elaboración de los morteros.....	13
Ilustración 6 Organigrama de actividades durante el procedimiento de experimentación.....	27
Ilustración 7 Análisis granulométrico de la arena.....	63
Ilustración 8 Composición granulométrica.....	64
Ilustración 9 Análisis granulométrico de concreto reciclado.....	66
Ilustración 10 Gráfico de resultados de resistencia a la compresión para los materiales CC, CH Y T. Con una relación de A/C de 0.45.....	68
Ilustración 11 Gráfico de resultados de resistencia a la compresión para los materiales CC, CH Y T. Con una relación de A/C de 0.65.....	69
Ilustración 12 Gráfico comparativo de resultados de resistencia a la compresión para los materiales CC, CH Y T. Con un relación de A/C de 0.65.....	70
Ilustración 13 Gráfico comparativo de coeficientes de velocidad de pulso ultrasónico para los materiales CC, CH y T. Con una relación de 0.45.....	71
Ilustración 14 Gráfico comparativo de coeficientes de velocidad de pulso ultrasónico para los materiales CC, CH y T. Con una relación de 0.65.....	72
Ilustración 15 Gráfico comparativo de coeficientes de velocidad de pulso ultrasónico para los materiales CC, CH y T. Con una relación de 0.45.....	73
Ilustración 16 Gráfico comparativo de coeficientes de velocidad de pulso ultrasónico para los materiales CC, CH y T. Con una relación de 0.65.....	74
Ilustración 17 Gráfico comparativo de coeficiente de resistividad para los materiales CC, CH y T. Con una relación de A/C de 0.45.....	75



Ilustración 18 Gráfico comparativo de coeficiente de resistividad para los materiales CC, CH y T. Con una relación de A/C de 0.65.	76
Ilustración 19 Gráfico comparativo de coeficiente de resistividad para los materiales CC, CH y T. Con una relación de A/C de 0.45.	77
Ilustración 20 Gráfico comparativo de coeficiente de resistividad para los materiales CC, CH y T. Con una relación de A/C de 0.65.	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Componentes de Cemento	9
Tabla 2 Clasificación por el tipo de Cemento.....	11
Tabla 3 Denominación del Cemento por sus características especiales (NMX-C414, 2010).	11
Tabla 4 Clasificación por clase resistente (NMX-C414, 2010)	11
Tabla 5 Tipos de cemento Portland (ASTM-C150, 2005).	12
Tabla 6 Factores de los agregados que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C003, 2010)	15
Tabla 7 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas para el agua a utilizarse en la construcción (NMX-C-122-ONNCCE, 2004)	16
Tabla 8 Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias (Instituto del Concreto, 1997).....	17
Tabla 9 Factores del agua que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C003, 2010).....	18
Tabla 10 Clasificación de los aditivos minerales que pueden adicionarse a una mezcla, según el contenido de compuesto (Norma ASTM C618).....	21
Tabla 11 Reacciones de hidratación del cemento.....	23

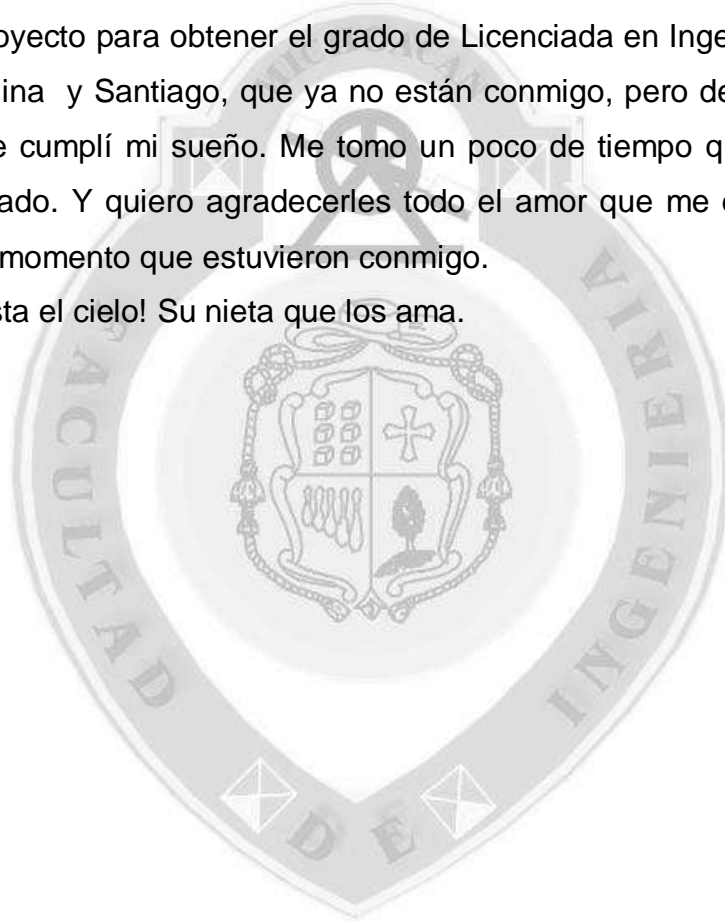


Tabla 12 Revenimiento recomendado para diversos tipos de construcción	47
Tabla 13 Requisitos de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.....	49
Tabla 14 Elección de la relación agua-cemento, dependiendo del f'c de diseño ..	49
Tabla 15 Estimación del agregado grueso	51
Tabla 16 Propiedades físicas de la grava natural triturada y del material reciclado.	52
Tabla 17 Composición química en porcentaje, en masa, de los materiales utilizados en las sustituciones, obtenidas por Fluorescencia de rayos X.	52
Tabla 18 Cantidades de masa y volume para un metro cúbico	53
Tabla 19 Proporciones de materiales para la mezcla base.....	53
Tabla 20 “Clasificación de los aditivos” (NMX-C-255-ONNCCE, 2013)	59
Tabla 21 Análisis granulométrico en arena.	62
Tabla 22 Análisis granulométrico en arena.	64
Tabla 23 Características del concreto reciclado.....	65
Tabla 24 Análisis granulométrico concreto reciclado.	65
Tabla 25 Criterio General de valores de resistividad eléctrica del concreto. (CYTED-DURAR, 1998).....	74



DEDICATORIA

Dedico este proyecto para obtener el grado de Licenciada en Ingeniería Civil a mis abuelos Marcelina y Santiago, que ya no están conmigo, pero desde el cielo son testigos de que cumplí mi sueño. Me tomo un poco de tiempo queridos abuelos, pero he terminado. Y quiero agradecerles todo el amor que me dieron de niña y hasta el último momento que estuvieron conmigo.
Con amor, ¡hasta el cielo! Su nieta que los ama.





AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a una persona muy importante en mi vida y es mi madre. Mamá gracias por nunca dudar de mí, por haberme apoyado siempre, gracias por enseñarme a luchar por lo que quiero, por ser padre y madre a la vez, te debo lo que soy y este logro es por ti.

A mis hermanos Edith, Maribel, Rosario, Lizeth y Miguel A, a mi familia que siempre estuvo apoyándome desde lejos y dándome palabras de aliento para seguir después de cada tropiezo que me daba la vida.

Juan Carlos quiero agradecerte por todo el apoyo incondicional que me brindaste desde que te conocí, gracias por estar ahí cuando más te necesitaba, eres una persona muy importante en mis proyectos.

Al ingeniero Cipriano Bernabé Reyes, gracias por su paciencia, tiempo, enseñanzas, gracias por confiar en mí y apoyarme a terminar este proyecto, que sin su ayuda no hubiera sido posible.

Quiero agradecer al Ingeniero Javier Linares Vázquez que desde que lo conocí en el aula y en el servicio social, eh recibido apoyo de su parte. Me motivó a seguir adelante y seguir formándome como profesionalista.

Por ultimo quiero agradecer a mi asesor el Dr. Marco Antonio Navarrete Seras por el apoyo brindado para que este proyecto se realizara.

A todos Gracias!



RESUMEN

La elaboración de concreto hidráulico ha sido un tema que cobra relevancia no solo en aplicaciones estructurales, sino también desde la perspectiva de su composición. Desde hace tiempo se han hecho estudios sobre materiales con características cementantes que pueden añadirse al cemento, como adición o sustitución, con los objetivos de mejorar el desempeño físico y mecánico y disminuir las cantidades empleadas de cemento. En este trabajo se realizaron diseños de mezclas utilizando ceniza de bagazo de caña (CC) y concreto reciclado. Las mezclas fueron elaboradas para dos relaciones agua/cemento (a/c) de 0.45 y 0.65. El cemento utilizado fue CPC 30R-RS y el diseño se realizó utilizando el método de proporcionamiento del *American Concrete Institute* (ACI). Los especímenes endurecidos se sometieron a pruebas destructivas: resistencia a la compresión, y no destructivas: resistividad eléctrica (RE) y velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Los resultados observados indican una mejora en las propiedades mecánicas y físicas de las probetas elaboradas con relación a/c de 0.45. En la prueba de VPU no se observan variaciones importantes, sin embargo en la prueba de RE se observa que existe un mejor desempeño.

Palabras clave: Ceniza de bagazo de caña, concreto reciclado, resistencia a la compresión, resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico.



1 ABSTRACT

The production of hydraulic concrete has been an issue that gains relevance not only in structural applications, but also from the perspective of its composition. Studies have long been conducted on materials with cementitious properties that can be added to cement, such as addition or replacement, with the objectives of improving physical and mechanical performance and reducing the quantities used of cement. In this work, mix designs were made using cane bagasse ash (CC) and recycled concrete. The mixtures were made for two water/cement ratios (a/c) of 0.45 and 0.65. The cement used was CPC 30R-RS and the design was carried out using the proportioning method of the American Concrete Institute (ACI). The hardened specimens were subjected to destructive tests: compressive strength; and non-destructive: electrical resistivity (RE) and ultrasonic pulse speed (VPU). The observed results indicate an improvement in the mechanical and physical properties of specimens made with a/c ratio of 0.45.

Keywords: Cane bagasse ash, recycled concrete, compressive strength, electrical resistivity, ultrasonic pulse speed.



2 JUSTIFICACIÓN

Estamos en tiempos donde nuestras acciones repercuten cada vez más al planeta. La utilización de material orgánico para la elaboración de mezclas de concreto hidráulico ayudan al medio ambiente a reducir gases de efecto invernadero, muchos son los beneficios al utilizar este tipo de materiales, tanto económicos como para el medio ambiente. Tan solo la utilización que se le puede dar a ese tipo de material reciclado, que si no es aprovechado sería solo desechado, es un gran aporte tanto en la ingeniería como para el medio ambiente. Un dato importante sobre el que yace la necesidad de investigaciones como esta es la cantidad de CO₂ que se genera en la producción de cemento, la cual según investigaciones oscila entre 0.7 y 0.9 toneladas por tonelada de cemento producido.

Es por eso que este trabajo tiene como finalidad hacer una investigación del comportamiento mecánico y las propiedades físicas de mezclas elaboradas con este tipo de material.



3 HIPÓTESIS

La incorporación de material reciclado como CBC y concreto de demolición para la elaboración de mezclas de concreto hidráulico mejoran las propiedades físicas y mecánicas, además que mejoran la durabilidad.

4 OBJETIVOS

4.1 General

Evaluar el desempeño físico y mecánico del concreto hidráulico con adicción de material reciclado y materiales puzolánicos.

4.2 Particulares

- Identificar las propiedades físicas de las mezclas endurecidas por medio de las pruebas de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), Resistividad eléctrica y Resistencia a la compresión.



- Determinar la influencia de las adiciones en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas con diferentes relaciones agua/cemento, adición y diferentes tipos de agregados.
- Analizar el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto hidráulico con los diferentes agregados y la influencia que tiene la relación A/C en el desempeño de la mezcla.
- Comparar los resultados obtenidos de cada una de las pruebas realizadas a los materiales.

5 ANTECEDENTES

5.1 Fundamentos generales de un Concreto.

5.1.1 Definición y antecedentes

5.1.1.1 Aglutinante

Los aglutinantes son materiales que mezclados con agua o algún solvente se hacen plásticos y al endurecer logran alcanzar un grado de resistencia mecánica. Las cuales pueden ser cal, cemento, yeso, arcilla entre otros, sustancias o materiales que sirven para aglomerar, adherir, unir, etc. De acuerdo con sus características proporcionan al mortero resistencia, tiempo de fraguado, durabilidad y economía diferentes. Como los aglutinantes puros (aparte del yeso de estuco) presentan cambios volumétricos, se agrietan durante el endurecimiento, por lo consiguiente habrá que mezclarlos con arena en proporción estándar conforme a la norma ASTM-C109 (Rivera Flores).



El aglutinante que se utilizó en la realización de este proyecto fue un cemento CPC 30R-RS, por tanto se describe a continuación las características de los cementos Portland y una breve reseña de su utilización en nuestro país.

5.1.1.1.1 Antecedentes del CP

A principios del siglo XX (1902), en México se comenzó a utilizar cemento importado de Inglaterra y para 1906 se constituyó la primera Compañía de Cementos Portland, en Toluca estado de Hidalgo, cuyo primer horno comenzó a trabajar en 1909. La revolución mexicana de 1920 y la crisis mundial de 1929 fueron factores determinantes que retrasaron el desarrollo de la industria cementera mexicana; sin embargo, desde principios del siglo XX el uso del cemento se ha popularizado hasta convertirse en un producto estratégico para el crecimiento económico. Actualmente México tiene la tercera empresa más importante del mundo en la producción de cemento, refiriéndonos a CEMEX con más de 50,000 empleados en el mundo y con una capacidad de producción de 94 millones de toneladas (Pacífica, 2008; CEMEX, 2011; IMCYC, Construyendo: CEMEX 100 años, 2005).

Como empresa CEMEX se constituyó el 2 de febrero de 1931, nació de la fusión de dos plantas: Cementos Hidalgo (1906) y Cementos Portland Monterrey, S. A. (1920) (Rojas Sandoval, 2011).

La producción de cemento gris en México y consumo per cápita se presenta en las ilustraciones 1 y 2 respectivamente.

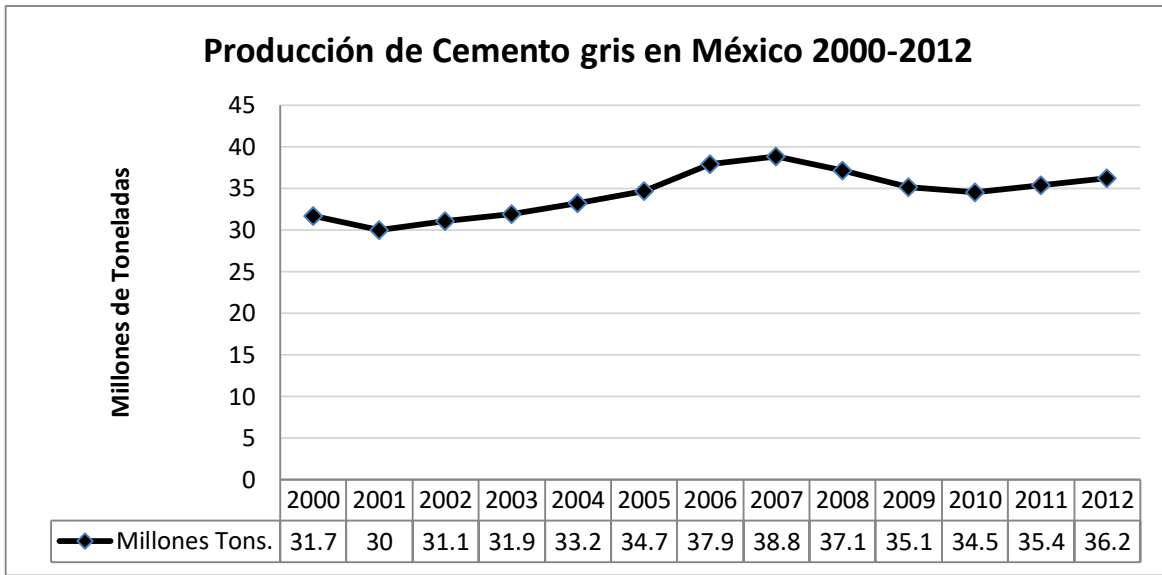


Ilustración 1 Producción del cemento gris en México en el periodo 2000-2012 (Cámara Nacional del Cemento, 2014)

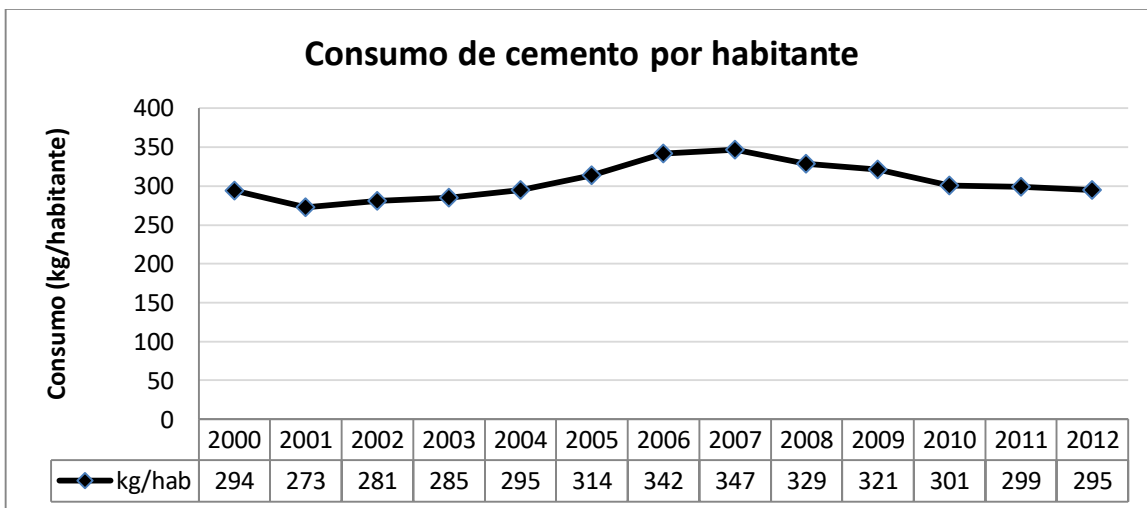


Ilustración 2 Consumo de cemento por habitante (Cámara Nacional del Cemento, 2014).

5.1.1.1.2 Proceso de producción del Cemento

La fabricación de cemento es una actividad industrial de procesado de minerales, la cual se divide en tres grandes etapas:

Primer Etapa



Obtención, preparación y molienda de materias primas (caliza, marga, arcilla, pizarra, etc.) que aportan los siguientes compuestos minerales: carbonato cálcico (CaCO_3), óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3), ilustración 3. Se obtiene una mezcla en forma de polvo de los minerales denominada crudo o harina (Cámara Nacional del Cemento, 2014).

Segunda Etapa

Cocción del crudo en hornos rotatorios hasta alcanzar una temperatura del material cercana a los 1450°C , para ser enfriado bruscamente y obtener un producto intermedio denominado clínker.



Ilustración 3 Materias primas y compuestos que aportan al cemento (Cámara Nacional del Cemento, 2014)

Tercera Etapa

Molienda del clínker con otros componentes: yeso (regulador de fraguado) y adiciones (escorias de alto horno, cenizas volantes, caliza, puzolanas), para dar lugar a los distintos tipos de cemento.

En la ilustración 4 se muestra el esquema general de la producción de cemento, desde la inclusión de la materia prima hasta el envasado del producto final.

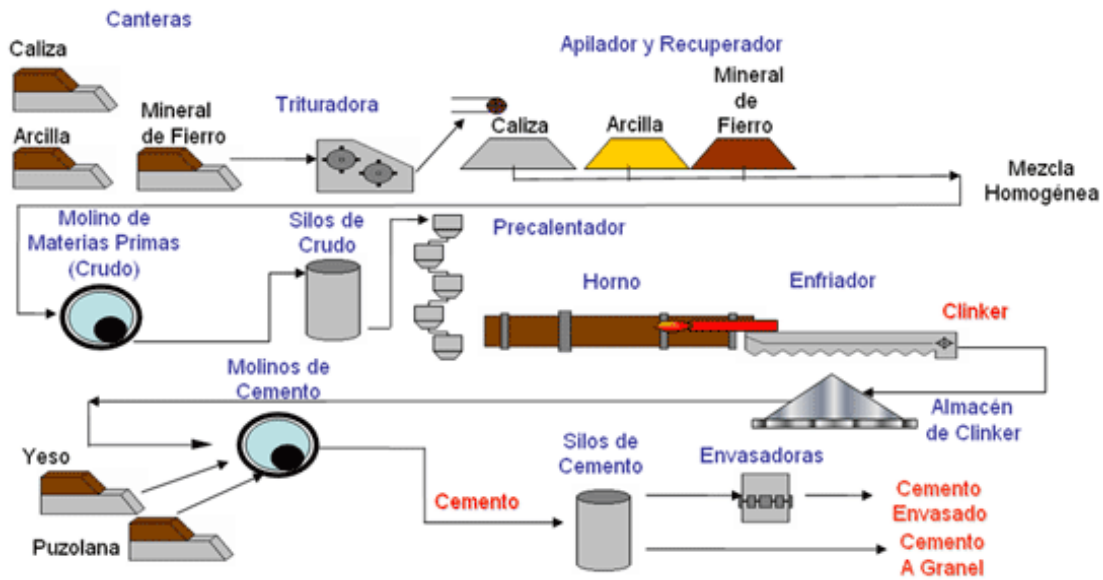


Ilustración 4 Esquema general del proceso de producción del cemento (Cámara Nacional del Cemento, 2014)

Todos estos compuestos reaccionan dando como resultado nuevas especies químicas que son los principales componentes del cemento, tabla 1 (Del Valle Moreno, Pérez López , & Martínez Madrid, 2001).

Tabla 1 Componentes de Cemento

Componente	Fórmula	Fórmula Abreviada
Silicato Dicálcico (belita)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Silicato Tricálcico (alita)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferrialuminato tetracálcico o Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Fe_2O_3	C_4AF

El silicato tricálcico (C_3S , alita) es la fase más abundante, y que le confiere las propiedades características al CP, con una hidratación rápida, resistencias iniciales altas y finales buenas, calor de hidratación moderadamente alto y responsable de las mayores resistencias mecánicas del cemento. El silicato dicálcico (C_2S , belita) es de hidratación lenta, resistencias iniciales bajas y finales



buenas, y calor de hidratación bajo. Aluminato tricálcico (C_3A), de hidratación muy rápida, calor de hidratación elevado que proporciona resistencias tempranas pero produce retracción en la hidratación. Además, es el componente que reacciona con los sulfatos produciendo fases expansivas como la etringita. EL ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), es de hidratación lenta y regular, apenas contribuye al desarrollo de resistencias, con calor de hidratación moderado, tiene un color pardo oscuro, que junto con la magnesia (MgO), da un color verde grisáceo oscuro, siendo por tanto responsable del color característico del CP. Es la fase que menos importancia tiene en las propiedades del cemento, variando según la proporción de aluminio o hierro disponible (Sepulcre Aguilar, 2005).

5.1.1.1.3 Clasificación del Cemento

Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, y por lo tanto por sus destinos y usos.

Se pueden establecer dos tipos básicos de cementos:

- De origen arcilloso: obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza en proporción 1 a 4 aproximadamente.
- De origen puzolánico: la puzolana del cemento puede ser de origen orgánico o volcánico.

Puesto que la composición química de los cementos es compleja, se utilizan terminologías específicas para definir las composiciones.

La norma mexicana clasifica a los cementos de acuerdo a tres aspectos (NMX-C414, 2010):

1. Tipo de Cemento
2. Clase Resistente
3. Características especiales

La clasificación se proporciona en las tablas se tabla 2, 3 y 4.



Tabla 2 Clasificación por el tipo de Cemento.

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
TPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de alto horno

La clasificación de acuerdo a sus características especiales se muestra en la tabla 3.

Tabla 3 Denominación del Cemento por sus características especiales (NMX-C414, 2010).

NOMENCLATURA	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LOS CEMENTOS
R	Alta resistencia Inicial
RS	Resistente a los sulfatos
BRA	Baja Reactividad Alcalina agregado
BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

Tabla 4 Clasificación por clase resistente (NMX-C414, 2010)

Clase Resistente	Resistencia a la compresión N/mm ²		
	3 días	28 días	
	Mínimo	Mínimo	Máximo
20	-	20	40
30	-	30	50
30R	20	30	50
40	-	40	-
40R	30	40	-

La ASTM clasifica a los cementos como se indica en la tabla 5 (ASTM-C150, 2005)



Tabla 5 Tipos de cemento Portland (ASTM-C150, 2005).

Cemento	Uso
Tipo I	Cemento de uso general
Tipo II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente al ataque por sulfatos. Se utiliza en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede provocar agrietamientos.
Tipo III	Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado. Es usado cuando se requiere alcanzar una elevada resistencia en pocos días.
Tipo IV	Presenta un calor de hidratación más bajo que el tipo III, se utiliza en construcciones de concreto masivo.
Tipo V	Cemento de alta resistencia a la acción de los sulfatos, se utiliza en estructuras que están en contacto con suelos de aguas freáticas de alto contenido de sulfatos y en concretos con aguas negras domésticas concentradas.

La resistencia normal de un cemento es la resistencia mínima mecánica a la compresión a los 28 días y se indica como 20, 30 ó 40 Mega Pascales (MPa).

El cemento utilizado en este trabajo fue un Cemento Tolteca gris CPC 30R-RS, ilustración 5.



Ilustración 5 Cemento gris CPC 30R RS Utilizado para la elaboración de los morteros.

5.1.1.1.4 El Cemento en los últimos años

El alto consumo de recursos naturales y energéticos y las emisiones de CO₂ y otros contaminantes comprometen las posibilidades futuras de utilización de cemento como material de construcción.

En la actualidad, la importancia del sector de la construcción en todos los países, desde el punto de vista económico y social, junto con la menor disponibilidad de los recursos naturales y artificiales necesarios, y su desarrollo sostenible, han provocado que, desde hace varias décadas a esta parte, se haya tenido que aumentar, en cantidad y tipos, la incorporación de adiciones minerales naturales y/o artificiales al cemento Portland. Las interacciones que se generan entre dichas adiciones minerales tan diversas y el cemento Portland, sumadas al resto de variables químico-físicas que intervienen en cada caso, tanto en el momento de su fabricación y primeras edades, como en sus prestaciones futuras sobre todo, es decir, su durabilidad, constituye una materia de investigación muy extensa (Sata, Jaturapitakkul, & Kiattikomol, 2007).

Todo ello, se ha visto además acelerado en la actualidad, al tratar de conseguir dos objetivos fundamentales: el primero, que queda circunscrito a la



industria del cemento, y que es el de reducir los costos de producción mediante la sustitución parcial del cemento Portland por dichas adiciones, obteniendo así un ahorro de energía, y el segundo, de carácter medioambiental, por el que se consiguen fabricar las cantidades de cemento necesarias disminuyendo la fabricación de Clinker. Este proceso lleva asociado, por tanto, la valorización material de diferentes residuos minerales de otros sectores industriales los cuales dejan de serlo para ganarse por este motivo el apelativo de subproductos. Por consiguiente, no es de extrañar que existan innumerables líneas de investigación encaminadas a la búsqueda, detección y consecución de nuevas adiciones minerales naturales y/o artificiales que puedan ser incorporadas al cemento Portland, si bien y en cualquier caso, las nuevas que se encuentren pertenecerán al grupo de las “activas” o al grupo de las “no activas” o mal llamadas “inertes”. Entre las “activas” se encuentran las adiciones puzolánicas y las adiciones siderúrgicas, y entre las no activas se encuentran los “fílleres”, los cuales a su vez pueden ser de naturaleza silíceo (menos abundantes) o caliza (más abundantes) (Talero, Pedrajas, Delgado, & Rahhal, 2009).

Para atenuar esta situación se trabaja en la disminución de su impacto ambiental, por dos vías; la de mejorar la eficiencia de los procesos de producción en planta, con el objeto de disminuir el consumo energético y la de disminuir el consumo de cemento en obra utilizando adiciones que sustituyan parcialmente este material por otros de menor impacto negativo al medio ambiente.

5.1.1.2 Material Inerte

La arena funciona como relleno inerte que favorece la economía de la producción, trabajabilidad y reduce la contracción, además que favorece el incremento de la resistencia a compresión. Un aumento en el contenido de arena aumenta el tiempo de fraguado de un mortero de albañilería, pero reduce el potencial de agrietamiento debido a la contracción de la articulación del mortero.

Agregado bien graduado reduce la separación de materiales en mortero plástico, que reduce el sangrado y mejora trabajabilidad. Arenas deficientes de



finos producen morteros ásperos, mientras que arenas con finos excesivos producen morteros débiles y aumentan la contracción (ASTM-C270, 2014).

Sin duda los agregados juegan un papel importante en el desempeño de las mezclas, no solo por el hecho de proporcionar resistencia mecánica, si no que una mala elección del árido puede representar problemas graves a la estructura. Estos problemas pueden ser derivados de las propiedades físicas del agregado, pero también pueden deberse a las reacciones químicas desarrolladas entre los álcalis del cemento y los componentes minerales del agregado. En la tabla 6 se observan algunos de los factores característicos de los agregados y la forma en que se manifiestan (NMX-C003, 2010).

Tabla 6 Factores de los agregados que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C003, 2010)

Componente	Factor	Se manifiesta en:
Agregados	Contaminación por materia orgánica o vegetal (troncos, hojas, raíces, etc.)	Inhibición de reacciones puzolánicas, falta de resistencia, agrietamientos, poca trabajabilidad y plasticidad.
	Alto índice de lascas	Problemas estructurales y de resistencia.
	Granulometría no adecuada	Falta de adhesión, problemas de resistencia, mayor requerimiento de aglomerante.
	Alto contenido de finos	Mayor requerimiento de aglomerantes, problemas de adhesión entre partículas.

5.1.1.3 Agua

El agua de las mezclas desarrolla tres funciones: dar trabajabilidad, hidratar al cemento y facilita la carbonatación de la cal. La cantidad de agua dependerá de los ingredientes del mortero, y usualmente el agua potable es aceptada para las mezclas (ASTM-C270, 2014).



Las aguas a las que se refiere la norma NMX-C-122-2004-ONNCCE, que se pretendan usar para la elaboración y curado del mortero y/o concreto hidráulico, excluyendo de ellas las aguas de mar, deben cumplir con los requisitos que aparecen en la tabla 7. El agua de mar cuando sea imprescindible su empleo, se debe usar únicamente para la elaboración y curado de concretos sin acero de refuerzo. El agua cuyo análisis muestre que excede alguno o algunos de los límites de la tabla 7, se puede utilizar si se demuestra que en concretos de características semejantes elaborados con esta agua han aportado un comportamiento satisfactorio a través del tiempo en condiciones similares de exposición.

Tabla 7 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas para el agua a utilizarse en la construcción (NMX-C-122-ONNCCE, 2004)

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en ppm.	Cementos sulforetistentes Límites en ppm.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
Cloruros como el CL (a)		
Para concreto con acero de pre esfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1000 (c)
Sulfato como $SO_4=$ (a)	3000	3500
Magnesio como Mg^{++} (a)	100	150
Carbonatos como CO_3	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO_2	5	3
Álcalis totales como Na^+	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del Ph	No menor de 6	No menor de 6.5
(a) Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden		



emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.

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

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

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencia, manchado, corrosión del esfuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por lo tanto, se pueden marcar límites para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla o se pueden realizar ensayos adecuados para la determinación del efecto de las impurezas, ya que algunas impurezas pueden tener efecto sobre la resistencia de fraguado y aún afectar la durabilidad y otras propiedades (NMX-C-122-ONNCCE, 2004). En la tabla 8 se da a conocer los efectos de las impurezas sobre las propiedades del concreto.

Tabla 8 Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias (Instituto del Concreto, 1997).

Impurezas	Fraguado	Endurecimiento	Eflorescencias	Corrosión	Adherencia	Expansión	Aire incluido	Hidratación
pH	X	x	---	---	---	---	---	---
Sustancias solubles	X	x	X	x	X	---	---	---
Sulfatos	X	x	X	x	X	x	---	---
Cloruros	X	x	X	x	---	---	---	---
Hidratos de carbono	X	x	---	---	---	---	---	---
Sustancias orgánicas	x	x	---	---	---	---	x	X



solubles en éter								
x Causa efecto negativo					---- No causa efecto negativo			

La norma mexicana NMX-C-003 describe efectos que causa el agua en las mezclas según su calidad, tabla 9.

Tabla 9 Factores del agua que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C003, 2010)

Componente	Factor	Se manifiesta en:
Agua de Mezcla	Contaminación con aceite	Inhibición de las reacciones de la cal con los componentes de la mezcla, falta de resistencia, agrietamientos y poca plasticidad.
	Alta acidez	Mayor requerimiento de aglomerante
	Alto contenido de sales	Inhibición de las reacciones de la cal con los componentes de la mezcla, falta de resistencia, agrietamientos y poca plasticidad.

5.1.1.4 Puzolanas

5.1.1.4.1 Definición y antecedentes

Una puzolana es un material silíceo o sílico-aluminoso que posee poco o nulo valor cementante, pero finamente divididos, y en presencia de humedad, reacciona químicamente con hidróxido de calcio (Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) a temperaturas ordinarias para formar compuestos con propiedades cementantes (NMX-C-199, 2010; ASTM-C618, 2003).

Malholtra y Mehta definen las adiciones puzolánicas como aquellos materiales inorgánicos naturales o artificiales que, pese a carecer de actividad



hidráulica y propiedades cementicias, contienen no obstante constituyentes químicos que a temperatura ambiente y en presencia de agua, se combinan con cal apagada, cal grasa, cal hidráulica, o la Portlandita procedente de la hidratación de los cementos Portland, para formar compuestos hidratados semejantes a los originados por el propio cemento Portland en su hidratación (C-S-H) (Malholtra & Mehta, 1996).

Las puzolanas están formadas por fases activas ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, (ASTM-C618, 2003)) capaces de reaccionar con la cal proveniente de la hidratación del cemento Portland. Esto lleva a que la puzolana se integre a dicho proceso de hidratación y dé como resultado más bajo contenido de Portlandita e incremento en los silicatos cálcicos hidratados. Todas estas fases activas son termodinámicamente inestables y, en general, están constituidas por materiales amorfos (MASSAZZA, 1993). La reacción puzolánica favorece los concretos adicionados, pues incrementa las resistencias mecánicas (compresión y flexión), reduce la permeabilidad y la porosidad capilar, aumenta resistencias frente al ataque químico y la posibilidad de prevenir la reacción árido-álcali (MEHTA, 1989).

Los objetivos de utilizar puzolanas en la elaboración de concretos es mejorar sus propiedades físico-mecánicas y utilizar los residuos que generan los procesos agroindustriales.

5.1.1.4.2 Clasificación

Todas las propiedades de las puzolanas naturales y en particular aquellas que las hacen especialmente aptas para su aprovechamiento en la industria del cemento, dependen fundamentalmente de su composición y de su textura, las cuales a su vez están íntimamente relacionadas con su origen y formación.

Los materiales puzolánicos naturales están constituidos principalmente por rocas eruptivas y en particular efusivas y volcánicas (aquellas consolidadas a poca profundidad de la corteza terrestre), y dentro de éstas, por extrusivas, salvo las de naturaleza orgánica que son de origen y formación sedimentaria (Salazar, 1968).



Como se muestra en la tabla 3-1, las puzolanas se clasifican, según la norma ASTM C-618:

Puzolanas naturales (N), crudas o calcinadas que cumplen con los requisitos aplicables para la clase como lo indica la norma ASTM C-618, indicados en la tabla 12, tales como algunas diatomeas; sílex opalinos y lutitas; tobas y cenizas volcánicas o pumicitas, calcinado o sin calcinar; y diversos materiales que requieran calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y pizarras.

Puzolanas Clase F, Dentro de esta clase se encuentran las cenizas volantes, por ejemplo las cenizas volantes de centrales eléctricas; normalmente se producen de la quema de antracita o carbón bituminoso que cumple con los requisitos aplicables para esta clase como se indica en la norma ASTM C-618, indicados en la tabla 10.

Puzolanas Clase C, Cenizas volantes normalmente producidas a partir de lignito o carbón sub-bituminoso que cumple con los requisitos aplicables para esta clase como se indica en la norma ASTM C-618, indicados en la tabla 10. Esta clase de ceniza, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes.

Dentro de la clase (F) se encuentra el Metacaolín (MK), el humo de sílice (HS) y las cenizas de cascara de elementos orgánicos (como la del bagazo de caña). En la clase C se encuentra la escoria granulada de alto horno.

En los residuos agrícolas combustionados, con propiedades puzolánicas reconocidas, la actividad puzolánica depende principalmente de la temperatura de combustión, que debe oscilar entre 400°C a 800°C para evitar la formación de fases cristalinas de sílice producto de las altas temperaturas en la combustión (Martirena Hernández & Betancourt Rodríguez, 2000).



Tabla 10 Clasificación de los aditivos minerales que pueden adicionarse a una mezcla, según el contenido de compuesto (Norma ASTM C618).

CLASE DE ADITIVO MINERAL	NORMA ASTM C618			NORMA ASTM C1240
	N	F	C	Humo de Sílice
Especificaciones Químicas y Físicas				
SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ , mín. %	70.0	70.0	50.0	85+
SO ₃ , % máx.	4.0	5.0	5.0	-
Humedad, % máx.				
Pérdidas por ignición, % máx.	10.0	6-12	6.0	6.0
Alcalis, N ₂ O, % máx. opcional	1.5	1.5	1.5	1.5
Retenido Tamiz N°325, % máx.	34	34	34	10
Índice de Act. Puz. Con cemento Pórtland 28 días, % mín. respecto al de control	75	75	75	85 7d.
Requerimiento de agua, % máx. vs. Control + referido a SiO ₂	115	105	105	-

Actualmente se elaboran cementos puzolánicos, de los llamados eco materiales por el hecho de contener puzolanas¹. En México, las empresas como CEMEX, CRUZ AZUL, HOLCIM Y MOCTEZUMA con cobertura en todo el territorio nacional, producen los cementos puzolánicos, cuya clasificación se basa en la normativa mexicana (NMX-C414, 2010) y la norteamericana (ASTM-C150, 2005) según las fichas técnicas de los productos.

Las ventajas que ofrece el cemento puzolánico sobre el resto se describen a continuación (CEMEX, 2011; CruzAzul, 2008; CMOCTEZ, 2010; HOLCIM, 2004; Valdez Tamez, Das Roy, & Rivera Villareal, 2004; Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013; Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010)

- Fraguado rápido
- Mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros.
- Resistencia a la reacción álcali agregado
- Mayor resistencia frente al agua de mar.
- Aumento de la impermeabilidad ante la reducción de grietas en el fraguado.
- Reducción del calor de Hidratación.

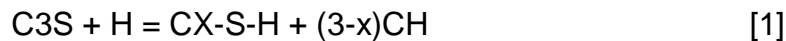
¹ De acuerdo a la normativa vigente actualmente en España (RC-03), el cemento Portland puede contener hasta un 35% de Puzolana, y hasta un 55% si es cemento Puzolánico.



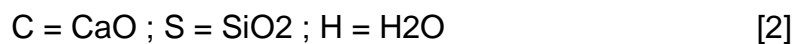
- Incremento en la resistencia a la compresión.
- Incrementa la resistencia del acero a la corrosión.
- Aumenta la resistencia a la Abrasión.
- Aumento en la durabilidad del concreto
- Disminuye la necesidad de agua.
- Menor tiempo para el descimbrado

La reacción química de la puzolana consume la cal sobrante del proceso de hidratación. Esta cal es vulnerable a disolverse y reaccionar en presencia de agua y ácidos, de tal forma que reduciendo este residuo de cal se obtiene un efecto positivo en la resistencia y durabilidad del concreto. Los silicatos de calcio resultantes de la reacción puzolánica actúan como relleno de los poros capilares, generando concretos poco permeables, lo que acentúa su durabilidad y resistencia ante el ataque de sustancias nocivas para el concreto (HOLCIM, 2004).

La reacción química del fraguado del cemento es como sigue [1] y [2]:



Dónde:



Siendo el Gel C-S-H el responsable de las propiedades mecánicas del cemento. Podemos observar que se produce un tercer producto, portlandita, abreviado CH en la fórmula, que no es sino el $Ca(OH)_2$, con poco valor cementante, y responsable de la reacción con los sulfatos que degradan la calidad del mismo. La CH se estima entre un 20 y 30% en masa de los productos de la reacción y mantiene un ambiente alcalino necesario para evitar la corrosión del acero embebido (Valdez Tamez, Das Roy, & Rivera Villareal, 2004; IMT-PT-327, 2010). En la tabla 11 se muestran las reacciones de hidratación del cemento, que sirven de apoyo para el entendimiento de los resultados electroquímicos (Pérez, 2002).



Tabla 11 Reacciones de hidratación del cemento

Componente		Productos de hidratación
$2(3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)+6\text{H}_2\text{O}$ Silicato tricálcico + agua	\rightarrow \leftarrow	$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}+3\text{Ca}(\text{OH})_2$ Gel de tobermorita+ portlandita
$2(2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)+4\text{H}_2\text{O}$ Silicato dicálcico + agua	\rightarrow \leftarrow	$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}+\text{Ca}(\text{OH})_2$ Gel de tobermorita+ portlandita
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3+10\text{H}_2\text{O}$ $+2\text{Ca}(\text{OH})_2$ Ferrialuminato tetracálcico +agua +hidróxido de calcio	\rightarrow \leftarrow	$6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Ferrialuminato hexacálcico hidratado
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3+12\text{H}_2\text{O}+\text{Ca}(\text{OH})_2$ Aluminato tricálcico + agua + portlandita	\rightarrow \leftarrow	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Ca}(\text{OH})_2\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Aluminato tricálcico hidratado
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3+10\text{H}_2\text{O}+\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Aluminato tricálcico+agua+yeso	\rightarrow \leftarrow	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Monosulfoaluminato tricálcico

Dentro de una fábrica de siderurgia integral, el alto horno es la instalación base para la obtención del arrabio, el cual, a su vez, constituye la materia prima para la fabricación de acero. El alto horno es un horno de cuba en el que se introduce un gas reductor a presión (generalmente CO_2) por la parte inferior, y una carga de materia constituida por minerales de hierro, coque y fundentes por la parte superior, separándose dos productos: el hierro y las impurezas con los fundentes (escoria primaria), que van evolucionando en su composición hasta llegar a la parte baja del horno (crisol), formándose los dos materiales finales arrabio y escoria. Estos productos fluyen juntos en estado líquido, a través de un orificio situado en la parte baja del crisol denominado piquera, a una especie de balsa, produciéndose la separación definitiva del arrabio y la escoria por diferencia de densidad (UNESID & IECA, 2011).



La composición química de la escoria depende de los minerales de hierro, de las cenizas de coque utilizado como combustible y de los óxidos de los fundentes empleados. Los principales componentes de la EAH son: CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃, S, FeO, MnO, K₂O, siendo los límites más utilizados el índice de basicidad ($I_b = \text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) y el índice de basicidad simple ($I_{bs} = \text{CaO} / \text{SiO}_2$).

La escoria que sale por la piquera a una temperatura aproximada de 1500°C, se puede enfriar siguiendo diferentes técnicas, obteniéndose materiales con características de utilización claramente diferenciadas:

- Escoria cristalizada
- Escoria vitrificada (granulada o peletizada)
- Escoria expandida

La escoria cristalizada se obtiene por enfriamiento lento; la escoria granulada se obtiene por enfriamiento brusco, dejándola caer sobre un chorro de agua fría. La granulación vitrifica la escoria, convirtiéndola en un sólido cuyos átomos no han tenido tiempo de orientarse al estado cristalino por la rapidez del enfriamiento. Para su utilización, la escoria granulada debe molerse en molinos de bolas, que consiste en un tambor de acero, horizontal y giratorio que contiene una carga considerable de bolas de acero con un tamaño entre 25 y 50mm.

La escoria peletizada se obtiene dejando caer la escoria fundida sobre un tambor giratorio, regando con agua. Los ajustes en la velocidad del tambor, relación agua/escoria, etc., hacen posible controlar las proporciones de los tamaños de partículas, así como su grado de vitrificación. La escoria expandida se obtiene añadiendo a la escoria fundida una pequeña cantidad de agua (UNESID & IECA, 2011).

La escoria granulada puede ser utilizada en diferentes aplicaciones, entre las que destacan:

- Cemento con adiciones
- Suelo-cemento



- Concreto compactado con rodillo
- Capa base de carreteras
- Agricultura/Mejora del suelo

En trabajos previos (Menéndez, Bonavetti, & Irassar, 2007; Carrasco, Menéndez, Bonavetti, & Irassar, 2005) se ha determinado que el empleo de escoria granulada de alto horno en la formulación de cementos compuestos conduce a una menor velocidad de hidratación del sistema y a una disminución de las propiedades resistentes a temprana edad, a medida que aumenta el nivel medio de adición en el cemento.

Un estudio realizado por Claudia Castellano et al. en 2013, en pastas de cemento con relación a/c de 0.40 y diferentes contenidos de escoria (20%-80%), concluye que cuando se reemplaza cemento por escoria y la finura del clinker se mantiene constante, el desarrollo de la resistencia a diferentes edades otorgada por esta adición dependerá de la distribución de tamaño de sus partículas. Las partículas de tamaño menor a 10 μm cumplen un rol fundamental en la contribución de la resistencia mecánica a las primeras edades, mientras que partículas cuyos tamaños se encuentran comprendidos entre los 10 a 45 μm contribuyen a edades más avanzadas (Castellano, Bonavetti, & Irassar, 2013).

Considerando que la hidratación inicial comienza sobre la superficie de las partículas de la escoria, el material de la superficie de partícula será quien reaccionará. De este modo la velocidad y el grado de hidratación que se podrá alcanzar dependerán, entre otras razones, de la superficie específica y la distribución de tamaño de partículas de escoria granulada de alto horno. Es decir, que si se controlan estos parámetros, pueden producirse especialmente a primeras edades, cementos mezclas con alto contenido de adición con propiedades similares o superiores a las obtenidas por el cemento Portland (Malhotra & Hemmings, 1995).



El aumento de la finura de la adición permite la obtención de concretos de alta resistencia con elevado contenido de la adición (Bonavetti, 2004).

Niu et al., al analizar el efecto del empaquetamiento de cementos con contenidos de 20 a 70 % de escoria y finuras Blaine de 300-800 m²/kg, concluyeron que a 3 días el grado de hidratación alcanzado por los morteros con escoria finura Blaine 800 m²/kg es el doble que el obtenido por los morteros con menor finura y estos resultados se correlacionan linealmente con las resistencias a compresión obtenidas (Niu, Feng, Yang, & Xheng, 2002).

La EAH utilizada en las experimentaciones hechas por otros autores, es activada con álcalis que pueden ser Na₂SiO₃, NaOH, Ca (OH)₂, Na₂SO₄. (Tórres Gómez, Aperador, Vera , Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010; Espinoza & Escalante, 2008)



6 DESARROLLO EXPERIMENTAL

La necesidad de realizar el presente proyecto condujo a aplicar una metodología que se basa en el método científico, con elementos propios del estudio y etapas necesarias para su conclusión. A continuación, se presenta un diagrama de secuencias de trabajos realizados, Ilustración 6.

6.1 Organigrama de Actividades

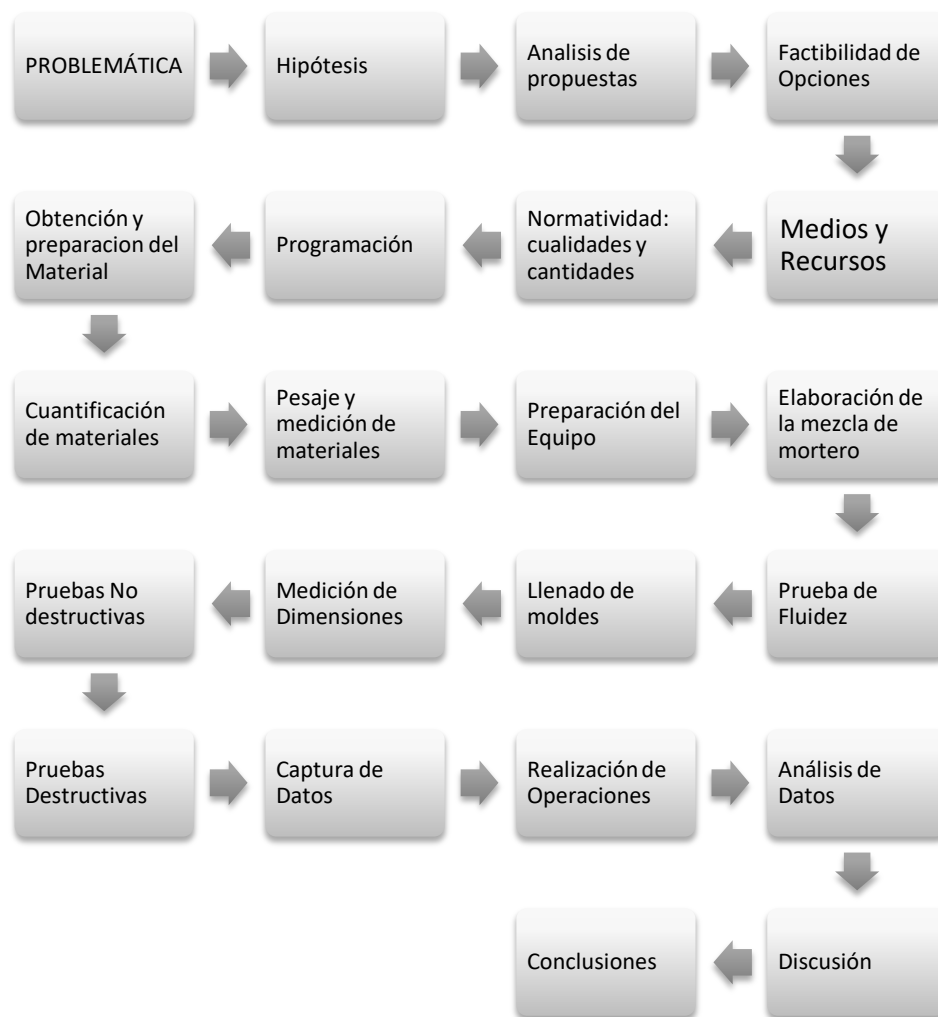


Ilustración 6 Organigrama de actividades durante el procedimiento de experimentación.



6.2 Caracterización del Material Inerte

6.2.1 Cuarteo

El objetivo de realizar el cuarteo es obtener una muestra representativa del agregado para poder realizar las pruebas descritas posteriormente.

El equipo necesario para realizar la prueba:

- Palas.
- Divisor de mecánico.
- Recipientes para el divisor.
- Charolas.
- Cucharón.

Procedimiento para efectuar la prueba:

1. Del material obtenido del muestreo se toma una parte de aproximadamente 100 kg si es arena, y 150 kg si es grava, este material nos servirá para realizar la caracterización de los agregados.
2. Con ayuda de la pala se forma un cono del agregado que se desee cuartear y se homogeniza moviendo el material del cono tres veces de un lugar a otro.
3. Se desvanece la punta del cono y se procede a dividir, posteriormente se separa en cuatro partes.
4. Se seleccionan dos frentes opuestos, y con ellos se llena un recipiente para posteriormente pasarlo por el cuarteador mecánico.

El cuarteo por divisor de muestras consiste en dejar caer la muestra de arena o grava en los divisores y este lo dividirá en dos partes, una se desecha y la otra se vuelve a pasar por el cuarteador, se repite el procedimiento hasta obtener la muestra requerida, ilustraciones 7 y 8.



Ilustración 7 División de la muestra de grava en cuatro partes.



Ilustración 8 Reducción de la muestra de arena por medio de cuarteador mecánico.

Este ensaye se realizó de acuerdo a la norma (NMX-C-030-ONNCCE, 2004)

Humedad actual.

La humedad actual se determinó según la norma NMX – C – 166 (NMX-C-166-ONNCCE, INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS-CONTENIDO DE AGUA POR SECADO-METODO DE PRUEBA, 2006). Se realizaron 3 ensayos de los cuales se obtuvo un promedio.

Se utilizó la fórmula [24]:

$$\% \text{ de Humedad actual} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad [24]$$

Dónde:

Mh= masa saturada y superficialmente seca en gramos.

Ms = masa seca del material en gramos, secada en charola sobre parrilla.

6.2.2 Determinación de la densidad en arenas y gravas



La densidad es una propiedad física de la materia que nos permite conocer la ligereza de los materiales, además de su flotabilidad, parámetro importante ya que si la densidad de los agregados que utilizaremos es menor a la densidad del agua los agregados flotarían y por lo tanto no se podrá realizar una mezcla homogénea.

6.2.2.1 Densidad en arenas

Equipo necesario para efectuar la prueba:

- Muestra representativa de arena
- Una balanza
- Frasco
- Parrilla
- Charolas metálicas
- Cono metálico (truncocónico)
- Un pisón
- Una espátula

Procedimiento para efectuar la prueba:

Esta prueba se realizó simultáneamente con la prueba de absorción ya que para ambas es necesario que la arena se encuentre superficialmente seca.

1. Del procedimiento de cuarteo se obtiene una muestra representativa de los agregados pétreos de aproximadamente 1 kg



2. Se seca superficialmente la arena por medio del método del molde troncocónico, se toma una muestra de aproximadamente 300 g y se registra como masa de la arena (M_a).
3. Se llena el frasco de agua hasta un nivel conocido, registrándolo como M_{fa} .
4. Se vacía agua del frasco procurando dejar lo suficiente, con la finalidad de que la arena al caer tenga una absorción rápida.
5. Se vacía la muestra de arena (M_a), de manera que toda la muestra entre al frasco utilizando una hoja de papel como embudo.
6. Se agita el frasco para liberar las burbujas atrapadas, se llena el frasco hasta el nivel de aforo y se pesa registrándolo como (M_t).

$$Densidad = \frac{M_a}{M_{fa} + M_a - M_t}$$

Donde:

M_a = Masa superficialmente seca (g).

M_{fa} = Masa del frasco lleno de agua hasta la marca de 450 ml (g).

M_t = Masa del frasco con agua y material (g)

Este ensaye se realizó de acuerdo a la norma (NMX-C-165-ONNCCE, 2014)

6.2.2.2 Densidad en gravas

Equipo necesario para efectuar la prueba:

- Muestra representativa de grava
- Picnómetro



- Franela
- Probeta graduada
- Báscula

Procedimiento para efectuar la prueba:

1. De la muestra obtenida en el procedimiento de cuarteo se toma aproximadamente 1 kg.
2. Se criba el material por las mallas $\frac{3}{4}$ " y $\frac{3}{8}$ " y se toma el agregado de la malla que retiene la $\frac{3}{8}$ para saturar en una charola con agua durante 24 horas.
3. Por medio de una franela se seca superficialmente el exceso del agua presente en el agregado con cuidado de no ejercer demasiada presión sobre el mismo y se toma una muestra de aproximadamente 300 gr registrándolo como (m).
4. Se coloca el picnómetro en una superficie lisa y horizontal, se coloca una probeta graduada vacía para contener el agua desalojada.
Se llena el picnómetro de agua hasta que comience a gotear, esperamos a que se estabilice y colocamos la muestra de grava dentro del picnómetro.
5. Se registra el volumen desalojado por el material como (v).



Ilustración 9 Determinación de la densidad de la grava por medio del volumen desplazado en el picnómetro

$$Densidad = \frac{m}{v}$$

Donde:

m= masa superficialmente seca en g.

v= volumen desalojado en cm³.

Este ensaye se realizó de acuerdo a la norma (NMX-C-164-ONNCCE, 2014)



6.2.3 Método de prueba para determinar la masa volumétrica seca suelta en arenas y gravas

Determinar la masa volumétrica seca suelta en arenas y gravas nos permite conocer la masa por unidad de volumen del agregado. El procedimiento es aplicable para ambos agregados la diferencia radica en tamaño del recipiente.

Equipo necesario para efectuar la prueba:

- Recipiente
- Varilla redondeada
- Báscula con aproximación al décimo de gramo

Procedimiento para efectuar la prueba:

1. Del procedimiento de cuarteo se obtiene una muestra representativa de los agregados pétreos.
2. Se vacía el agregado dentro del recipiente a una altura aproximada de 5 cm desde el borde del mismo.
3. Se llena el recipiente hasta formar un cono.
4. Se enrasa con una varilla lisa redonda con el objeto de que no queden partículas sobresaliendo.
5. Se determina la masa del recipiente.
6. Se repite los pasos anteriores, tres veces para obtener un promedio de los valores.



7. La masa volumétrica suelta se determina, dividiendo la masa neta del material, entre el volumen del recipiente.

6.2.4 Humedad actual en arenas y gravas

Para realizar un concreto es de vital importancia controlar la cantidad de agua que vamos a requerir para la producción de nuestro concreto, es por ello que se realiza un ajuste en la cantidad de agua del proporcionamiento dependiendo de la humedad presente en los agregados justo antes de colar.

Equipo necesario para realizar la prueba:

- Una muestra representativa del agregado (Aproximadamente 1 kg).
- Una parrilla.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Charolas metálicas
- Espátula.
- Vidrio

Procedimiento para efectuar la prueba:

1. Del procedimiento de cuarteo se obtiene una muestra representativa de los agregados pétreos de aproximadamente 1 kg.
2. Se determina una masa de 300 g registrándolos como masa húmeda (Mh).
3. Se coloca la muestra en una charola metálica y se seca en la parrilla. Para determinar que el material este completamente seco, se forma un cono de



material y se coloca el vidrio encima, cuando no se forme vapor en el vidrio se deja enfriar para pesar.

4. Se determina la masa de la muestra representativa y se registra el valor como (M_s).
5. Se repite los pasos anteriores, tres veces para obtener un promedio de los valores.
6. La humedad actual se calcula como el porcentaje de agua que pueden tener los agregados en las condiciones atmosféricas respecto a su masa seca.

Fórmula:

$$\% \text{ Hum. act} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

Donde:

M_h = masa del material en condiciones atmosféricas en g.

M_s = masa del material seco, en g.

Este ensaye se realizó de acuerdo a la norma (MarcadorDePosición2)

6.2.5 Humedad de absorción en arenas y gravas

La absorción en los agregados es un parámetro que indirectamente nos indica la calidad de los mismos ya que entre más capacidad de retener agua posea un material tendrá más porosidad y por lo tanto su resistencia mecánica disminuirá.



6.2.5.1 Humedad de absorción en arenas.

Equipo necesario para efectuar la prueba:

- Una muestra representativa de arena (Aproximadamente 1 kg)
- Una Parrilla.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Charolas metálicas
- Espátula.
- Molde troncocónico
- Pisón

Procedimiento para efectuar la prueba:

1. Del procedimiento de cuarteo se obtiene una muestra representativa de los agregados pétreos de aproximadamente 1 kg.
2. Se coloca el material en una charola con agua y se deja saturando durante 24 horas.
3. Se seca el material superficialmente, como se establece a continuación:
 - Se retira el exceso del agua de la muestra saturada y se coloca en la parrilla a temperatura constante.
 - Para determinar si la arena esta superficialmente seca, se coloca el molde troncocónico con la abertura de mayor diámetro hacia abajo, y se procede a llenar cuatro capas, distribuyendo 25 golpes con el

pisón, dando 10 a la primer capa, 10 a la segunda, 3 a la tercera y 2 a la cuarta.

- Se retira el cono de manera vertical y si el material comienza a disgregarse quiere decir que el material está superficialmente seco.

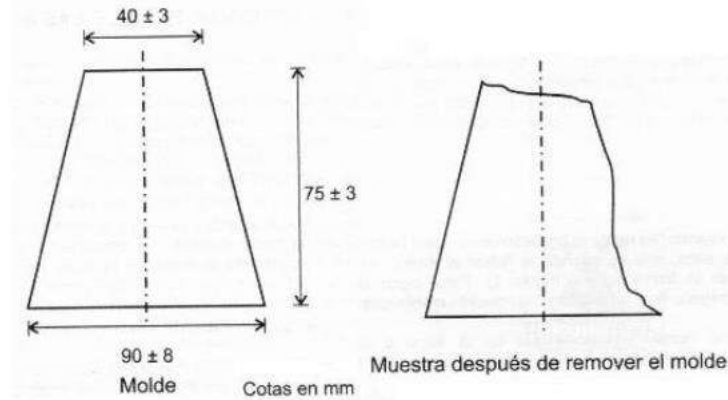


Ilustración 10 Medidas de cono troncocónico y muestra seca superficialmente
Fotografía:(NMX-C-165-ONNCCE-2014)

4. Cuando el material está superficialmente seco se toma una muestra aproximada de 200 gr y se registra como (Mh)
5. Se coloca en una charola y se procede a secar en la parrilla completamente.
6. Se deja enfriar y se registra como (Ms).
7. La humedad de absorción se calcula como el porcentaje de agua que puede tener una arena superficialmente seca, respecto a su masa seca.



Ilustración 11 Secado superficial de la arena por medio del molde troncocónico.



Ilustración 12 Pesaje de la muestra de arena.

Fórmula:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Donde:

Mh= masa del material superficialmente seco, en g.

Ms= masa del material seco, en g.

Este ensaye se realizó de acuerdo a la norma (NMX-C-165-ONNCCE, 2014)

6.2.5.2 Humedad de absorción en gravas.

Equipo necesario para efectuar la prueba:

- Una muestra representativa de grava (aproximadamente 1 kg).
- Franela
- Parrilla
- Espátulas
- Vidrio



Procedimiento para efectuar la prueba:

1. Del procedimiento de cuarteo se obtiene una muestra representativa de los agregados pétreos de aproximadamente 1 kg.
2. Se criba el material en las mallas de $\frac{3}{4}$ " y $\frac{3}{8}$ ", se toma el material que se retiene en la malla $\frac{3}{8}$ ".
3. Se coloca el material en una charola con agua y se deja saturando durante 24 horas.
4. Se seca el material superficialmente por medio de una franela quitando el excedente de agua del agregado.
5. Se pesan 300 g de la muestra y se registra este valor como (Mh).
6. Se coloca la muestra en una charola metálica en la parrilla y se seca hasta que no se forme vapor en el vidrio.
7. Se deja enfriar y se determina la masa registrándola como (Ms).
8. Se repiten los pasos anteriores, tres veces para obtener un promedio de los valores.
9. La humedad de absorción se calcula como el porcentaje de agua que puede tener una arena superficialmente seca, respecto a su masa seca.



Ilustración 13 En la imagen de la izquierda se observa la grava saturada durante 24 horas, en la imagen de la derecha se observa el material secado en la parrilla.

Fórmula:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Donde:

Mh= masa del material superficialmente seco, en g.

Ms= masa del material seco, en g.

Este ensaye se realizó de acuerdo a la norma (NMX-C-164-ONNCCE, 2014).

Fórmulas:

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

MV = masa volumétrica de los agregados, en Kg/m³.



G = masa de los agregados más el recipiente, en Kg.

T = masa del recipiente, en Kg.

V = volumen del recipiente, en m^3 .

Este ensaye se realizó de acuerdo a la norma (NMX-C-073-ONNCCE, Industria de la construcción-Agregados-Masa volumétrica-Método de prueba, 2004)

6.2.6 Método de prueba para determinar la masa volumétrica seca varillada en arenas y gravas

Determinar la masa volumétrica seca varillada en arenas y gravas nos permite conocer la masa por unidad de volumen del agregado cuando tiene cierta compactación. El procedimiento es aplicable para ambos agregados la diferencia radica en tamaño del recipiente.

Equipo necesario para efectuar la prueba:

- Recipiente
- Báscula con aproximación al décimo de gramo
- Varilla redonda de 5/8" con punta de bala.

Procedimiento para efectuar la prueba:



1. Del procedimiento de cuarteo se obtiene una muestra representativa de los agregados pétreos.
2. Se vacía el agregado dentro del recipiente a una altura aproximada de 5 cm desde el borde del mismo.
3. Se llena el recipiente en tres capas, dando 25 golpes por capa.
4. Se enrasa con una varilla lisa redonda con el objeto de que no queden partículas sobresaliendo
5. Se determina la masa del recipiente.
6. Se repite los pasos anteriores, tres veces para obtener un promedio de los valores.
7. La masa volumétrica seca varillada se determina, dividiendo la masa neta del material, entre el volumen del recipiente.

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

Se realizó en base a la norma NMX – C – 073 (NMX-C-191-ONNCCE, 2004).

Se utilizó un recipiente metálico y una barra de $\frac{3}{4}$ de pulgada con “punta de bala” para varillar el material, ilustración 7.



Ilustración 14 Varillado de la arena en la prueba de MVSV

Colorimetría.

Esta prueba permitió determinar el contenido de materia orgánica en el agregado conforme lineamientos de la norma mexicana, ilustración 8 (NMX-C-088-ONNCCE, 1997).



Ilustración 15 Análisis colorimétrico.

Sedimentación.

Se realizaron 3 pruebas:

En las 3 pruebas el resultado fue "Contenido de finos aceptable", ilustración 16.



Ilustración 16 Análisis de contenido de finos.

Determinación del material fino



Determina la cantidad de materia fina que contiene una arena, cribándola por la malla n° 200 (NMX-C-084-ONNCCE, 2006).

Prueba de terrones de arcilla.

Es útil para conocer la cantidad de terrones de arcilla que contiene una arena, ya que son partículas de baja resistencia estructural, que además en contacto con el agua forman lodos que contaminan el concreto, cuando se encuentran en abundancia formando parte de la arena (NMX-C-071-ONNCCE, 2004).

Gravedad Específica

Se realizó siguiendo los procedimientos del manual de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil. Se evaluaron dos procedimientos, mediante inmersión del material, ilustración 10, y por diferencias gravimétricas, ilustración 17, empleando un frasco de vidrio.



Ilustración 17 Cálculo de la gravedad específica. Método de inmersión. Por el autor.



Ilustración 18 Cálculo de la gravedad específica. Método de inmersión. Por el autor.



6.3 Análisis del agua

El agua utilizada en la elaboración de concretos y morteros debe cumplir con parámetros indicadores de calidad, que se tomarán en cuenta para aceptar su uso. El análisis del agua empleada en el presente trabajo fue realizado por el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, quienes expidieron los resultados con referente bajo normativa mexicana (NMX-C-122-ONNCCE, 2004). Los datos del reporte se presentan en la tabla 13 de la sección de resultados.

6.4 Materiales de estudio

Los materiales de sustitución CBC y CH fueron caracterizados mediante pruebas de tamaño de partícula, análisis en el MEB para determinar morfología de partícula y por fluorescencia de rayos X (FRX) en que se determinó la composición química.

La ceniza de bagazo de caña (CBC) se obtuvo del ingenio azucarero localizado en el municipio de Taretan, en el estado de Michoacán, ilustración 27. El tratamiento al que se sometió fue de secado y cribado, utilizando las partículas que pasan la malla ASTM No. 200 (0.074 mm) para la elaboración del mortero.



Ilustración 19 Proceso de transporte de residuos de molienda de caña.

6.5 Proporcionamiento de material para un metro cúbico de concreto

6.5.1 Procedimiento de cálculo ACI

1. Elección del revenimiento:

El método del ACI sugiere distintos tipos de revenimiento cuando no se especifica en la obra. El revenimiento con el que se hicieron los diseños de las mezclas fue de 15 centímetros ya que una de las características principales del concreto es la facilidad de bombeo.

Tabla 12 Revenimiento recomendado para diversos tipos de construcción

Revenimiento recomendado para diversos tipos de construcción			
Tipos de construcción	Revenimiento en centímetros		Tolerancias
	Máximo	Mínimo	
Vigas y muros reforzados	10	-	3.5
Columnas para edificios	10	2.5	3.5
Pavimentos y Losas	8	2.5	2.5
Concreto Masivo	5	2.5	2.5

2. Elección del tamaño máximo del agregado:



La elección del tamaño máximo del agregado, segundo paso del método, debe considerar la separación de los costados de la cimbra, el espesor de la losa y el espacio libre entre varillas individuales o paquetes de ellas. Por consideraciones económicas es preferible el mayor tamaño disponible, siempre y cuando se utilice una trabajabilidad adecuada y el procedimiento de compactación permite que el concreto sea colado sin cavidades o huecos. La cantidad de agua que se requiere para producir un determinado revenimiento depende del tamaño máximo, de la forma y granulometría de los agregados, la temperatura del concreto, la cantidad de aire incluido y el uso de aditivos químicos.

3. Determinación del agua de mezclado y contenido de aire

El método presenta una tabla con los contenidos de agua recomendables en función del revenimiento requerido y el tamaño máximo del agregado, considerando concreto sin aire incluido y con aire incluido.



Tabla 13 Requisitos de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.

Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado									
Agua Kg/m ³ de concreto									
Tamaños máximos nominales de agregado	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"	in
	10	12.5	20	25	40	50	70	150	cm
Revenimiento en cm	Concreto sin aire incluido								
2.5 a 5	207	199	190	179	166	154	130	113	Kg/m ³
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124	Kg/m ³
15 a 18	243	228	216	202	190	178	160	---	Kg/m ³
% de aire incluido	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2	
Concreto con aire incluido									
2.5 a 5	181	175	168	160	150	142	122	107	Kg/m ³
7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119	Kg/m ³
15 a 18	216	205	197	184	174	166	154	---	Kg/m ³
Promedio recomendado del contenido total del aire, porcentaje de acuerdo con el 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	5.5	5	4.5	4	

4. Selección de la relación agua/cemento

El método del ACI proporciona una tabla con los valores de la relación agua/cemento de acuerdo con la resistencia a la compresión a los 28 días que se requiera, por supuesto la resistencia promedio seleccionada debe exceder la resistencia especificada con un margen suficiente para mantener dentro de los límites especificados las pruebas con valores bajos. En una segunda tabla aparecen los valores de la relación agua/cemento para casos de exposición severa.

Tabla 14 Elección de la relación agua-cemento, dependiendo del f'c de diseño



Resistencia a la compresión a los 28 días (Kgf/cm ²)	Relación agua/cemento por masa	
	Sin aire incluido	Con aire incluido
420	0.41	-
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

5. Cálculo de la cantidad de cemento

La cantidad de cemento por volumen unitario de concreto se rige por las determinaciones expuestas en el paso 3 y 4. El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado, dividido entre la relación a/c.

6. Estimación de contenido de agregado grueso

Se puede ver que para una trabajabilidad igual, el volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto depende sólo de su tamaño máximo nominal y del módulo de finura del agregado fino. Este volumen se convierte a masa seca del agregado grueso requerido en un metro cúbico de concreto, multiplicándolo por la masa unitaria de varillado en seco por metro cúbico de agregado grueso [ACI 211].



Tabla 15 Estimación del agregado grueso

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

7. Estimación del contenido del agregado fino

Para la estimación del contenido del agregado fino se lleva a cabo por medio del método del volumen absoluto, el cual inicia con el cálculo de la masa de la grava y el volumen de la grava, haciendo uso de la densidad de la misma. El método del volumen absoluto implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes. En este caso, el volumen total desplazado por los componentes conocidos (agua, aire, cemento y agregado grueso) se restan del volumen unitario de concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen ocupado por cualquier componente en el concreto es igual a su masa dividida entre la densidad de ese material (siendo esta el producto del masa unitario del agua y de la gravedad específica del material).

8. Correcciones por humedad del agregado

Una vez que ya se tiene calculada la cantidad de material necesario para 1 m³ de mezcla se realizan las correcciones por humedad del agregado, estas correcciones consisten en restar al porcentaje de la humedad actual el porcentaje de la humedad de absorción del material (porcentaje de humedad actual - porcentaje de absorción). Por lo tanto a los materiales pétreos, al considerarse superficialmente secos y saturados se les debe restar el porcentaje de absorción correspondiente.



El método de ACI establece las proporciones o dosificación de los materiales pétreos, agua y aglutinante para diferentes resistencias mecánicas en la prueba de compresión.

Los datos que incluyen las tablas son obtenidos de pruebas de laboratorio.

Tabla 16 Propiedades físicas de la grava natural triturada y del material reciclado.

Propiedades Físicas	Grava Natural Triturada (GNT)	Concreto reciclado (GCR)
M.V.S.S (kg/m ³)	1396	1148
M.V.S.V (kg/m ³)	1549	1280
Densidad (g/cm ³)	2.64	2.16
Absorción (%)	1.6	6

Tabla 17 Composición química en porcentaje, en masa, de los materiales utilizados en las sustituciones, obtenidas por Fluorescencia de rayos X.

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PXC/PPI
CBC	56.62	4.293	0.422	5.488	1.573	0.227	2.013	0.24	2.178	0.244	26.65
CPC 30R RS	23.88	4.997	0.217	2.972	0.88	0.096	54.6	1.23	1.666	3.791	5.54

La CBC se utilizó previo triturado y tamizado, usando las partículas que pasan la malla ASTM No. 200. Se puede observar que la CBC presenta tamaños de partícula mayores que el CPC, lo que infiere velocidad de reacción menor, debido a la disminución del área superficial y la dificultad para lograr la nucleación de los hidratos en las partículas de sílice. El uso de la CBC tiene como desventaja el uso de energía para disminuir el tamaño de la partícula y lograr mayor reactividad. La norma ASTM C618 clasifica a la CBC como una puzolana N.

En la siguiente tabla se muestran las cantidades en masa y volumen de los materiales que en la mezcla conformarán un metro cúbico.



Tabla 18 Cantidades de masa y volume para un metro cúbico

Materiales	Cantidades (kg)	Volumen
Cemento	450.00	142.86
Agua	216.00	216.00
Grava	931.75	356.17
Arena	626.66	264.97
Aire	0.00	20.00
Total:	2224.40	1000.00

Para agregarle el material de sustitución, se calcula el porcentaje a sustituir de la cantidad de cemento y se resta, y se agrega la misma cantidad pero del material sustituto.

En el caso anterior se plantea realizar una sustitución del 10% por ceniza de bagazo de caña, entonces las cantidades quedan como:

Tabla 19 Proporciones de materiales para la mezcla base.

Resumen	Peso	Volumen
Cemento	405.00	142.86
Ceniza	45.00	-----
Agua	216.00	216.00
Grava	931.75	356.17
Arena	626.66	264.97
Aire	0.00	20.00
	2224.40	1000.00

En la Tabla 19 se listan las proporciones de los materiales para la mezcla base usando el método de proporcionamiento del *American Concrete Institute* (ACI) para un metro cúbico de concreto.



6.5.2 Concreto Reciclado

El concreto reciclado utilizado se obtuvo de la demolición de la torre del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) de Morelia.

La razón por la cual se utilizó el material reciclado fue para aprovechar el concreto reciclado para la elaboración de otras mezclas. Se desconoce las características del concreto original con que fue construido.

Sabemos que en la actualidad todo proyecto en la industria de la construcción debe buscar contribuir con el cuidado del medio ambiente. Hoy en día el uso del concreto reciclado se ha utilizado para diversos proyectos de construcción. La gente aún no está muy socializada con este tipo de material, pero si buscamos la manera de concientizar a la población de los beneficios que se obtienen al utilizar este tipo de material estaremos dando un gran avance.

“El uso del concreto reciclado es más común en Europa, quizá por la falta de agregados minerales naturales. En América Latina, específicamente en México, caso que conocemos un poco más, se está buscando el empleo sostenido de materiales considerados como desechos sólidos que permitan respuestas a la conservación del medio ambiente, a la búsqueda e innovación de adiciones, métodos, técnicas y procesos que mejoren las propiedades mecánicas del concreto reciclado.” (Martinez Molina, y otros, 2015).

Como sabemos en la actualidad hay una cantidad notable de material producto de alguna demolición entonces al ser utilizado este tipo de material además de reducir la contaminación del medio ambiente, se reduce el desecho de concreto que de ser grandes cantidades que se generan no hay un lugar específico donde colocar este tipo de material.

Concretos Reciclados S.A. DE C.V. es una empresa ubicada en Azcapotzalco, Ciudad de México. Fundada en el año 2004. Pionera en dedicarse a este tipo de actividad. Cuya misión es promover la cultura del reciclaje y crear nuevos estándares en el reciclado de desechos y materiales pétreos productos de las construcciones. Concretos Reciclados utiliza tecnología muy equipada con la cual puede llevar a cabo este tipo de actividad. (C.V., 2019).



El uso del concreto reciclado se ha utilizado para la elaboración de diferentes tipos de mezclas.

Las mezclas confeccionadas con agregados reciclados presentan un costo muy parecido a la mezcla de referencia, dado que si bien consumen más cemento, el costo del agregado reciclado es menor que el natural. En tal caso se recomienda por distintos investigadores y productores de concreto, invertir el ahorro generado por los agregados reciclados en un aumento de cemento en la mezcla, para incrementar la resistencia al esfuerzo de la compresión y la durabilidad. (Bedoya & Dzul, 2015).

Los materiales que se utilizan en la industria de la construcción sabemos que son extraídos de bancos de materiales los cuales han sido explotados

El reciclaje de concreto para fabricar agregado grueso y sustituir al natural es una práctica que debe empezar a realizarse a la brevedad posible, ya que la disponibilidad de bancos de materiales pétreos es cada día más escasa. (Martínez & Mendoza , 2006)

6.5.3 Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)

La prueba de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se rige por la normativa ASTM (ASTM-C-597, 2009).

El equipo empleado para esta prueba fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B marca CONTROLS, medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos, ilustración 61-a; con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9 μ s; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1 μ s; salida del transmisor hasta 1500V; funciona con



baterías recargables internas; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM.

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie de prueba y para tal fin se emplea un gel, ilustración 61-b.

Durante la realización de la prueba se tomó la precaución de mantener constantemente húmedos los especímenes y evitar así variantes en las lecturas.



Ilustración 20 Equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico (ASTM-C-597,2009)

6.5.4 Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica fue la primera prueba no destructiva realizada a los especímenes cilíndricos, los especímenes se extraían de la pila de curado y se cubrían con una franela húmeda para evitar la pérdida de humedad. Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo Resistómetro que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos (ASTM-G57, 2012), marca Nilsson, ilustración 21.



Ilustración 21 Equipo utilizado para determinar la resistividad eléctrica.

El procedimiento seguido se resume en los siguientes números:

1. Se determinaron las dimensiones de la muestra:
2. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
3. Se monta la muestra en el equipo Nilsson.
4. Se colocan las caras laterales del espécimen a realizarle la prueba entre dos placas de cobre y entre éstas esponjas húmedas figura 5-8.
5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el espécimen a una corriente dada, (I) y voltaje (E).

La resistencia eléctrica (R) se calcula como E/I y se expresa en Ohmios.

Para el cálculo de resistividad se utilizó la siguiente fórmula [35] (ASTM-G57, 2012; CYTED-DURAR, 1998):

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right) \quad [35]$$

Dónde:

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

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



A = Área transversal del espécimen en cm^2

L = Longitud del espécimen en cm

7 Aditivos

Las razones más comunes para usar aditivos en el concreto son:

- Incrementar la trabajabilidad, sin cambiar el contenido de agua.
- Reducir el contenido de agua, sin cambiar la trabajabilidad.
- Así mismo, efectuar una combinación de lo anterior.
- Ajustar el tiempo de fraguado.
- Reducir la segregación y/o el sangrado.
- Mejorar la bombeabilidad.
- Acelerar la tasa de desarrollo de resistencia a edades tempranas.
- Incrementar la resistencia.
- Mejorar la durabilidad potencial y reducir la permeabilidad.
- Disminuir el costo total de los materiales usados en el concreto.
- Compensar las pobres propiedades del agregado.

Según la norma mexicana (NMX-C-255-ONNCCE, 2013), los aditivos se clasifican de la siguiente manera:



Tabla 20 “Clasificación de los aditivos” (NMX-C-255-ONNCCE, 2013)

Tipo A	Reductor de agua
Tipo B	Retardante
Tipo C	Acelerante de fraguado inicial
Tipo C2	Acelerante de resistencia
Tipo D	Reductor de agua y retardante
Tipo E	Reductor de agua y acelerante
Tipo F	Reductor de agua de alto rango
Tipo G	Reductor de agua de alto rango y retardante
Tipo F2	Superplastificante
Tipo G2	Superplastificante y retardante
Tipo AA	Modificador del contenido de aire

7.1 Tipos de aditivos

Los aditivos normalmente se clasifican en categorías de acuerdo con su efecto:

- Plastificadores (agentes reductores de agua).
- Superplastificadores.
- Inclusores de aire.
- Aceleradores.

Plastificadores

Cuando se agregan a una mezcla de concreto, los plastificantes son absorbidos en la superficie de las partículas de los aglomerantes, haciendo que se repelan entre sí, lo cual da como resultado una mejora en la trabajabilidad y proporciona



una distribución más uniforme de las partículas del aglomerante a través de la mezcla.

Los principales tipos de plastificantes son los ácidos lignosulfónicos y sus sales, los ácidos carboxílico hidroxilados y sus sales, y modificaciones de ambos.

Superplastificadores

Estos aditivos son químicamente distintos de los plastificantes normales y aunque su acción es casi la misma, es más marcada. Cuando se usan para producir concreto fluido puede esperarse una pérdida rápida de trabajabilidad y, por tanto, éstos deben ser agregados justo antes de la colocación. De modo usual, los superplastificantes son compuestos químicos como formaldehído de melamina sulfonada, formaldehído naftaleno sulfonado y lignosulfonatos modificados.

Inclusores de aire

Un agente inclusor de aire introduce aire en forma de diminutas burbujas distribuidas de modo uniforme a través de toda la pasta de cemento. Los tipos principales incluyen sales de resinas de madera, grasas y aceites animales y vegetales, e hidrocarburos sulfonados.

Aceleradores

Estos aditivos aceleran la reacción química del cemento y el agua, y de este modo aceleran la tasa de fraguado y/o la ganancia temprana en la resistencia del concreto. Entre los tipos principales de aceleradores están el cloruro de calcio, el formiato de calcio, ceniza de sosa, cloruro de potasio y varios materiales orgánicos. El cloruro de calcio parece ser el único predecible, de modo razonable, en su desempeño, pero tiende a promover la corrosión del acero en el concreto.

Retardadores



Estos aditivos disminuyen la velocidad de la reacción química del cemento y el agua conduciendo a tiempos más largos de fraguado y ganancia de resistencia iniciales más lentas. Los retardadores más comunes son los ácidos carboxílicos hidroxilados, bórax, lignina, azúcar y algunos fosfatos (IMCYC, IMCYC, 2006).

Aditivo usado en la investigación

En este trabajo se utilizó el fluidificante CRISOTAN R-5 para lograr el revenimiento adecuado en las mezclas, sin afectar la resistencia de diseño.



8 RESULTADOS

8.1 Caracterización del material pétreo

8.1.1 Arena “La Unión”-Joyitas

En la tabla 21 se muestra el análisis obtenido de la prueba de granulometría en arena.

Tabla 21 Análisis granulométrico en arena.

Malla	Masa retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
4	1.1	0	0	100
8	36.8	6	6	94
16	161.6	25	31	69
30	220.8	34	64	36
50	108.5	17	81	19
100	54	8	89	11
200	41.3	6	96	4
charola	28.8	4	100	0
Masa total	652.9			

En la ilustración 7 se observan los valores graficados del análisis granulométrico de la arena.

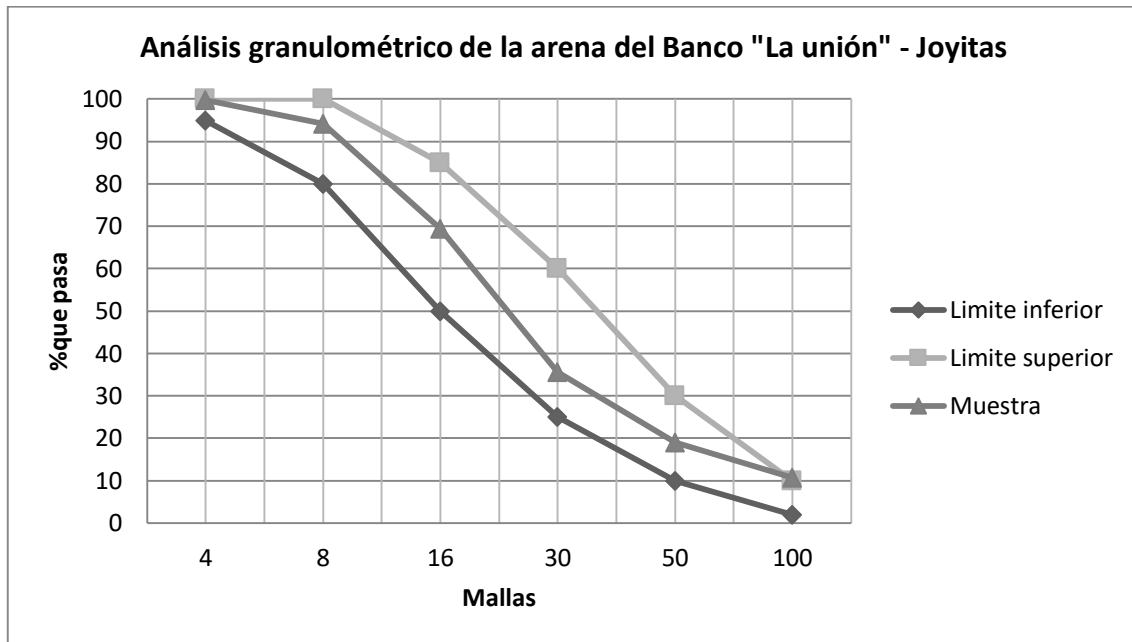


Ilustración 7 Análisis granulométrico de la arena.

8.1.2 Análisis de la Grava Triturada de Trasca

Las características del material obtenidas del banco Trasca ubicado en Morelia se presentan a continuación en la tabla 22.

Tabla 22 Características del material.

Banco "Trasca" - Morelia	
M..V.S.S (kg/m ³)	1396
M.V.S.V (kg/m ³)	1549
Densidad (g/cm ³)	2.64
Absorción (%)	1.6
T.M (plg)	1/2

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en la prueba de análisis granulométrico en arena.



Tabla 22 Análisis granulométrico en arena.

Malla	Masa retenida (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1	0	0	0	100
3/4	245	2	2	98
1/2	4635	31	33	67
3/8	3850	26	59	41
4	5610	38	97	3
8	485	3	100	0
Charola	0	0	100	0
Masa total	14825			

Los valores obtenidos del análisis granulométrico en arena se graficaron en la ilustración 8 que se observa a continuación.

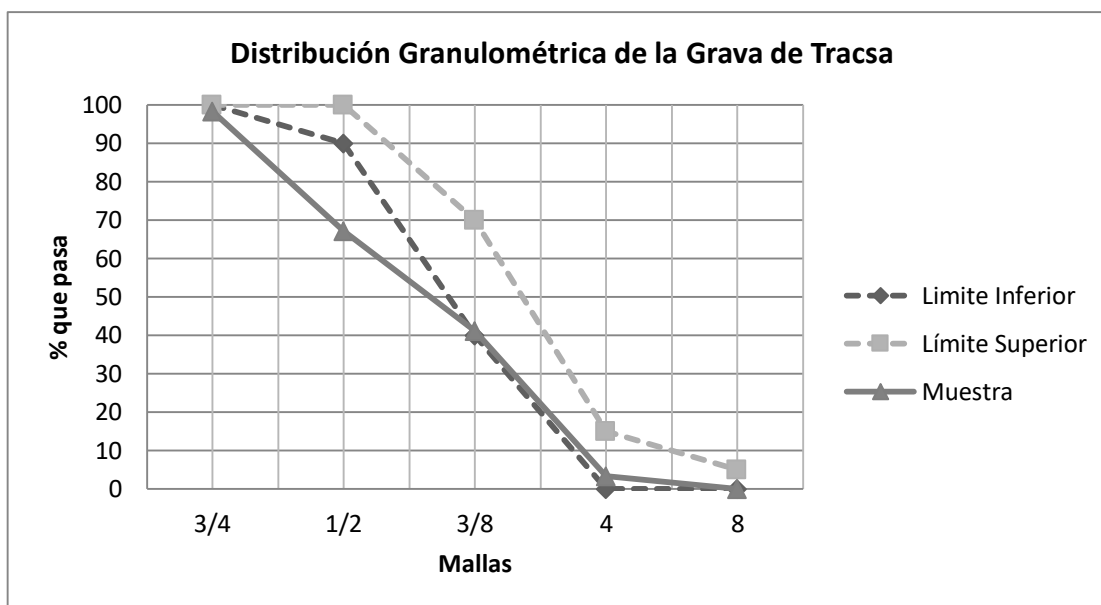


Ilustración 8 Composición granulométrica.



8.1.3 Análisis del concreto reciclado

Las características de la prueba del análisis del concreto reciclado se presentan en la tabla siguiente con los valores obtenidos.

Tabla 23 Características del concreto reciclado.

Grava Reciclada	
M.V.S.S (kg/m ³)	1148
M.V.S.V (kg/m ³)	1280
Densidad (g/cm ³)	2.16
Absorción (%)	6.0
T.M (plg)	3/4

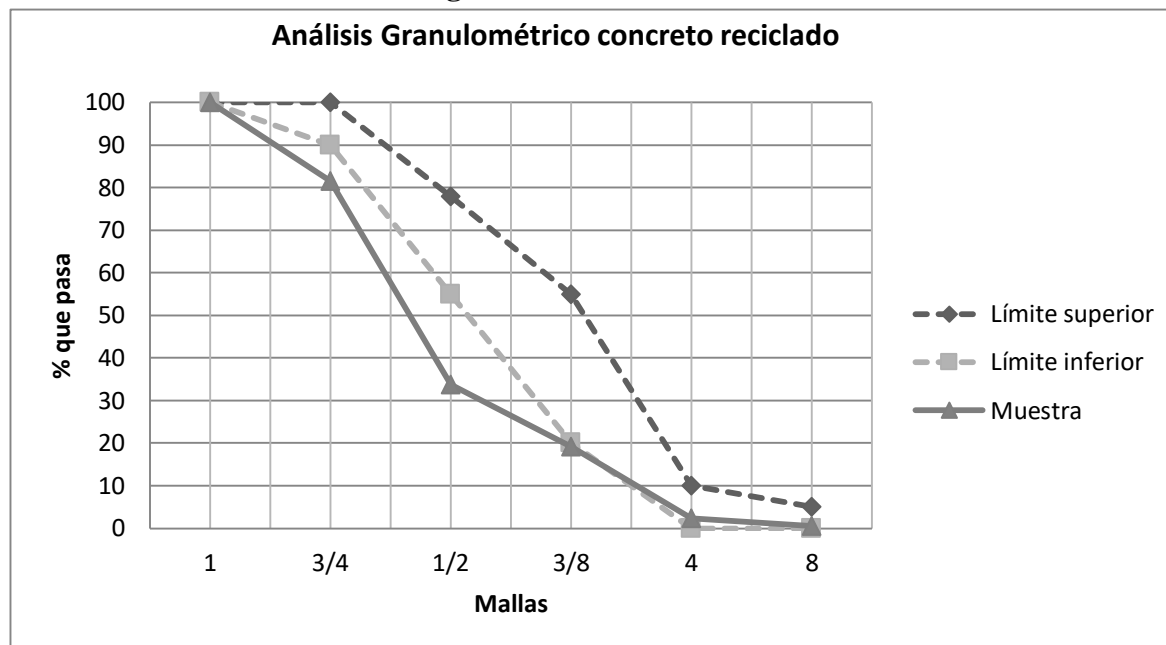
El análisis granulométrico del concreto reciclado se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 24 Análisis granulométrico concreto reciclado.

Malla	Masa retenida (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1	0	0	0	100
3/4	2230	18	18	82
1/2	5780	48	66	34
3/8	1765	15	81	19
4	2040	17	98	2
8	210	2	99	1
Charola	70	1	100	0
Masa total	12095			

Los valores obtenidos en la en el análisis granulométrico del concreto reciclado se observan en la siguiente ilustración.

Ilustración 9 Análisis granulométrico de concreto reciclado.



8.2 Cantidades obtenidas del proporcionamiento

Los resultados del proporcionamiento por el método del ACI se muestran en la tabla 29.

Tabla 27 Proporciones de los materiales empleados para la elaboración de un metro cúbico de concreto. Dosificación para el material natural y reciclado con relaciones a/c de 0.45 y 0.65.

Material	Grava Reciclada (GCR)		Grava Triturada (GNT)	
	a/c = 0.45	a/c= 0.65	a/c=0.45	a/c=0.65
Cemento	455.56	315.38	480.00	332.31
Grava	741.12	793.60	870.54	937.15
Arena	683.85	734.05	658.59	712.38
Agua	205	205	216	216
Total	2085.52	2048.04	2225.13	2197.83



La cantidad de ceniza de bagazo de caña en sustitución fue del 10%. Se utilizó fluidificante en proporción de 8 cc/kg de cementante para lograr revenimiento de proyecto de 15 cm.

8.3 Caracterización del agua de mezclado

Los resultados del agua empleada en las mezclas se presentan en la tabla 30.

Tabla 30 Resultados del análisis del agua potable utilizada para la elaboración de las mezclas de mortero

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	Límite Permisible (NMX-C-122-ONNCCE-2004)	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-2000
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

Los resultados obtenidos en este análisis muestran que el agua es apropiada para la elaboración del espécimen y la realización del curado ya que no



posee un componente que pueda llegar a alterar la composición del mismo (Pedraza Pérez, 2014).

8.3.1 Resultados de la prueba a compresión

Se muestran resultados de resistencia a la compresión para materiales CC, CH y T. Con la relación de A/C de 0.45 podemos observar que las edades de prueba fueron de 28, 45, 60, 90 y 504 días. Se puede apreciar que la resistencia incrementa a medida que aumenta la edad de prueba.

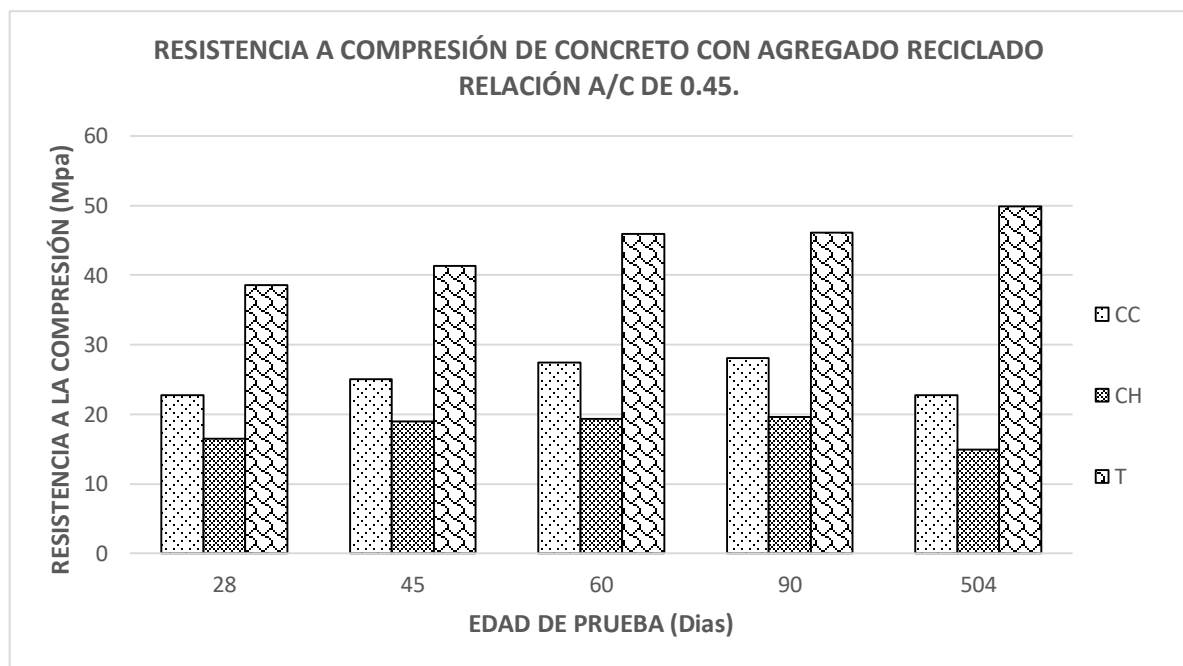


Ilustración 10 Gráfico de resultados de resistencia a la compresión para los materiales CC, CH Y T. Con una relación de A/C de 0.45.

La resistencia a la compresión para una relación a/c de 0.65, para el material CC (ceniza de caña) la resistencia fue aumentando de acuerdo a la edad de prueba y en la última edad hay un decremento. El material CH para la Resistencia aplicada fue aumentando y en la última edad también presenta un decremento. El material T presentó un aumento de resistencia en las diferentes edades.

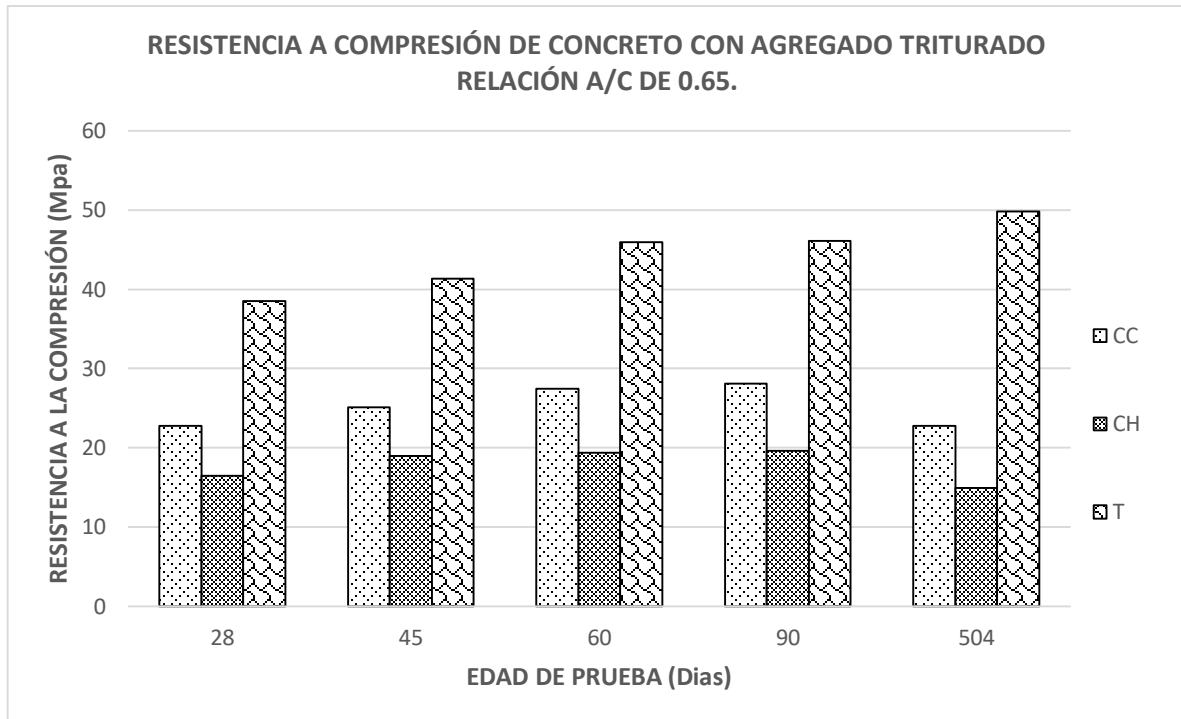


Ilustración 11 Gráfico de resultados de resistencia a la compresión para los materiales CC, CH Y T. Con una relación de A/C de 0.65.

En la gráfica se puede observar que para una relación de A/C de 0.65 para el material triturado CC, la resistencia a la compresión va aumentando hasta los 90 días de prueba y en los 504 hay un pequeño descenso, esto ocurre también para el material triturado CH. El material T, presenta un aumento de resistencia para cada edad de prueba.

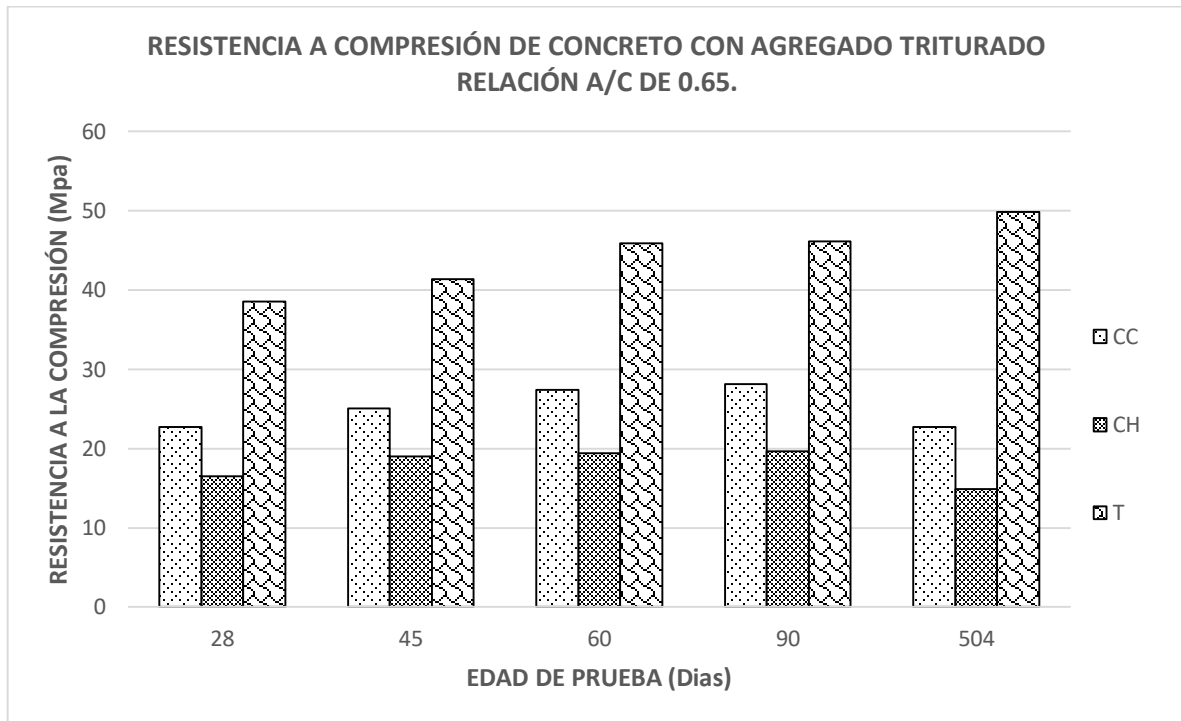


Ilustración 12 Gráfico comparativo de resultados de resistencia a la compresión para los materiales CC, CH Y T. Con un relación de A/C de 0.65.

8.3.2 Velocidad de pulso Ultrasónico

Un criterio de evaluación, utilizado como parámetro la velocidad de pulso ultrasónico, se presenta en la tabla 31. Este criterio especifica como material de análisis al concreto hidráulico. Sin embargo, el concreto hidráulico a su vez nos puede ubicar en el rango de calidad del mortero que estamos estudiando al ser evaluado con la VPU.

Tabla 31 Criterio de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU (CYTED-DURAR, 1998).

Velocidad de Propagación	Calidad del Concreto
<2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001-4000 m/s	Alta



>4000 m/s	Durable
-----------	---------

Se muestra en el gráfico de velocidad de pulso ultrasónico en las mezclas de CC, CH Y T. El valor que se obtuvo para el material CC y T permaneció constante es decir no hubo un decremento muy notable. Se puede observar que en el uso del material CH respectivamente para cada edad de prueba inicio con un valor de 4000 m/s después decreció, posteriormente en las edades siguientes volvió a incrementar su valor de velocidad de pulso electrónico, por lo tanto el material CC Y el CH tienen una calidad alta, la calidad del material T con los valores que se observan se puede decir que tiene una calidad durable.

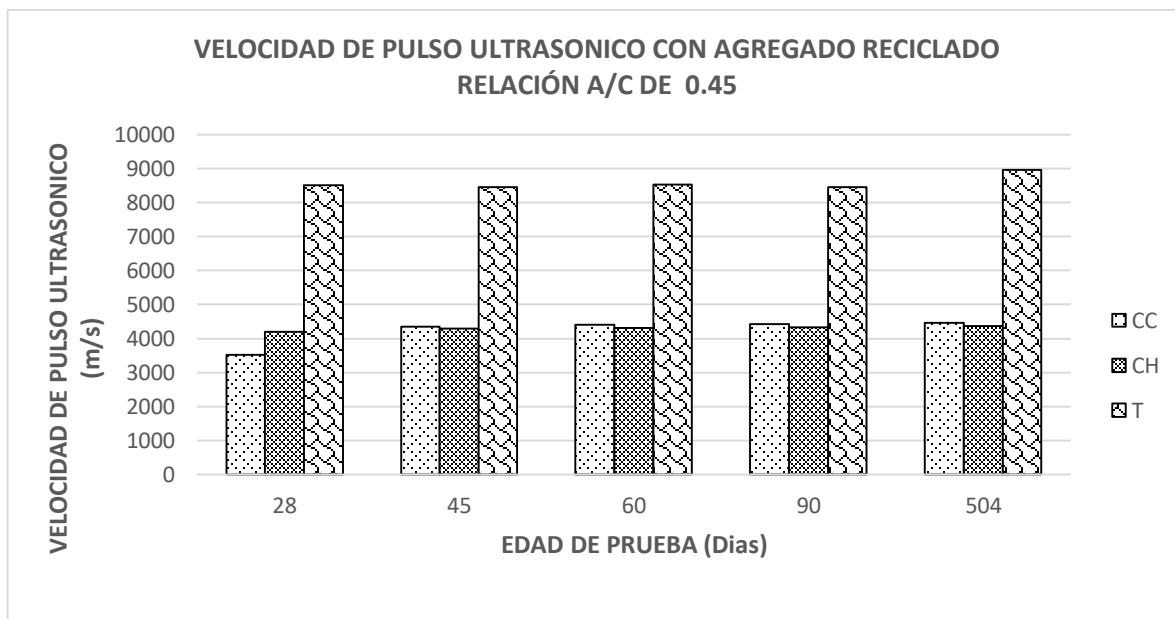


Ilustración 13 Gráfico comparativo de coeficientes de velocidad de pulso ultrasónico para los materiales CC, CH y T. Con una relación de 0.45.

El gráfico siguiente de la Prueba de velocidad de pulso ultrasónico con agregado reciclado para una relación de A/C de 0.65 se observa que la VPU para el agregado reciclado CC y CH no varía mucho para cada una de las edades de prueba, los cambios más notorios se presentaron para el material reciclado T, ya



que inicio aumentando la VPU y en los últimas dos edades de prueba este disminuyo.

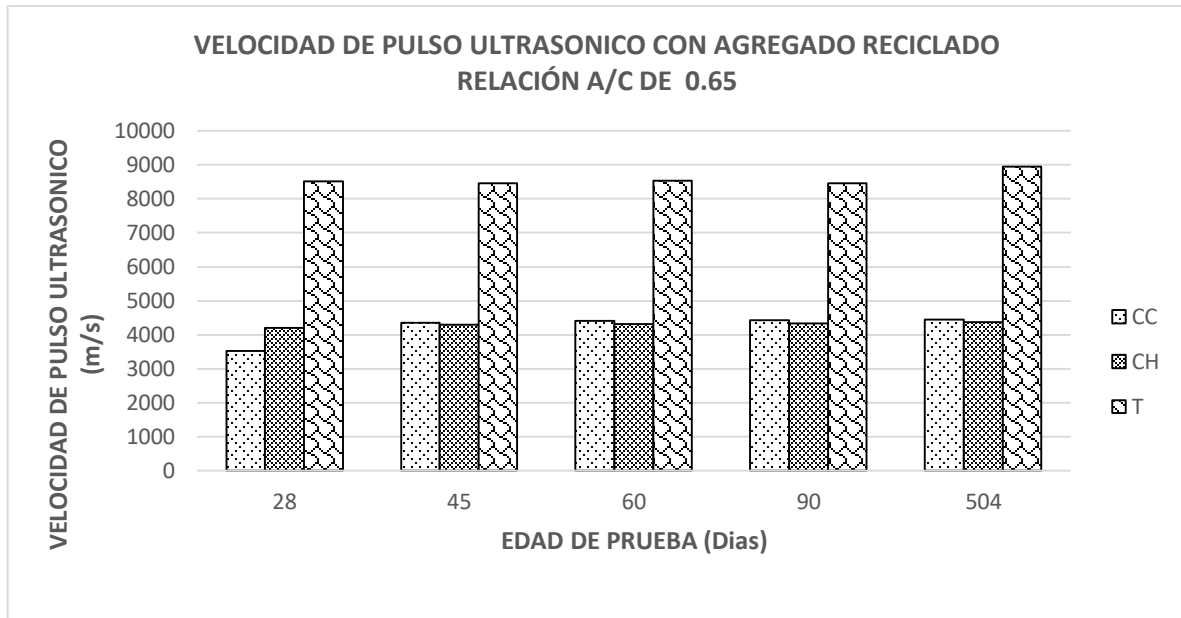


Ilustración 14 Gráfico comparativo de coeficientes de velocidad de pulso ultrasónico para los materiales CC, CH y T. Con una relación de 0.65.

Podemos observar en el gráfico siguiente que los valores de resistividad para cada material respectivamente fueron aumentando de acuerdo a la edad de prueba. La calidad que presenta el material CC es alta, los materiales CH y T presentan una calidad durable.

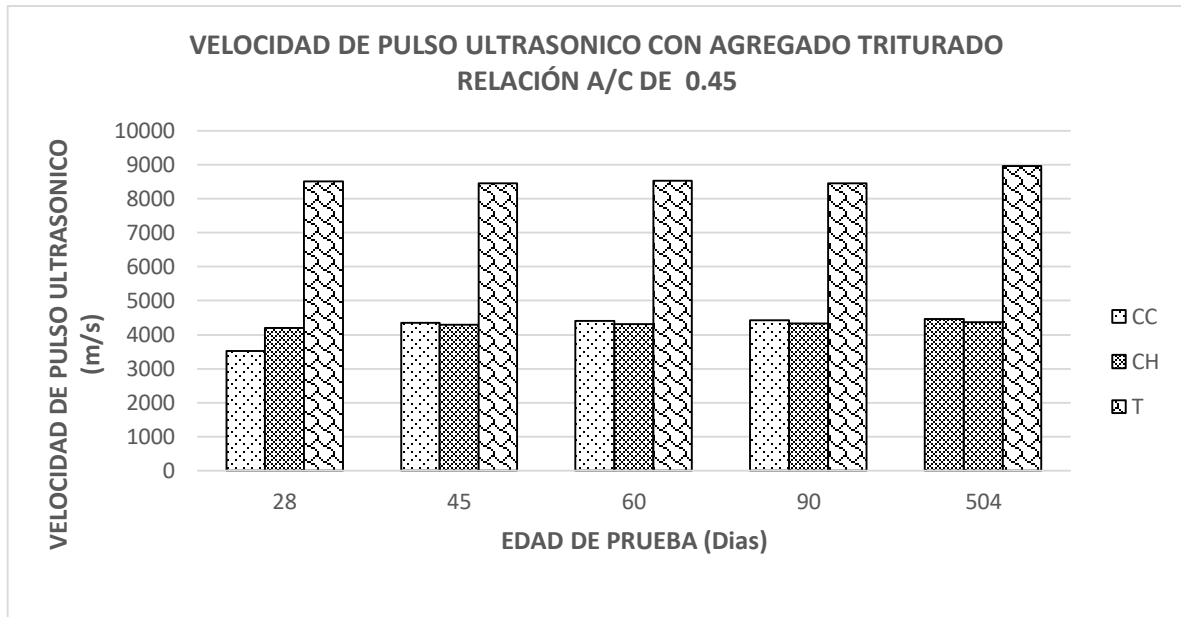


Ilustración 15 Gráfico comparativo de coeficientes de velocidad de pulso ultrasónico para los materiales CC, CH y T. Con una relación de 0.45.

Se observa en el grafico que la prueba realizada en este caso VPU para cada edad de prueba fue aumentando de una manera progresiva para cada material agregado triturado CC, CH y T.

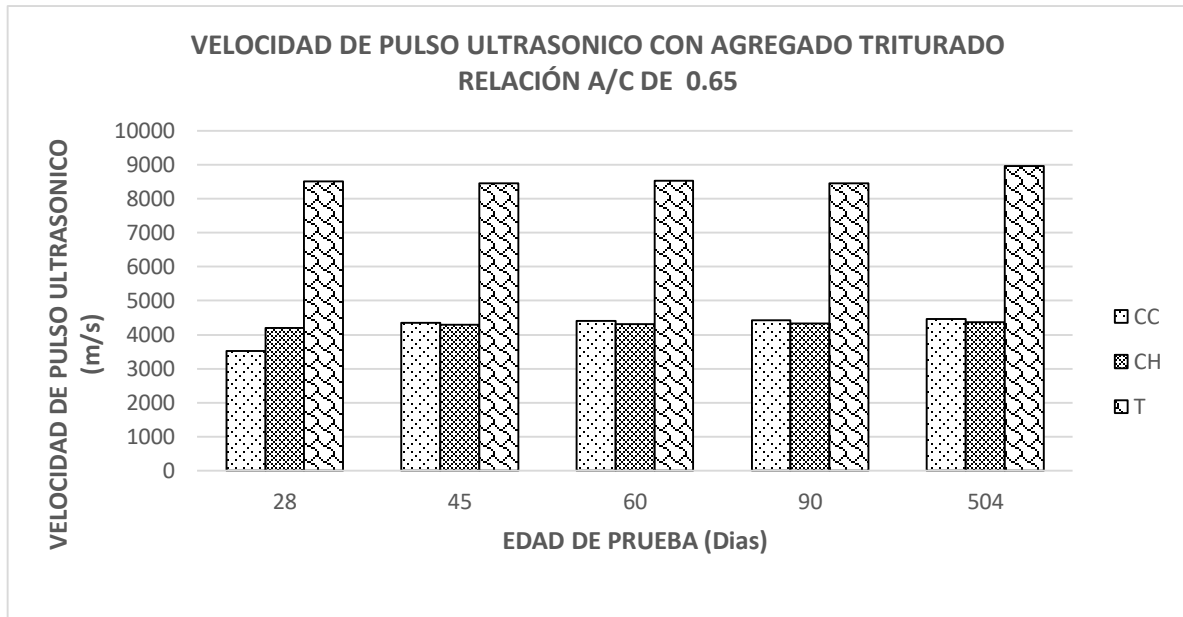


Ilustración 16 Gráfico comparativo de coeficientes de velocidad de pulso ultrasónico para los materiales CC, CH y T. Con una relación de 0.65.

8.3.3 Resistividad Eléctrica

No existe un criterio general para determinar los valores de resistividad que definan el estado de corrosión de una armadura. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se pueden utilizar los parámetros de la tabla 31 para estructuras de concreto armado (CYTED-DURAR, 1998).

Tabla 25 Criterio General de valores de resistividad eléctrica del concreto. (CYTED-DURAR, 1998)

Valor	Criterio
$\rho > 200 \text{K}\Omega\text{-cm}$	Poco Riesgo
$200 > \rho > 10 \text{K}\Omega\text{-cm}$	Riesgo Moderado
$\rho < 10 \text{K}\Omega\text{-cm}$	Alto Riesgo

La resistividad eléctrica del concreto con material CC para una relación de A/C de 0.45. Para 28,45,60, 90 y 504 de acuerdo a los resultados tenemos que el criterio de riesgo es moderado, la resistencia para el concreto con agregado reciclado con



material CH el riesgo de igual manera es moderado como es el caso del material T para esta prueba y esta relación.

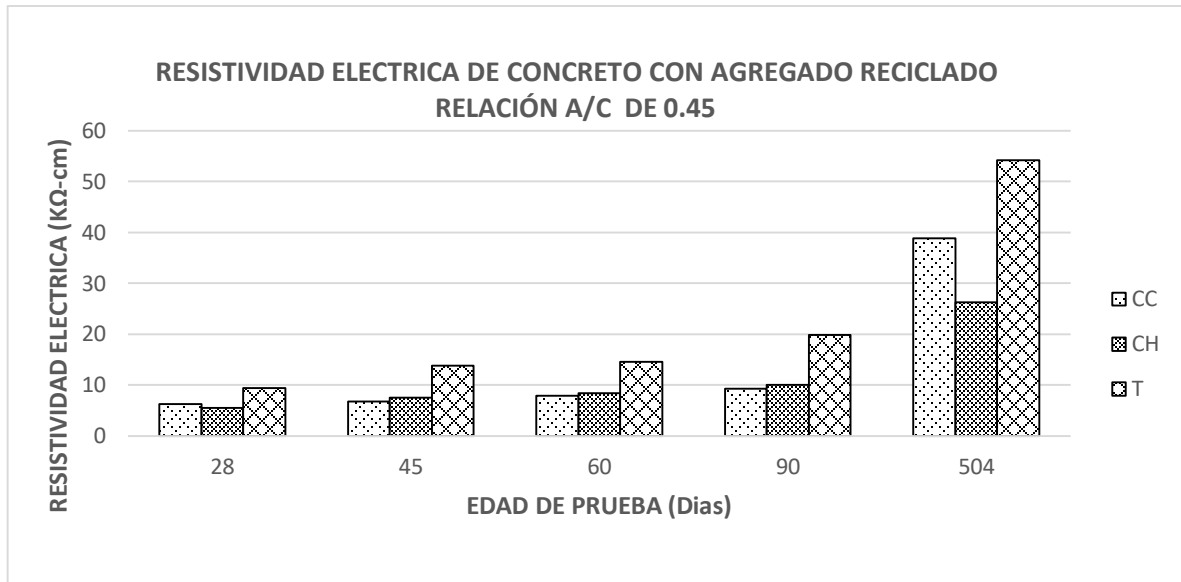


Ilustración 17 Gráfico comparativo de coeficiente de resistividad para los materiales CC, CH y T. Con una relación de A/C de 0.45.

En esta prueba de resistividad eléctrica con una relación de A/C de 0.65 el material utilizado fue aumentando el valor de la resistividad en función a los días de prueba, de acuerdo a los resultados obtenidos estos materiales se encuentran en un criterio de riesgo moderado.

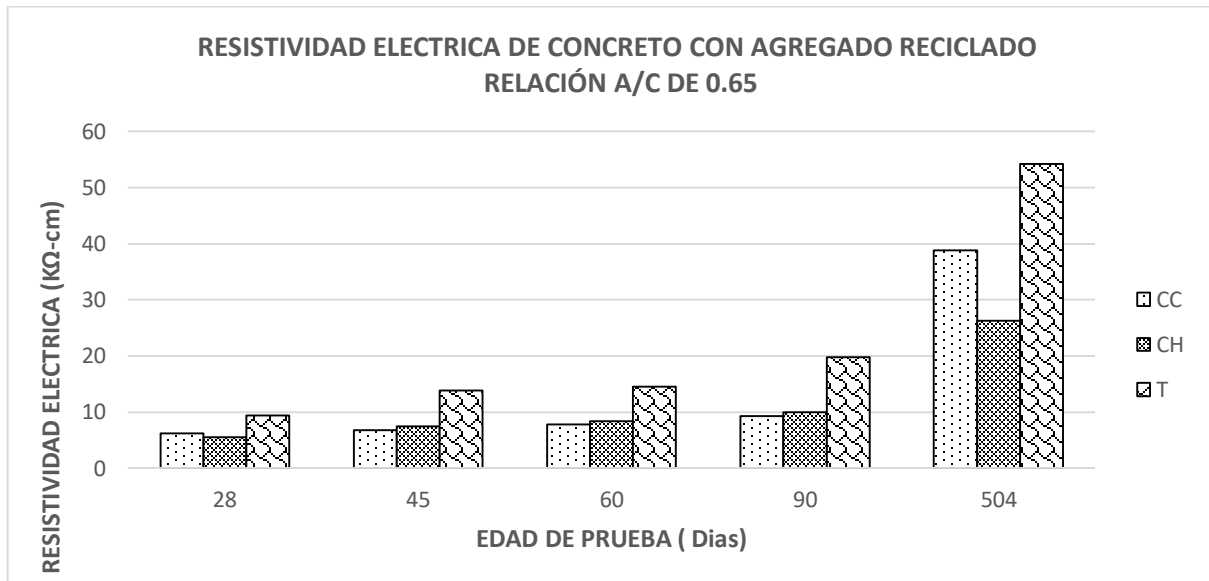


Ilustración 18 Gráfico comparativo de coeficiente de resistividad para los materiales CC, CH y T. Con una relación de A/C de 0.65.

En el siguiente grafico podemos observar que para las edades de prueba 28, 45, 60,90 y 504 días, para los materiales triturados se ve un incremento en Resistividad eléctrica para la CC, CH y T en la edad de 504 días.

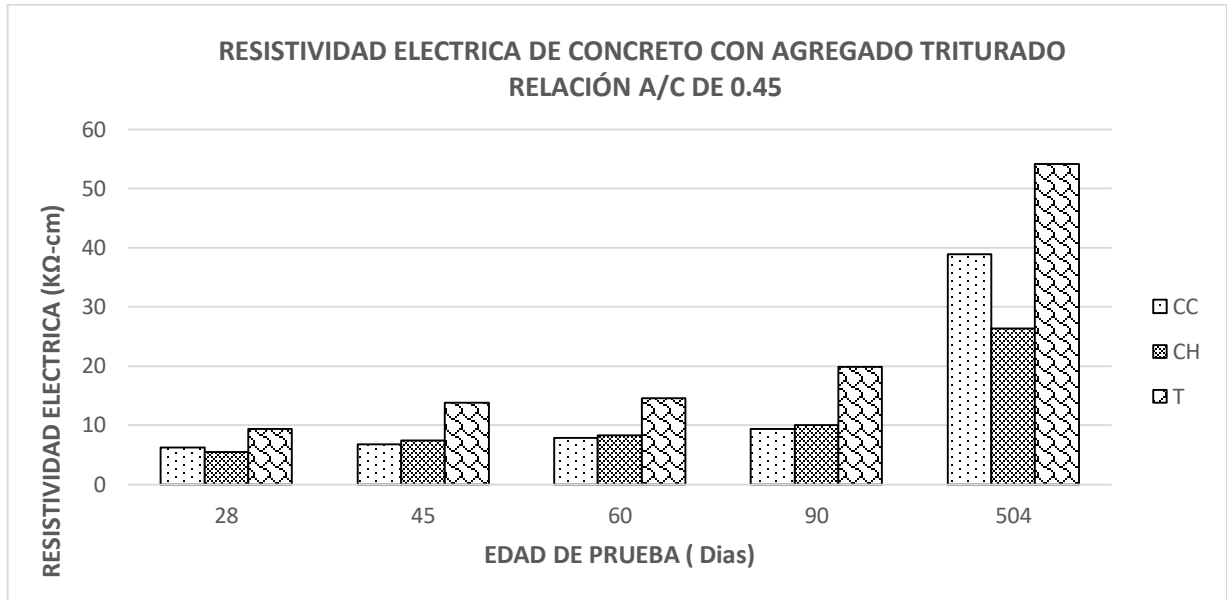


Ilustración 19 Gráfico comparativo de coeficiente de resistividad para los materiales CC, CH y T. Con una relación de A/C de 0.45.

En el siguiente grafico se observa que para los materiales triturados CC,CH y T la Resistividad eléctrica presenta un incremento iniciando a los 28 días, se mantiene incrementando hasta los 90 días y llega a un aumento más notorio a los 504 días de prueba para los materiales ya mencionados.

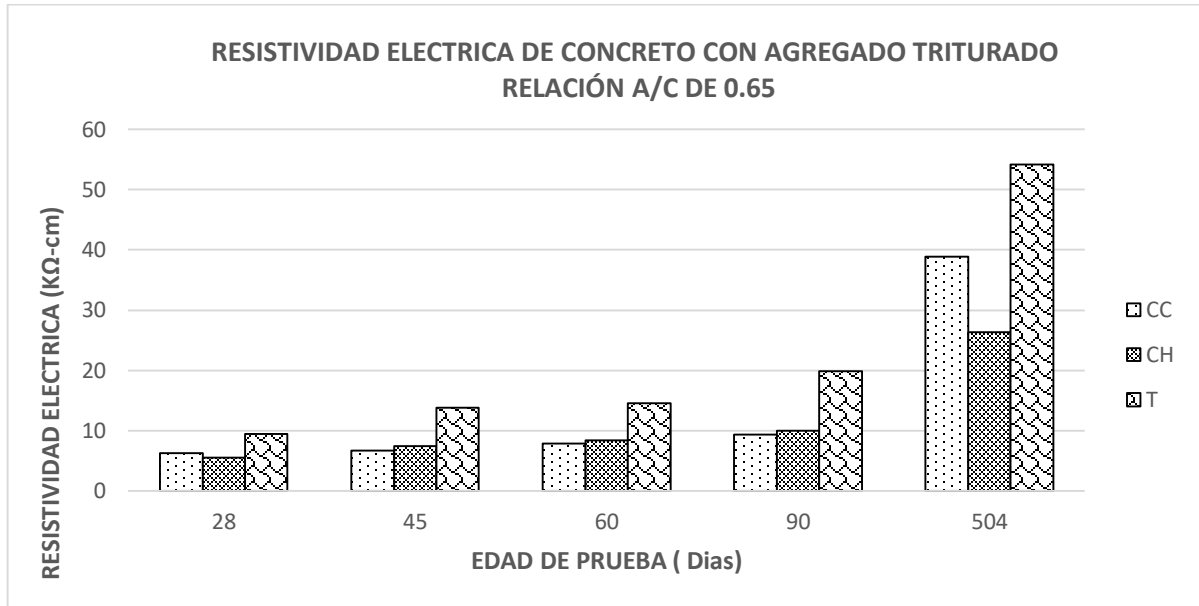


Ilustración 20 Gráfico comparativo de coeficiente de resistividad para los materiales CC, CH y T. Con una relación de A/C de 0.65.



9 CONCLUSIONES

La complejidad de los procedimientos de caracterización de materiales representa un reto al formar conclusiones exactas, ya que en la experimentación donde se utilizan materiales de diferente composición, conocer o inferir sobre resultados puede dirigirnos al planteamiento de nuevas experimentaciones que nos acerquen a la comprobación o a resultados de mayor precisión. Sin duda el uso de materiales generados en los procesos agroindustriales o en los procesos de demolición propicia la construcción de infraestructura con cierto nivel de sostenibilidad, además de que promueve la generación de conciencia sobre el uso de materiales de desecho como alternativa para mitigar el impacto ambiental en el rubro de la construcción. Para fortalecer las bases de la presente investigación será necesario desarrollar análisis de comportamiento multivariable, con el objetivo de discretizar las aportaciones de cada componente o variable en el desempeño físico y mecánico, que permita no solo obtener resultados posteriores a la elaboración, sino que también permita realizar diseños a partir de datos de caracterización. Finalmente se ha de mencionar la importancia que tiene el estudio de materiales diversos para su empleo en la construcción, considerando el incremento en la demanda de infraestructura, la ingeniería civil como disciplina debe adoptar nuevos paradigmas para lograr desarrollo con las menores afectaciones posibles.



10 BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, A. R., & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions. *Materiales de Construcción*, 63(309), 7-38.

ASTM-C150. (2005). Standard Specification for Portland Cement.

ASTM-C270. (2014). Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. ASTM International, 9-10.

ASTM-C-597. (2009). Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete.

ASTM-C618. (2003). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

ASTM-G57. (2012). Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method.

Bedoya, C., & Dzul, L. (2015). El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana. *Revista ingeniería de construcción*.

Bonavetti, V. (2004). Hormigón con elevado contenido de adiciones (Green Concrete). En *Hormigones Especiales* (págs. 97-142). Buenos Aires, Argentina: Editado por la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.

C.V., C. R. (2019). <http://www.concretosreciclados.com.mx/>. Obtenido de <http://www.concretosreciclados.com.mx/#5>

Cámara Nacional del Cemento. (Julio de 2014). Recuperado el 07 de Julio de 2014, de http://www.canacem.org.mx/procesos_de_produccion.htm

Carrasco, M., Menéndez, G., Bonavetti, V., & Irassar, E. (2005). Strength Optimization of Tailor Made Cement with Limestone Filler and Blast Furnace



- Slag. En Cement and Concrete Research (págs. 1324-1331). Oxford, England: Elsevier.
- Castellano, C. C., Bonavetti, V. L., & Irassar, E. F. (2013). CEMENTOS MEZCLAS: INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE ESCORIA. En Concreto y Cemento . Investigación y Desarrollo (Vol. IV, págs. 2-14).
- CEMEX. (2011). Cemento Portland Puzolánico. Recuperado el 02 de Agosto de 2014, de <https://www.cemexmexico.com/ce/ficha30.html>
- CMOCTEZ. (2010). Reporte Anual que se presenta de acuerdo con las disposiciones de carácter general aplicables a. México: CMOCTEZ.
- CruzAzul. (2008). Cemento Cruz Azul Tipo II con Puzolana. Recuperado el 10 de Agosto de 2014, de <http://www.cruzazul.com.mx/2008/producto/tiposCemento.aspx#3>
- CYTED-DURAR. (1998). En Red Temática XV. Durabilidad de la Armadura, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (SEGUNDA ed., pág. 128).
- Del Valle Moreno, A., Pérez López , T., & Martínez Madrid, M. (2001). El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado. Querétaro: IMT-SCT.
- Espinoza, L., & Escalante, I. (2008). Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo parcial y total del cemento Pórtland ordinario. Nexo: Revista Científica, XXI(01), 11-18.
- HOLCIM. (2004). Cemento para construcción de mayor durabilidad. Recuperado el 23 de Julio de 2014, de http://www.holcimnews.cr/docs/Ficha_Cemento_MP.pdf
- IMCYC. (2005). Construyendo: CEMEX 100 años. México: IMCYC.



- IMCYC. (Julio de 2006). IMCYC. Obtenido de
<http://www.imcyc.com/revistact06/julio06/TECNOLOGIA.pdf>
- IMT-PT-327. (2010). Plan Nacional de Evaluación de Puentes Federales, Libres de Peaje Dañados por Corrosión (2000-2005). Una Cuantificación de Resultados, Proyectos y Colaboraciones. (SCT, Ed.) Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Instituto del Concreto. (1997). "Manual Tecnología y Propiedades" (Tercera reimpresión ed.). (A. c. ASOCRETO, Ed.) Colombia.
- Malholtra, V., & Mehta, P. (1996). Pozzolanic and Cementitious Materials. Gordon & Breach Publishers.
- Malhotra, V., & Hemmings, R. (1995). Blended cements in North America-A review. En Cement and Concrete Composites (págs. 23-35). Oxford, England: Elsevier.
- Martinez Molina, W., Torres Acosta, A., Alonso Guzmán, E., Chávez García, H., Hernandez Barrios, H., Lara Gómez, C., . . . González Valdéz, F. (2015). Revista ALCONPAT, 13.
- Martinez, S., & Mendoza , E. (2006). Comportamiento Mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados. Ingeniería, investigación y Tecnología.
- Martirena Hernández, J. F., & Betancourt Rodríguez, S. (2000). Pozzolanic properties of residues of sugar. En Materiales de Construcción (Vol. 50). España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- MASSAZZA, F. (1993). Pozzolanic cements. Cement and Concrete composites.
- MEHTA, P. K. (1989). Pozzolanic and Cementitious by-product. Proceedings 3rd International Conference. Trondheim.



- Menéndez, G., Bonavetti, V., & Irassar, E. (2007). Hormigones con cementos compuestos ternarios. Parte II: Mecanismos de transporte. En *Materiales de Construcción* (págs. 31-43). Madrid, España.
- Niu, Q., Feng, N., Yang, J., & Xheng, X. (2002). Effect of superfine slag powder on cement properties. En *Cement and Concrete Research* (págs. 615-621). Oxford, England: Elsevier.
- NMX-C003. (2010). *Industria de la Construcción-Cal Hidratada- Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-030-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción-Agregados-Muestreo*. Organismo nacional de normalización y certificación de las construcción y la edificación, S.C.
- NMX-C-071-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES*. México: ONNCCE.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción-Agregados-Masa volumétrica-Método de prueba*. Organismo nacional de normalización y certificación de las construcción y la edificación, S.C.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- AGREGADOS-MASA VOLUMÉTRICA-MÉTODO DE PRUEBA*. México: ONNCCE.
- NMX-C-084-ONNCCE. (2006). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION- AGREGADOS PARA CONCRETO-PARTICULAS MAS FINAS DE LA CRIBA 0,075 mm (No. 200) POR MEDIO DE LAVADO* . México: ONNCCE.
- NMX-C-088-ONNCCE. (1997). *Industria de la construcción-Agregados- Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino*. México: ONNCCE.



NMX-C-122-ONNCCE. (2004). Industria de la Construcción- Agua para Concreto- especificaciones. México.

NMX-C-164-ONNCCE. (2014). Industria de la construcción-Agregados- Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso. Organismo nacional de normalización y certificación de las construcción y la edificación, S.C.

NMX-C-165-ONNCCE. (2014). Industria de la construcción-Agregados- Determinación de la densidad relativo y absorción de agua del agregado fino-Método de ensayo. Organismo nacional de normalización y certificación de las construcción y la edificación, S.C.

NMX-C-166-ONNCCE. (2006). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION- AGREGADOS-CONTENIDO DE AGUA POR SECADO-METODO DE PRUEBA. México: ONNCCE.

NMX-C-166-ONNCCE. (2006). Industria de la construcción-Agregados-Contenido de agua por secado-Método de prueba. Organismo nacional de normalización y certificación de las construcción y la edificación, S.C.

NMX-C-191-ONNCCE. (2004). Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una vida simple con carga en los tercios del claro.

NMX-C-199. (2010). Terminología y Clasificación en Concreto y Mortero. En I. p.- A. concreto.

NMX-C-255-ONNCCE. (2013). Industria de la Construcción-Aditivos Quimicos para Concreto-Especificaciones y Métodos de Enasaye. ONNCCE.

NMX-C414. (2010). ONNCCE Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos- Especificaciones y Métodos de Prueba. México.

Pacífica, R. m. (2008). Evolución reciente de la industria de cemento. PORTES, 165-202.



- Pedraza Pérez, A. C. (2014). Tesis: Comportamiento físico-mecánico de morteros de abañilería para la construcción. Morelia, Michoacán, México.
- Pérez, T. (2002). Aplicación de la Técnica Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) en el Estudio de la Corrosión del Acero de Refuerzo Embebido en Concreto. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche.
- Rivera Flores, E. (s.f.). Morteros de albañilería para restauración, como aditivo miel de abeja. Facultad de Ingeniería Civil.
- Rojas Sandoval, J. (2011). Pioneros de la Industria del Cemento en el Estado de Nuevo León, México. Cementos Mexicanos, S. A. México, Nuevo León.
- Salazar, A. (1968). Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos. Cali: Corporacion Construir.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2007). Influence of puzzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. Construction and Building Materials No 24, 1589-1598.
- Sepulcre Aguilar, A. (2005). INFLUENCIA DE LAS ADICIONES PUZOLANICAS EN MORTEROS DE RESTAURACION. MADRID.
- Talero, R., Pedrajas, C., Delgado, A., & Rahhal, V. (Diciembre de 2009). Re-use of incinerated agro-industrial waste as pozzolanic addition. Comparison with spanish silica fume. Materiales de Construcción, 59(296), 53-89.
- Tórres Gómez, R., Aperador, W., Vera, E., Mejía de Gutierrez, R., & Ortiz, C. (2010). STUDY OF STEEL CORROSION EMBEDDED IN AAS. Dyna(164), 52-59.
- UNESID, & IECA. (2011). Ficha Técnica: Escorias de Alto Horno. Madrid.



Valdez Tamez, P. L., Das Roy, T. K., & Rivera Villareal, R. (2004). Evaluación de la velocidad de Hidratación en sistemas puzolanas naturales-portlandita. En Ciencia UANL (Vol. VII, págs. 190-195).