



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**TESIS PROFESIONAL**

**“OPTIMIZACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DEL CONCRETO  
HIDRÁULICO, UTILIZANDO ADITIVO FLUIDIFICANTE, CON  
ARENA VOLCÁNICA DEL BANCO DE MAGDALENA”**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

**OSCAR GEOVANNY MARTINEZ BALVANERA**

ASESOR:

**M.I. CINDY LARA GÓMEZ**

COASESORES:

**M.I. SANDRA DEL CARMEN ARGUELLO HERNÁNDEZ**

**M.I. CIPRIANO BERNABÉ REYES**

Morelia, Michoacán. Julio de 2017.

---





## Dedicatorias

A mis padres, por darme todo el apoyo necesario en cada etapa de la vida, por todo el sacrificio que han realizado a fin de dar a sus hijos lo mejor que ha estado a su alcance, por estar ahí cuando más los he necesitado y darme palabras del aliento cuando he estado desanimado. Este logro no sería posible sin ustedes, así que también es suyo ¡LOS AMO!

A mis hermanos, por ser un pilar en el día a día, por ser grandes compañeros y amigos. Por brindarme el apoyo siempre que lo he necesitado. Por no dejarme vencer en ningún momento. Sé que puedo confiar en ustedes.

A mis sobrinos, por ser una fuente de inspiración, por estar alegrándome la vida con cada sonrisa.

## Agradecimientos

A Dios, Por permitirme culminar esta etapa tan importante en mi vida, así como sustentarme en los momentos difíciles de la vida, así como poner en mi camino a personas que desinteresadamente me han ayudado para llegar hasta este momento.

A mis padres por tantos sacrificios que han hecho a fin de permitirme llegar hasta donde he llegado, sé que sin su esfuerzo esto no sería posible. Por su buen ejemplo de perseverancia, he podido alcanzar mis metas, espero poder seguir teniéndolos muchos años más en mi vida.



A mis hermanos, por ser mis compañeros y amigos de toda la vida, sé que sin su ayuda no podría estar en este momento, gracias a sus palabras de ánimo y ejemplo.

A mi casa de estudios, la Universidad Michoacana de San Nicolás De Hidalgo, por permitirme formar parte uno más de los profesionales que se han formado en sus aulas.

A la facultad de Ingeniería civil, que me ha dado los conocimientos necesarios para poder obtener el título de Ingeniero civil, así como las bases necesarias para poder desempeñarme laboralmente como tal.

Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, en especial al departamento de Resistencia de Materiales, por facilitarme las instalaciones, equipo y material necesario para que yo pudiera realizar esta investigación, pero además por hacerme sentir parte del laboratorio y hacer de él un lugar agradable para trabajar.

A mi asesor, M.I. Cindy Lara Gómez por el tiempo y apoyo brindado a la presente investigación.

A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán por confiar en mí desde el momento en que nos conocimos, por invitarme a realizar mi trabajo de tesis en el laboratorio de materiales, por todo el apoyo brindado durante la carrera como mi tutora, así como también todo el apoyo y aporte de ideas para poder realizar la presente investigación.

A mis coasesores de tesis: M. I. Sandra del Carmen Arguello Hernández y M. I. Cipriano Bernabé Reyes, porque de no ser por ustedes este trabajo de tesis jamás lo hubiera podido terminar, por invertir desinteresadamente tanto tiempo, esfuerzo y conocimiento a fin de llevar a cabo esta investigación, por ser amigos más que profesores. Sin lugar a dudas son grandes personas ¡GRACIAS!



A mis compañeros de tesis: Sostenes Alberto López Reyes y Mayra Alejandra Guiza Sánchez, por todo el apoyo brindado a fin de poder culminar esta etapa tan importante en mi vida.

A la Ing. María Auxilio Flores García, por creer en mí, por darme la oportunidad de ingresar a una institución de estudios superiores, y por todo el apoyo económico y principalmente moral que me ha brindado a lo largo de toda la carrera. ¡GRACIAS!

Al Ingeniero José Guiza por proporcionarnos los materiales y apoyo necesario para la presente investigación.

A mis amigos Orlando, Ivon y Mayra, muchas gracias por todo el apoyo que me han dado, gracias a ustedes el paso por la carrera fue muy ameno y me deja recuerdos inolvidables. Con ustedes conforme un grandioso equipo de trabajo, que aunque con pleitos y discusiones siempre logramos tener los trabajos a tiempo y destacar entre los mejores. De ustedes he aprendido tantas cosas que me han permitido ser mejor persona. Espero nuestra amistad pueda perdurar para siempre.

A mis amigos de licenciatura Imer, Ariel, Julio, Luis Daniel, Arturo y todos y cada uno de los que me apoyaron, gracias por brindarme su valiosa amistad.

A mis profesores que dedicaron tiempo y esfuerzo para compartir conmigo sus conocimientos y experiencias de vida, sin duda alguna han sido muy valiosas.

A los jóvenes del verano Nicolaita (2016) por su ayuda prestada para la realización de algunas de las pruebas de la presente investigación.

Finalmente agradezco a todas aquellas personas que directa o indirecta mente hayan colaborado en algún momento mi vida a fin de lograr todas las metas que me he propuesto.



## Contenido

<b>Dedicatorias</b>	<b>i</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>i</b>
<b>Índice de ilustraciones</b>	<b>viii</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>x</b>
<b>1. Resumen</b>	<b>11</b>
<b>2. Abstract</b>	<b>12</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>13</b>
<b>4. Hipótesis</b>	<b>14</b>
<b>5. Objetivos</b>	<b>14</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>15</b>
<b>6.1 Antecedentes</b>	<b>15</b>
<b>6.2 Componentes del concreto</b>	<b>17</b>
6.2.1 Pasta de cemento	17
6.2.1.1 Cemento	18
Proceso de fabricación	18
Clasificación	20
Propiedades del cemento	22
Especificaciones	28
6.2.1.2 Agua	30
Características del gua	31
Especificaciones	33
6.2.2 Agregados	35
6.2.2.1 Origen de los agregados	36
Agregados naturales	36
Agregados artificiales	37
6.2.2.2 Clasificación de los agregados	38
6.2.2.3 Propiedades de los agregados	39
Propiedades químicas.	39



Propiedades físicas	39
Propiedades mecánicas	40
6.2.3 Aditivos	42
6.2.3.1 Tipos de aditivos	42
Acelerantes:	42
Retardantes:	43
Inclusores de aire:	44
Plastificantes:	44
Superplastificantes:	45
<b>7. Materiales de estudio</b>	<b>46</b>
<b>7.1 Cemento utilizado</b>	<b>46</b>
<b>7.2 Análisis del agua utilizada</b>	<b>47</b>
<b>7.3 Agregados utilizados en esta investigación</b>	<b>48</b>
Agregado grueso.	48
Agregado fino.	49
<b>7.4 Aditivo utilizado en esta investigación</b>	<b>49</b>
<b>8. Diseño de mezclas</b>	<b>51</b>
<b>8.1 Introducción</b>	<b>51</b>
<b>8.2 Objetivos</b>	<b>52</b>
<b>8.3 Método del ACI 211</b>	<b>54</b>
<b>9. Desarrollo experimental</b>	<b>60</b>
<b>9.1 Caracterización de agregados pétreos</b>	<b>60</b>
9.1.1 Cuarteo	60
9.1.2 Humedad actual en arenas y gravas	61
9.1.3 Humedad de absorción en arenas y gravas	62
9.1.4 Método de prueba para la masa volumétrica seca suelta en arenas y gravas	65
9.1.5 Método de prueba para la masa volumétrica seca varillada en arenas y gravas	67
9.1.6. Análisis granulométrico en arena y grava	68
9.1.7. Prueba de colorimetría en arena	70
9.1.8. Sedimentación en arenas	71



9.1.9. Material que pasa por la malla N° 200 en arena _____	73
9.1.10. Prueba de terrones de arcilla de la arena _____	74
9.1.11. Determinación de la densidad _____	75
En arenas _____	75
En gravas _____	77
9.1.12. Equivalente de arena _____	78
<b>9.2. Cemento _____</b>	<b>80</b>
9.2.1. Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico _____	80
9.2.2. Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico _____	82
9.2.3. Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico. ____	83
<b>9.3. Pruebas realizadas a Concreto fresco _____</b>	<b>84</b>
9.3.1. Método de prueba estándar para el revenimiento del concreto hidráulico _____	84
9.3.2. Determinación del potencial hidrógeno en la mezcla _____	86
9.3.3. Determinación de la temperatura de la mezcla _____	87
<b>9.4. Pruebas realizadas a Concreto endurecido _____</b>	<b>88</b>
9.4.1. Preparación de los especímenes _____	88
9.4.1.1. Método de prueba para el curado de especímenes _____	88
9.4.1.2. Práctica para el cabeceo de especímenes de concreto con azufre. _____	89
9.4.2. Pruebas destructivas _____	90
9.4.2.1. Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de cilindros de concreto. _____	90
9.4.2.2. Método de prueba estándar para la resistencia a la flexión en vigas de concreto. _____	93
9.4.3. Pruebas no destructivas _____	94
9.4.3.1. Método de prueba estándar para la velocidad de pulso a través del concreto _____	94
9.4.3.2. Resistividad eléctrica _____	95
<b>10. Resultados y discusiones _____</b>	<b>96</b>
<b>10.1. Agregados pétreos _____</b>	<b>96</b>
10.1.1. Arena _____	96
10.1.2. Grava _____	98
<b>10.2. Cemento _____</b>	<b>99</b>
<b>10.3. Diseño de mezclas _____</b>	<b>99</b>
<b>10.4. Concreto fresco _____</b>	<b>101</b>



<b>10.5 Concreto endurecido</b>	<b>102</b>
10.5.1 Compresión simple	102
10.5.2 Flexión	103
10.5.3 Velocidad de Pulso Ultrasónico	104
10.5.4 Resistividad Eléctrica	105
<b>11. Conclusiones</b>	<b>107</b>
<b>12. Bibliografía</b>	<b>108</b>



## Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 6-1 Proceso de fabricación del cemento (monografías.com, 2017)</i> .....	19
<i>Ilustración 6-2 Determinación de la densidad. (Martinez Balvanera, 2017)</i> .....	23
<i>Ilustración 6-3 Aparato de Vicat (Martinez Balvanera, 2017)</i> .....	24
<i>Ilustración 6-4 agujas de Gillmore (LBEQUIM, 2017)</i> .....	25
<i>Ilustración 6-5 Agregados pétreos (Tecnología de materiales, 2017)</i> .....	36
<i>Ilustración 6-6 Agregado natural triturado mecánicamente (La macuira, 2017)</i> .....	37
<i>Ilustración 7-1 Cemento CPC 40 RS (CYCNA, 2017)</i> .....	46
<i>Ilustración 9-1 cuarteo de grava mediante pala, y de arena por divisor de muestras (Martinez Balvanera, 2017)</i> .....	61
<i>Ilustración 9-2 Medidas cono troncocónico y muestra seca superficialmente (NMX-C-165-ONNCCE, 2014)</i> ..	63
<i>Ilustración 9-3 En la izquierda se observa la comprobación del secado superficial de la arena por medio del molde troncocónico, en la derecha se tomó la masa del material para realizar la prueba.</i> .....	64
<i>Ilustración 9-4 Izquierda: saturación del material, previo al secado. Derecho: secado del agregado grueso</i> ..	65
<i>Ilustración 9-5 En la izquierda se aprecia el llenado del molde con grava, en la izquierda se observa el llenado con grava (Martinez Balvanera, 2017)</i> .....	66
<i>Ilustración 9-6 Determinación de la masa volumétrica seca varillada de arena y grava (Martinez Balvanera, 2017)</i> .....	68
<i>Ilustración 9-7 Equipo "Raf-Tap" utilizado para granulometría en arenas (Martinez Balvanera, 2017).</i> .....	69
<i>Ilustración 9-8 Obtención de granulometría en grava (Martinez Balvanera, 2017).</i> .....	70
<i>Ilustración 9-9 Determinación de colorimetría en una muestra de arena (Martinez Balvanera, 2017)</i> .....	71
<i>Ilustración 9-10 Muestra en reposo para sedimentación (Martinez Balvanera, 2017)</i> .....	72
<i>Ilustración 9-11 Determinación de densidad en arena</i> .....	77
<i>Ilustración 9-12 Determinación de la densidad en gravas</i> .....	78
<i>Ilustración 9-13 muestras en reposo para obtener equivalente de arena (Martinez Balvanera, 2017).</i> .....	80
<i>Ilustración 9-14 Realización de una mezcla normalizada (Martinez Balvanera, 2017).</i> .....	82
<i>Ilustración 9-15 Molde troncocónico para determinación de revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE, 2010)</i> .....	85
<i>Ilustración 9-16 Proceso para la determinación del revenimiento</i> .....	86
<i>Ilustración 9-17 "Máquina universal Forney"</i> .....	91
<i>Ilustración 9-18 "Prueba de compresión"</i> .....	92
<i>Ilustración 10-1 Resultado granulométrico de la arena</i> .....	97
<i>Ilustración 10-2 Resultado del análisis granulométrico de la grava</i> .....	98
<i>Ilustración 10-3 Resultados de la prueba de compresión simple a 7 días</i> .....	103
<i>Ilustración 10-4 Resultados de la prueba de compresión simple a 14 días</i> .....	103



<i>Ilustración 10-5 Resultados de la prueba de compresión simple a 28 días .....</i>	<i>103</i>
<i>Ilustración 10-6 Resultados de la prueba de flexión a 14 días .....</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 10-7 Resultados de la prueba de flexión a 7 días .....</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 10-8 Resultados de la prueba de flexión a 28 días .....</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 10-9 Resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico a 14 días .....</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 10-10 Resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico a 7 días .....</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 10-11 Resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico a 28 días .....</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 10-12 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a 14 días .....</i>	<i>106</i>
<i>Ilustración 10-13 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a 7 días .....</i>	<i>106</i>
<i>Ilustración 10-14 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a 28 días .....</i>	<i>106</i>



## Índice de tablas

Tabla 6-1 Tipos de cemento según la (NMX-C-414-ONNCCE, 2016)	21
Tabla 6-2 Tipos de cemento	21
Tabla 6-3 Componentes de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2010).	28
Tabla 6-4 Requisitos de los componentes principales (NMX-C-414-ONNCCE, 2016).	29
Tabla 6-5 Especificaciones físicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2016).	29
Tabla 6-6 Especificaciones químicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2010).	30
Tabla 6-7 Especificaciones del cemento con características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2016).	30
Tabla 6-8 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas (NMX-C-122-ONNCCE-2004, 2004)	33
Tabla 6-9 Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en las aguas (INSTITUTO DEL CONCRETO, 1997)	34
Tabla 7-1: Análisis del agua utilizada para la caracterización del cemento y la elaboración de los especímenes de concreto (Bernabé Reyes, 2015).	47
Tabla 7-2 Propiedades típicas del CRISOTAN® R-5 (Ficha técnica CRISOTAN R-5)	49
Tabla 7-3 Dosificación del CRISOTAN R-5 LÍQUIDO /100Kg de cemento	50
Tabla 8-1 Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción (ACI 211, 1991).	54
Tabla 8-2 Relaciones entre la relación Agua/Cemento y la resistencia a la compresión del concreto (ACI 211, 1991)	56
Tabla 8-3 Relaciones entre la relación Agua/Cemento y la resistencia a la compresión del concreto (ACI 211, 1991).	57
Tabla 8-4 Volumen de agregado grueso por unidad de volumen del concreto (ACI 211, 1991)	58
Tabla 9-1 Especificaciones correspondientes a los límites permisibles.	74
Tabla 9-2 límites máximos de partículas deleznales.	75
Tabla 9-3 Tolerancia en revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE, 2010)	84
Tabla 9-4 Criterios de Evaluación para la Calidad del Concreto	94
Tabla 9-5 Criterios de evaluación. (Red Durar, 2000).	95
Tabla 10-1 Resultados obtenidos de las pruebas realizadas a la arena	97
Tabla 10-2 Resultados de las pruebas realizados a la grava	98
Tabla 10-3 Resultados de los ensayos realizados al cemento	99
Tabla 10-4 Resumen de las cantidades para 1 m <sup>3</sup> .	101
Tabla 10-5 Resultados obtenidos de pruebas realizadas al concreto fresco.	101



## 1. Resumen

El presente estudio es una investigación sobre el uso de un concreto elaborado con cemento tipo CPC 40 RS, esto debido a que existe una gran incertidumbre entre las cantidades a usar a fin de obtener una resistencia lo más cercana posible a la de diseño. Esta incertidumbre se debe a que al ser de grado 40 obtiene mayores resistencias que las de un cemento de grado 30. Además, al usar algún tipo de aditivo en el concreto en estado fresco, también se ve afectada su resistencia. En este estudio se ha usado un aditivo superplastificante, el cual, al permitir una reducción de agua, logra disminuir la relación agua-cemento sin demeritar la trabajabilidad del concreto fresco. Al reducir esta relación también se ve afectada la resistencia del concreto.

Todos estos factores hacen que al utilizar las cantidades indicadas por algún método de proporcionamiento de concretos se obtengan concretos con resistencias superiores a las de diseño, lo cual en primera instancia es muy bueno, pero económicamente llega a ser contraproducente ya que se están empleando mayores cantidades de material, incrementando así su costo.

Durante esta investigación se partió de un proporcionamiento obtenido por el método ACI, y de estos datos se fue variando un porcentaje de cemento y de aditivo (calculado a partir de la masa de cemento dada por el método), con la finalidad de obtener un concreto de  $f'c$  de 25 Mpa. Esto sin que se viera afectado el revenimiento de 15 cm, ni la trabajabilidad de la mezcla.

Para ello se realizó una muestra testigo, con las cantidades indicadas por el método. Y se realizaron varias mezclas adicionales con las variaciones indicadas, las cuales fueron comparadas con la mezcla testigo. Aunque se hicieron unas nueve mezclas distintas, para esta investigación solo se reportan tres más el testigo. Esto debido a que son las que obtuvieron un mejor comportamiento.

**Palabras clave:** Concreto, Aditivo, Resistencia, Trabajabilidad, Diseño.



## 2. Abstract

This study is an investigation into the use of a concrete made with cement type CPC 40 RS, this is because that there is great uncertainty among the amounts to use in order to obtain a resistance as close as possible to the design. This uncertainty is due to that being 40 grade gets higher resistance than those of a cement of grade 30. In addition, by using some kind of additive on concrete in fresh State, its resistance is also affected. A superplasticizer additive, which, by allowing a reduction of water, achieved lower water-cement the relationship without diminishing the workability of the fresh concrete is used in this study. The concrete strength is affected by reducing this relationship also.

All these factors make using the quantities indicated by some method of proportioning of concrete are obtained for concrete with resistances greater than the design, which in the first instance is very good, but economically becomes counterproductive since you are using larger amounts of material, thus increasing its cost.

During this research he left a Proportioning obtained by ACI method, and these data a percentage of cement and additive (calculated from the mass of cement by the method), was changing in order to get a  $f'c$  of 25 Mpa concrete. This without that would be affected slump of 15 cm, or the workability of the mixture.

This witness, has made a sample with the quantities indicated by the method. And conducted several additional mixtures with specified variations, which were compared with the mixture control. Although some nine different mixtures were made, for this research only reported three more witness. This are that obtained a better performance.

**Keywords:** Concrete, additive, resistance, workability, design.



### 3. Justificación

El concreto es una piedra artificial que tiene la ventaja de dejarse moldear, es por esta razón, que ha tenido un gran uso en la construcción de edificios e infraestructura, es por esto que la industria de la construcción se ha preocupado en buscar la forma de producir concretos con mejores desempeños, y que al mismo tiempo sean económicos.

Dentro de los componentes del concreto, el cemento suele ser el más caro, ya que el precio del cemento, por kilo, es varias veces mayor que el de los agregados, es decir, el cemento constituye alrededor del 10% del volumen absoluto total del concreto, pero puede llegar a representar más del 70% del costo del mismo (NEVILLE, 1998). Es por esta razón que al realizar un correcto proporcionamiento se puede minimizar la cantidad de cemento sin sacrificar la resistencia, durabilidad y demás propiedades del concreto.

Bajo este esquema se ha decidido realizar el presente estudio con el objetivo de reducir la cantidad de cemento utilizado en un concreto, pero sin demeritar su resistencia mecánica y demás propiedades.

Para lograr esto se planea utilizar un fluidificante en la elaboración del concreto, para poder reducir la relación agua-cemento y obtener mejores resistencias con la misma cantidad de cemento manteniendo la trabajabilidad del concreto fresco.



## 4. Hipótesis

En algunos estudios realizados por diversos autores se ha llegado a concluir que la resistencia del concreto es inversamente proporcional a la relación agua cemento. Es decir que mientras menor sea esta relación, mayor será la resistencia.

Es por esta razón que suponemos que, al reducir la cantidad de agua utilizada en la elaboración de concreto, mediante un aditivo súper plastificante podremos aumentar su resistencia. De esta manera se podría disminuir un porcentaje del cemento utilizado sin afectar la resistencia mecánica de diseño ni la trabajabilidad del concreto.

## 5. Objetivos

### **Objetivo general**

Crear un proporcionamiento basado en método ACI para elaborar concreto, utilizando un cemento tipo CPC 40 y un aditivo fluidificante. En el que se reduzca el consumo de cemento utilizado, pero sin sacrificar la trabajabilidad de la mezcla ni la resistencia del concreto.

### **Objetivos específicos**

- Disminuir la cantidad de cemento empleado para la elaboración de concreto.
- Encontrar la cantidad optima de aditivo fluidificante que permita obtener la resistencia deseada, con una disminución de cemento.
- Reducir el costo en la elaboración de concreto.



## 6. Marco teórico

### 6.1 Antecedentes

Derivado del vocablo inglés *concrete*. El concreto es la mezcla de piedras y mortero conocida también como hormigón. Es un material muy frecuente en la construcción ya que tiene la capacidad de resistir grandes esfuerzos de compresión. Sin embargo, no se desempeña bien ante otros tipos de esfuerzos, como la flexión o la tracción. Por lo tanto, el concreto suele utilizarse en conjunto con el acero, en un compuesto que recibe el nombre de concreto armado (RODRÍGUEZ, 2013).

El uso de materiales de cementación es muy antiguo. Los egipcios ya utilizaban yeso calcinado y puro. Los griegos y romanos empleaban caliza calcinada y posteriormente, aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo y tejas quebradas; éste es conocido como el primer concreto de la historia. Un mortero de cal no endurece con el agua y para la construcción con agua, los romanos mezclaban cal con ceniza volcánica o con tejas de arcilla quemada, finamente trituradas. La sílice activa y la alúmina que se encuentran en las cenizas y en las tejas se combinaban con la cal para producir lo que fue conocido como cemento puzolánico, proveniente del nombre del pueblo de Puzzuoli, cerca del Vesubio, donde se encontraron por primera vez esas cenizas volcánicas. El nombre de cemento puzolánico se utiliza hasta nuestros días para describir cementos obtenidos de moler materiales naturales a temperatura normal.

En la edad media hubo una disminución general en la calidad y el uso del cemento, y solamente en el siglo XVIII se encuentra un adelanto en el conocimiento de los cementos. En 1756, JOHN SMEATON fue comisionado para reconstruir el faro de Eddyston, en la costa de Cornwall, y encontró que el mejor mortero se obtenía cuando se mezclaba "puzolana" con caliza que contenía una alta cantidad de material arcilloso. (Puzolana: Material silíceo o sílicoaluminoso que posee propiedad puzolánica, es decir, el material una vez pulverizado tiene la aptitud de reaccionar químicamente en presencia de agua con hidróxido de calcio a la temperatura ambiente, formando compuestos que poseen propiedades



hidráulicas, o sea, que el material finamente dividido tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua y formar compuestos estables).

Al reconocer el papel de la arcilla, que hasta entonces se consideraba indeseable, SMEATON fue el primero en conocer las propiedades químicas de la cal hidráulica. A partir de esto, se desarrollaron otros tipos de cementos hidráulicos, como el "cemento romano" que obtuvo JOSEPH PARKER por calcinación de nódulos de caliza arcillosa, que vinieron a culminar en la patente del "cemento Portland" efectuada en 1824 por Joseph Aspdin, un constructor de Leeds (Inglaterra). Este cemento se preparaba calentando una mezcla de arcilla finamente triturada y caliza dura en un horno, hasta eliminar  $\text{CO}_2$ , esta temperatura era mucho más baja que la necesaria para la formación de clinker, Aspdin llamó su cemento "CEMENTO PORTLAND" debido a la semejanza de color y calidad entre el cemento fraguado y la piedra Portland – una caliza obtenida en una cantera de DORSET, INGLATERRA (RODRÍGUEZ, 2013).

A ASPDIN se le reconoce como el inventor del "cemento Portland", aunque su método de fabricación fue conservado en secreto (su patente se escribió en forma tan confusa y oscura que, durante algún tiempo, nadie pudo imitar su producto). El prototipo del cemento moderno fue obtenido en 1845 por ISAAC JOHNSON, quien quemó una mezcla de arcilla y caliza hasta la formación de clinker, con la cual se produjo la reacción necesaria para la formación de un compuesto fuertemente cementoso.

JOHNSON describió claramente sus experimentos y encontró que la temperatura de calcinación debía elevarse hasta el máximo que pudiera lograrse, claro está, con los métodos y equipos de ese tiempo.

Tomando como base los experimentos de JOHNSON, la fabricación del cemento Portland se inició en varias factorías, no solo en Inglaterra, sino en algunos países de Europa. La cantidad producida fue muy pequeña y únicamente cerca del año de 1900, empezó el crecimiento notable de la industria del cemento, debido a dos factores:

- a) Experimentos realizados por los franceses VICAT y LE CHATELIER y el alemán MICHAELIS, con los cuales se logró producir cemento de calidad



uniforme de modo que pudiera ser usado en la industria de la construcción y

- b) Dos invenciones mecánicas muy importantes los HORNOS ROTATORIOS para la calcinación y el MOLINO TUBULAR para la molienda, con esas dos máquinas pudo entonces producirse el cemento Portland en cantidades comerciales, induciendo así el rápido crecimiento de ésta industria. (RIVERA, 2010)

## 6.2 Componentes del concreto

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

### 6.2.1 Pasta de cemento

La pasta está compuesta de cemento Portland, agua y aire atrapado o aire incluido intencionalmente. Ordinariamente, la pasta constituye del 25 al 40 por ciento del volumen total del concreto.

La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta. En un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado está completamente cubierta con pasta, así como también todos los espacios entre partículas de agregado.

La gran demanda por el uso de este material se debe principalmente a que el concreto endurecido se transforma en un material de construcción resistente, no combustible, durable, con resistencia al desgaste y prácticamente impermeable que requiere poco o nulo mantenimiento. Además, el concreto también es un excelente material de construcción porque puede moldearse en una gran variedad de formas, colores y texturizados para ser usado en un número ilimitado de aplicaciones.



### 6.2.1.1 Cemento

Es un material inorgánico (clinker) finamente pulverizado que, al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava, asbestos u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de las reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad (NOM-040-ECOL, 2002).

#### CEMENTO PORTLAND

Producto que se obtiene por la pulverización del clinker Portland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio. Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionales deben ser pulverizados conjuntamente con el clinker.

#### Proceso de fabricación

Los dos materiales principales con los que se fabrica el cemento Portland son: un material calcáreo, tal como piedra caliza, conchas, greda o marga, y un material arcilloso (en el cual la sílice es el constituyente importante) tales como arcilla, pizarra o escoria de altos hornos. Algunas veces los materiales calcáreos y arcillosos se encuentran combinados en depósitos naturales. Debe mantenerse la dosificación de las materias primas en proporciones muy precisas.

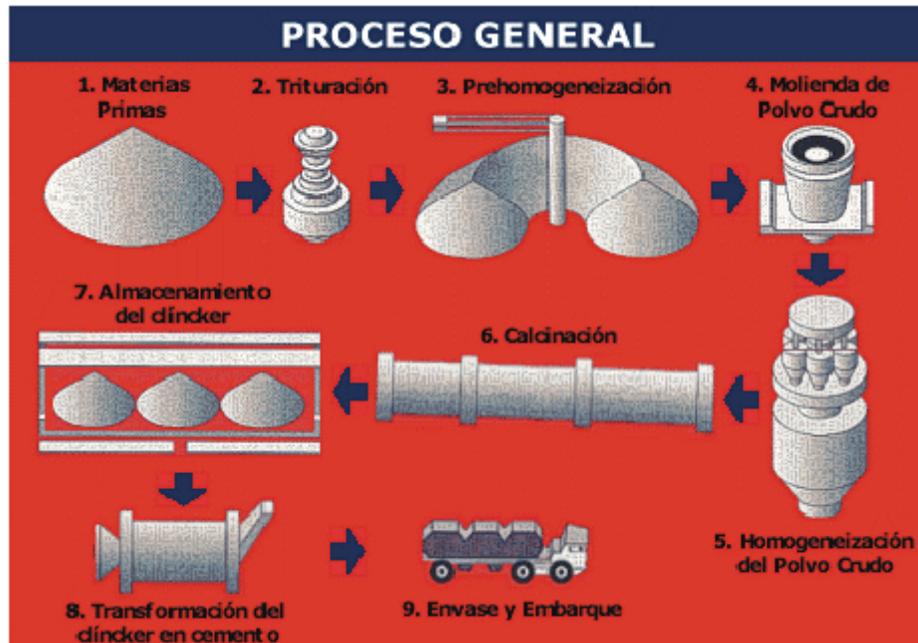


Ilustración 6-1 Proceso de fabricación del cemento (monografias.com, 2017)

Las materias primas, finamente molidas e íntimamente mezcladas, se calientan hasta principio de la fusión (alrededor de  $1500^{\circ}\text{C}$ ), usualmente en grandes hornos giratorios, que pueden llegar a medir más de 200m de longitud y 5.50m de diámetro. Al material parcialmente fundido que sale del horno se le denomina “clinker”. El clinker enfriado y molido a polvo muy fino, es lo que constituye el cemento Portland comercial. Durante la molienda se agrega una pequeña cantidad de yeso (3 o 4 por ciento) para controlar las propiedades de fraguado y en los últimos tiempos, material puzolánico, que se tritura hasta obtener un polvo fino; el producto comercial resultante es el cemento Portland, utilizado a gran escala en todo el mundo. Para los cementos con aire incluido, el material necesario para impartir las propiedades del aire incluido, se añade durante la molienda del clinker. La mezcla y la trituración de materias primas pueden efectuarse tanto en húmedo como en seco, de donde provienen los nombres de proceso "húmedo" o "seco". El método de fabricación a seguir depende, de la naturaleza de las materias primas usadas y principalmente de factores económicos.



## Clasificación

A medida que varían los contenidos de  $C_2S$ ,  $C_3S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  se modifican las propiedades del cemento Portland, por lo tanto, se pueden fabricar diferentes tipos con el fin de satisfacer ciertas propiedades físicas y químicas para situaciones especiales.

- CEMENTO PORTLAND TIPO 1: Es el destinado a obras de concreto en general, al que no se le exigen propiedades especiales.
- CEMENTO PORTLAND TIPO 1-M: Es el destinado a obras de concreto en general, al que no se le exigen propiedades especiales, pero tiene resistencias superiores a las del tipo 1.
- CEMENTO PORTLAND TIPO 2: Es el destinado en general a obras de concreto expuestas a la acción moderada de sulfatos y a obras donde se requiera moderado calor de hidratación.
- CEMENTO PORTLAND TIPO 3: Es el que desarrolla altas resistencias iniciales.
- CEMENTO PORTLAND TIPO 4: Es el que desarrolla bajo calor de hidratación.
- CEMENTO PORTLAND TIPO 5: Es el que ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.
- CEMENTO PORTLAND CON INCORPORADORES DE AIRE: Son aquellos a los que se les adiciona un material incorporador de aire durante la pulverización; para identificarlos se les coloca una "A" así por ejemplo cemento Portland tipo 1-A o tipo 3-A, etc.
- CEMENTO PORTLAND BLANCO: Es el que se obtiene con materiales debidamente seleccionados que le confieren una coloración blanca; prácticamente cumple las especificaciones del cemento Portland tipo 1.



Tabla 6-1 Tipos de cemento según la (NMX-C-414-ONNCCE, 2016)

TIPOS DE CEMENTO		CLASE RESISTENTE	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES	
TIPO	DENOMINACIÓN		NOMENCLATUR	CARACTERÍSTICA
CPC	Cemento Portland Ordinario	20	RS	Resistente a los Sulfatos
CPP	Cemento Portland Puzolánico	30		
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30R	BRA	Baja Reactividad Alkali-Agregado
CPC	Cemento Portland Compuesto	40	BCH	Bajo Calor de Hidratación
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	40R	B	Blanco
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno			

La clase resistente está referida a la resistencia a la compresión en donde se esperan 20, 30, o 40 Mega pascales (MPa) a 28 días, según sea el caso, en especímenes cúbicos de mortero elaborado con el cemento a prueba. La R representa una rápida adquisición de resistencia en el cemento. La prueba a compresión en cementantes está regida por la norma mexicana (NMX-C-061-ONNCCE, 2010).

Tabla 6-2 Tipos de cemento

NMX-C-414-ONNCCE-2004	ASTM C-150
CPO 30, CPO 30R, CPC 30, CPC 30R	Tipo I
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH y/o RS	Tipo II
CPO 40, CPO 40R, CPC 40R	Tipo III
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH y/o RS	Tipo IV
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH y/o RS	Tipo V



## Propiedades del cemento

La mayor parte de las especificaciones para cemento Portland establecen límites a la composición química y algunas propiedades físicas, por lo tanto, el conocimiento de algunas de estas propiedades es provechoso para interpretar los resultados de las pruebas del cemento. (NMX-C-414-ONNCCE, 2016)

## Densidad

La densidad del cemento Portland varía generalmente entre 2,90 y 3,20 g/cm<sup>3</sup> dependiendo básicamente de la cantidad y densidad del material puzolánico que se adicione. La densidad de un cemento no indica la calidad del mismo; su uso principal radica en dosificación y control de mezclas.

La densidad del cemento se determina generalmente con el frasco de Le Chatelier. Este frasco permite determinar el volumen correspondiente a una cierta masa de cemento (64 g), por el desplazamiento de un líquido colocado dentro del frasco. El líquido empleado es keroseno libre de agua o nafta con una gravedad no inferior a 62° A.P.I., ya que no es posible emplear agua pues el cemento iniciaría sus reacciones de hidratación.

En este caso, la temperatura a la cual se haga la prueba no ocasiona mucha diferencia en los resultados; pero es importante que la temperatura del frasco, del líquido y del cemento se mantenga constante durante toda la práctica (NMX-C152-ONNCCE, 2014).



Ilustración 6-2 Determinación de la densidad. (Martinez Balvanera, 2017)

### Finura

La importancia de la finura en el cemento radica en que a mayor finura el cemento desarrolla mayor resistencia, pero desprende más calor; esto es debido principalmente, a que granos gruesos pueden durar varios años en hidratarse, e inclusive no llegar jamás a realizarlo totalmente, mientras que, cuanto más fino sea el cemento, mayor será la cantidad de material que se hidrata, ya que la superficie total en contacto con el agua es mucho más grande. Al hidratarse un mayor porcentaje de la masa total del cemento, ésta masa reacciona, logrando un desarrollo más alto de resistencia, pero como desprende calor al realizar este proceso, también será mayor la cantidad de calor desprendido.

La medida de la finura se expresa por el área de las partículas contenidas en una masa unitaria del material, lo cual se denomina "Superficie Específica" y sus unidades de medida son unidades de área por unidades de masa así por ejemplo  $\text{cm}^2/\text{g}$  o  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

### Consistencia normal

Con el propósito de poder determinar algunas propiedades del cemento como tiempos de fraguado o estabilidad volumétrica, se debe realizar una mezcla de cemento y agua llamada pasta; puesto que las propiedades de la pasta se ven afectadas por las cantidades de cada uno de los componentes que entran a formar



parte de la mezcla, se debe preparar una pasta "normalizada", con la cantidad de agua necesaria para que la hidratación del cemento sea lo más exacta posible; ésta pasta se denomina de consistencia normal.

La pasta de consistencia normal se determina mediante la NMX-C-057-ONCCE-2010; el ensayo consiste en averiguar la cantidad de agua en porcentaje con respecto a la masa de cemento usada que debe tener la pasta de tal manera que al colocarla en el aparato de "Vicat" (Figura 6-3.) la penetración de  $10 \pm 1$  mm sea en 30s por lo general, el porcentaje de agua varía entre 23 y 33% (NMX-C-057-ONCCE, 2010).



*Ilustración 6-3 Aparato de Vicat (Martinez Balvanera, 2017)*

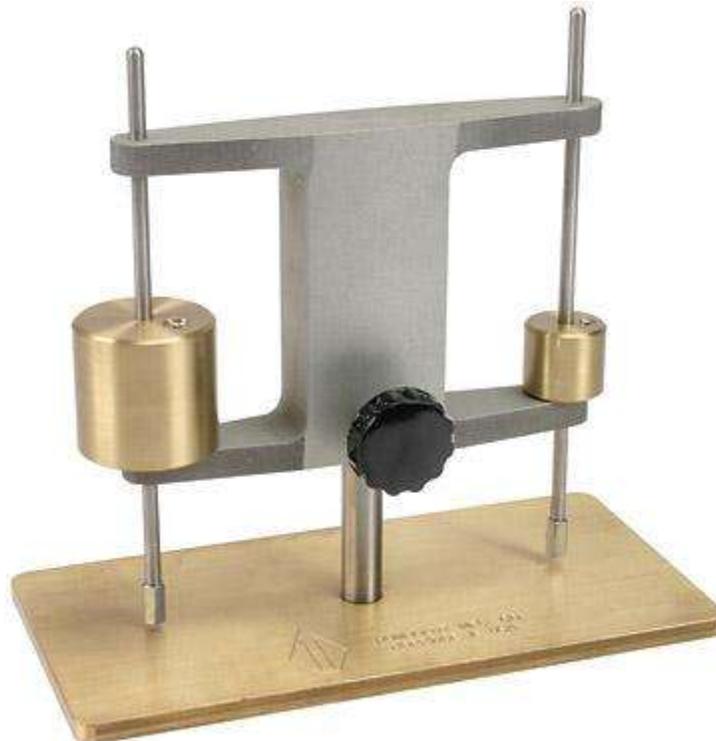


## Fraguado

Fraguado se refiere al paso de la mezcla del estado fluido o plástico al estado sólido. Aunque durante el fraguado la pasta adquiere alguna resistencia, para efectos prácticos es conveniente distinguir el fraguado del endurecimiento, pues este último término se refiere al aumento de resistencia de una pasta de cemento fraguada.

En la práctica se utilizan los términos de fraguado inicial y fraguado final para describir etapas del fraguado elegidas arbitrariamente. Los tiempos de fraguado de la pasta, se emplean como control de calidad del cemento, y se pueden determinar con las agujas de GILLMORE o con el aparato de VICAT que es el método más utilizado.

Cuando la penetración de la primera aguja no penetra, sino que deja una ligera huella se dice que ha transcurrido el tiempo de fraguado inicial el cual no debe ser menor de 45 minutos para cualquier tipo de cemento. Cuando la segunda aguja no penetra, sino que deja una ligera huella se dice que ha transcurrido el tiempo de fraguado final el cual no debe ser mayor a 8 horas para cualquier tipo de cemento.



*Ilustración 6-4 agujas de Gillmore (LBEQUIM, 2017)*



### Falso fraguado

Se da el nombre de falso fraguado a una rigidez prematura y anormal del cemento, que se presenta dentro de los primeros minutos después de haberlo mezclado con agua.

El falso fraguado se pone en evidencia por una gran pérdida de plasticidad, sin generar mucho calor poco después de haberse realizado la mezcla. Cuando esta pasta endurecida se remezcla, sin adicionar agua, su plasticidad se recupera y fragua normalmente sin pérdida de resistencia.

Si, por el contrario, la mezcla no recupera su plasticidad y desprende calor en forma apreciable se dice que lo que ocurrió fue un fraguado relámpago, o sea un verdadero fraguado pero en muy corto tiempo (NMX-C-132-ONNCCE, 2014).

Un falso fraguado muy marcado puede causar dificultades desde el punto de vista de la colocación y manipulación, pero esto no es probable donde el concreto se mezcla generalmente por un tiempo largo, como ocurre en un camión mezclador, o cuando éste es remezclado antes de colocarlo o transportarlo, como sucede en operaciones de concreto bombeado. Esto debe ser más digno de atención cuando se mezcla por un tiempo corto en mezcladoras fijas y se transporta en equipos sin agitador, como sucede en algunos tipos de obras.

### Estabilidad volumétrica

El cemento que muestra grandes expansiones luego de fraguado se conoce con el nombre de cemento expansivo; este es el peor defecto que puede presentar un cemento pues las estructuras hechas con él quedan seriamente amenazadas.

Es esencial que la pasta de cemento, una vez fraguada, no sufra un gran cambio en volumen, en particular no debe de haber una expansión apreciable, la cual, bajo condiciones de esfuerzo, podría ocasionar un rompimiento de la pasta de cemento endurecida. Tal expansión puede tener lugar debido a una hidratación retardada o lenta o a otra reacción de algún compuesto presente en el cemento endurecido, particularmente  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  o  $\text{CaSO}_4$  (yeso).



Si las materias primas adicionadas al horno contienen más cal de la que puede combinarse con los otros óxidos, el exceso permanecerá en estado libre. Esta cal fuertemente calcinada se hidrata solo en forma muy lenta y puesto que la cal apagada ocupa un volumen más grande que el óxido de calcio original, se produce una expansión. Un cemento también puede tener variaciones de volumen debidas a la presencia de MgO, el cual reacciona con el agua en forma similar al CaO. El sulfato de calcio es el tercer compuesto capaz de causar expansión; si el contenido de yeso sobrepasa la cantidad que puede reaccionar con el C<sub>3</sub>A durante el fraguado, se presentará una variación de volumen en forma de expansión lenta.

### Calor de hidratación

El calor de hidratación es el calor generado cuando reaccionan el cemento y el agua. La cantidad de calor generado depende principalmente de la composición química del cemento; a tasa de generación de calor la afecta la finura y temperatura de curado, así como la composición química (NMX-C-151-ONNCCE, 2014).

De acuerdo con las reacciones químicas, la hidratación de compuestos del cemento es exotérmica, y pueden liberar hasta 500 joules por gramo (120 calorías/gramo). Puesto que la conductividad del concreto es relativamente baja, actúa como aislante, y en el interior de una masa grande de concreto, la hidratación puede producir un fuerte aumento en temperatura. Al mismo tiempo, la masa exterior del concreto pierde algo de calor, de modo que se produce un fuerte gradiente de temperatura y durante el enfriamiento posterior del interior, pueden producirse graves agrietamientos. Esto es especialmente importante en estructuras como aquellas de gran masa, donde la rapidez y la cantidad de calor generado son importantes; si no se disipa este calor rápidamente, puede ocurrir una importante elevación de temperatura en el concreto, lo cual puede resultar inconveniente al ir acompañada de una dilatación térmica. El enfriamiento posterior del concreto endurecido a la temperatura ambiente puede crear contracciones en la masa conocidas como retracción de fraguado, y originar esfuerzos perjudiciales. En el otro extremo, el calor producido por hidratación



puede impedir el congelamiento del agua en los capilares de concreto recientemente aplicado, en aguas heladas y es, por lo tanto, ventajoso que haya una fuerte dispersión de calor. Sin duda, es aconsejable conocer las propiedades productoras de calor de diferentes cementos para poder elegir el cemento más adecuado para cada finalidad.

Para efectos prácticos no importa necesariamente el calor total de hidratación sino la velocidad de desarrollo del calor. La misma cantidad total de calor producida en un período mayor, puede dispersarse en mayor grado, con menor aumento consecuente de la temperatura.

### Resistencia del cemento

La resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad del material que posiblemente resulte más importante en cuanto a los requisitos de usos estructurales. Por lo tanto, no es sorprendente que las pruebas de resistencia estén indicadas en todas las especificaciones del cemento.

La resistencia de un mortero o concreto depende de la cohesión de la pasta de cemento, de su adhesión a las partículas de los agregados y en cierto grado, de la resistencia del agregado mismo.

Para determinar la resistencia del cemento se utilizan morteros, es decir, mezcla de agua, cemento y agregado fino; de proporciones determinadas, hechos con materiales específicos en condiciones estrictamente controladas.

### Especificaciones

Los componentes de los cementos deben cumplir con los límites de la tabla 6-3.

Tabla 6-3 Componentes de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2010).

Tipo	Denominación	Componentes (% masa)					Minoritarios (1)
		Principales					
		Clinker pórtland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos (2)	Humo de sílice	caliza	



CPO	Cemento Pórtland Ordinario	95-100	-	-	-	-	0-5
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	50-94	-	6-50	-	-	0-5
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	40-94	6-60	-	-	-	0-5
CPC	Cemento Pórtland Compuesto <sup>(3)</sup>	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice	90-99	-	-	1-10	-	0-5
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto horno	20-39	61-80	-	-	-	0-5

(1) Los componentes minoritarios deben ser uno o más de los componentes principales representados en la tabla.

(2) Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes.

(3) El Cemento Pórtland compuesto debe llevar como mínimo dos componentes principales, excepto cuando se adicione caliza, ya que ésta puede ser en forma individual o en conjunto con clinker + yeso.

Tabla 6-4 Requisitos de los componentes principales (NMX-C-414-ONNCCE, 2016).

Componente granulada de alto hono	Indice de actividad con cemento CPO 30 a 28 días (% mínimo)	Carbonatos totales (% mínimo)
Escoria granulada de alto horno	75	-
Puzolana	75	-
Humo de sílice	75	-
Caliza	-	75

Tabla 6-5 Especificaciones físicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2016).

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



30 R	-	30	50	45	600	0.80	0.20
40	20	40	-	45	600	0.80	0.20
40 R	30	40	-	45	600	0.80	0.20

Para los siguientes tipos de cemento y todas las clases resistentes se deben cumplir con las especificaciones químicas de la tabla 6-6.

Tabla 6-6 Especificaciones químicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2010).

Propiedades	Tipos de cemento	Especificación (% en masa)
Pérdida por ignición	CPO, CEG	Max 5.0 %
Residuo insoluble	CPO, CEG	Max 5.0 %
Sulfato (SO <sub>3</sub> )	Todos	Max 4.0 %

Tabla 6-7 Especificaciones del cemento con características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2016).

Nomenclatura	Característica especial	Expansión por ataque de sulfatos	Expansión por la reacción álcali agregado (máx %)		Calor de hidratación (max) kJ/kg (kcal/kg)		Blancura (mín %)
		1 año	14 días	56 días	7 días	28 días	
RS	Resistente a los sulfatos	0.10	-	-	-	-	-
BRA	Baja reactividad Álcali Agregado	-	0.020	0.060	-	-	-
BCH	Bajo calor de Hidratación	-	-	-	250 (60)	290 (70)	-
B	Blanco	-	-	-	-	-	70

### 6.2.1.2 Agua

El agua de mezcla cumple dos funciones muy importantes, permitir la hidratación del cemento y hacer la mezcla manejable. De toda el agua que se emplea en la preparación de un concreto, parte hidrata el cemento, el resto no presenta ninguna alteración y con el tiempo se evapora; como ocupaba un espacio dentro de la mezcla, al evaporarse deja vacíos los cuales disminuyen la resistencia y la durabilidad del concreto. La cantidad de agua que requiere el cemento para su hidratación se encuentra alrededor del 25% al 30% de la masa del cemento, pero con esta cantidad la mezcla no es manejable, para que la mezcla empiece a



dejarse trabajar, se requiere como mínimo una cantidad de agua del orden del 40% de la masa del cemento, por lo tanto, de acuerdo con lo anterior como una regla práctica, se debe colocar la menor cantidad de agua en la mezcla, pero teniendo en cuenta que el concreto sea trabajable.

A continuación, se presenta algunas ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua:

- Se incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión.
- Se tiene menor permeabilidad, y por ende mayor hermeticidad y menor absorción.
- Se incrementa la resistencia al intemperismo.
- Se logra una mejor unión entre capas sucesivas y entre el concreto y el esfuerzo.
- Se reducen las tendencias de agrietamientos por contracción.

Como norma general se considera que el agua es adecuada para producir concreto si su composición química indica que es apta para el consumo humano, sin importar si ha tenido un tratamiento preliminar o no; es decir, casi cualquier agua natural que pueda beberse y que no tenga sabor u olor notable sirve para mezclar el mortero o el concreto. Sin embargo, algunas aguas no potables pueden ser adecuadas para el concreto (RIVERA, 2010).

Las impurezas excesivas en el agua no sólo pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también pueden ser causa de eflorescencia, manchado, corrosión del esfuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad.

Para cualquier conjunto específico de materiales y de condiciones de curado, la cantidad de concreto endurecido está determinada por la cantidad de agua utilizada en relación con la cantidad de cemento.

### Características del agua

El agua que contiene menos de 2,000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos totales generalmente puede ser utilizada de manera satisfactoria para elaborar concreto.



**Carbonatos y bicarbonatos alcalinos.** Los carbonatos y bicarbonatos de sodio y potasio tienen diferentes efectos en los tiempos de fraguado de cementos distintos. El carbonato de sodio puede causar fraguados muy rápidos, en tanto que los bicarbonatos pueden acelerar o retardar el fraguado. En concentraciones fuertes estas sales pueden reducir de manera significativa la resistencia del concreto. Cuando la suma de sales disueltas exceda 1,000 ppm, se deberán realizar pruebas para analizar su efecto sobre el tiempo de fraguado y sobre la resistencia a los 28 días. También se deberá considerar la posibilidad que se presenten reacciones álcali-agregado graves.

**Cloruros.** La inquietud respecto a un elevado contenido de cloruros en el agua de mezclado, se debe principalmente al posible efecto adverso que los iones de cloruro pudieran tener en la corrosión del acero de refuerzo, o de los torones de presfuerzo. Los iones cloruro atacan la capa de óxido protectora formada en el acero por el medio químico altamente alcalino (pH 12.5) presente en el concreto. El nivel de iones cloruro solubles en el agua en el cual la corrosión del acero de refuerzo comienza en el concreto es de aproximadamente 0.15% del peso del cemento. Del contenido total de ión cloruro en el concreto, sólo es soluble en el agua aproximadamente del 50% al 85%: el resto se combina químicamente en reacciones del cemento.

El Reglamento de construcción del American Concrete Institute limita el contenido de ión cloruro soluble al agua en el concreto, a los siguientes porcentajes en peso del cemento:

- Concreto presforzado. 0.06%
- Concreto reforzado expuesto a cloruros durante su servicio. 0.15%
- Concreto reforzado que vaya a estar seco protegido contra la humedad durante su servicio. 1.00%
- Otras construcciones de concreto reforzado 0.30%

**Sulfatos.** El interés respecto a un elevado contenido de sulfatos en el agua, se debe a las posibles reacciones expansivas y al deterioro por ataque de sulfatos, especialmente en aquellos lugares donde el concreto vaya a quedar expuesto a



suelos o agua con contenidos elevados de sulfatos. Aunque se han empleado satisfactoriamente aguas que contenían 10,000 ppm de sulfato de sodio, el límite del producto químico sulfato, como  $SO_4$ , de 3,000 ppm, se deberá respetar a menos que se tomen precauciones especiales.

### Especificaciones

Las aguas a que se refiere la norma NMX-C-122-ONNCCE-2004, que se pretendan usar para la elaboración y curado del concreto hidráulico, excluyendo de ellas las aguas de mar, deben cumplir los requisitos que aparecen en la tabla 6-8. El agua de mar cuando sea imprescindible su empleo, se debe usar únicamente para la fabricación y curado de concretos sin acero de refuerzo. El agua cuyo análisis muestre que excede alguno o algunos de los límites de la tabla 6-8, se puede utilizar si se demuestra que en concretos de características semejantes elaborados con esta agua han acusado un comportamiento satisfactorio a través del tiempo en condiciones similares de exposición.

*Tabla 6-8 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas (NMX-C-122-ONNCCE-2004, 2004)*

<b>Sales e impurezas</b>	<b>Cementos ricos en calcio. Límites en p.p.m.</b>	<b>Cementos sulforesistentes. Límites en p.p.m.</b>
<b>Sólidos en suspensión</b>		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
<b>Cloruros como CL (a)</b>		
Para concreto con acero de presfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el	700 (c)	1000 (c)



aluminio, fierro galvanizado y otros similares		
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
Alcalis 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.

En la tabla 6-9. Aparecen los efectos de las impurezas sobre las propiedades del concreto.

*Tabla 6-9 Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en las aguas (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 solubles en	X	X	---	---	---	---	X	X



éter								
	X Causa efecto negativo		No causa efecto negativo					

### 6.2.2 Agregados

Los agregados son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento Portland en presencia de agua forman una piedra artificial o concreto.

Los concretos hidráulicos están constituidos en un alto porcentaje por agregados (50-80% en volumen), por lo tanto, éstos no son menos importantes que la pasta del cemento endurecida, el agua libre, el aire incorporado, el aire naturalmente atrapado, o los aditivos; por el contrario, gran parte de las características de las mezclas de concreto, tanto en estado plástico como en estado endurecido, dependen de las características y propiedades de los agregados, las cuales deben ser estudiadas para obtener concretos de buena calidad y económicos (RIVERA, 2010).

Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10 mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo del agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm.

Los agregados deben consistir en partículas con resistencia adecuada, así como resistencia a condiciones de exposición a la intemperie y no deben contener materiales que pudieran causar deterioro del concreto. Para tener un uso eficiente de la pasta de cemento y agua, es deseable contar con una granulometría continua de tamaños de partículas.



*Ilustración 6-5 Agregados pétreos (Tecnología de materiales, 2017)*

### 6.2.2.1 Origen de los agregados

#### Agregados naturales

Son aquellos procedentes de la explotación de fuentes naturales tales como: depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de río) o glaciares (cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales. Pueden usarse tal como se hallen o variando la distribución de tamaños de sus partículas, si ello se requiere. Todas las partículas que provienen de los agregados tienen su origen en una masa mayor la que se ha fragmentado por procesos naturales como intemperismo y abrasión, o mediante trituración mecánica realizada por el hombre, por lo que gran parte de sus características vienen dadas por la roca madre que le dio su origen. (RIVERA, 2010)



*Ilustración 6-6 Agregado natural triturado mecánicamente (La macuira, 2017)*

### Agregados artificiales

Por lo general, los agregados artificiales se obtienen a partir de productos y procesos industriales tales como: arcillas expandidas, escorias de alto horno, clinker, limaduras de hierro y otros, comúnmente estos son de mayor o menor densidad que los agregados comunes.

Actualmente se están utilizando concretos ligeros o ultraligeros, formados con algunos tipos de áridos los cuales deben presentar ciertas propiedades como son: forma de los granos compacta, redondeada con la superficie bien cerrada, ninguna reacción perjudicial con la pasta de cemento ni con el refuerzo, invariabilidad de volumen, suficiente resistencia a los fenómenos climatológicos; además deben de tener una densidad lo menor posible, con una rigidez y una resistencia propia suficientemente elevada y ser de calidad permanente y uniforme (RIVERA, 2010).



### 6.2.2.2 Clasificación de los agregados

#### Fino (arena).

Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o piedra triturada siendo la mayoría de sus partículas menores que 5 mm.

Los agregados finos deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables.

La granulometría más conveniente para el agregado fino, depende del tipo de trabajo, de la riqueza de la mezcla, y del tamaño máximo del agregado grueso. En mezclas más pobres, o cuando se emplean agregados gruesos de tamaño pequeño, la granulometría que más se aproxime al porcentaje máximo que pasa por cada criba resulta lo más conveniente para lograr una buena trabajabilidad

#### Agregado grueso (grava).

Los agregados gruesos consisten en una grava o una combinación de gravas o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 38 mm.

Al igual que los agregados finos los agregados gruesos deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables.

El tamaño máximo de agregado que se utiliza en el concreto tiene su fundamento en la economía. Comúnmente se necesita más agua y cemento para agregados de tamaño pequeño que para mayores tamaños.

El tamaño máximo de un agregado, es el menor tamaño de malla por el cual todo el agregado debe pasar. El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor tamaño de malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado. La malla de



tamaño máximo nominal, puede retener de 5% a 15% del agregado dependiendo del número de tamaño.

El tamaño máximo del agregado que puede ser empleado depende generalmente del tamaño y forma del elemento de concreto y de la cantidad y distribución del acero de refuerzo. Por lo común el tamaño máximo de las partículas de agregado no debe sobrepasar:

1. Un quinto de la dimensión más pequeña del miembro de concreto.
2. Tres cuartos del espaciamiento libre entre barras de refuerzo.
3. Un tercio del peralte de las losas.

Estos requisitos se pueden rebasar si, en opinión del ingeniero, la mezcla tiene la trabajabilidad suficiente para colocar el concreto sin que se formen alveolados ni vacíos.

#### 6.2.2.3 Propiedades de los agregados

##### Propiedades químicas.

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

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

##### Propiedades físicas

Las propiedades físicas que tienen mayor importancia en el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto son las siguientes:

- **Granulometría:** es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregados en una muestra. Esta proporción se suele indicar, de mayor a



menor tamaño, por una cifra que representa, en masa, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición.

- **Densidad:** La densidad de un agregado es la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión). Se usa en ciertos cálculos para proporcionamientos de mezclas y control. Generalmente no se le emplea como índice de calidad del agregado. La mayoría de los agregados naturales tienen densidades relativas entre 2.4 y 2.9 (RODRÍGUEZ, 2013).
- **Absorción y humedad.** La absorción y humedad superficial de los agregados se debe determinar de manera que se pueda controlar el contenido neto de agua en el concreto y se puedan determinar los pesos correctos de cada mezcla. La estructura interna de una partícula de agregado, está constituida de materia sólida y de vacíos que pueden o no contener agua. Por esta razón se debe determinar la cantidad de agua que posee una muestra de agregado con respecto al peso seco de la muestra.
- **Masa volumétrica:** la relación entre la masa del material que cabe en un determinado recipiente y el volumen de éste, da una cifra llamada masa unitaria. La masa unitaria compacta es otro buen índice para conocer la calidad del agregado, puesto que cuanto mejor sea la granulometría mayor es el valor numérico de la masa [Instituto del Concreto, 1997].
- **Porosidad y absorción:** cuanto más poroso es, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad.

#### Propiedades mecánicas

- **Dureza:** propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado. En la elaboración de concretos sometidos a elevadas tasas de desgaste por roce o abrasión, como aplicaciones en pavimentos o revestimientos de canales, la dureza del



agregado grueso es una propiedad decisiva para la selección de los materiales.

- **Resistencia:** el agregado grueso, en mayor medida que el fino, va a resultar relacionado con el comportamiento de las resistencias del concreto, por su aporte en tamaños de grano dentro de la masa de la mezcla. En tal sentido, una de las posibilidades de ruptura de la masa es por medio del agregado grueso (las otras son por la pasta y por la interface de contacto entre pasta y agregado). De esta manera, la resistencia de los agregados cobra importancia y se debe buscar que éste nunca falle antes que la pasta de cemento endurezca. La falla a través del agregado grueso se produce bien sea porque tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque previamente se le han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (especialmente cuando éste se hace por voladura) o por un inadecuado proceso de trituración. Adicionalmente, cuando se aumenta la adherencia por la forma o textura superficial del agregado al buscar una alta resistencia del concreto, también aumenta el riesgo de que las partículas del agregado fallen antes de la pasta de cemento endurecida.
- **Tenacidad o resistencia a la falla por impacto:** es una propiedad que depende de la roca de origen y se debe tener en cuenta ya que tiene mucho que ver con el manejo de los agregados, porque si estos son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría y también disminuir la calidad del concreto que con ellos se elabore.
- **Adherencia:** es la interacción que existe en la zona de contacto agregado-pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto. La adherencia depende de la calidad de la pasta de cemento y, en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión. Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que



aumenta con la rugosidad superficial de las partículas (INSTITUTO DEL CONCRETO, 1997)

### 6.2.3 Aditivos

Las propiedades del concreto en estado fresco (plástico) y endurecido, se pueden modificar agregando aditivos al concreto, usualmente en forma líquida durante su dosificación. Los aditivos se usan comúnmente para (1) ajustar el tiempo de fraguado o endurecimiento, (2) reducir la demanda de agua, (3) aumentar la trabajabilidad, (4) incluir intencionalmente aire, y (5) ajustar otras propiedades del concreto.

#### 6.2.3.1 Tipos de aditivos

##### Acelerantes:

Estos aditivos se emplean para acelerar el desarrollo de la resistencia del concreto a edades tempranas. Tal desarrollo de resistencia también se puede acelerar: (1) con el empleo de cemento Portland de alta resistencia a edad temprana, (2) reduciendo la relación agua-cemento con el aumento de 60 a 120 kg de cemento adicional por metro cúbico de concreto, o (3) curando a mayores temperaturas. El cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) es el material comúnmente usado en los aditivos acelerantes. Deberá cubrir los requisitos de la norma ASTM D 98 y también deberá ser muestreado y ensayado de acuerdo con la norma ASTM D 345. El amplio uso de los aditivos a base de cloruro de calcio, ha brindado muchos datos y experiencias sobre su efecto en las propiedades del concreto. Aparte del incremento en aceleración de resistencia, el cloruro de calcio produce un aumento en la contracción por secado, una posible corrosión del refuerzo, descoloramiento (oscurece al concreto), y posibles descascaramientos.

##### Ejemplos:

Acelerantes (ASTM C 494, Tipo C): Cloruro de calcio (ASTM D 98), Trietanolamina, Tiocianato de sodio, Formato de calcio, Nitrito de calcio, Nitrato de calcio.



### Retardantes:

Los aditivos retardantes se emplean para aminorar la velocidad de fraguado del concreto. Las temperaturas altas en el concreto fresco (30° a 32°C y mayores), son frecuentemente la causa de una gran velocidad en el endurecimiento, lo que provoca que el colado y acabado del concreto sea difícil. Uno de los métodos más prácticos de contrarrestar este efecto consiste en hacer descender la temperatura del concreto enfriando el agua de mezclado o los agregados. Los aditivos retardantes no bajan la temperatura inicial del concreto.

Los retardantes se emplean en ocasiones para: (1) compensar el efecto acelerante que tiene el clima cálido en el fraguado del concreto, (2) demorar el fraguado inicial del concreto o lechada cuando se presentan condiciones de colado difíciles o poco usuales, como puede ocurrir al colar estribos o cimentaciones de gran tamaño, cementar pozos petroleros, o bombear lechada o concreto a distancias considerables, o (3) retrasar el fraguado para aplicar procesos de acabado especiales, como puede ser una superficie de agregado expuesto.

Debido a que la mayoría de los retardantes también actúan como reductores de agua, se les denomina frecuentemente retardantes reductores de agua. Los retardantes también pueden incluir un poco de aire en el concreto.

En general, el empleo de retardantes va acompañado de una cierta reducción de resistencia a edades tempranas (uno a tres días). Los efectos de estos materiales en las demás propiedades del concreto, tales como la contracción, pueden ser impredecibles. En consecuencia, se deberán efectuar pruebas de recepción de los retardantes con los materiales con que se va a trabajar en condiciones anticipadas de trabajo.

Ejemplos:

Retardantes (ASTM C 494, Tipo B): Lignina, Bórax, Azúcares, Ácido tartárico y sales.



### Inclusores de aire:

Los aditivos inclusores de aire se utilizan para retener intencionalmente burbujas microscópicas de aire en el concreto. La inclusión de aire mejorará drásticamente la durabilidad de los concretos que estén expuestos a la humedad durante los ciclos de congelación y deshielo. El aire incluido mejora considerablemente la resistencia del concreto contra el descascaramiento de la superficie causado por los productos químicos deshelantes. También se ve mejorada de manera importante la trabajabilidad del concreto fresco, y la segregación y la exudación se reducen o se llegan a eliminar.

El concreto con aire incluido, contiene diminutas burbujas de aire distribuidas uniformemente en toda la pasta de cemento. La inclusión de aire en el concreto, se puede producir usando un cemento inclusor de aire, o con la introducción de un aditivo inductor de aire, o con una combinación de ambos métodos. Un cemento inductor de aire es un cemento portland con una adición inclusora de aire molida conjuntamente con el clinker durante la fabricación. Por otra parte, los aditivos inclusores de aire se agregan directamente a los componentes del concreto antes y durante el mezclado.

Los principales ingredientes que se utilizan en los aditivos inclusores de aire (ASTM C 260) se enlistan a continuación: Sales de resinas de madera (resina Vinsol), Algunos detergentes sintéticos, Sales de lignina sulfonatada, Sales de ácidos de petróleo, Sales de material proteináceo, Ácidos grasos y resinosos y sus sales, Sulfonatos de alquilbenceno, Sales de hidrocarburos sulfonados.

Las especificaciones así como los métodos de ensaye para los aditivos inclusores de aire se presentan en las normas ASTM C 260 y C 233. Las adiciones inclusoras de aire que se emplean en la fabricación de cementos inclusores de aire, deben cumplir con los requisitos de la norma ASTM C 226.

### Plastificantes:

Cuando estos aditivos se adicionan a una mezcla de concreto, los plastificantes (agentes reductores del contenido de agua) son absorbidos en la superficie de las partículas del aglomerante, generando una repulsión entre sí, lo que nos da como



resultado una mejora en la trabajabilidad y proporcionan 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, pueden existir algunas modificaciones en ambos.

Algunos beneficios obtenidos con el uso de estos aditivos son:

- Incrementan el revenimiento de la mezcla con un contenido de agua dado
- Pueden reducir el requerimiento de agua de una mezcla de concreto para una trabajabilidad dada, de manera práctica, se adiciona aproximadamente el 10%
- Posibilita de gran manera el poder lograr una resistencia dada con un contenido menor de cemento
- Pueden mejorar la bombeabilidad

#### Superplastificantes:

Estos aditivos son químicamente distintos de los plastificantes normales y aunque su acción sea prácticamente la misma, en los superplastificantes es más marcada. Cuando se utilizan para producir una mezcla más fluida, puede esperarse una pérdida rápida de trabajabilidad, estos deben ser agregados justo antes de la colocación. De manera usual, los superplastificantes son compuestos químicos como *formaldehído*, *naftaleno sulfonatada* y *lignosulfonatos modificados*.



## 7. Materiales de estudio



### 7.1 Cemento utilizado

El cemento utilizado para el presente estudio fue un CPC 40 RS, el cual cumple con la norma (NMX-C-414-ONNCCE, 2016). Sus características se describen a continuación

Beneficios:

- Resistencias mecánicas: Altas y uniformes. Por su confiabilidad impacta positivamente en el diseño de los concretos, lo cual se refleja en un mayor rendimiento.
- Resistencia al ataque de sulfatos: El diseño del cemento CPC 40 RS da por resultado un cemento resistente al ataque de los sulfatos del medio ambiente.
- Impermeabilidad: Siguiendo todos los cuidados en la elaboración, transporte, colocación y acabado del concreto, ayuda a reducir la cantidad de poros en el mismo, disminuyendo la penetración de los agentes agresivos, como las sales marinas, aguas negras, suelos salitrosos, etc.
- Calor de hidratación: Genera menor cantidad de calor al hidratarse, por lo que se califica como cemento de bajo calor de hidratación. Esto quiere decir que minimiza las expansiones térmicas y disminuye significativamente la aparición de grietas.
- Segregación, exudación, plasticidad y cohesión: La finura y la mejor distribución de tamaños de las partículas del, contribuyen a lograr menor segregación y exudación en el concreto, obteniéndose una mayor cohesión con los agregados.

Ilustración 7-1 Cemento CPC 40 RS  
(CYCNA, 2017)



Por ser un cemento CPC 40 RS es un cemento portland compuesto, de clase 40, con resistencia especificada a los 28 días de 40 MPa a los 28 días y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-ONNCCE-2010).

Es de importante mención señalar que el uso de cemento tipo RS por sí mismo no garantizará la producción de un concreto resistente a sulfatos ya que están involucrados otros factores y deben ser considerados, pues su efecto puede ser más importante que el del cemento de la resistencia a sulfatos del concreto. La fuerza del ataque de sulfatos depende del tipo y concentración del sulfato y se incrementa con el mojado y el secado (Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, 2006).

### 7.2 Análisis del agua utilizada

El agua de mezclado o agua de amasado que se utilice en una mezcla de concreto hidráulico debe cumplir con ciertos parámetros indicadores de su calidad, los cuales al ser los deseados nos permitirán hacer uso de ella.

El agua empleada para la elaboración de las distintas mezclas fue analizada por el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en mayo de 2014, quienes expidieron los resultados referentes a la normativa mexicana NMX-C-122-ONNCCE-2004.

Los resultados de este análisis demuestran que el agua es apropiada para utilizarse en la elaboración de los especímenes de concreto, en su etapa de curado y en los ensayos de caracterización del cemento y otros que requieran el uso de agua en su procedimiento.

La tabla 7-1 muestra los parámetros obtenidos y se presentan a continuación:

*Tabla 7-1: Análisis del agua utilizada para la caracterización del cemento y la elaboración de los especímenes de concreto (Bernabé Reyes, 2015).*

**Muestra:** Agua potable de la Red de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

**Sitio de muestro:** Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”.

**Fecha de muestreo:** 18 de mayo de 2014.

**Normativa 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	337	-----	mg/L	NMX-AA-012-SCFI-2001
Sulfatos	5	3000	mg/L	NMX-AA-074-SCFI-1981
Cloruros	13.36	400	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001
Dureza Cálrica	21	-----	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Volumétrico
Sales de magnesio	5	100	mg/L	Volumétrico

### 7.3 Agregados utilizados en esta investigación

El agregado pétreo (arena y grava) tienen la función de proporcionar la resistencia al concreto y generar volumen respectivamente. En la presente investigación los agregados pétreos son procedentes de dos distintos bancos de materiales.

#### Agregado grueso.

Como agregado grueso se usó una grava producto de trituración de roca con TMA de ¾" (19 mm) proveniente de un banco de material ubicado en el km 014+250 de la carretera Morelia-Salamanca. Con el uso de los agregados triturados se espera lograr un concreto de mayor densidad y de mejores prestaciones mecánicas, así mismo incrementar la durabilidad.



### Agregado fino.

Como agregado grueso se usó una arena volcánica con un módulo de finura de 3.64 %. Proveniente de un banco de material ubicado en el km 077+000 de la carretera Morelia-Salamanca.

### 7.4 Aditivo utilizado en esta investigación

Para lograr el objetivo de disminuir la cantidad de cemento y al mismo tiempo mantener una mezcla trabajable y con mayor fluidez se optó por utilizar un aditivo súper plastificante llamado CRISOTAN® R-5. Se adicionó a las mezclas aditivo con respecto a la masa de material cementante. Este aditivo utilizado se describe a continuación con base en su ficha técnica:

El CRISOTÁN® R-5 es un agente no tóxico que no provoca espuma y dado que es un producto sintético, presenta propiedades uniformes de un lote a otro, a diferencia de los lignosulfonatos.

Su estabilidad térmica se garantiza hasta los 150°C. Su temperatura de descomposición es a los 380°C. En dosificaciones normales, el CRISOTAN® R-5 no afecta al calor de hidratación del concreto. No contribuye a la corrosión del acero ni al crecimiento de microorganismos.

*Tabla 7-2 Propiedades típicas del CRISOTAN® R-5 (Ficha técnica CRISOTAN R-5)*

	CRISOTAN R-5	CRISOTAN R-5 LÍQUIDO
Apariencia	Polvo fino	Líquido ámbar oscuro
% de ingrediente activo	90%	40%
Densidad (g/ml)	-----	1.2
Solubilidad en solución al 10%	Clara	Clara

La plasticidad que imparte el CRISOTAN® R-5 a una mezcla de concreto produce una fluidez en el llenado de moldes. Cuando los moldes se retiran, el concreto resulta de superficie más uniforme, sin accidentes.



### ¿Cómo funciona?

El CRISOTAN® R-5 es un agente dispersante que promueve la separación o defloculación de las partículas de cemento, venciendo las fuerzas cohesivas que las atraen unas a otras. Esta poderosa acción del CRISOTAN® sobre el cemento causa que la mezcla de concreto fluya más fácilmente que una mezcla convencional. Este efecto se llama plastificación.

Como un súper plastificante, el CRISOTAN® R-5 da a la mezcla de concreto una óptima plastificación y permite que sea colocado con mayor facilidad. Además, su uso permite reducir la relación agua/cemento sin pérdida en el revenimiento. Esto resulta directamente, en un incremento en la resistencia inicial y final a la compresión del concreto.

### Dosificación.

La dosificación del CRISOTAN se basa en el contenido de cemento de la mezcla de concreto. En la mayoría de los casos, se puede obtener una reducción de agua con un 0.5% de CRISOTAN, (en base al ingrediente activo), o 1.66% para el CRISOTAN® R-5 LÍQUIDO.

Para obtener las máximas ventajas del CRISOTAN®, la mezcla de concreto debe ser rediseñada y aprobada. Un revenimiento bajo, puede ser corregido con una mayor dosificación de CRISOTAN® en vez de agregar agua.

La siguiente tabla muestra el nivel de CRISOTAN LIQUIDO en peso o volumen para diferentes concentraciones.

*Tabla 7-3 Dosificación del CRISOTAN R-5 LÍQUIDO /100Kg de cemento (CHRISTIANSON S.A. de C.V.)*

% INGREDIENTE ACTIVO (BASE SECA)	VOLUMEN CRISOTAN R-5 LÍQUIDO (ml)	PESO CRISOTAN R-5 LÍQUIDO (g)	PESO DEL AGUA EN EL CRISOTAN R-5 LÍQUIDO (g)
0.2	430	516	155
0.3	645	774	310
0.4	860	1032	620
0.5	1075	1290	775
0.6	1290	1596	930
0.7	1505	1806	1085
0.8	1720	2064	1240



## 8. Diseño de mezclas

### 8.1 Introducción

El Diseño de Mezclas puede ser definido como el proceso de selección de los ingredientes adecuados para concreto (cemento, agregados, agua y en algunos casos aditivos) y la determinación de sus proporciones con el objeto de producir un concreto de cierta resistencia, consistencia y durabilidad de la forma más económica posible (SHETTY, 2005).

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

Teniendo los materiales para la realización del concreto, los tres factores variantes que tienen que ser considerados especificando una determinada mezcla de concreto son (SHETTY, 2005).

- **Relación agua-cemento acorde con la durabilidad y resistencia requerida:** esta relación es sencillamente la masa del agua, dividido entre la masa del cemento. La relación agua/cemento que se elija para el diseño de la mezcla, debe ser el menor valor requerido para cubrir las consideraciones de exposición de diseño. Cuando la durabilidad no sea el factor que rija en el diseño, la relación agua/cemento deberá elegirse con base en la resistencia a compresión del concreto (KOSMATHA & PANARESE, 1992).
- **Graduación de los Agregados:** esta graduación está controlada sólo por la variación del contenido de agregado fino y grueso (SHETTY, 2005).
- **Consistencia:** la consistencia es la facultad del concreto fresco para fluir, la prueba de revenimiento es una medida de la consistencia de la pasta.



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

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

## 8.2 Objetivos

El principal objetivo que se busca al realizar el diseño de una mezcla de concreto es determinar la composición más eficaz y económica de los componentes de un concreto, tomando en cuenta los materiales de que se dispone, esto con la finalidad de producir un concreto que cumpla las exigencias de comportamiento para las condiciones particulares de uso del mismo (ALCARAZ, 2010).

En primera instancia se debe determinar la combinación más práctica y económica de los materiales con los que se dispone, para producir un concreto que satisfaga las exigencias de comportamiento bajo las situaciones exclusivas de uso (KOSMATHA & PANARESE, 1992). Para lograr tal objetivo, una mezcla de concreto bien proporcionada debe poseer las propiedades siguientes:

1. En el concreto fresco
  - Trabajabilidad aceptable: es una medida de lo fácil o difícil que resulta colocar, consolidar y darle acabado al concreto.
  - Consistencia (cohesión y viscosidad): es la facultad del concreto fresco para fluir.



- Plasticidad: determina la facilidad de moldear al concreto. Si se usa más agregado en una mezcla de concreto o si se agrega menos agua, la mezcla se vuelve más rígida, (menos plástica y menos trabajable) y difícil de moldear. No se pueden considerar plásticas a las mezclas muy secas o muy desmoronables ni a las muy aguadas o fluidas.
- No se debe segregar ni presentar exudación excesiva: La exudación es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos – cemento, arena y piedra- dentro de la masa. El asentamiento es consecuencia del efecto combinado de la vibración y de la gravedad. Una exudación excesiva aumenta la relación agua/cemento cerca de la superficie superior, pudiendo dar como resultado una capa superior débil de baja durabilidad, particularmente si se llevan a cabo las operaciones de acabado mientras está presente el agua de la exudación. La segregación es la separación de los distintos componentes de una mezcla de concreto o mortero fresco durante su transporte o colocación (KOSMATHA & PANARESE, 1992).

2. En el concreto endurecido:

- Durabilidad.
- Resistencia.
- Presentación uniforme.

El segundo objetivo es hacer el concreto de la manera más económica, es decir, todos los concretos dependen principalmente de dos factores (SHETTY, 2005):

1. Costo de la elaboración de una mezcla de concreto: Este costo está constituido básicamente por la variación en el costo de los materiales. Es conveniente mencionar que, en este rubro, el componente más costoso es el cemento. Es por ello que el proporcionamiento debe minimizar la cantidad de cemento sin sacrificar la resistencia, durabilidad y demás propiedades del concreto.



2. Costo de la mano de obra: Este costo depende de la trabajabilidad de la mezcla y de los métodos de colocación y compactación. Una mezcla poco trabajable con un equipo de compactación deficiente aumenta los costos de mano de obra y aún, con un equipo de colocación eficiente, el costo de la colocación de mezclas muy secas es alto (INSTITUTO DEL CONCRETO, 1997).

### 8.3 Método del ACI 211

Para este trabajo de investigación se utilizó el método que establece el ACI. Este método volumétrico es más exacto que otros métodos ya que involucra los valores de densidades de todos los ingredientes para calcular el volumen absoluto que cada ingrediente ocupará en la unidad de volumen de concreto. (KOSMATHA & PANARESE, 1992). El procedimiento siguiente es aplicable al concreto normal.

1. **Elección del Revenimiento:** Cuando no se especifica el revenimiento, puede seleccionarse un valor apropiado para la obra de los que aparecen en la tabla 8-1. Las variaciones de revenimiento que se muestran son aplicables cuando se emplea el vibrador para compactar concreto. Deben emplearse mezclas de consistencia más densa, que pueden colarse con buen rendimiento [ACI 211].

Tabla 8-1 Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción (ACI 211, 1991).

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

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



2. **Elección del Tamaño Máximo del Agregado:** Tamaños máximos nominales mayores o agregados bien graduados tienen menos vacíos que los tamaños pequeños. Por lo tanto, concretos con tamaños más grandes requieren menos mortero por unidad de volumen del concreto. Generalmente el tamaño máximo nominal del agregado debe ser el más grande que esté económicamente disponible y guardar relación con las dimensiones de la estructura. En ningún caso el tamaño máximo nominal debe exceder de  $1/5$  de la menor dimensión entre los costados de las cimbras,  $1/3$  del espesor de la losa, ni  $3/4$  del espacio libre mínimo entre varillas de refuerzo individuales, paquetes de varillas, o torones de pretensado.

A veces estas limitaciones se pasan por alto si la trabajabilidad y los métodos de compactación permiten que el concreto sea colado sin cavidades o huecos. En áreas congestionadas con acero de refuerzo, el proporcionador deberá seleccionar un tamaño máximo nominal del agregado de manera que el concreto pueda ser colocado sin una segregación excesiva o vacíos. Cuando se desea un concreto de alta resistencia los mejores resultados se obtienen reduciendo el tamaño máximo nominal del agregado, ya que estos producen resistencias altas con una relación Agua/Cemento determinada.

3. **Determinación del agua de mezclado y contenido de aire:** La cantidad de agua por volumen unitario de concreto requerida para producir determinado revenimiento, depende del tamaño máximo nominal, de la forma de la partícula y granulometría de los agregados, así como de la cantidad de aire incluido.

En la tabla 8-2 aparecen valores estimados del agua de mezclado requerida para concretos hechos con diversos tamaños máximos de agregados, con o sin aire incluido. Según sea la textura y forma del agregado, los requerimientos de agua de mezclado pueden estar por encima o por debajo



de los valores tabulados, pero son suficientemente precisos para el primer cálculo.

En la parte superior de la tabla 8-2, se indica la cantidad aproximada de aire atrapado que puede esperarse en concretos sin inclusión de aire, premeditada, y en la parte inferior, el promedio de contenido de aire recomendado para concretos con inclusión de aire. Para el caso de que sea necesario o deseable incluir aire, se señalan tres niveles de contenido de aire para cada tamaño de agregado, los que dependen del propósito de la inclusión de aire y de la severidad de la exposición, si la inclusión de aire está en función de la durabilidad (ACI 211, 1991)

Tabla 8-2 Relaciones entre la relación Agua/Cemento y la resistencia a la compresión del concreto (ACI 211, 1991)

Revenimiento, mm	Agua, Kg/m <sup>3</sup> de concreto para tamaño máximo nominal de agregado indicado							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
<b>Concreto Sin Aire Incluido</b>								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
% aire atrapado	3.0	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
<b>Concreto Con Aire Incluido</b>								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-
Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo al nivel de exposición.								
Exposición Ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.00	1.5	1
Exposición Severa	6.0	5.5	5.00	4.5	4.5	4.00	3.5	3
	7.5	7.00	6.00	6.00	5.5	5.00	4.5	4

4. **Selección de la relación Agua/Cemento:** la relación agua/cemento requerida se determina no sólo por los requisitos de resistencia, sino



también por otros factores como la durabilidad y las propiedades del acabado.

Puesto que diferentes agregados y cementos producen, generalmente, distintas resistencias empleando la misma relación agua/cemento, es muy deseable establecer una relación entre la resistencia y la relación agua/cemento para los materiales que de hecho van a emplearse. En ausencia de estos datos, pueden tomarse de la tabla 8-3 valores aproximados y relativamente conservadores para concretos que contengan cemento Portland CPO.

Tabla 8-3 Relaciones entre la relación Agua/Cemento y la resistencia a la compresión del concreto (ACI 211, 1991).

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

- Cálculo del Contenido 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. Sin embargo, la especificación incluye un límite mínimo separado sobre el cemento aparte de los requerimientos para la resistencia y durabilidad, la mezcla debe basarse en el criterio que conduzca a una cantidad mayor de cemento.
- Estimación del contenido de agregado grueso:** los agregados con tamaño máximo nominal y granulometría esencialmente iguales producirán concreto con una trabajabilidad satisfactoria cuando un volumen dado de agregado grueso, seco y varillado, es utilizado por unidad de volumen de concreto. Valores apropiados de volumen para el agregado grueso están



dados en la tabla 8-4. 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, 1991).

Tabla 8-4 Volumen de agregado grueso por unidad de volumen del concreto (ACI 211, 1991)

Tamaño Máximo Nominal del agregado		Volumen del agregado varillado en seco por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura del agregado fino			
plg.	mm.	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8	9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2	12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4	19	0.66	0.64	0.62	0.60
1	25	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2	37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
2	50	0.78	0.76	0.74	0.72
3	75	0.82	0.80	0.78	0.76
6	150	0.87	0.85	0.83	0.81

7. **Estimación del contenido de agregado fino:** al término del paso 6, todos los ingredientes del concreto han sido estimados excepto el agregado fino, cuya cantidad se determina por diferencia. Para calcular esto se utiliza el método del volumen absoluto, el cual 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 de la masa unitaria del agua y de la gravedad específica del material).
8. **Ajustes por humedad del agregado:** las cantidades de agregado que realmente deben pesarse para el concreto deben considerar la humedad del agregado. Los agregados están generalmente húmedos, y sus masas



secas deben incrementarse con el porcentaje de agua, tanto absorbida como superficial, que contienen. El agua de mezclado que se añade al lote debe reducirse en cantidad igual a la humedad libre contenida en el agregado, es decir, humedad total menos absorción.

9. **Ajustes en la mezcla de prueba:** las proporciones calculadas de la mezcla deben verificarse mediante mezclas de prueba, preparadas y probadas de acuerdo con la norma ASTM-C-129, o por medio de mezclas reales en el campo. Sólo debe usarse el agua suficiente para producir el revenimiento requerido, independientemente de la cantidad supuesta al dosificar los componentes de la prueba. Deben verificarse la masa unitaria y la fluencia, así como el contenido de aire del concreto. También debe tenerse cuidado de lograr la trabajabilidad apropiada, ausencia de segregación, así como las propiedades del acabado (ACI 211, 1991).



## 9. Desarrollo experimental

### 9.1 Caracterización de agregados pétreos

#### 9.1.1 Cuarteo

El objetivo de realizar el cuarteo es obtener una muestra representativa del agregado para poder realizar las pruebas que se van a describir posteriormente (NMX-C-030-ONNCE, 2004).

El equipo utilizado para el cuarteo es:

- Palas
- Divisor de muestras
- Recipientes para el divisor
- Charolas

El procedimiento para el cuarteo de los agregados es el siguiente:

1. Se vacía el material en una superficie limpia y trabajable procurando formar un cono.
2. Se cambia el agregado de un lado a otro procurando que se mezcle completamente.
3. Una vez que se obtuvo una homogenización del agregado se aplana el cono y se divide el total del agregado en cuatro partes.

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 vaciar, se repite el procedimiento hasta obtener la muestra requerida (esto se realiza cuando la muestra requerida es pequeña, de lo contrario se toma del cuarteo por pala).



*Ilustración 9-1 cuarteo de grava mediante pala, y de arena por divisor de muestras (Martinez Balvanera, 2017)*

### 9.1.2 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 (NMX-C-166-ONNCCE, 2006).

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.

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

### 9.1.3 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.

#### **Humedad de absorción en arenas (NMX-C-165-ONNCCE, 2014).**

Equipo:

- Una muestra representativa de arena (Aproximadamente 1 kg)
- Una Parilla.
- 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 está 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 primera 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.

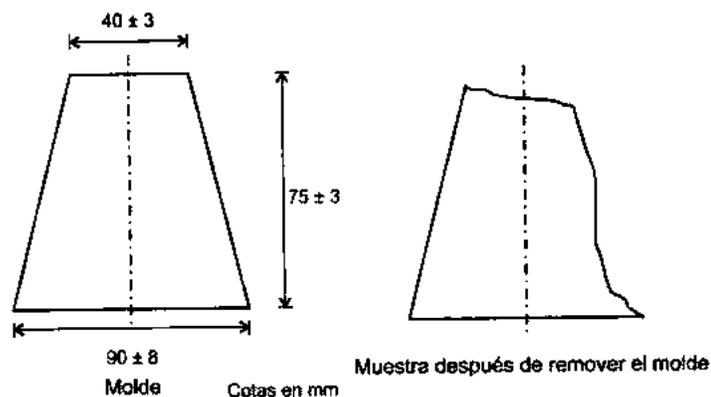


Ilustración 9-2 Medidas cono troncocónico y muestra seca superficialmente (NMX-C-165-ONNCCE, 2014).

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 9-3 En la izquierda se observa la comprobación del secado superficial de la arena por medio del molde troncocónico, en la derecha se tomó la masa del material para realizar la prueba.*

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

#### **Humedad de absorción en gravas (NMX-C-164-ONNCCE, 2014).**

Equipo:

- 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 3/4” y 3/8”, se toma el material que se retiene en la malla 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 ( $M_s$ ).
8. Se repite 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 9-4 Izquierda: saturación del material, previo al secado.  
Derecho: secado del agregado grueso*

$$\% \text{ Absorción} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

9.1.4 Método de prueba para 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 (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).



#### Equipo:

- 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 se suelta se determina, dividiendo la masa neta del material, entre el volumen del recipiente.



*Ilustración 9-5 En la izquierda se aprecia el llenado del molde con grava, en la izquierda se observa el llenado con grava (Martinez Balvanera, 2017)*



### Fórmula:

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

Donde:

Mv = masa volumétrica de los agregados, en Kg/m<sup>3</sup>.

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

T = masa del recipiente, en Kg.

V = volumen del recipiente, en m<sup>3</sup>.

#### 9.1.5 Método de prueba para 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 (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

Equipo:

- Recipiente
- Varilla redondeada
- Báscula con aproximación al décimo de gramo
- Varilla redonda de 5/8" de 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 se suelta se determina, dividiendo la masa neta del material, entre el volumen del recipiente.



*Ilustración 9-6 Determinación de la masa volumétrica seca varillada de arena y grava (Martinez Balvanera, 2017)*

#### **Fórmulas:**

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

#### **Donde:**

Mv = masa volumétrica de los agregados, en Kg/m<sup>3</sup>.

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

T = masa del recipiente, en Kg.

V = volumen del recipiente, en m<sup>3</sup>.

#### **9.1.6. Análisis granulométrico en arena y grava**

La granulometría es una prueba física muy importante para los agregados usados en concreto ya que, al tener cantidades de partículas uniformemente distribuidas con relación a su tamaño, se podrá tener un concreto más denso de agregado y por lo tanto se requerirá menos pasta de cemento para llenar los espacios (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).



### **Granulometría en arenas**

Esta prueba consiste en hacer pasar una muestra representativa de arena seca por una serie de tamices acomodados de mayor a menor abertura por medio de la gravedad y de movimientos con la ayuda del equipo "Raf-Tap".

El equipo necesario es el siguiente:

- Muestra representativa de arena
- Juego de tamices (No 4, 8, 16, 30, 50 y 100)
- charola
- Equipo Raf-Tap
- Báscula con aproximación al de décimo de gramo



*Ilustración 9-7 Equipo "Raf-Tap" utilizado para granulometría en arenas (Martinez Balvanera, 2017).*

### **Granulometría en gravas**

Lo ideal es tener una granulometría uniforme, de acuerdo a lo establecido en la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2004), en donde de acuerdo al tamaño máximo del agregado establece un rango del porcentaje que pasa para cada malla.

El equipo necesario es el siguiente:

- Muestra representativa de aproximadamente 16 kilos.
- Juego de mallas (1,  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{8}$  y No 4)
- Charolas
- Cucharón



- Báscula

Procedimiento:

1. Se toma el agregado de una de las muestras utilizadas en la prueba de M.V.S.S y se pesa para conocer su masa inicial.
2. Se hace pasar el material por la malla más pequeña y los retenidos en esa malla se pasan por las siguientes mallas.
3. De esta manera se tienen los retenidos de cada malla y se pesa cada retenido.



*Ilustración 9-8 Obtención de granulometría en grava (Martinez Balvanera, 2017).*

(NMX-C-077-ONNCCE, 1997)

#### 9.1.7. Prueba de colorimetría en arena

La colorimetría es una prueba física que se realiza a las arenas utilizadas para concreto hidráulico en la cual se determina de forma aproximada la presencia de materia orgánica dañina, esta determinación se hace de forma comparativa con una tabla colorimétrica. El exceso de materia orgánica es perjudicial para las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto (NMX-C-088-ONNCCE, 1997).

El equipo utilizado para la colorimetría es:

- Muestra representativa de arena, 500 gr aproximadamente.
- 3 gr de sosa cáustica.
- 97 ml de agua destilada.



- Biberón con tapa.
- Tabla colorimétrica.

El procedimiento es el siguiente:

1. Se realiza la solución de sosa cáustica y agua, se utilizan 3 gramos por 97 de agua destilada.
2. Se agrega la muestra de arena seca dentro de la botella hasta la marca de 130 cm<sup>3</sup> (ml).
3. Se agrega la solución de sosa cáustica hasta que el volumen del agregado y de la solución se aproxime a 206 cm<sup>3</sup> (ml).
4. Se agita durante 2 minutos y se deja reposar.
5. Al paso de 24 horas se compara el color del sedimento del material con la tabla colorimétrica.



*Ilustración 9-9 Determinación de colorimetría en una muestra de arena (Martínez Balvanera, 2017)*

#### 9.1.8. Sedimentación en arenas

El objetivo de este ensayo es el de determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable o no en la elaboración de concreto.

Equipo a emplear:

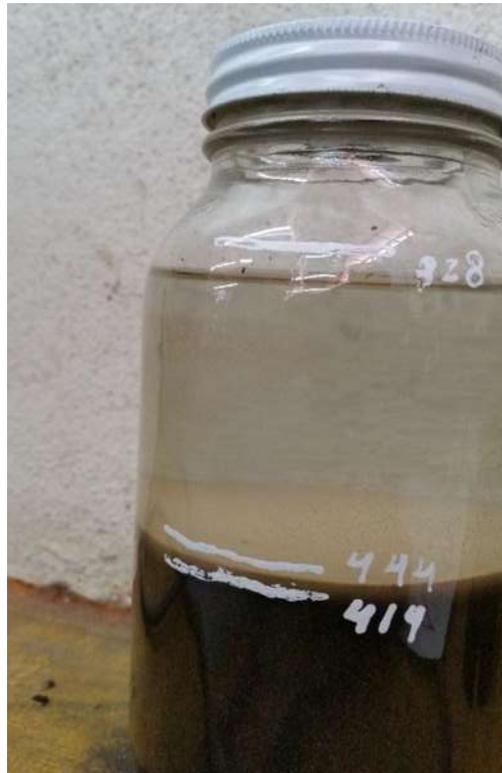
- Un frasco graduado con tres marcas, la primera a los 414 ml, la segunda a los 444ml y la tercera a los 828 ml.



- Una muestra de arena seca de 2 kilogramos aproximadamente.
- Un litro de agua de preferencia destilada.

Procedimiento:

1. Se coloca arena seca dentro del frasco hasta la marca de 414 ml para enseguida llenar de agua el frasco hasta la marca de 828 ml.
2. Se tapa el frasco y se procede a agitarlo hasta que todo el material fino quede en suspensión en el agua durante dos minutos.
3. Se deja reposar el frasco durante 24 horas para determinar el nivel del material fino, esto se logra observando si el material fino rebasa o no el nivel de 444 ml.
4. La prueba se realiza en tres frascos iguales, en el mismo lapso de tiempo, esto con la intención de verificar los resultados.



*Ilustración 9-10 Muestra en reposo para sedimentación (Martinez Balvanera, 2017)*

Interpretación de resultados:

- Si el nivel del material fino rebasa la marca de 444 ml se reporta el material con exceso de finos.



- Si el material fino no rebasa la marca de 444 ml, se reporta que el contenido de material fino es aceptable.

Esta prueba no está referenciada con alguna norma, por lo tanto, es sólo una prueba complementaria para conocer el contenido de finos del agregado pétreo fino, esto como control de calidad (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011).

#### 9.1.9. Material que pasa por la malla N° 200 en arena

En algunos casos el material fino, como las arcillas o los limos se encuentran adheridas a las partículas más grandes. Estas partículas más finas de las 75 micras pueden ser separadas de una manera mucho más eficiente y por completo por medio de cribado en estado húmedo, comparado con un cribado en estado seco (NMX-C-084-ONNCE, 2006).

El equipo utilizado es el siguiente:

- Muestra representativa de arena
- Parrilla
- Charolas
- Recipiente
- Malla No 200
- Horno
- Báscula
- Vaso metálico

El procedimiento es el siguiente:

1. Se obtiene una muestra representativa de 300 gramos como mínimo siguiendo el procedimiento de cuarteo, y se seca.
2. Después del secado se determina su masa registrándola como Mi.
3. Se coloca el material en un contenedor y se le agrega agua suficiente hasta cubrir todo el recipiente.



4. Realizado lo anterior, se lava el material decantando el vaso, para lo cual se agita su contenido en forma de ochos utilizando una varilla metálica, a la vez que se vierte sobre la malla No 200.
5. Para facilitar el paso y la eliminación de los finos, se aplica un chorro de agua con baja presión sobre el contenido de la malla, repitiendo este procedimiento hasta que el agua salga limpia.
6. Se regresa el material retenido en la malla No 200 al vaso metálico y se seca en el horno, se pesa el material seco y se registra como  $M_f$ .

$$\% \text{ de material que pasa malla No 200} = \frac{M_i - M_f}{M_f} * 100$$

Tabla 9-1 Especificaciones correspondientes a los límites permisibles.

Concepto	Material máximo permisible en masa de la muestra total en %	
	NMX-111-ONNCCE-2004	ASTM-C-33-03
En concreto sujeto a abrasión	5.00 <sup>(1)</sup>	3.00 <sup>(A)</sup>
En concretos presforzados	8.00 <sup>(1)</sup>	-
En otros concretos	15.00	5.00 <sup>(A)</sup>

(1) En caso de agregados triturados, sí el material que pasa por la criba 0,075 mm (malla No. 200) es el resultado de la pulverización de rocas exentas de arcilla y/o pizarras, este límite puede incrementarse a 6 % y 10 %, respectivamente.

(A) En caso de agregados triturados, sí el material que pasa por la criba 0,075 mm (malla No. 200) es el resultado de la pulverización de rocas exentas de arcilla y/o pizarras, este límite puede incrementarse a 5 % y 7 %, respectivamente.

#### 9.1.10. Prueba de terrones de arcilla de la arena

Esta prueba determina la cantidad de partículas que tienen la capacidad de afectar su resistencia debido a la absorción en mayor o menor proporción de cemento y agua (NMX-C-071-ONNCCE, 2004).

El equipo utilizado es el siguiente:

- Muestra representativa de arena
- Malla No 16



- Malla No 30
- Charolas

El procedimiento es el siguiente:

1. Se toma la muestra de aproximadamente 1 kilogramo y se seca teniendo cuidado de no romper los terrones de arcilla.
2. Se deja enfriar la muestra y se pasa por la malla No 16, del retenido se toma una muestra de 100 gramos y se anota como M.
3. Colocar el material en una charola y extender en una fina capa.
4. Cubrir la muestra con agua y dejar reposar durante 24 horas.
5. Presionar las partículas individualmente entre el dedo pulgar y el índice para tratar de romper los terrones de arcilla que existan.
6. Tamizar el material por la malla No. 30 vertiendo agua sobre la muestra mientras se agita manualmente la criba hasta que todo el material de menor tamaño ha sido eliminado.
7. Remover las partículas retenidas en el tamiz y secar.
8. Se deja enfriar el material y se pesa registrando como N.

$$\% \text{ Terrones} = \frac{M - N}{M} * 100$$

*Tabla 9-2límites máximos de partículas delezables.*

Concepto	Material máximo permisible en masa de la muestra total en %
Grumos de arcilla y partículas delezables	3.00

### 9.1.11 Determinación de la densidad

#### En arenas

La densidad es el volumen del agregado sin considerar los vacíos formados entre el acomodo de partículas.

La densidad de la arena es uno de los parámetros más importantes en el proporcionamiento del concreto ya que si se tiene un agregado denso mecánicamente tendrá un mejor comportamiento (NMX-C-165-ONNCCE, 2014).



El equipo utilizado para la densidad es:

- Muestra representativa de arena, aproximadamente 2 kilos.
- Una balanza
- Frasco
- Una parrilla
- Charolas metálicas
- Cono metálico (truncocónico)
- Un pisón
- Una espátula

El procedimiento para la densidad es el siguiente:

Esta prueba se realizó simultáneamente con la prueba de absorción ya que para la prueba de densidad también se requiere que la muestra de arena esté superficialmente seca.

1. Una vez seco superficialmente, se pesa una muestra del agregado registrándola como masa de la arena ( $S_s$ ).
2. Se llena el frasco de agua hasta un nivel conocido, registrándolo como B.
3. Se vacía agua del frasco procurando dejar lo suficiente, con la finalidad de que la arena al caer tenga una absorción rápida.
4. Se vacía la muestra de la arena ( $S_s$ ), de manera que toda la muestra entre al frasco utilizando una hoja de papel como embudo.
5. Se agita el frasco para liberar las burbujas atrapadas, se llena el frasco hasta el nivel de aforo y se pesa registrándolo como (C).

$$\text{densidad} = \frac{S_s}{B + S_s - C}$$



*Ilustración 9-11 Determinación de densidad en arena*

### En gravas

Esta prueba se realizó en base a la norma (NMX-C-164-ONNCCE, 2014).

Equipo:

Muestra representativa de grava, aproximadamente 2 kilos (la misma muestra usada en absorción).

- Picnómetro
- Probeta de 250 ml.
- Franela

Procedimiento:

Se deja saturando la muestra durante 24 horas.

Después de saturar, se seca superficialmente con la ayuda de la franela.

1. Se miden 300 gramos de grava seca superficialmente, registrándola como masa húmeda (mh)
2. Se llena el picnómetro, se deja reposar hasta que deje de gotear por el orificio.
3. Se coloca la probeta de 250 ml por debajo del orificio, después se vierte la muestra (mh) sobre el picnómetro procurando no salpicar el agua contenida en el picnómetro.
4. Se deja reposar hasta que el goteo sea prácticamente nulo, se mide el volumen desalojado y se registra como vf.
5. De manera análoga se realiza este procedimiento al menos dos veces más a fin de obtener un dato más preciso.

$$densidad = \frac{mh}{vf}$$



*Ilustración 9-12 Determinación de la densidad en gravas*

#### 9.1.12 Equivalente de arena

La normativa mexicana (NMX-C-480-ONNCCE, 2014) define al equivalente de arena como la proporción volumétrica de material no plástico (arena y limo) en una muestra de material que pase por la malla 4.75 mm (No. 4).

La prueba consiste en determinar las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos plásticos que contiene, empleando un procedimiento que amplifica el volumen de los materiales finos plásticos. Es un procedimiento rápido para conocer la calidad de los materiales que se emplean como sub base, carpeta asfáltica y arena para concreto.

Equipo a emplear:

- Probetas de lucita o acrílico graduadas en decimos de pulgada.
- Tapón de hule.
- Tubo irrigador.
- Un tramo de manguera.
- Un pisón metálico de  $1000 \pm 5$  gramos.
- Cápsulas de  $85 \pm 5$  ml (metálicas).
- Embudo.
- Cronómetro.



- Dos frascos de 3.875 litros.
- Malla N° 4.
- Papel filtro N° 12.

Para el ensayo se necesitará preparar previamente dos soluciones antes de efectuar la prueba, una solución de reserva y una de trabajo.

#### **Preparación de la solución de reserva.**

En un frasco se disuelven 454 gramos de cloruro de calcio en 1.89 litros de agua destilada, se deja enfriar la solución y se hace pasar a través del papel filtro, se le agregan 47 gramos de formaldehído en solución volumétrica al 40 % y 2050 gramos de glicerina USP (normalizada), mezclando el total, finalmente se le agrega agua destilada hasta completar los 3.785 litros y agitando toda la solución para uniformizarla.

#### **Preparación de la solución de trabajo.**

En un frasco de 3.785 litros se colocan  $85 \pm 5 \text{ cm}^3$  de la solución de reserva completando con agua destilada hasta el nivel de 3.785 litros

Procedimiento:

1. Se toma una muestra de material de aproximadamente 500 gramos que pasa la malla N° 4, procurando que no se pierdan finos.
2. Se llena la cápsula y se golpea para acomodar el material y se enrasa. La prueba se realiza por triplicado y se hace un promedio de los resultados.
3. Se vierte solución de trabajo en las probetas hasta una altura de  $10.16 \text{ cm} \pm 0.25 \text{ cm}$  ( $4'' \pm 0.1''$ ) y se coloca la muestra en la probeta previamente preparada usando un embudo para evitar pérdidas de material.
4. Se deja reposar  $10 \pm 1$  minuto procurando no mover la probeta en este lapso de tiempo.
5. Se coloca el tapón de hule a la probeta inclinándola para que afloje el material del fondo, para posteriormente agitar, de forma manual, cada una



- de las probetas con una carrera de 20 centímetros (8 pulgadas) hasta completar 90 ciclos en 30 segundos.
6. Se introduce el tubo irrigador, se pica el material y con el mismo se baja el material que quedó en las paredes de la probeta; se llena con solución de trabajo hasta la marca de 15 y se deja reposar 20 minutos, al término de este tiempo en la escala de la probeta se lee el nivel superior de la arcilla en suspensión la cual se denominará como  $LNS_{finos}$ .
  7. Se introduce el pisón lentamente en la probeta ajustando hasta que el pisón se apoye en la arena, el nivel donde se apoya en la arena se denominará  $LNS_{arena}$ .

Para determinar el equivalente de arena se aplica la siguiente fórmula:

$$E. de arena = \frac{LNS_{arena}}{LNS_{finos}} * 100$$



*Ilustración 9-13 muestras en reposo para obtener equivalente de arena (Martinez Balvanera, 2017).*

## 9.2 Cemento

### 9.2.1 Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico

Esta prueba se utiliza para conocer la cantidad de agua necesaria en porcentaje con respecto a la masa del cemento para lograr una pasta bien hidratada y poder realizar las pruebas de sanidad del cemento y tiempos de fraguado. La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-057-ONNCCE, 2010).

El equipo utilizado es el siguiente:



- Muestra representativa de cemento
- Agua
- Báscula
- Recipiente no absorbente para la elaboración de la pasta de cemento
- Probeta graduada
- Aparato de Vicat
- Cristal liso de 15 cm x 15 cm
- Espátula

El procedimiento es el siguiente:

1. Se coloca el anillo cónico sobre el cristal y se coloca la aguja de mayor área sobre el anillo para ajustar el aparato de Vicat en ceros.
2. Se pesan 350 gramos de cemento de la muestra representativa y se vacían en el recipiente formando un cráter con ayuda de una espátula.
3. Se propone un porcentaje para medir el agua a utilizar, se recomienda 30%, este volumen se mide en la probeta y se vacía dentro del cráter del cemento.
4. Se deja reposar durante 60 segundos con la finalidad de que el cemento absorba el agua.
5. Una vez transcurrido el minuto, se realiza el amasado de la mezcla de la siguiente manera:
  - En 30 segundos se homogenea la pasta de cemento presionándola con la palma de las manos.
  - En otros 30 segundos con la pasta homogénea se forma una esfera y se pasa de mano en mano 6 veces.
  - En los últimos 30 segundos se vierte la pasta de cemento en el anillo cónico apoyado sobre el cristal, del aparato de Vicat con la ayuda de las manos y el excedente se retira con la espátula.
6. Se coloca el anillo con la pasta por debajo de la aguja y se suelta la aguja a la vez que se inicia el tiempo en el cronómetro, después de 30 segundos se mide la penetración de la aguja.



7. Si la penetración de la aguja está entre los 9 y 11 mm, se encontró la consistencia normal, si no es así, se realizan otros tanteos hasta que la penetración de la aguja quede dentro del rango.



*Ilustración 9-14 Realización de una mezcla normalizada (Martinez Balvanera, 2017).*

### 9.2.2 Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico

Esta prueba es muy importante ya que nos permite conocer el tiempo que se tiene para manejar al concreto en estado fluido y en qué tiempo alcanzara su dureza, este tiempo de fraguado nos permite saber que marcas de cemento fraguan más rápido.

Para conocer dichos tiempos se necesita el aparato de Guillmore, el cual tiene dos agujas, la de menor área determina el fraguado inicial y la de mayor área para el fraguado final.

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-059-ONNCCE, 2010) y establece que el tiempo del fraguado inicial debe ser mayor a 45 minutos y el fraguado final no debe exceder las 7 horas.

Procedimiento:



1. Con la pasta que se obtuvo en la prueba de consistencia normal, se aplanan la muestra de la pasta sobre el cuadro de cristal formando una circunferencia de aproximadamente 12 cm de diámetro y 1 cm de espesor.
2. Para determinar el fraguado inicial se coloca la circunferencia por debajo de la aguja y se deja caer la aguja a ras de la pasta y si ésta ya no deja marca se mide el tiempo en el que entró en contacto el agua con el cemento y en el que ya no dejó marca la aguja sobre la pasta, el mismo procedimiento se utiliza para el fraguado final utilizando la aguja de menor área.

Se recomienda realizar la penetración cada 15 minutos para el fraguado inicial y transcurridas las 5 horas cada media hora para el fraguado final.

### 9.2.3 Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico.

La densidad del cemento es una propiedad importante para el proporcionamiento del concreto y en comparación con los agregados, esta propiedad no varía de forma drástica en las diferentes marcas que existen en el mercado. El método de prueba se rige por la norma mexicana (NMX-C152-ONNCCE, 2014).

El equipo necesario es el siguiente:

- Muestra representativa de cemento
- Frasco de Le Chatelier
- Balanza
- 250 ml de petróleo
- Recipiente con agua
- Termómetro
- Embudo no absorbente

Procedimiento:

1. Se vierte el petróleo en el frasco de Le Chatelier hasta un nivel de 1 ml, se sumerge el bulbo del frasco en agua y se gira para establecer el nivel de petróleo.
2. Se toma la lectura del petróleo y se anota como lectura inicial,  $L_i$  (ml).



3. Se pesan 60 gramos de cemento aproximadamente, procurando que la masa del cemento eleve al petróleo después del segundo bulbo para poder tomar lecturas y se registra la masa como  $M_c$  (gr).
4. Vaciar los 60 gramos de cemento lentamente procurando que no se obstruya en el primer bulbo.
5. Mover el frasco lentamente para que el aire atrapado entre el cemento y el petróleo salga.
6. Se toma la lectura al nivel del petróleo y se registra como  $L_f$  (ml).

$$\text{densidad} = \frac{M_c}{L_f - L_i}$$

### 9.3 Pruebas realizadas a Concreto fresco

#### 9.3.1 Método de prueba estándar para el revenimiento del concreto hidráulico

La prueba de fluidez más común en la industria de la construcción es la de revenimiento, ya que es la más sencilla de realizar tanto en campo como en laboratorio y ofrece resultados de mayor confianza que las demás pruebas.

La prueba de revenimiento, se realizó con el objetivo de determinar la trabajabilidad de las diferentes mezclas que se realizaron durante este análisis.

Tabla 9-3 Tolerancia en revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE, 2010)

Revenimiento	Tolerancia
$R < 5$ cm	$\pm 1.5$
$5 \text{ cm} < R < 10$ cm	$\pm 2.5$
$R > 10$ cm	$\pm 3.5$

Equipo que se utiliza:

- Molde metálico, troncocónico, abierto por ambos extremos, con un diámetro superior de 10 cm e inferior de 20 cm además de pisaderas y asas (Fig. siguiente).



- Varilla punta de bala lisa, de un diámetro de 5/8 de pulgada.
- Placa de apoyo, rígida, no absorbente y por lo menos de 40 x 60 cm.
- Cucharón metálico
- Flexómetro
- Esponja para humedecer el material necesario.

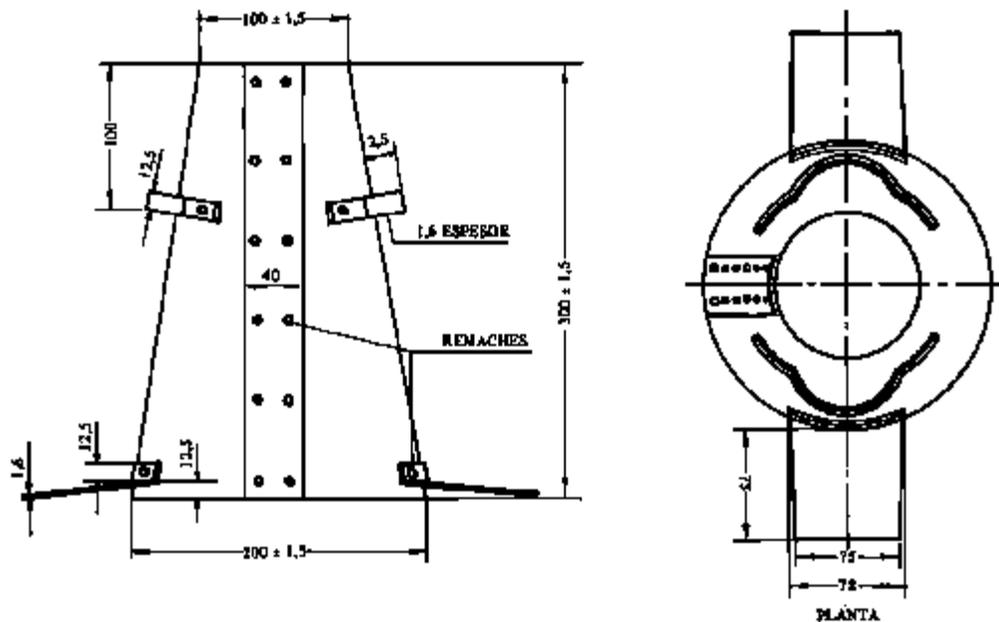


Ilustración 9-15 Molde troncocónico para determinación de revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE, 2010)

### Procedimiento:

1. Se coloca la placa sobre una superficie de apoyo horizontal, sobre esta se coloca el molde, ambos limpios y humedecidos con agua, (no se permite humedecer con aceites ni grasa).
2. El operador se posiciona sobre las pisaderas del molde, evitando el movimiento de éste durante el llenado.
3. Se llena el molde en tres capas de aproximadamente igual volumen y se apisona cada capa con 25 golpes de la varilla pisón distribuidos uniformemente. La capa inferior se llena hasta aproximadamente 7 cm de altura y la capa media hasta aproximadamente 16cm de altura. Al apisonar la capa inferior se darán los primeros golpes con la varilla pisón ligeramente inclinada alrededor del perímetro. Al apisonar la capa media y superior se

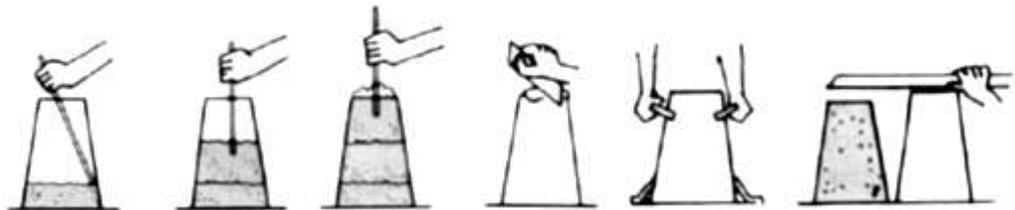


darán los golpes de modo que la varilla pisón penetre 2.5 cm la capa subyacente. Durante el apisonado de la última capa se deberá mantener permanentemente un exceso de concreto sobre el borde superior del molde.

4. Se enrasa la superficie de la capa superior con la varilla pisón y se limpia el concreto derramado en la zona adyacente al molde.

Inmediatamente después de terminado el llenado, enrase y limpieza, se carga el molde con las manos, sujetándolo por las asas y dejando las pisaderas libres y se levanta en dirección vertical sin perturbar el concreto en un tiempo de 5 a 12 segundos.

5. Toda la operación de llenado y levantamiento del molde no debe demorar más de tres minutos.
6. Se coloca el molde a un lado de la mezcla para medir la disminución de altura del concreto respecto al molde, para esto se coloca la varilla sobre el molde de forma horizontal y se mide la distancia entre el concreto y la varilla, como se muestra en la ilustración.



*Ilustración 9-16 Proceso para la determinación del revenimiento*

### 9.3.2 Determinación del potencial hidrógeno en la mezcla

El pH es una medida de la acidez o basicidad de la mezcla que se está elaborando. Las siglas significan "potencial de hidrógeno". La escala de pH se establece en una recta numérica que va desde el 0 hasta el 14. El número 7 corresponde a las soluciones neutras. El sector izquierdo de la recta numérica indica acidez, y el derecho indica que las soluciones son básicas.



Para realizar esta prueba es necesario contar con un indicador de pH, el cual es una sustancia que permite medir el pH de la mezcla. Habitualmente, se utilizan como indicador de las sustancias químicas que cambian su color al cambiar el pH. La forma más rápida, económica y sencilla es utilizar un indicador ácido- base: sustancia colorida que en un valor de pH determinado cambia súbitamente de color. Es una sustancia ácida o básica, que presenta diferente estructura electrónica dándole un color característico.

Existen muchas sustancias que pueden ser usadas como indicadores ácido- base y todas tienen un valor particular de pH en el que cambian de color. El indicador universal, es una mezcla de sustancias colorantes que viran de color en diferentes valores de pH y es el mismo en el que están impregnadas las tiras de papel de pH.

Equipo:

pH- metro o indicador universal

Procedimiento

1. Se realiza la homogenización de los materiales que componen la mezcla del concreto.
2. Se deja reposar la mezcla durante unos 5 minutos para dar tiempo a que empiece a reaccionar el cemento.
3. Se coloca el indicador universal en la mezcla de concreto.
4. Se comparan los colores que muestra el indicador universal con los que se muestran de referencia en el empaque del indicador. De esta manera se obtiene el valor del pH.

### 9.3.3 Determinación de la temperatura de la mezcla

Este método de prueba permite medir la temperatura de mezclas de concreto recién mezclado, dosificado con cemento portland. Puede usarse para verificar que el concreto satisfaga requerimientos específicos de temperatura (ASTM C1064, 2012).



#### Equipo:

- Termómetro de al menos 0,5 ° C de exactitud
- Carretilla o charola
- Pala o cucharón

#### Procedimiento:

1. Humedezca la carretilla o charola con agua antes del muestreo.
2. Obtenga la muestra de concreto fresco siguiendo las instrucciones de la norma (ASTM-C-172, 2008).
3. Homogenice la muestra usando la pala o el cucharón.
4. Asegúrate que el espesor de la capa de concreto es por lo menos 3 veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso.
5. Coloque el termómetro de tal forma que el vástago esté sumergido un mínimo de 3 pulgadas en la muestra de concreto fresco, es necesario asegurarse que el vástago se cubra con 3 pulgadas de concreto alrededor de él en cualquier dirección.
6. Suavemente se presiona la superficie del concreto alrededor del termómetro, de tal forma que el vástago quede totalmente cubierto por la mezcla y la temperatura del aire en el ambiente no afecte la lectura.
7. Se deja el termómetro dentro de la mezcla de concreto fresco por un período de 2 minutos o hasta que la lectura se estabilice.
8. Finalmente se registra el dato obtenido de la lectura del termómetro (ASTM-C-1064-86, 1993).

### 9.4 Pruebas realizadas a Concreto endurecido

#### 9.4.1. Preparación de los especímenes

##### 9.4.1.1. Método de prueba para el curado de especímenes

El curado del concreto es el proceso posterior a la colocación y acabado en el cual se debe de adicionar o en el peor de los casos no permitir que el concreto pierda humedad, dado que al entrar en contacto con una humedad mayor al 80% el cemento hidráulico empieza endurecer, esta reacción es más eficiente cuanto



mayor humedad exista en el cemento. La edad del concreto inicia cuando el agua de mezcla se disuelve con el cemento y forman la pasta.

El curado en laboratorio es el proceso que se les da a las muestras que se obtienen del concreto fresco, cilindros y vigas comúnmente, aunque los especímenes de mortero a base de mortero de albañilería y morteros a base de cemento y cal, también son curados por los mismos métodos que el concreto. Las muestras de concreto son realizadas con la ayuda de moldes metálicos que se retiran a las 24 horas de haber sido elaboradas, enseguida deben ser puestas a curar y retirarlas del curado hasta la fecha de prueba. Para los trabajos de campo las edades más comunes son 3, 7, 14 y 28 días y para los trabajos de investigación se pueden tener edades de años y de igual manera debe permanecer en curado hasta la fecha de prueba (Trujillo Calderón, 2016).

Procedimiento:

Existen dos métodos de curado en laboratorio de acuerdo con la norma mexicana (NMX-C-159-ONNCCE-2016, 2016), el empleado para esta investigación fue el curado por inmersión. Consiste en sumergir al espécimen, de forma vertical tanto en cilindros y vigas, en una pila de curado donde la superficie del agua debe estar a no más de 2.5 cm sobre la superficie de los especímenes. La temperatura del agua debe estar entre los 21°C y 25°C con un 3% de cal respecto a la masa del agua en la pila de curado. Aunque se ha demostrado que temperaturas en el agua de curado entre los 13°C y 28°C no afectan de forma drástica las propiedades mecánicas del concreto.

#### 9.4.1.2. Práctica para el cabeceo de especímenes de concreto con azufre.

Antes de realizar la prueba de compresión de los especímenes se realiza el cabeceo de estos de acuerdo con la norma mexicana (NMX-C-109-ONNCCE, 2013). Esto con el objetivo de obtener la planicidad y perpendicularidad requerida para su ensayo.

Equipo:



- Mortero de azufre
- Parrilla de gas
- Recipiente para fundir azufre
- Mascarilla con filtro
- Alineador para cabeceo (guías metálicas), junto con su plato metálico con diámetro superior al del espécimen
- Diésel para lubricación del plato metálico

#### Procedimiento

1. Colocar en el recipiente la cantidad necesaria de mortero de azufre para cabecear los especímenes deseados.
2. Se pone el recipiente sobre la parrilla a fuego alto hasta que alcance la temperatura de 95 °C para que se funda el mortero de azufre y sea trabajable el líquido.
3. Se coloca el plato metálico en la parrilla durante unos segundos con la intención de calentarlo ligeramente para evitar choques térmicos entre el metal y el azufre.
4. Una vez fundido el azufre, se vacía sobre en el plato precalentado, lubricado y apoyado sobre las guías hasta la mitad del nivel del plato.
5. Enseguida se desliza el espécimen sobre las guías metálicas hasta que éste siente sobre el azufre.
6. Después de un tiempo, el azufre se vuelve sólido de nuevo y se retira el cilindro con la primera cara cabeceada.
7. Se repiten los pasos anteriores para la segunda cara del espécimen

#### 9.4.2. Pruebas destructivas

##### 9.4.2.1 Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de cilindros de concreto.

La prueba de resistencia a la compresión se realiza en una máquina universal “Forney”. Todas las pruebas a la compresión se realizan en el rango de 75



toneladas. Esta prueba se realiza de acuerdo a la norma mexicana (NMX-C-083-ONNCCE, 2014)

Una vez cabeceado el espécimen a probar, se deja enfriar durante unos minutos y se lleva a la máquina universal para realizar la prueba de compresión.



*Ilustración 9-17 "Máquina universal Forney"*

Procedimiento:

1. Se colocan los aditamentos para la prueba de compresión y se enciende la máquina universal.
2. Se mueve la platina superior (platina azul) hasta la altura donde quede una separación de 2.5 cm aproximadamente entre el cilindro y el disco de compresión.
3. Se abren las dos llaves de la máquina para permitir el flujo aceite y que levante la platina inferior (platina gris) para comprimir al cilindro.
4. Se comprime el cilindro hasta notar una clara falla del espécimen, esto con la finalidad de determinar la calidad del cabeceo y se registra la carga máxima.



*Ilustración 9-18 "Prueba de compresión"*

Para obtener la resistencia a la compresión se utiliza la siguiente ecuación:

$$f'c = \frac{F}{A}$$

$f'c$  es la resistencia a la compresión,  $\text{kgf/cm}^2$

$F$  es la carga máxima,  $\text{kgf}$

$A$  es el área del espécimen,  $\text{cm}^2$



La resistencia a la compresión se determina con el promedio de dos especímenes como mínimo, ensayados a la edad deseada. Y con una aproximación de 100 kPa (1kg/cm<sup>2</sup>)

#### 9.4.2.2 Método de prueba estándar para la resistencia a la flexión en vigas de concreto.

Esta prueba se realizó en la misma máquina que la prueba de compresión, solo que con la ayuda de los aditamentos para flexión. El método de prueba está basado en la norma mexicana (NMX-C-191-ONNCCE, 2015).

Procedimiento:

1. Una vez retiradas las vigas de la pila de curado, se marcan los apoyos y las líneas de los rodillos donde se aplicará la carga.
2. Se colocan los apoyos con una abertura de 45 cm entre sí sobre la platina de la máquina, se pone el espécimen sobre los apoyos guiados por las marcas.
3. Se centra el espécimen y los apoyos para después colocar los rodillos sobre las líneas marcadas (centradas, con una separación de 15 cm) y encima de los rodillos la placa metálica.
4. Se aplica carga de forma lenta hasta la falla y se registra la carga última.

La mejor falla es cuando el espécimen se parte por la mitad o cuando menos en el tercio medio. La norma establece otra fórmula para determinar el módulo de ruptura cuando la falla se presenta entre el apoyo y el extremo del tercio medio, cuando la falla se presenta sobre o fuera de los apoyos, la prueba debe repetirse.

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

Donde:

R es el módulo de ruptura, en MPa (kgf/cm<sup>2</sup>)

P es la carga máxima aplicada, en N (kgf)

L es la distancia entre apoyos, en cm

b es el ancho promedio del espécimen, en cm



d es el peralte promedio del espécimen, en cm

### 9.4.3. Pruebas no destructivas

#### 9.4.3.1 Método de prueba estándar para la velocidad de pulso a través del concreto

Esta prueba se realizó con el equipo, utilizando un gel como liquido estabilizador. La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-275-ONNCCE, 2004).

Equipo:

- Especimen de concreto
- Equipo de velocidad de pulso
- Gel

Procedimiento:

1. Se enciende el equipo y se calibra
2. Se coloca el espécimen de forma horizontal recién sacado de la pila para realizar la prueba lo antes posible.
3. Se agrega gel en los transductores y se colocan en la parte central de la circunferencia del cilindro o el área de la base de la viga.
4. Se introduce la altura del cilindro o el largo de la viga (según el caso) y se toman 10 lecturas para después sacar el promedio.

Es importante agregar una buena cantidad de gel para que las lecturas no varíen de forma drástica.

*Tabla 9-4 Criterios de Evaluación para la Calidad del Concreto*

<b>Velocidad de propagación (m/s)</b>	<b>Tolerancia permisible</b>
<2,000	Deficiente
2,001 a 3,000	Normal
3,001 a 4,000	Alta
>4,000	Durable



### 9.4.3.2 Resistividad eléctrica

Esta prueba fue realizada con el resistómetro para suelos con el cual se puede determinar la resistencia eléctrica en ohm. Se utilizaron las normas (NMX-C-514-ONNCCE, 2016), así como parámetros de la RED DURAR.

#### Equipo.

- Resistómetro
- Placas de cobre de igual diámetro al del cilindro
- Cable del N° 12 AWG con punta banana y punta caimán
- Almohadilla de tela saturada de agua

#### Procedimiento

1. Una vez sacado de la pila el espécimen, esta debe ser la primera prueba que se le debe realizar con el propósito de que no pierda humedad. Si por alguna razón perdiera humedad se debe humedecer superficialmente para que esté completamente saturado y poder realizar la prueba.
2. Se conectan los cables al equipo y a las placas de cobre.
3. Se coloca una almohadilla de tela completamente saturada por debajo del espécimen y otra por encima sirviendo como material de cabeceo para las placas de cobre y poder tomar la lectura sin que esta oscile demasiado.
4. Con la finalidad de obtener resultados similares se coloca un cilindro como contrapeso sobre la placa superior, esto debido a que la fuerza con la que se presionen las placas afecta la lectura, de esta manera se considera una presión constante en todos los ensayos.

*Tabla 9-5 Criterios de evaluación. (Red Durar, 2000).*

<b>Resistividad eléctrica (KΩ-cm)</b>	<b>Riesgo de corrosión</b>
<10	Alto riesgo
10 a 200	Riesgo moderado
>200	Poco riesgo



## 10. Resultados y discusiones

Este capítulo complementa los análisis de los capítulos anteriores, en donde se muestran cómo se realizan las diferentes pruebas para esta investigación.

Debemos recordar que existe una muestra testigo que se elaboró con las cantidades indicadas obtenidas del proporcionamiento realizado por el método ACI, la cual sirve como referencia para evaluar el resto de las mezclas.

Adicionalmente se mostrará el resultado de otras tres mezclas identificadas con las nomenclaturas M1-M, M6-M y M7-M, las cuales tienen las siguientes disminuciones de material, tomando como referencia los valores indicados por el método ACI.

- M1-M= 0.5% aditivo, -20% de agua, 100% de cemento
- M6-M= 0.3% aditivo, -14% de cemento, 90% de agua
- M7-M= 0.3% aditivo, -20% de cemento, agua variable para mantener revenimiento

### 10.1 Agregados pétreos

Los agregados pétreos son de gran importancia para esta investigación, esto debido a que gran parte de las propiedades que tengan estos, se verán reflejadas en la calidad del concreto que se elabora con ellos.

Es por esta razón que se ha dedicado suficiente tiempo para realizar un análisis detallado de las propiedades de estos materiales.

Los resultados obtenidos se analizan y a continuación.

#### 10.1.1 Arena

Las pruebas realizadas a la arena, fueron las primeras realizadas durante esta investigación, esto con la finalidad de caracterizar el material y ver qué tan apto es para ser utilizado en la elaboración de concreto.

En la tabla 10-1 se muestran los resultados obtenidos de las diferentes pruebas, donde se puede observar que prácticamente cumple en todas las propiedades requeridas para realizar un concreto.



Tabla 10-1 Resultados obtenidos de las pruebas realizadas a la arena

CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA DEL BANCO "LA MAGDALENA"				
PRUEBA	RESULTADO	UNIDAD	LÍMITE	NORMA
Absorción	4.640	%	No establece	NMX-C165-ONNCCE-2014
M.V.S.S.	1.649	g/cm <sup>3</sup>	No establece	NMX-C-073-ONNCCE-2004
M.V.S.V.	1.746	g/cm <sup>3</sup>	No establece	NMX-C-073-ONNCCE-2004
Colorimetría	2	-	No. 3 máx.	NMX-C-111-ONNCCE-2004
Sedimentación	Aceptable	-	No establece	Manual de laboratorio
Pasa Malla No. 200		%	15% máx.	NMX-C-111-ONNCCE-2014
Terrones de Arcilla		%	3% máx.	NMX-C-111-ONNCCE-2004
Módulo de finura	3.640	%	2.30-3.10	NMX-C-111-ONNCCE-2014
Densidad	2.610	g/cm <sup>3</sup>	No establece	NMX-C-165-ONNCCE-2014
Equivalente de Arena			85% mín.	NMX-C-480-ONNCCE-2014

Como se puede observar en la ilustración 10-1 se aprecia que la arena del banco de magdalena tiene un alto contenido de finos, lo cual provoca que el módulo de finura (3.64) esté por encima de los valores establecidos por la norma, sin embargo se prosiguió con la investigación con el uso de esta arena, esto debido a que es una arena muy utilizada en la industria de la construcción.

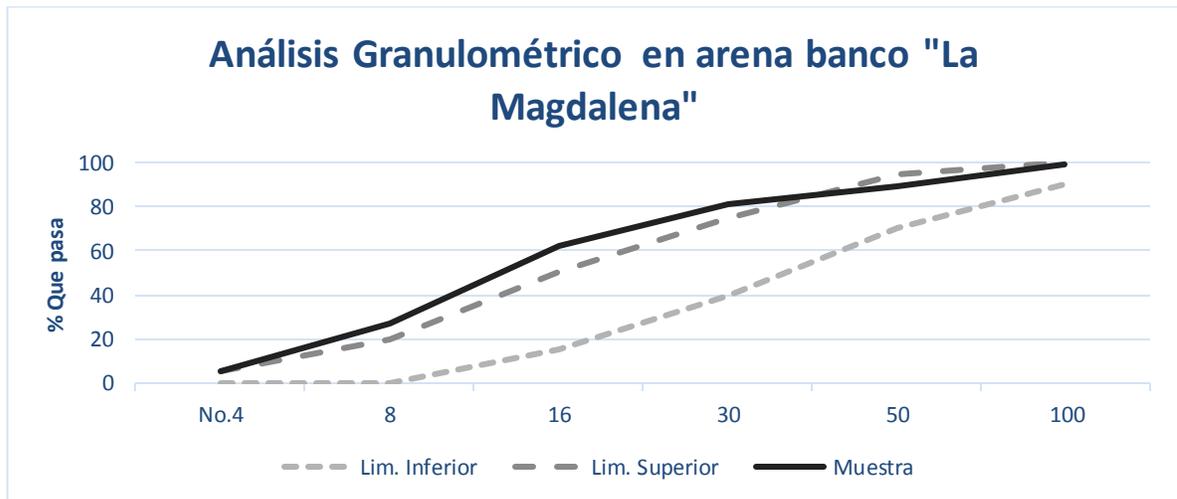


Ilustración 10-1 Resultado granulométrico de la arena



### 10.1.2 Grava

Los valores obtenidos de los ensayos realizados a la grava se presentan en la tabla 10-2, en donde muestra que la grava utilizada para esta investigación tiene buenas propiedades y es apto para ser utilizado en la elaboración de concreto.

Aunque la grava utilizada en este estudio tiene partículas de una pulgada, se considera que el tamaño máximo nominal es de 3/4” debido a que es la primera malla que retiene más del 5% de la muestra.

Tabla 10-2 Resultados de las pruebas realizados a la grava

CARACTERIZACIÓN DE LA GRAVA DEL BANCO "TRACSA"				
PRUEBA	RESULTADO	UNIDAD	LÍMITE	NORMA
Absorción	2.360	%	No establece	NMX-C164-ONNCCE-2014
MVSS	1.425	g/cm <sup>3</sup>	No establece	NMX-C-073-ONNCCE-2004
MVSV	1.581	g/cm <sup>3</sup>	No establece	NMX-C-073-ONNCCE-2004
Tamaño Máximo	3/4	in	No establece	NMX-C-077-ONNCCE-1997
Densidad	2.500	g/cm <sup>3</sup>	No establece	NMX-C-164-ONNCCE-2014

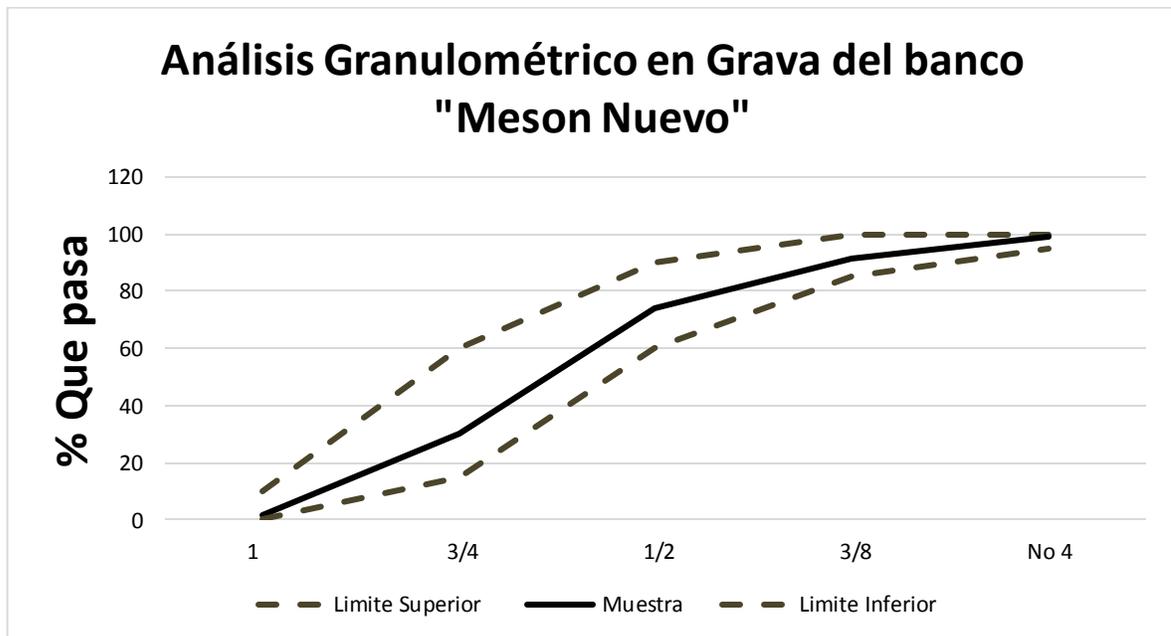


Ilustración 10-2 Resultado del análisis granulométrico de la grava



## 10.2 Cemento

El cemento es el componente que dará al concreto la propiedad conglomerante, su estudio es importante para utilizar la cantidad necesaria para que el concreto obtenga un buen comportamiento físico-mecánico, pero se debe cuidar el no utilizar demasiado, de tal manera que sea una mezcla económicamente poco viable.

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al cemento se encuentran en la tabla 10-3. En donde se puede observar que cumple con los límites establecidos por la norma para ser utilizado en mezclas de concreto.

Tabla 10-3 Resultados de los ensayos realizados al cemento

CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO				
PRUEBA	RESULTADO	UNIDAD	LÍMITE	NORMA
Consistencia Normal		%	23% a 33%	NMX-C-057-ONNCCE-2010
Fraguado Inicial	330 min	min	>45 min	NMX-C-059-ONNCCE, 2010
Fraguado Final	750 min	min	<420 min	NMX-C-059-ONNCCE, 2010
Densidad del cemento	3.04	g/cm <sup>3</sup>	2.9 - 3.15	NMX-C-152-ONNCCE, 2010

## 10.3 Diseño de mezclas

**Paso 1. Elección del revenimiento:** Un objetivo de la mezcla a diseñar es lograr la mayor trabajabilidad posible debido a que se ocupa que sea un concreto bombeable por lo tanto se elige un revenimiento de diseño de 15 cm.

**Paso 2. Elección del tamaño máximo de agregado:** La dimensión más pequeña de los especímenes a elaborar para esta investigación es de 15 cm. La quinta parte de esta dimensión ( $15 \text{ cm}/5=3 \text{ cm}$ ) representa el tamaño máximo de agregado que se puede utilizar. El tamaño máximo de nuestra grava es de  $\frac{3}{4}$ “, correspondiente a 1.905 cm < 3 cm por lo que es un tamaño apropiado para ser utilizado.

Los dos puntos posteriores quedan satisfechos ya que no se pretenden colar losas o utilizar acero de refuerzo embebido en los especímenes.



**Paso 3. Cálculo del agua de mezclado y el contenido de aire:** Como se eligió un revenimiento de 15 cm para el diseño de la mezcla, se procede a la elección del agua de mezclado correspondiente a 1 m<sup>3</sup> mediante la tabla 8-2.

Para un revenimiento de 15 cm y un T.M.N. de agregado de ¾” corresponde 216 Kg/m<sup>3</sup> de agua, y se considera que se presentará un 2% de aire incluido consecuencia del mismo proceso de elaboración.

**Paso 4. Selección de la relación agua/cemento:** Como se busca obtener una resistencia mecánica de 25 MPa y se considera un concreto sin aire incluido, se puede obtener de la tabla 8-3 una relación agua-cemento de 0.61. Lo cual contribuye a que sea una mezcla trabajable y bombeable. Estos valores serán utilizados en el cálculo del contenido de cemento, al conocerse ya la cantidad de agua necesaria.

**Paso 5. Cálculo del contenido de cemento.** La obtención del valor del contenido de cemento está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Cantidad de cemento en masa} = \frac{\text{Cantidad de agua en Kg}}{\text{Relación agua - cemento}}$$
$$\text{Cantidad de cemento en masa} = \frac{216}{0.61} = 354.09 \text{ kg/m}^3$$

**Paso 6. Estimación del contenido del agregado grueso:** La tabla 8-4 nos permite llevar a cabo la determinación de la cantidad de agregado grueso, con base de tamaño máximo del agregado y el módulo de finura de la arena. Analizando el tamaño de ¾” y un valor de M.F. de 3.6 se puede interpolar y obtenemos un valor de 0.54, lo cual significa que se tendrá un volumen del 54% de agregado grueso en la mezcla.

**Paso 7. Estimación del contenido de agregado fino:** Para la estimación del contenido del agregado fino se lleva a cabo por medio del método del volumen absoluto, del cual se obtienen 853.74 kg de arena para 1 m<sup>3</sup> de concreto

**Paso 8. Ajustes o correcciones por humedad del agregado:** Una vez que ya se tiene calculada la cantidad de material necesario para 1 m<sup>3</sup> de mezcla se realizan las correcciones por humedad del agregado, esta corrección consiste en restar el porcentaje de la humedad actual del porcentaje de absorción del material. Este



ajuste se realiza en cada ocasión que se desea realizar una mezcla ya que la humedad varía de acuerdo a la humedad del ambiente.

Tabla 10-4 Resumen de las cantidades para 1 m<sup>3</sup>.

<b>Resumen de las cantidades obtenidas en el proporcionamiento</b>			
<b>Material</b>	<b>Volumen (L)</b>	<b>Masa (Kg)</b>	<b>Masa Corregida (Kg)</b>
Cemento	116.86	354.10	354.10
Agua	216.00	216.00	237.02
Arena	341.50	853.74	848.53
Grava	305.64	797.72	729.95
Aire	20.00	0.00	0.00

Estas cantidades en el proporcionamiento fueron utilizadas para realizar las muestras del testigo utilizado para esta investigación.

Para el resto de mezclas se utilizó este mismo proporcionamiento, pero se varió el porcentaje del contenido de cemento, dándole una disminución del 14% y del 20%.

#### 10.4 Concreto fresco

Durante la realización de las mezclas de concreto, se tomaron en cuenta diferentes parámetros que nos permiten conocer el comportamiento que se tiene de la mezcla.

De acuerdo con la tabla 10-4, en donde se muestran los resultados obtenidos, se puede ver que se obtienen temperaturas muy cercanas a las ambiente, aunque hay diferencias en ellas, esto se debe al calor expedido por las diferentes cantidades de cemento utilizado, así como a la hora de realización de la muestra, ya que la temperatura ambiente varía.

En cuanto al pH de la muestra se mantiene en un nivel superior a 9, lo que indica que se trata de mezclas alcalinas, lo cual permite ser utilizado con acero de refuerzo sin tener una corrosión prematura.

Finalmente se observa que se cumple con los límites establecidos para el revenimiento, lo cual garantiza una buena trabajabilidad de la mezcla de concreto, sin producir segregación o exudación.

Tabla 10-5 Resultados obtenidos de pruebas realizadas al concreto fresco.



<b>PRUEBAS EN CONCRETO FRESCO</b>			
<b>Mezcla</b>	<b>Temperatura</b>	<b>pH</b>	<b>Revenimiento</b>
Testigo	18	13	14
M7-M	21	13	13
M6-M	19	12	13.5
M1-M	19	12	14.5

## 10.5 Concreto endurecido

### 10.5.1 Compresión simple

La prueba a la compresión simple es una de las más importantes en el presente estudio, ya que nos permite conocer a ciencia cierta la resistencia mecánica que soporta el concreto que se elaboró y de esta manera poder realizar una evaluación detallada de su comportamiento.

Se puede observar en las ilustraciones que todas las mezclas llegan a superar la resistencia de diseño, pero la que más se acerca a la resistencia objetivo es la mezcla M7-M, la cual presenta un  $f'c$  de 27.98 MPa, el cual se considera correcto, previendo algún margen de error para concreto realizado en obra, de esta manera se garantiza obtener resultados positivos ante cualquier prueba.

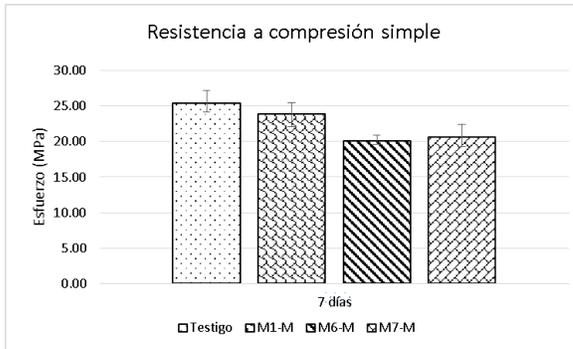


Ilustración 10-3 Resultados de la prueba de compresión simple a 7 días

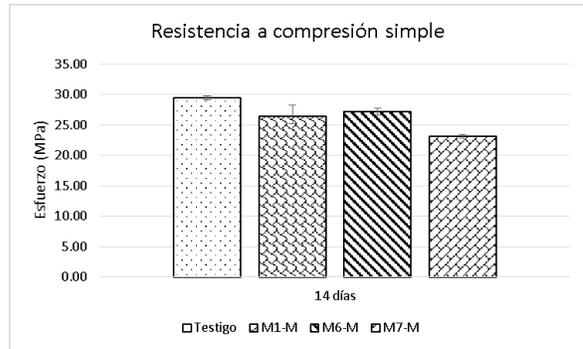


Ilustración 10-4 Resultados de la prueba de compresión simple a 14 días

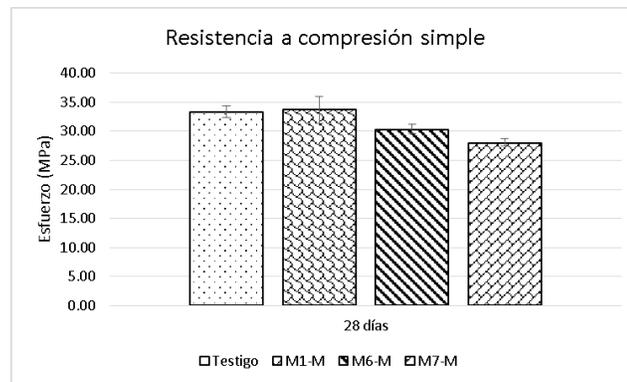


Ilustración 10-5 Resultados de la prueba de compresión simple a 28 días

### 10.5.2 Flexión

El módulo de ruptura obtenido a partir de la prueba de flexión es un parámetro que ayuda a evaluar la calidad del concreto, este es un parámetro principalmente utilizado para el diseño de pavimentos.

Según bibliografía existente, se especifica que el valor del esfuerzo a la flexión o valor del módulo de ruptura en especímenes es de 0.7 a 0.8 por la raíz del esfuerzo a compresión (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

En el caso de las muestras ensayadas para módulo de ruptura, cumplen con este parámetro, incluso lo superan por un poco.



Es digno de hacer mención que para esta prueba no se realizó ensayo en las mezclas M1-M y M6-M, esto debido por la gran cantidad de material necesario para realizar vigas y proceder con el ensayo, y que además nos interesaba principalmente conocer el comportamiento de la mezcla M7-M con respecto a la testigo.

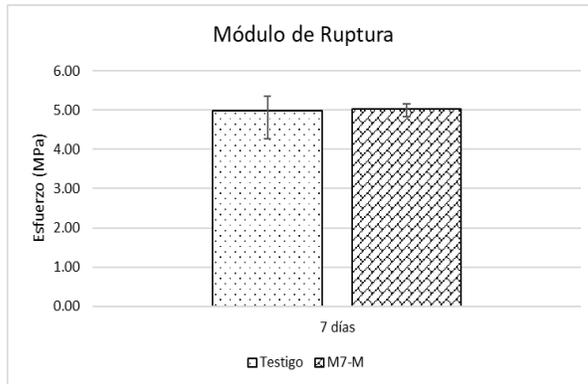


Ilustración 10-7 Resultados de la prueba de flexión a 7 días

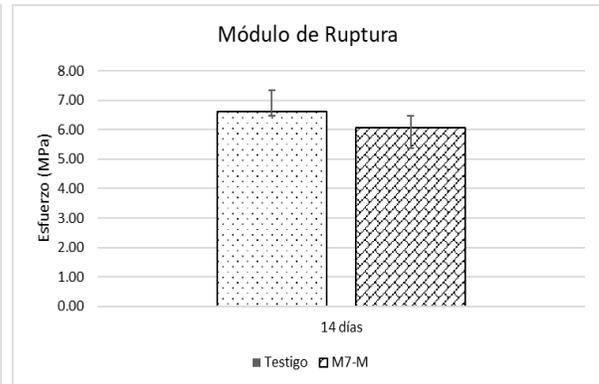


Ilustración 10-6 Resultados de la prueba de flexión a 14 días

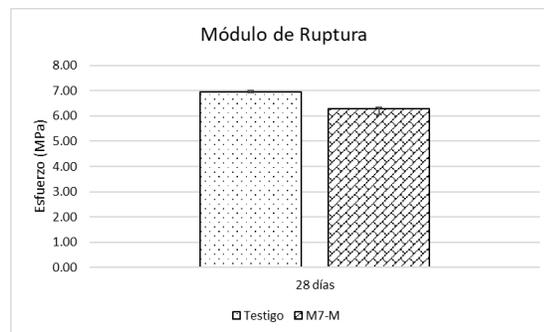


Ilustración 10-8 Resultados de la prueba de flexión a 28 días

### 10.5.3 Velocidad de Pulso Ultrasónico

La velocidad de pulso es un parámetro utilizado ampliamente para conocer un parámetro de la durabilidad del concreto. De acuerdo con especificaciones de la Red Durar cuando se obtienen valores superiores a 4000 m/s se puede considerar que existe una buena calidad en el concreto y por tal razón va a ser durable.



Como se puede observar en las ilustraciones 10-8 a 10-10, se obtuvieron resultados de una calidad durable para todas las muestras, lo que indica que tendrán un buen comportamiento aun con el paso del tiempo.

También se observa que la mezcla M7-M se encuentra tan solo un poco por debajo de la mezcla testigo, lo cual es muy bueno, ya que a pesar de tener una disminución de 20% respecto a la masa del cemento, aún sigue teniendo muy buen comportamiento.

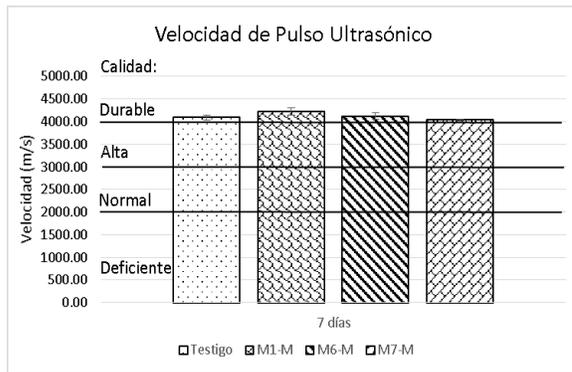


Ilustración 10-9 Resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico a 7 días

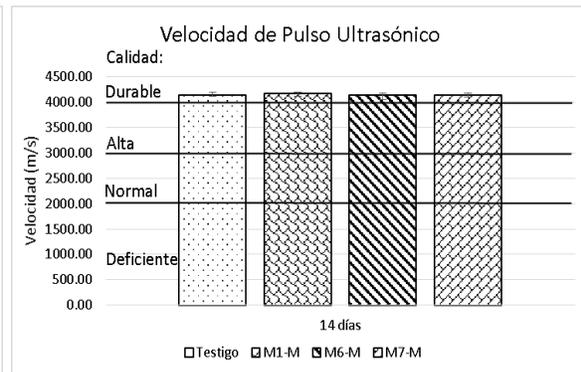


Ilustración 10-10 Resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico a 14 días

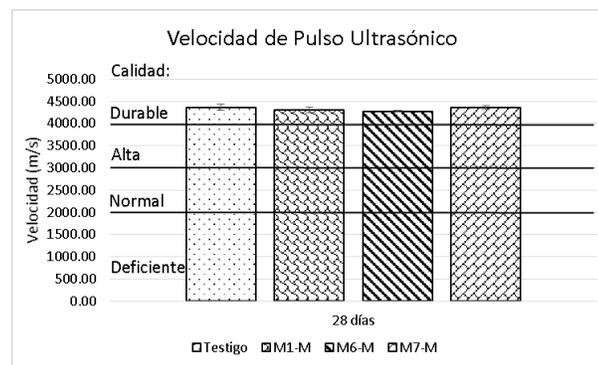


Ilustración 10-11 Resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico a 28 días

#### 10.5.4 Resistividad Eléctrica

Los valores de resistividad eléctrica ( $\rho$ ) se pueden emplear como parámetros de durabilidad, y según la normativa (NMX-C-514-ONNCCE, 2016) para la evaluación del concreto, este puede ser con muy bajas o muy altas velocidades de corrosión



según sea el caso. Los valores de resistividad que se presentan en los especímenes ensayados en esta investigación nos dan parámetros de riesgo moderado a la corrosión, en este caso la mezcla testigo es la que obtiene los valores más altos, indicando, así menor riesgo. Mientras que las demás mezclas tienen un valor más bajo, siendo la mezcla M7-M la que tiene el mayor riesgo a la corrosión.

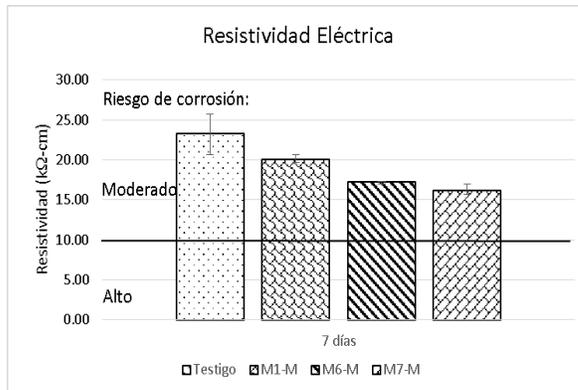


Ilustración 10-13 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a 7 días

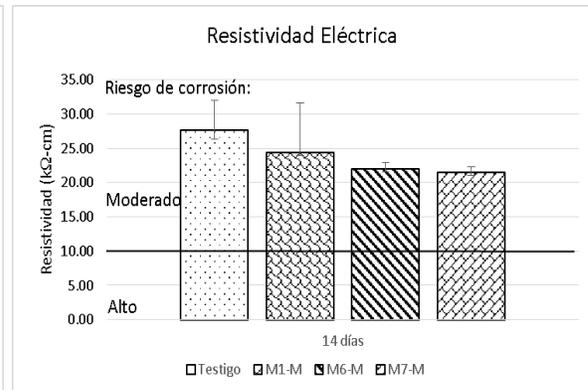


Ilustración 10-12 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a 14 días

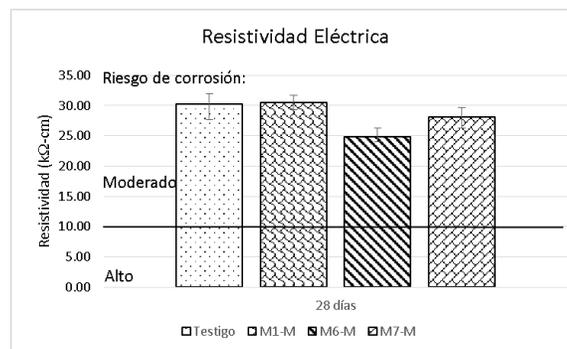


Ilustración 10-14 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a 28 días



## 11. Conclusiones

Sin lugar a duda el concreto es uno de los inventos más sobresalientes que ha realizado el ser humano. Dicha creación ha sido ampliamente utilizada debido a la gran variedad de usos que puede dársele, además de ser de bajo costo debido a la fácil obtención de su materia prima. Aunque la calidad de este depende de la calidad de los materiales con los que ha sido fabricado.

Tras la presente investigación se puede decir que se han cumplido los objetivos planteados para esta. Ya que se ha podido encontrar un proporcionamiento que nos permite obtener un concreto resistente mecánicamente, y al mismo tiempo se ha conseguido utilizar menos cemento, el cual es el componente más caro de un concreto.

También se logró mantener la relación agua cemento sin afectar el revenimiento, de hecho, se consiguió utilizar menos agua de la indicada por el método ACI lo cual permite mejorar dicha relación.

Es importante mencionar que aunque se tiene muy buenas propiedades para el agregado grueso, lo cual contribuye en gran manera a las buenas propiedades del concreto. No es el mismo caso del agregado fino, ya que tiene un excedente en cuanto a los finos presentes, lo cual arroja un módulo de finura de 3.64, el cual se encuentra fuera de norma, no obstante las demás propiedades son buenas, por lo que se decidió usarlo con buenos resultados.



## 12. Bibliografía

- ACI 211, A. C. (1991). *ACI Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, 1991 reapproved 2002*,. ACI Committee 211 Report.
- ALCARAZ, N. D. (2010). *INFLUENCIA DE LA MORFOLOGÍA DE PÉTREOS: VOLCÁNICOS, TRITURADOS Y CANTOS RODADOS; CORRELACIONANDO MATEMÁTICAMENTE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD, ESTÁTICO Y DINÁMICO, EN CILINDROS DE CONCRETO DE 10CM X 20CM*. MORELIA, MICH.
- ASTM C1064. (2012). *Método de Ensayo Normalizado de Temperatura de Concreto de Cemento Hidráulico recién Mezclado*.
- ASTM-C-1064-86. (1993). *MÉTODO ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL CONCRETO FRESCO DE CEMENTO PORTLAND*. ASTM.
- ASTM-C-172. (2008). *Muestreo de concreto recién mezclado*. ASTM.
- Bernabé Reyes, C. (2015). *Evaluación de morteros de cemento sustituidos con cenizas puzolánicas para mitigar el fenómeno de corrosión en estructuras de concreto en rehabilitación*. Morelia, Mexico.
- CHRISTIANSON S.A. de C.V. (s.f.). *CRISOTAN R-5. Dispersantes para concretos*. *Boletín Técnico*. CDMX.
- CYCNA. (16 de 06 de 2017). Obtenido de <http://www.cycna.mx/cpc-40-rs/>
- INSTITUTO DEL CONCRETO. (1997). *"MANUAL TECNOLOGÍA Y PROPIEDADES"*, . BOGOTÁ COLOMBIA.: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO -ASOCRETO-, TERCERA REIMPRESIÓN.
- Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto. (2006). *Cemento y Concreto resistentes a sulfatos. El concreto en la obra, problemas, causas y soluciones, 44-47*.



- KOSMATHA, S., & PANARESE, W. (1992). *DISEÑO Y CONTROL DE MEZCLAS DE CONCRETO*, INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO A.C. (IMCYC), PRIMERA EDICIÓN. MEXICO.
- Kosmatka, s., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Skokie, Illinois, EE.UU: Portland Cement Association.
- La macuira. (22 de 06 de 2017). Obtenido de <http://macuiraweb.wixsite.com/paginaweb>
- LABEQUIM. (22 de 06 de 2017). Obtenido de <http://www.labequim.com.mx/html/APARATOSHUMBOLDT.htm>
- Martinez Balvanera, O. G. (2017). Morelia, Mich. *monografias.com*. (22 de 06 de 2017). Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos58/produccion-cemento/produccion-cemento.shtml>
- Navarro Sánchez, L., Martínez Molina, W., & Espinoza Mandujano, J. (2011). *Análisis de Materiales (Tercera Edición ed.)*. Morelia, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Facultad de Ingeniería Civil.
- NEVILLE, A. (1998). *TECNOLOGÍA DEL CONCRETO*, INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO A.C. (IMCYC), PRIMERA EDICIÓN. MEXICO: TRILLAS.
- NMX-C-030-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS-MUESTREO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-057-ONNCCE. (2010). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CEMENTANTES HIDRÁULICOS - DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA NORMAL*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-059-ONNCCE. (2010). *Industria de la construcción-cementantes hidráulicos-determinación del tiempo de fraguado de cementante*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-061-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos-Determinación de la Resistencia a la Compresión en Cementantes Hidráulicos*. CDMX: ONNCCE.



- NMX-C-071-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-MASA VOLUMETRICA-METODO DE PRUEBA*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-077-ONNCCE. (1997). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS PARA CONCRETO-ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS-METODO DE PRUEBA*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-083-ONNCCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO-DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES-MÉTODO DE ENSAYO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-084-ONNCE. (2006). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS PARA CONCRETO-PÁRTICULAS MÁS FINAS QUE CRIBA 0.075 MM (No.200) POR MEDIO DE LAVADO-MÉTODO DE PRUEBA*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-088-ONNCCE. (1997). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE IMPUREZAS ORGÁNICAS EN EL AGREGADO FINO*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-109-ONNCCE. (2013). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO HIDRÁULICO-CABECEO DE ESPECÍMENES*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-122-ONNCCE-2004. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGUA PARA CONCRETO-ESPECIFICACIONES*. CDMEX: ONNCCE.
- NMX-C-132-ONNCCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CEMENTANTES HIDRÁULICOS-DETERMINACIÓN DEL FRAGUADO FALSO DEL CEMENTO HIDRÁULICO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-151-ONNCCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CEMENTANTES HIDRÁULICOS- DETERMINACIÓN DEL CALOR DE HIDRATACIÓN*. CDMX: ONNCCE.



- NMX-C152-ONNCCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-CEMENTANTES-HIDRAULICOS-DETERMINACION DE LA DENSIDAD*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-156-ONNCCE. (2010). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO HIDRÁULICO-DETERMINACIÓN DEL REVENIMIENTO EN EL CONCRETO FRESCO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-159-ONNCCE-2016. (2016). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO-ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE ENSAYO*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-164-ONNCCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DE AGUA EL AGREGADO GRUESO*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO-MÉTODO DE ENSAYO*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-166-ONNCCE. (2006). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS-CONTENIDO DE AGUA POR SECADO-MÉTODO DE PRUEBA*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-191-ONNCCE. (2015). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO-DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO USANDO UNA VIGA SIMPLE CON CARGA EN LOS TERCIOS DEL CLARO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-275-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO-DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PULSO A TRAVES DEL CONCRETO-MÉTODO DE ULTRASONIDO*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2010). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CEMENTANTES HIDRÁULICOS-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO*. CDMX: ONNCCE.



- NMX-C-414-ONNCCE. (2016). *Industria de la construcción-Cementantes hidráulicos-Especificaciones y métodos de ensayo*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-480-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción - Geotecnia - Equivalente de arena de agregados finos - Método de ensayo*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-514-ONNCCE. (2016). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO HIDRÁULICO-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO*. CDMX: ONNCE.
- NOM-040-ECOL. (2002). *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-040-ECOL-2002, PROTECCION AMBIENTAL-FABRICACION DE CEMENTO HIDRAULICO-NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION A LA ATMOSFERA*.
- Red Durar. (2000). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (Tercera ed.)*. México: CYTED.
- RIVERA, G. A. (2010). *CONCRETO SIMPLE*. POPAYÁN, COLOMBIA: UNIVERSIDAD DEL CAUCA.
- RODRÍGUEZ, A. P. (2013). *MANUAL DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE CONCRETO*. CHIHUAHUA: UACH.
- SHETTY, M. (2005). *CONCRETE TECHNOLOGY THEORY AND PRACTICE*. RAM NAGAR, NEW DHELI, INDIA.: S. CHAND AND COMPANU LTD.
- Tecnología de materiales*. (22 de 06 de 2017). Obtenido de <http://tecnololapa.blogspot.mx/2015/09/semana-6-y-7.html>
- Trujillo Calderón, I. (2016). *Comparativa de concreto hidráulico sometida a curado por inmersión y curado al interperie*. Morelia, Mich.