



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE  
HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**TESIS PROFESIONAL**

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

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

**SÓSTENES ALBERTO LÓPEZ REYES**

ASESOR:

**M.I. CINDY LARA GÓMEZ**

COASESORES:

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

**M.I. CIPRIANO BERNABÉ REYES**

Morelia, Michoacán. Julio de 2017.

---



## Contenido

|  |     |
|--|-----|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....          | v   |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                 | vii |
| DEDICATORIAS .....                     | ix  |
| AGRADECIMIENTOS .....                  | x   |
| 1. RESUMEN .....                       | 12  |
| 2. ABSTRACT .....                      | 13  |
| 3. JUSTIFICACIÓN .....                 | 14  |
| 4. HIPÓTESIS .....                     | 15  |
| 5. OBJETIVOS .....                     | 15  |
| 5.1 Objetivo general .....             | 15  |
| 5.2 Objetivos particulares .....       | 15  |
| 6. MARCO TEÓRICO .....                 | 16  |
| 6.1 Antecedentes .....                 | 16  |
| 6.2 Componentes del concreto .....     | 18  |
| 6.2.1 Cemento .....                    | 20  |
| 6.2.1.1 Proceso de fabricación .....   | 21  |
| 6.2.1.2 Clasificación .....            | 23  |
| 6.2.1.3 Propiedades del cemento .....  | 25  |
| 6.2.1.4 Especificaciones .....         | 28  |
| 6.2.2 Agua .....                       | 30  |
| 6.2.2.1 Características del agua ..... | 30  |
| 6.2.2.2 Especificaciones .....         | 31  |
| 6.2.3 Agregados .....                  | 32  |
| 6.2.3.1 Origen de los agregados .....  | 33  |



|         |   |    |
|---------|---|----|
| 6.2.3.2 | Clasificación de los agregados .....                          | 34 |
| 6.2.3.3 | Propiedades de los agregados .....                            | 35 |
| 6.2.4   | Aditivos .....  | 41 |
| 6.2.4.1 | Tipos de aditivos.....  | 41 |
| 7.      | MATERIALES DE ESTUDIO.....                                    | 45 |
| 7.1     | Cemento utilizado .....                                       | 45 |
| 7.2     | Análisis del agua utilizada .....                             | 46 |
| 7.3     | Agregados utilizados en esta investigación .....              | 47 |
| 7.4     | Aditivo utilizado en esta investigación .....                 | 48 |
| 8.      | DISEÑO DE MEZCLAS .....                                       | 50 |
| 8.1     | Introducción .....  | 50 |
| 8.2     | Objetivos.....  | 51 |
| 8.3     | Método del ACI 211 .....                                      | 54 |
| 9.      | DESARROLLO EXPERIMENTAL .....                                 | 59 |
| 9.1     | Caracterización de agregados pétreos.....                     | 59 |
| 9.1.1   | Cuarteo.....  | 59 |
| 9.1.2   | Humedad actual en arenas y gravas.....                        | 60 |
| 9.1.3   | Humedad de absorción en arenas y gravas.....                  | 61 |
| 9.1.4   | Método de prueba para la masa volumétrica seca suelta .....   | 64 |
| 9.1.5   | Método de prueba para la masa volumétrica seca varillada..... | 66 |
| 9.1.6   | Análisis granulométrico en arena y grava .....                | 67 |
| 9.1.7   | Prueba de colorimetría en arena.....                          | 69 |
| 9.1.8   | Sedimentación en arenas .....                                 | 70 |
| 9.1.9   | Material que pasa por la malla N° 200 en arena .....          | 72 |
| 9.1.10  | Prueba de terrones de arcilla de la arena .....               | 73 |



|         |   |    |
|---------|---|----|
| 9.1.11  | Determinación de la densidad en arenas y gravas .....                                       | 75 |
| 9.1.12  | Equivalente de arena.....   | 77 |
| 9.2     | Cemento .....   | 79 |
| 9.2.1   | Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico.....           | 79 |
| 9.2.2   | Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico.....            | 81 |
| 9.2.3   | Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico. .... | 82 |
| 9.3     | Pruebas realizadas a concreto fresco .....  | 83 |
| 9.3.1   | Método de prueba estándar para el revenimiento del concreto.....                            | 83 |
| 9.3.2   | Determinación del potencial hidrógeno en la mezcla .....                                    | 86 |
| 9.3.3   | Determinación de la temperatura de la mezcla .....  | 87 |
| 9.4     | Pruebas realizadas a concreto endurecido .....  | 88 |
| 9.4.1   | Preparación de 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. ....                   | 92 |
| 9.4.3   | Pruebas no destructivas .....   | 94 |
| 9.4.3.1 | Método de prueba estándar para la velocidad de pulso.....                                   | 94 |
| 9.4.3.2 | Resistividad eléctrica.....   | 95 |
| 10.     | RESULTADOS Y DISCUSIONES .....  | 97 |
| 10.1    | Agregados pétreos.....  | 97 |



|        |                          |     |
|--------|--------------------------|-----|
| 10.1.1 | Arena.....               | 97  |
| 10.1.2 | Grava.....               | 98  |
| 10.2   | Cemento .....            | 99  |
| 10.3   | Diseño de mezclas.....   | 99  |
| 10.4   | Concreto fresco .....    | 100 |
| 10.5   | Concreto endurecido..... | 100 |
| 10.5.1 | Cilindros .....          | 100 |
| 10.5.2 | Vigas .....              | 105 |
| 11     | CONCLUSIONES .....       | 107 |
| 12     | BIBLIOGRAFÍA .....       | 108 |



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 3-1. Consumo de cemento por habitante (Cámara Nacional del Cemento, 2016).....  | 14 |
| Ilustración 6-1 Palacio de Cresco (NATIONALGEOGRAPHIC).....   | 16 |
| Ilustración 6-2 Proceso de fabricación del cemento (Fundación Laboral del Cemento y Medio Ambiente, 2015) .....   | 23 |
| Ilustración 6-3 Ciclo geológico del origen de rocas (GeoXNet, 2016).....  | 33 |
| Ilustración 7-1 Cemento CPC 40 RS (CYCNA, 2017) .....   | 46 |
| Ilustración 9-1 Cuarteo mediante el divisor de muestras. ....   | 59 |
| Ilustración 9-2 Cuarteo por medio de palas .....  | 60 |
| Ilustración 9-3 Medidas cono troncocónico y muestra seca superficialmente (NMX-C-165-ONNCCE, 2014) .....  | 62 |
| Ilustración 9-4 En la izquierda se muestra 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..... | 63 |
| Ilustración 9-5 Material saturado a 24 horas y seco superficialmente.....   | 64 |
| Ilustración 9-6 Proceso para la obtención de la MVSS.....   | 65 |
| Ilustración 9-7 Proceso para la obtención de la MVSV.....   | 67 |
| Ilustración 9-8 Equipo Raf-tap utilizado.....   | 68 |
| Ilustración 9-9 Granulometría en gravas mediante las mallas. ....   | 69 |
| Ilustración 9-10 Comparación del color del sedimento con la tabla colorimétrica. ....   | 70 |
| Ilustración 9-11 Muestra de sedimentación trascurridas 24 horas.....  | 71 |
| Ilustración 9-12 Volumen de agua desalojado por el picnómetro. ....   | 77 |
| Ilustración 9-13 En la derecha se muestra la formación de la esfera y en la izquierda la penetración de la aguja. ....  | 81 |
| Ilustración 9-14 Descripción del aparato de Gillmore. ....  | 82 |
| Ilustración 9-15 Frasco Le Chatelier sumergido en agua y muestra de cemento para la prueba.....   | 83 |
| Ilustración 9-16 Medidas del molde metálico para el revenimiento (Rodríguez, 2013). ....  | 85 |
| Ilustración 9-17 Proceso para la obtención del revenimiento (Rodríguez, 2013). ....   | 86 |



|  |     |
|--|-----|
| Ilustración 9-18 Comparación del pH con la muestra. ....   | 87  |
| Ilustración 9-19 Máquina universal Forney.....   | 91  |
| Ilustración 9-20 Prueba de compresión.....   | 92  |
| Ilustración 9-21 Prueba de flexión en vigas.....   | 93  |
| Ilustración 9-22 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico.....   | 94  |
| Ilustración 9-23 Prueba de resistividad eléctrica. ....  | 96  |
| Ilustración 10-1 Granulometría obtenida de la arena de Chamacuero.....                                 | 98  |
| Ilustración 10-2 Granulometría obtenida de la grava Mesón Nuevo. ....                                  | 99  |
| Ilustración 10-4 Resistencia a la compresión (14 días) .....   | 101 |
| Ilustración 10-3 Resistencia a la compresión (7 días) .....  | 101 |
| Ilustración 10-5 Resistencia a la compresión (28 días) .....   | 101 |
| Ilustración 10-6 Resumen de resultados obtenidos de la prueba de resistencia a la compresión. ....     | 102 |
| Ilustración 10-7 velocidad de pulso ultrasónico (7 días) .....   | 102 |
| Ilustración 10-8 velocidad de pulso ultrasónico (14 días) .....  | 102 |
| Ilustración 10-9 velocidad de pulso ultrasónico (28 días) .....  | 103 |
| Ilustración 10-10 Resumen de resultados obtenidos de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico. .... | 103 |
| Ilustración 10-12 Resistividad eléctrica (14 días). ....   | 104 |
| Ilustración 10-11 Resistividad eléctrica (7 días). ....  | 104 |
| Ilustración 10-13 Resistividad eléctrica (28 días). ....   | 104 |
| Ilustración 10-14 Resumen de resultados obtenidos de la prueba de resistividad eléctrica. ....         | 105 |
| Ilustración 10-16 Resistencia a la flexión (14 días) .....   | 105 |
| Ilustración 10-15 Resistencia a la flexión (7 días) .....  | 105 |
| Ilustración 10-17 Resistencia a la flexión (28 días). ....   | 106 |
| Ilustración 10-18 Resumen de resultados obtenidos de la prueba de flexión. ....                        | 106 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 6-1 Clasificación por el tipo de cemento (NMX-C-414-ONNCCE, 2010).....  | 24 |
| Tabla 6-2 Denominación del cemento por sus características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2010). .....   | 24 |
| Tabla 6-3 Clasificación por clase resistente (NMX-C-414-ONNCCE, 2010). .....  | 24 |
| Tabla 6-4 Tipos de cemento Portland (ASTM-C-150, 2016).....   | 24 |
| Tabla 6-5 Abreviaturas de los Óxidos del Cemento (Instituto del Concreto, 1997)....   | 25 |
| Tabla 6-6 Componentes principales del Cemento (Shetty M. S., 2005). .....   | 25 |
| Tabla 6-7 Componentes de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2010).....   | 28 |
| Tabla 6-8 Requisitos de los componentes principales (NMX-C-414-ONNCCE, 2010).<br>.....  | 29 |
| Tabla 6-9 Especificaciones físicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2010) .....   | 29 |
| Tabla 6-10 Especificaciones químicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2010) .....   | 29 |
| Tabla 6-11 Especificaciones del cemento con características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2010). .....  | 30 |
| Tabla 6-12 Valores característicos y límites máximos tolerantes de sales e impurezas (NMX-C-122-ONNCCE-2004, 2004). .....                                   | 31 |
| Tabla 6-13 Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en las aguas (Instituto del Concreto, 1997)..... | 32 |
| Tabla 6-14 Clasificación según el tamaño (Instituto del Concreto, 1997). .....  | 35 |
| Tabla 6-15 Clasificación de las partículas según su forma (Instituto del Concreto, 1997).....   | 37 |
| Tabla 6-16 Clasificación de la textura superficial de los agregados (Instituto del Concreto, 1997). .....   | 38 |
| Tabla 7-1 Resultados del análisis del agua utilizada para la caracterización del cemento y la elaboración de los especímenes de concreto .....              | 47 |
| Tabla 7-2 Propiedades típicas del CRISONTAN® R-5 (Ficha técnica CRISOTAN® R-5) .....  | 48 |
| Tabla 7-3 Dosificación del CRISOTAN® R-5 LIQUIDO/100 kg de cemento. ....  | 49 |
| Tabla 8-1 Revenimiento recomendado para diversos tipos de construcción (ACI 211, 1991).....   | 54 |



|  |     |
|--|-----|
| Tabla 8-2 Requerimientos de agua de mezclado y contenido de aire (ACI 211, 1991)                                 | 55  |
| Tabla 8-3 Desviación estándar de la resistencia del concreto (ACI 211, 1991).                                    | 56  |
| Tabla 8-4 Fórmulas para determinar el $f'_{cr}$ en el diseño de la mezcla  | 56  |
| Tabla 8-5 Selección de la relación agua/cemento (ACI 211, 1991).   | 56  |
| Tabla 8-6 Estimación del agregado grueso (ACI 211, 1991).  | 57  |
| Tabla 9-1 Especificaciones material que pasa la malla N0. 200 ASTM.  | 73  |
| Tabla 9-2 Especificación cantidad máxima de terrones de arcilla o material deleznable.                           | 74  |
| Tabla 9-3 Parámetros de tolerancia para el revenimiento  | 84  |
| Tabla 9-4 Criterio de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU (CYDET-DURAR, 1998). | 95  |
| Tabla 9-5 Criterio general de valores de resistividad eléctrica del hormigón (CYDET-DURAR, 1998)                 | 96  |
| Tabla 10-1 Resumen de resultados arena de Chamacuero.  | 97  |
| Tabla 10-2 Resumen de resultados grava Chamacuero.   | 98  |
| Tabla 10-3 Resumen de resultados cemento CPC 40 RS.  | 99  |
| Tabla 10-4 Resumen del proporcionamiento para 1 m <sup>3</sup> de concreto                                       | 100 |
| Tabla 10-5 Resultados del concreto fresco.   | 100 |



## DEDICATORIAS

A **mis padres** Sóstenes López Ceja y María Teresa Reyes Díaz, que son los que me dieron la vida y a quienes debo lo que soy y he logrado. Son mi mayor inspiración porque han sabido llevarnos por el buen camino a mí y a mis hermanos, sin ustedes llegar a esto no hubiera sido posible. Esta carrera representa todo el esfuerzo y el apoyo que me brindaron para que yo pudiera tenerla. Muchas gracias por creer en mí y por brindarme todo el apoyo a lo largo de estos 6 años.

"Los amo padres"

A **mis hermanos** Emanuel López Reyes, Nelson Abiut López Reyes y Yerania Isabel López Reyes, por brindarme todo su cariño y apoyo a lo largo de la vida, son ustedes los que han estado en todos los momentos difíciles e importantes que hemos pasado y lo seguirán estando.

"Los amo hermanos"

A **mi novia** Aritzandy Guadalupe Pereyda Rueda, por acompañarme a lo largo de los 5 años de la carrera y apoyarme en todo lo que estuviera a su alcance, juntos compartimos la experiencia de estar estudiando en una ciudad que no es la que nos vio nacer y lejos de nuestras familias. Muchas gracias por todo.

A toda mi familia, amigos y compañeros, a todos les tengo un gran aprecio y los estimo mucho.



## AGRADECIMIENTOS

A dios primero que nada por permitirme llegar hasta donde estoy y poder lograr esto.

A mis padres por todo su apoyo moral y económico que me brindaron para que yo pudiera terminar la carrera, por apoyarme en las buenas y en las malas y aconsejarme en los momentos difíciles. A mis hermanos por compartir muchos momentos difíciles y especiales a lo largo de la vida. "Mil gracias por todo".

A mi novia por todo su apoyo incondicional y todo su cariño durante todos estos años. Gracias por apoyarme y darme ánimos en todas las cosas que he realizado, por ayudarme en tareas y trabajos. "Muchas gracias mi amor".

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por permitirme ingresar y formar parte de ella. A la Facultad de Ingeniería Civil por formarme como Ingeniero Civil, siempre llevaré en mi corazón y la recordare. A cada uno de mis profesores por darme las bases necesarias para poder concluir mis estudios. Al Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas, departamento de resistencia de materiales y todo su personal, por brindarme las instalaciones, material y equipo necesario para el desarrollo de la investigación.

A mi asesora M.I. Cindy Lara Gómez, a la Doctora Elia Mercedes Alonso Guzmán y al M.A. Wilfrido Martínez Molina por sus aportaciones, consejos e ideas para realizar la investigan por el mejor camino, resolver las dudas y brindar la confianza necesaria.

A mis coasesores: M.I. Sandra del Carmen Arguello Hernández y M.I. Cipriano Bernabé Reyes, por brindar todo su apoyo y asesorar cada una de las pruebas realizadas, muchas gracias por todo su tiempo en cada una de las revisiones, sin ustedes no hubiese sido posible lograr esta investigación, los aprecio mucho como buenas personas que son.

A mis compañeros de tesis: Mayra y Oscar, por apoyarnos en todo a lo largo de todo este año, al padre de Mayra por apoyarnos con los materiales requeridos para la investigación, muchas gracias por compartir esto juntos.



A mis compañeros de trabajo a lo largo de la carrera: Víctor Hugo, Fidel, Gabriel, Julio, Juan Carlos, Luis David e Imer, gracias por compartir tantos momentos juntos, por todas las desveladas y todo el apoyo mutuo para concluir la carrera juntos y de la mejor manera, a cada uno de ustedes les tengo un gran aprecio y considero que conformamos una buena amistad y un gran grupo de trabajo. "Muchas gracias por todo".

A todo el personal del laboratorio: Dr. Hugo, Noel, Marco, Wilbert, Laura, Mayra, Don Chuy, Fidel, gracias por apoyarnos en la investigación cuando necesitamos ayuda.

Muchas gracias a todos y cada uno de los que formaron parte de esto y que siempre me han ayudado, sin cada uno de ustedes esto no hubiera sido posible.



## 1. RESUMEN

El presente estudio es una investigación sobre el proporcionamiento de un concreto hidráulico utilizando un cemento CPC 40 RS, aditivo fluidificante y material pétreo de un banco de material del que no se tienen estudios de caracterización previa (banco de Chamacuero). El empleo del aditivo fluidificante es con la finalidad de poder disminuir el agua y asimismo bajar la relación agua/cemento para poder encontrar el proporcionamiento adecuado obteniendo un  $f'c=250 \text{ kgf/cm}^2$ .

Se diseñaron 9 mezclas de concreto utilizando el método del ACI (solo se presentan resultados de cuatro), con una relación agua/cemento = 0.6, una mezcla testigo y ocho mezclas empleando aditivo en diferentes proporciones de acuerdo a la ficha técnica del producto. Los especímenes fueron ensayados a edades de 7, 14 y 28 días, sometidos a pruebas no destructivas: resistividad eléctrica y velocidad de pulso; pruebas destructivas: compresión simple en cilindros. Obtenida la proporción ideal de fluidificante, se elaboraron vigas de esa mezcla y de la mezcla testigo a fin de comparar los valores de Modulo de ruptura (MR).

La mezcla con el  $f'c$  deseado se obtuvo utilizando un 0.3% de fluidificante y reduciendo la cantidad de cemento en un 20%, la cantidad de agua es variable para poder obtener un revenimiento de 15 cm y el concreto pudiera ser bombeable.

Palabras clave: concreto, fluidificante, proporcionamiento, revenimiento, bombeable.



## 2. ABSTRACT

This study is an investigation on the proportioning of concrete hydraulic using a cement CPC 40 RS, additive free-flowing and stone material from a Bank of material that do not have previous studies (Chamacuero Bank). The use of the additive thinning is aiming to reduce the water and also lower the water/cement ratio in order to find the appropriate Proportioning obtaining an  $f'c = 250 \text{ kgf/cm}^2$ .

9 concrete mixtures were designed using the method of the ACI (only presents results of four), with ratio water/cement = 0.6, a mix control and eight mixtures using additive in different proportions according to the technical data sheet of the product. The specimens were tested at age of 7, 14 and 28 days, subject to non-destructive tests: electrical resistivity, and pulse rate; destructive tests: simple compression in cylinders. Obtained the ideal proportion of thinning, were drawn up beams of that mixture and mix witness in order to compare the values of rupture (MR) module.

The mixture with the  $f'c$  desired was obtained using a 0.3% of thinning and reducing the amount of cement by 20%, the amount of water is variable for a slump of 15 cm and the concrete could be pumpable.

Key words: concrete, thinning, Proportioning, slump, pumpable.



### 3. JUSTIFICACIÓN

El concreto es el material de construcción más utilizado en el mundo, y se sabe que su componente más costoso es el cemento, se pretende disminuir la mayor cantidad posible de este componente para poder economizar el costo de su elaboración sin afectar sus propiedades mecánicas.

Se tiene registro que para el año 2014, el consumo de cemento por habitante es de 294 kg (ilustración 3-1). La ciudad de Morelia cuenta con 784776 habitantes, es decir, al disminuir la cantidad de cemento en un 20%, se están ahorrando 46,144,829 kg considerando solo la ciudad de Morelia, este análisis es en base a la cantidad de cemento que se consume implicando también un gran ahorro económico para toda la ciudad.

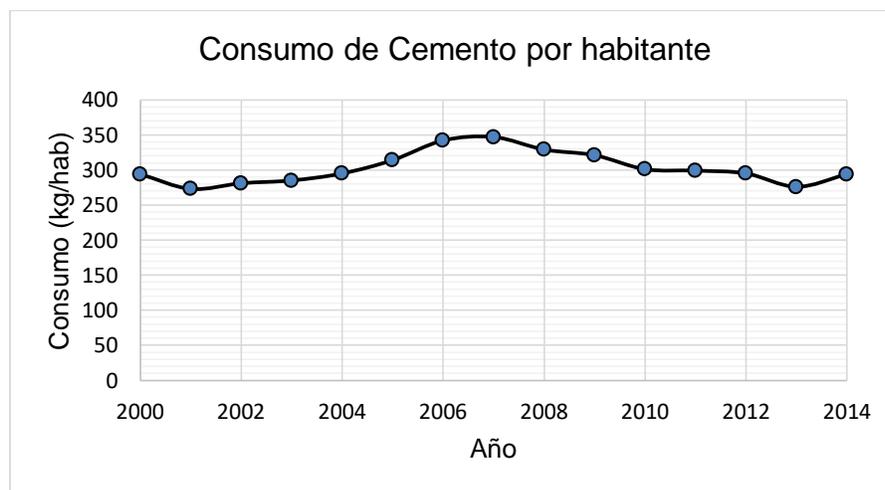


Ilustración 3-1. Consumo de cemento por habitante (Cámara Nacional del Cemento, 2016)

Para esto se utilizó un aditivo fluidificante que es capaz de reducir la cantidad de agua y reducir la relación agua-cemento, encontrando la proporción ideal sin que se afecte la trabajabilidad y resistencia de diseño.

Por cada tonelada de producción de cemento se estima que se emanan 530 kg de gases del efecto invernadero hacia la atmósfera (Cement Sustainability Initiative, 2016), es decir, al reducir la cantidad de cemento también se reducen en gran cantidad la contaminación provocada por estos gases.



## 4. HIPÓTESIS

La incorporación de un aditivo fluidificante reduce la cantidad de agua utilizada en una mezcla, por lo tanto se puede reducir también la relación agua-cemento y optimizar la cantidad de materiales utilizados para reducir el costo sin afectar las propiedades físico-mecánicas del concreto.

## 5. OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo general

Diseñar una mezcla de concreto hidráulico utilizando el método del ACI adicionando un aditivo fluidificante para reducir la cantidad de agua y cemento portland en una proporción óptima y así reducir su costo, elaborándola bajo condiciones controladas de laboratorio y evaluando su resistencia mecánica.

### 5.2 Objetivos particulares

- Reducir el costo del concreto
- Reducir la cantidad de cemento
- Encontrar la proporción óptima de fluidificante
- Caracterizar el banco de material de Chamacuero.
- Utilizar cemento CPC 40 RS
- Reducir la cantidad de CO<sub>2</sub> a la atmósfera



## 6. MARCO TEÓRICO

### 6.1 Antecedentes

Posiblemente el empleo de materiales cementantes se remonta al inicio de la civilización cuando el hombre se vio en la necesidad de construir su habitación utilizando arcilla o una mezcla de cal y arena para unir las piedras y conformar una estructura simple que le sirviera de protección.

En el año 500 A.C. los antiguos griegos mezclaron compuestos basados en caliza calcinada (cal viva) y agua a la cual se adicionaba arena, para recubrir y unir piedras y ladrillos no cocidos, llegando a mencionarse que los palacios de Cresos y Atalía fueron construidos de esta forma. La adición a estas mezclas, de piedra triturada, tejas rotas o ladrillo, dieron origen al primer concreto de la historia. Probablemente, la civilización romana copió la idea de la producción de concreto de los griegos. Se han encontrado obras de concreto romanas fechadas con anterioridad al año 300 A.C. (Alcaraz, 2010)



*Ilustración 6-1 Palacio de Cresos (NATIONALGEOGRAPHIC)*

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. Algunas de las



estructuras romanas en las cuales la mampostería se unía con morteros, tales como el Coliseo de Roma y el "Pont du Gard", cerca de Nimes (sur de Francia), han sobrevivido hasta esta época, con su material de cementación aún duro y firme.

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) (Rivera, 2010).

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).

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.

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.



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.

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es importante. 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 (Rodríguez, 2013).

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.

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. 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.

Entre menos agua se utilice, se tendrá una mejor calidad de concreto, a condición que se pueda consolidar adecuadamente. Menores cantidades de agua de mezclado resultan en mezclas más rígidas; pero con vibración, aún las mezclas más rígidas pueden ser empleadas. Para una calidad dada de concreto, las mezclas más rígidas



son las más económicas. Por lo tanto, la consolidación del concreto por vibración permite una mejora en la calidad del concreto y en la economía.

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.

Después de un proporcionamiento adecuado, así como, dosificación, mezclado, colocación, consolidación, acabado y curado, 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. 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 (Rodríguez, 2013).

### 6.2.1 Cemento

El cemento Portland es un producto comercial de fácil adquisición el cual se mezcla con agua, ya sea sólo o en combinación con arena, piedra u otros materiales similares, tiene la propiedad de combinarse lentamente con el agua hasta formar una masa endurecida. Esencialmente es un clinker finamente pulverizado, producido por la cocción a elevadas temperaturas, de mezclas que contiene cal, alúmina, fierro y sílice en proporciones, previamente establecidas, para lograr las propiedades deseadas (Rodríguez, 2013).

El cemento es el material de construcción más utilizado en el mundo. Aporta propiedades útiles y deseables, tales como resistencia a la compresión (el material de construcción con la mayor resistencia por costo unitario), durabilidad y estética para una diversidad de aplicaciones de construcción (CEMEX, 2016).

Otra definición que encontramos del cemento es: Polvo fino que se obtiene de la calcinación a 1450°C de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro. El producto del proceso de calcinación es el clinker (principal ingrediente del cemento)



que se muele finamente con yeso y otros aditivos químicos para producir cemento (CEMEX, 2016).

#### 6.2.1.1 Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de cemento es a partir de una mezcla de clinker y yeso que actúa como controlador de fraguado. Además se le pueden añadir otro tipo de adiciones activas como cenizas volantes, escorias de alto horno, caliza, humo de sílice o puzolanas (HOLCIM, 2015).

El proceso consta de 6 pasos fundamentalmente:

1. “Obtención de materias primas: Las materias primas para la fabricación son dos principalmente: un aporte de carbonato (calizas o margas), es la parte encargada de aportar el Óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) que luego reaccionará en el horno para formar los silicatos (componentes activos del clinker), y un aporte de fundentes, que son principalmente arcillas o pizarras, las cuales son las encargadas de aportar los óxidos que funcionan como fundentes y que contribuyen a la formación de la fase líquida en el horno, facilitando las reacciones” (HOLCIM, 2015).
2. “Preparación de las materias primas: Uno de los factores a seguir en la fabricación del clinker es la alimentación del horno con un material de composición homogénea. Para conseguir esto el material sufre un proceso de prehomogeneización en unas pilas formadas por capas que luego se cortan en sentido transversal. La materia prima para la fabricación del clinker debe de tener un porcentaje determinado de cada uno de los óxidos y suele ser necesario el aportar adiciones correctoras de la composición (ferrita, magnetita, alúmina, sílice, caliza, etcétera)” (HOLCIM, 2015).
3. “Molienda de crudo: El material aportado al horno debe ser finamente molido con la ayuda de molinos, el resultado de esta molienda es un material que recibe el nombre de harina o crudo que es almacenado en unos silos dotados de un sistema de homogeneización neumática” (HOLCIM, 2015).
4. “Cocción en el horno rotativo: El crudo es introducido a través de un intercambiador de calor compuesto por ciclones, en el cual el material, al



descender a contracorriente con los gases que salen del horno, se calienta hasta alcanzar una temperatura de unos 600°C a la entrada del mismo. Una vez en el horno, el material sufre una serie de reacciones a 1500°C para formar los componentes básicos del clinker que le van a conferir sus propiedades ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$ ). El clinker, a la salida del horno, debe sufrir un rápido enfriamiento con el fin de que no se reviertan las reacciones que acaban de producirse. Este proceso se hace mediante aire que se calienta y posteriormente se utilizará en la combustión. El aporte calorífico del horno se realiza mediante la combustión en el mechero de combustibles, principalmente coque de petróleo, hoy en día, muchas fábricas utilizan residuos industriales (aceites, disolventes o neumáticos usados) como combustible, valorizando así los mismos y evitando los posibles daños al medio ambiente que su almacenamiento provoca. Dependiendo de las necesidades de producción el clinker puede pasar al molino o bien almacenarse en el silo de clinker” (HOLCIM, 2015).

5. “Molienda de cemento (clinker + adiciones): En esta etapa el clinker se mezcla con el regulador de fraguado (yeso) y con las posibles adiciones, se introduce en los molinos de bolas para su molienda. Una vez alcanzada la finura deseada, el producto que obtenemos finalmente es el cemento” (HOLCIM, 2015).
6. “Almacenamiento y expedición: El cemento se almacena en silos protegido de las condiciones medioambientales, espera a ser ensacado o bien a ser expedido directamente en forma de granel” (HOLCIM, 2015).

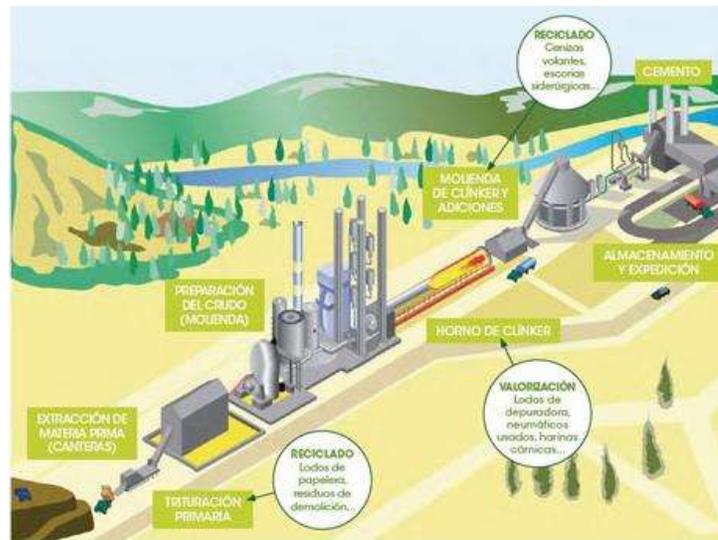


Ilustración 6-2 Proceso de fabricación del cemento (Fundación Laboral del Cemento y Medio Ambiente, 2015)

### 6.2.1.2 Clasificación

A medida que varían los componentes 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 (Rivera, 2010).

Pueden establecerse dos tipos básicos de cemento:

- De origen arcilloso: obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza, guardando una relación de 1 a 4 aproximadamente.
- De origen puzolánico: la puzolana que contiene el cemento puede ser de origen orgánico o volcánico.

Debido a la compleja composición química de los cementos, se utilizan terminologías específicas para poder definir las composiciones.

La norma Mexicana (NMX-C-414-ONNCCE, 2010) clasifica a los cementos en función de tres características:

1. Tipo de cemento
2. Clase resistente
3. Características especiales

En las tablas 6-1, 6-2 y 6-3 se muestran las clasificaciones del cemento:



Tabla 6-1 Clasificación por el tipo de cemento (NMX-C-414-ONNCCE, 2010).

| Tipo | Denominación   |
|------|--|
| CPO  | Cemento Portland Ordinario                           |
| CPP  | Cemento Portland Puzolánico                          |
| TPEG | Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno |
| CPC  | Cemento Portland Compuesto                           |
| CPS  | Cemento Portland con Humo de Sílice                  |
| CEG  | Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno          |

Tabla 6-2 Denominación del cemento por sus características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2010).

| Nomenclatura | Denominación                     |
|--------------|----------------------------------|
| R            | Alta resistencia inicial         |
| RS           | Resistente a los Sulfatos        |
| BRA          | Baja Reactividad Alkali-Agregado |
| BCH          | Bajo Calor de Hidratación        |
| B            | Blanco                           |

Tabla 6-3 Clasificación por clase resistente (NMX-C-414-ONNCCE, 2010).

| Clase resistente | Resistencia a la compresión (N/mm <sup>2</sup> ) |         |        |
|------------------|--|---------|--------|
|                  | 3 días   | 28 días |        |
|                  | Mínimo   | Mínimo  | Máximo |
| 20               | -  | 20      | 40     |
| 30               | -  | 30      | 50     |
| 30R              | 20   | 30      | 50     |
| 40               | -  | 40      | -      |
| 40R              | 30   | 40      | -      |

La ASTM clasifica a los cementos como se indica en la tabla 6-4 (ASTM-C150, 2005).

Tabla 6-4 Tipos de cemento Portland (ASTM-C-150, 2016).

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



### 6.2.1.3 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.

#### Propiedades químicas

El proceso de “Clinkerización” del cemento involucra la transformación de las materia primas a productos más complejos, por medio de reacciones en estado sólido. Razón por la que, la química del cemento emplea un modelo basado en abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes, indicados en la tabla 6-5, los cuatro compuestos principales del cemento se forman a partir de óxidos, como se muestra en la tabla 6 (Arguello Hernández, 2012).

Tabla 6-5 Abreviaturas de los Óxidos del Cemento (Instituto del Concreto, 1997).

| Fórmula                        | Nombre                        | Abreviatura |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------|
| CaO                            | Óxido de Calcio (Cal)         | C           |
| SiO <sub>2</sub>               | Dióxido de Sílice (Silicato)  | S           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Óxido de Aluminio (Aluminato) | A           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Óxido de Hierro (Hierro)      | F           |

Tabla 6-6 Componentes principales del Cemento (Shetty M. S., 2005).

| Nombre                      | Composición   | Abreviatura       |
|-----------------------------|---|-------------------|
| Silicato Tricálcico         | 3CaO-SiO <sub>2</sub>   | C <sub>3</sub> S  |
| Silicato Dicálcico          | 2CaO-SiO <sub>2</sub>   | C <sub>2</sub> S  |
| Aluminato Tricálcico        | 3CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                 | C <sub>3</sub> A  |
| Aluminoferrito Tetracálcico | 4CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> AF |

#### Propiedades físicas

Las propiedades físicas más importantes del cemento son: densidad, finura, consistencia normal, tiempos de fraguado y expansión.

- **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 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 petróleo, ya que no es posible emplear agua pues el cemento iniciaría sus reacciones de hidratación (NMX-C-152-ONNCCE, 2010) .

- **Finura:** El proceso de molienda de Clinker y yeso determina la finura del cemento, que es el tamaño de las partículas de cemento, se encuentra ligado de manera intrínseca con la velocidad de hidratación (área superficial-requerimiento), desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia. Un cemento con alta finura endurece con mayor velocidad (rapidez de hidratación) y presenta un rápido desarrollo de resistencia.
- **Consistencia Normal:** Esta propiedad indica el grado de fluidez o dificultad con la que la pasta puede ser manejada (trabajabilidad), cuando los cementos tienen adiciones los requerimientos de agua son mayores que en cementos normales. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco.

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" la penetración sea en 30s de  $10 \pm 1$  mm (NMX-C-057-ONNCCE, 2010) (ASTM-C-191, 2013).

- **Tiempos de fraguado:**
  - **Fraguado inicial:** Es el tiempo que transcurre desde que la pasta plástica que se forma cuando se le adiciona agua al cemento y va perdiendo su fluidez, hasta el momento en el que se pierde parte de su viscosidad y la temperatura se eleva, esto es un indicador de que el cemento se encuentra parcialmente hidratado.
  - **Fraguado final:** Es el tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente



pequeñas, se vuelve rígida y alcanza la temperatura máxima, lo que indica que el cemento se encuentra con un mayor grado de hidratación y la pasta ya se encuentra dura.

- **Fraguado rápido o relámpago:** Es una reacción violenta que lleva a un endurecimiento inmediato de la pasta, se caracteriza por su velocidad de desarrollo de calor.
- **Fraguado falso:** Es el fenómeno que ocurre cuando la pasta de cemento adquiere una prematura y anormal resistencia, dentro de los primeros minutos después de mezclar el cemento y el agua. No despiden calor de manera apreciable y se restablece su plasticidad si se vuelve a mezclar la pasta sin adicionarle agua, esto sin afectar el fraguado o la resistencia.

Las metodologías a seguir para la prueba estándar para la determinación de fraguado del cemento hidráulico (NMX-C-059-ONNCCE, 2010) (ASTM-C-191, 2013).

- **Expansión:** 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 obras hechas con él quedan seriamente amenazadas. Para que un cemento sea estable se requiere que una vez hidratado, ninguno de sus componentes sufra expansión perjudicial o destructiva, en las normas limitan la expansión potencial del cemento por medio del ensayo de Autoclave, este consiste en medir el cambio de longitud de barras de 2.5 cm x 2.5 cm x 25.4 cm hechas de pasta de cemento, las que se exponen a alta temperatura y presión por tres horas, el cambio de longitud expresada en porcentaje se conoce como expansión (NMX-C-062-ONNCCE, 2010) (ASTM-C-151, 2015).



### 6.2.1.4 Especificaciones

Los componentes de los cementos deben cumplir con los límites de la tabla 6-7.

Tabla 6-7 Componentes de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2010)

| Tipo | Denominación   | Componentes (% masa)          |  |                                  |                      |        |                     |
|------|--|-------------------------------|--|----------------------------------|----------------------|--------|---------------------|
|      |  | Principales                   |  |                                  |                      |        | Minoritarios<br>(1) |
|      |  | Clinker<br>pórtland<br>+ yeso | Escoria<br>granulada<br>de alto<br>horno | Materiales<br>puzolánicos<br>(2) | Humo<br>de<br>sílice | caliza |                     |
| CPO  | Cemento<br>Pórtland<br>Ordinario                                 | 95-100                        | -  | -                                | -                    | -      | 0-5                 |
| CPP  | Cemento<br>Pórtland<br>Puzolánico                                | 50-94                         | -  | 6-50                             | -                    | -      | 0-5                 |
| CPEG | Cemento<br>Pórtland con<br>Escoria<br>Granulada de<br>Alto Horno | 40-94                         | 6-60                                     | -                                | -                    | -      | 0-5                 |
| CPC  | Cemento<br>Pórtland<br>Compuesto (3)                             | 50-94                         | 6-35                                     | 6-35                             | 1-10                 | 6-35   | 0-5                 |
| CPS  | Cemento<br>Pórtland con<br>Humo de<br>Sílice                     | 90-99                         | -  | -                                | 1-10                 | -      | 0-5                 |
| CEG  | Cemento con<br>Escoria<br>Granulada de<br>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.

Los requisitos que deben cumplir los componentes principales del cemento están mostrados en el la tabla 6-8.



Tabla 6-8 Requisitos de los componentes principales (NMX-C-414-ONNCCE, 2010).

| Componente granulada de alto horno | Índice 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                            |

Las especificaciones físicas de la resistencia mecánica a la compresión a los 28 días, resistencia mecánica a la compresión a los 3 días para los cementos 30 R y 40 R, tiempo de fraguado y expansión/contracción del cemento, están indicadas en la tabla 6-9.

Tabla 6-9 Especificaciones físicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2010)

| 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 6-10.

Tabla 6-10 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 %                  |

Cuando se requiera que un cemento tenga alguna característica especial, este debe cumplir con las especificaciones indicadas en la tabla 6-11.



Tabla 6-11 Especificaciones del cemento con características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2010).

| 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   |                  |
| 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               |

## 6.2.2 Agua

Es la sustancia más abundante sobre la faz de la Tierra, ya que cubre más del 70% de la corteza terrestre, está constituida por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H<sub>2</sub>O). Todas las formas de vida requieren de este elemento para su supervivencia, es por esta razón que se le dio el mote de “líquido vital”. El término agua se utiliza de manera usual para el estado líquido de esta sustancia, pero también se puede encontrarse en forma sólida (hielo) o gaseosa (vapor).

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 mortero o un concreto, parte hidrata el cemento, el resto no presenta ninguna alteración y con el tiempo se evapora.

### 6.2.2.1 Características del agua

Como norma general se considera que el agua es adecuada para producir mortero o 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, el agua que sirve para preparar estas mezclas, puede no servir para beberla (Rivera, 2010).



### 6.2.2.2 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 6-12. 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 6-12, 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 6-12 Valores característicos y límites máximos tolerantes de sales e impurezas (NMX-C-122-ONNCCE-2004, 2004).

| Sales e impurezas  | Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m. | Cementos sulfuresistentes Límites en p.p.m. |
|--|--|---|
| Sólidos en suspensión  |  |   |
| En aguas naturales (limos y arcillas)  | 2000                                       | 2000  |
| En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)   | 50000                                      | 35000                                       |
| Cloruros como CL (a)   |  |   |
| Para concreto con acero de preesfuerzo y piezas de puente  | 400 (c)                                    | 600 (c)                                     |
| Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares | 700 (c)                                    | 1000 (c)                                    |
| Sulfato como $SO_4=(a)$  | 3000                                       | 3500  |
| Magnesio como $Mg^{++}(a)$   | 100  | 150   |
| Carbonatos como $CO_3$   | 600  | 600   |
| Dióxido de carbonato disuelto, como $CO_2$   | 5  | 3   |
| 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 ( $\text{CaCl}_2$ ) como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.

En la tabla 6-13 aparecen los efectos de las impurezas sobre las propiedades del concreto.

*Tabla 6-13 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 éter | X                       | X              | ---                           | ---       | ---        | ---       | X             | X           |
|                                       | X Causa efecto negativo |                | ---- No causa efecto negativo |           |            |           |               |             |

### 6.2.3 Agregados

Los agregados también llamados áridos son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento Portland en presencia de agua forman un todo compacto (piedra artificial), conocido como mortero o concreto.

Como agregados de las mezclas de mortero o concreto se pueden considerar, todos aquellos materiales que teniendo una resistencia propia suficiente (resistencia de la partícula), no perturben ni afecten desfavorablemente las propiedades y características de las mezclas y garanticen una adherencia suficiente con la pasta endurecida del cemento Portland. En general, la mayoría son materiales inertes, es



decir, que no desarrollan ningún tipo de reacciones con los demás componentes de las mezclas, especialmente con el cemento; sin embargo, existen algunos agregados cuya fracción más fina presenta actividad en virtud de sus propiedades hidráulicas colaborando con el desarrollo de la resistencia mecánica, tales como: las escorias de alto horno de las siderúrgicas, los materiales de origen volcánico en donde hay sílice activo, entre otros.

Pero hay algunos otros agregados, que presentan elementos nocivos o eventualmente inconvenientes que reaccionan afectando la estructura interna del concreto y su durabilidad, como por ejemplo, los que presentan elementos sulfurados, los que contienen partículas pulverulentas más finas o aquellas que se encuentran en descomposición latente como algunas pizarras (Rivera, 2010).

### 6.2.3.1 Origen de los agregados

Encontramos que las rocas son “materiales sólidos compuestos por un agregado cohesionado de propiedades no definidas de uno o varios minerales”. Las rocas se dividen en ígneas (magmáticas), sedimentarias y metamórficas, de acuerdo a su origen de formación. Esta clasificación se da a su vez, porque las rocas se encuentran sometidas a continuos cambios por las acciones de los agentes geológicos que se llevan a cabo en el interior y exterior de los estratos de la Tierra, son los llamados “ciclos geológicos” (Ilustración 6-3).

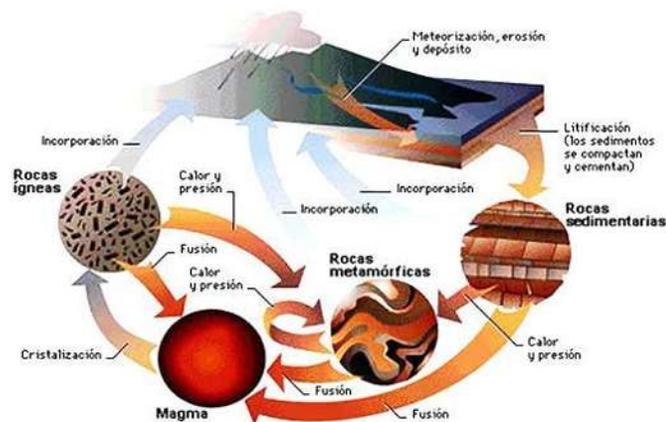


Ilustración 6-3 Ciclo geológico del origen de rocas (GeoXNet, 2016).



Las rocas que se generan primero son las ígneas, se forman en el interior de la corteza terrestre con presión alta y gases disueltos, que generan una expulsión a través de grietas hasta la superficie terrestre en forma de erupción volcánica, al enfriarse el magma y los otros materiales expulsados, al entrar en contacto con el agua y anhídrido carbónico se cristalizan.

Con el paso del tiempo estos materiales sufren un proceso de meteorización (desintegración y descomposición) por agua, viento, raíces de las plantas y el hielo, son transportados y se depositan en el fondo de los ríos y lagos, con el paso del tiempo se van acumulando fragmentos de material generando grandes capas de sedimentos, las capas ubicadas en lo más profundo, se ven sometidas a la presión que le genera el peso de la arena o arcilla que se encuentran encima, se sedimentan y cristalizan, formando de esta manera las “rocas sedimentarias”.

Posteriormente las rocas ígneas y sedimentarias se ven sometidas a alteraciones que modifican su estructura sólida por temperatura y presión elevada, o también, se puede generar esta modificación al entrar en contacto con magma, es de esta manera que se produce la generación de “rocas metamórficas” (Arguello Hernández, 2012).

La generación de gravas, arenas, limos o arcillas se forman por la desintegración mecánica y descomposición química de las rocas. Los suelos deben su origen a una gran variedad de causas, lo cual es difícil dar una explicación de manera detallada, que el innumerable tipo de suelos es el resultado de esta gran variedad de causas.

Es importante hacer referencia que la formación de los diversos tipos de agregados se ha generado a través de las Eras Geológicas, que esto sigue ocurriendo hasta el día de hoy (Juárez Badillo & Rodríguez, 2005).

#### 6.2.3.2 Clasificación de los agregados

##### **Según su procedencia**

Pueden ser naturales o artificiales. Los agregados naturales se obtienen de depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de río), o glaciares (cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales. Los agregados artificiales son



los que se obtienen a partir de procesos industriales, tales como, arcillas expandidas, escorias de alto horno, clínker, y limaduras de hierro, entre otros (Instituto del Concreto, 1997).

### Según su tamaño

La forma más empleada para clasificar los agregados naturales es según su tamaño el cual varía desde fracciones de milímetros hasta varios centímetros en sección transversal. La clasificación más general del agregado para elaborar concreto según su tamaño se muestra en la tabla 6-14 donde se indican los nombres más comunes.

Tabla 6-14 Clasificación según el tamaño (Instituto del Concreto, 1997).

| Tamaño de las partículas (mm) | Denominación corriente | Clasificación como agregado para concreto |
|-------------------------------|------------------------|---|
| <0.002                        | Arcilla                | Fracción muy fina                         |
| 0.002 - 0.074(No. 200)        | Limo                   |   |
| 0.074(No. 200) - 4.76(No. 4)  | Arena                  | Agregado fino                             |
| 4.76(No. 4) - 19.1(3/4")      | Gravilla               | Agregado grueso                           |
| 19.1(3/4") - 50.8(2")         | Grava                  |   |
| 50.8(2") - 152.4(6")          | Piedra                 |   |
| >152.4(6")                    | Rajón, Piedra bola     |   |

#### 6.2.3.3 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: granulometría, porosidad, masa unitaria, forma y textura de las partículas.

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

Las arenas, por su propio origen geológico, suelen ser de forma redondeada, pero cabe recordar que es posible obtenerlas mediante trituración, y en este caso la forma también va a depender de modo importante del sistema o maquinaria que se use para la fragmentación de la roca original en la producción de arena (Instituto del Concreto, 1997).

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



cemento, la resistencia y la durabilidad. En general, los agregados excesivamente alargados hacen al concreto muy pobre.

Desde el punto de vista de la economía en el requisito de la relación agua/cemento, los agregados redondeados son preferibles a los agregados angulares. Por el otro lado, el cemento adicional requerido para los agregados angulares es contrarrestado en cierta medida por las resistencias superiores del agregado y, en ocasiones por una mayor durabilidad, como resultado de la trabazón del concreto endurecido, es decir, uniones más fuertes entre los agregados y la pasta de cemento.

La textura del agregado también entra en la discusión debido a su estrecha asociación con la forma. Generalmente, los agregados redondeados tienen una textura lisa y los agregados angulares tienen una textura rugosa, pero incluso cuando la superficie del agregado redondeado es lisa, es suficientemente rugosa para desarrollar un vínculo razonablemente bueno entre la superficie y el gel submicroscópico del cemento (Shetty M. S., 2005). La clasificación más utilizada para definir la forma de las partículas del agregado, se indican en la tabla 6-15.

*Tabla 6-15 Clasificación de las partículas según su forma (Instituto del Concreto, 1997).*

| <b>Clasificación</b>     | <b>Descripción</b>   |
|--------------------------|--|
| Redondeada (frotamiento) | Totalmente desgastada por el agua o completamente por ella   |
| Irregular                | Irregular natural, o parcialmente limitada por frotamiento y con caras más o menos planas.                       |
| Angular                  | Posee caras bien definidas, que se forman en la intersección de caras más o menos planas.                        |
| Escamosa                 | Material en el cual el espesor es pequeño en (laminar) relación con las otras dos dimensiones.                   |
| Elongada                 | Material normalmente angular, en el cual la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones.   |
| Escamosa y elongada      | Material cuya longitud es considerablemente mayor que el ancho y este es considerablemente mayor que el espesor. |

- **Textura:** reviste especial importancia por su influencia en la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento fraguado, así como también, por su efecto sobre las propiedades del concreto o mortero endurecido, tales como,



densidad, resistencia a la compresión y a la flexión, cantidad requerida de agua, etc. En términos generales, se puede decir que la textura superficial es áspera en las piedras obtenidas por trituración y lisa en los cantos rodados, de río, quebrada o mar. La clasificación más utilizada se encuentra en la tabla 6-16. (Instituto del Concreto, 1997).

*Tabla 6-16 Clasificación de la textura superficial de los agregados (Instituto del Concreto, 1997).*

| Grupo | Textura superficial | Características  |
|-------|---------------------|--|
| 1     | Vítrea              | Fractura concoidea   |
| 2     | Lisa                | Desgastada por el agua, o lisa debido a la fractura de la roca laminada o de grano fino.                         |
| 3     | Granular            | Fractura que muestra granos más o menos uniformemente redondeados.   |
| 4     | Áspera              | Fractura áspera de roca con granos finos o medianos que contienen partículas cristalinas no fácilmente visibles. |
| 5     | Cristalina          | Contiene partículas fácilmente visibles.   |
| 6     | Apanalada           | Con poros y cavidades visibles.  |

### 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).

### Sustancias perjudiciales

- **Contenido de arcilla:** la presencia excesiva de tamaños muy pequeños en la grava y en la arena puede afectar el comportamiento deseado de la mezcla de concreto, perjudicando el fraguado y la adquisición de la resistencia mecánica de éste. En el caso de aparición de finos en las gravas, es posible que estos pasen a engrosar parte de la granulometría de la arena, ya que sus granos quedan comprendidos en esos tamaños. Desde luego, la presencia excesiva de finos puede plantear la mayor avidez de agua y con ella, crear una pasta fina que envuelva los granos de agregado y dañe sus condiciones de adherencia.

En caso de agregados obtenidos por trituración, suele ser abundante la presencia de polvillo, como material fino, por efecto mismo de las mandíbulas trituradoras, sin embargo, para su uso en el concreto deben tener su superficie



limpia. Es por ello que se recomienda el lavado. Si hay exceso de partículas finas cubriendo los agregados, resultará una inadecuada adhesión entre la pasta de cemento endurecida y el agregado. Esto puede causar bajas resistencia a la compresión, durabilidad reducida, y, en algunos casos, estallidos, donde existen agregados recubiertos de polvo en cercanías a la superficie de concreto. Además, la presencia de material fino incrementa la demanda de agua en el concreto. La demanda de agua en aumento puede resultar en una durabilidad reducida, aumento de la contracción, y problemas con la trabajabilidad. El agregado grueso no debe contener terrones de arcilla u otros granos o grumos de material deleznable, tales como partículas blandas, madera, carbón, lignito o mica, los cuales se confunden con el agregado grueso por su forma. En la masa de concreto, los materiales deleznales significan puntos débiles que disminuyen las propiedades mecánicas del concreto o su durabilidad, en el caso de estar expuestos a la abrasión.

- **Sales solubles:** Algunos agregados pueden estar contaminados con un elevado contenido de sulfatos o de cloruros, adheridos a su superficie, por lo cual la arena resulta el agregado de mayor peligro, dada su elevada medida de superficie específica. Estas circunstancias no pueden ser detectadas por la vista ni por el gusto, pues muy pequeñas cantidades ya son suficientes para significar un peligro para el concreto (basta el 1.0% de sulfatos, en masa, o el 0.1% de cloruros, en masa) (Instituto del Concreto, 1997). Los sulfatos atacan al cemento produciendo reacciones expansivas que agrietan y desmoronan su masa. Los cloruros corroen el acero del concreto armado, perdiendo sus condiciones resistentes, aumenta el volumen, y agrieta las secciones de concreto.
- **Materia orgánica:** la presencia de elevadas cantidades de materia orgánica, no visible que se impregna o adhiere a los granos de concreto, puede interferir con las acciones químicas de la hidratación del cemento, así como también puede resultar en un concreto de menor resistencia y puede afectar la



velocidad de reacción del cemento, ocasionando retrasos considerables en su tiempo normal de fraguado (Instituto del Concreto, 1997).

#### 6.2.4 Aditivos

Los aditivos químicos se agregan en la etapa de mezclado del concreto y mortero para modificar algunas de las propiedades de la mezcla que no deben de ser considerados nunca como sustituto de un buen diseño de mezcla, de buena mano de obra o del uso de materiales de calidad.

El concreto es uno de los materiales más usados en la construcción, por lo que se requiere controlar la fabricación, tanto en planta, como en obra. En México los procedimientos que se siguen en su elaboración están instaurados con los procedimientos del Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés). Con las anteriores recomendaciones se diseñan concretos y morteros normales con cierta resistencia, pesados o algunas características especiales, las que se pueden lograr con el uso de aditivos (IMCYC, 2006).

##### 6.2.4.1 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, 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 (Rodríguez, 2013).



### **Retardantes:**

Los aditivos retardantes se emplean para aminorar la velocidad de fraguado del concreto. Las temperaturas altas en el concreto fresco, 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 (Rodríguez, 2013).

### **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 inclusor de aire, o con una combinación de ambos métodos. Un cemento inclusor 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:

1. Sales de resinas de madera (resina Vinsol),
2. Algunos detergentes sintéticos,
3. Sales de lignina sulfonatada,
4. Sales de ácidos de petróleo,
5. Sales de material proteínáceo,
6. Ácidos grasos y resinosos y sus sales,
7. Sulfonatos de alquilbenceno,
8. Sales de hidrocarburos sulfonatados.

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 o mortero, los plastificantes (agentes reductores del contenido de agua) son absorbidos en la superficie de las partículas de esos aglomerantes, 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.

Este tipo de aditivo se utiliza para:

1. incrementar el revenimiento de la mezcla con un contenido de agua dado,
2. posibilita de gran manera el poder lograr una resistencia dada con un contenido menor de cemento,
3. puede 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.

Este tipo de aditivo se utiliza para:

1. Concreto de alta resistencia, lo que nos permite reducir la relación A/C (agua/cemento), como resultado se puede reducir el contenido de agua desde un 15% a 25%,
2. en donde se requiera de una consistencia autonivelable.



## 7. MATERIALES DE ESTUDIO

### 7.1 Cemento utilizado

El cemento utilizado para la experimentación fue un CPC 40 RS.

El hecho de ser un CPC 40 RS significa que es un cemento Portland compuesto, de clase 40, con resistencia especificada a los 28 días de 40 MPa y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-ONNCCE, 2010). Sus características se muestran 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:** El clinker característico, junto con los cementantes suplementarios, 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 de nuestro cemento, 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)*

## 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 (mezcla de concreto testigo y concreto fluidificante) 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 muestra los parámetros obtenidos

*Tabla 7-1 Resultados del análisis del agua utilizada para la caracterización del cemento y la elaboración de los especímenes de concreto*

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

**Sitio de muestreo:** 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 | Limite 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 |
| Solidos 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 Cálctica           | 21        | -----                                     | mg/L CaCO <sub>3</sub> | Volumétrico          |
| Sales de magnesio         | 5         | 100                                       | mg/L                   | Volumétrico          |

(Bernabé Reyes, 2015)

### 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

El banco de materia del agregado grueso se encuentra ubicado en la carretera Morelia-Salamanca en el km 14+250 y lleva el nombre de Mesón Nuevo.

## Agregado fino

El banco de material del agregado fino se encuentra ubicado al sureste de la ciudad de Puruándiro, Michoacán, en el límite con Guanajuato.

### 7.4 Aditivo utilizado en esta investigación

Para lograr una mezcla trabajable y con mayor fluidez se optó por utilizar un aditivo súper plastificante llamado CRISOTAN® R-5. Este aditivo utilizado se describe a continuación con base en su ficha técnica:

El CRISOTAN® 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 CRISONTAN® 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® R-5 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 proporciona 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® R-5 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 R-5 (en base al ingrediente activo), o 1.66% para el CRISOTAN® R-5 Líquido.

Para obtener las máximas ventajas del CRISOTAN® R-5, la mezcla de concreto debe ser rediseñada y probada. Un revenimiento bajo, puede ser corregido con una mayor dosificación de CRISOTAN® R-5 en vez de agregar agua.

La tabla 7-3 muestra el nivel de CRISOTAN® R-5 LÍQUIDO en peso o volumen para diferentes concentraciones.

*Tabla 7-3 Dosificación del CRISOTAN® R-5 LIQUIDO/100 kg de cemento.*

| % Ingrediente activo<br>(base agua) | VOLUMEN<br>CRISOTAN R-5<br>Líquido (g) | PESO CRISOTAN<br>R-5 Líquido (g) | PESO DEL AGUA<br>en el CRISOTAN R-<br>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  |

(CHRISTIANSON S.A. de C.V)



## 8. DISEÑO DE MEZCLAS

### 8.1 Introducción

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

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

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

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

Para el proporcionamiento de los ingredientes de una muestra de concreto se han sugerido muchos métodos dentro de los cuales se encuentran los analíticos, experimentales, semianalíticos y empíricos (Instituto del Concreto, 1997):

- Proporción arbitraria (proporcionamiento empírico por ejemplo mezclas 1:2:4)
- Método de módulo de finura
- Método de máxima densidad
- Método de área superficial de los agregados
- Relación de vacíos



- El diseño de mezclas de alta resistencia
- Mezclas de diseño basadas en la resistencia a la flexión
- Contenido de cemento
- Método del ACI 211
- Mezcla de diseño para concreto bombeado

De los métodos anteriores, algunos de ellos no son muy utilizados en estos días debido a algunas dificultades o inconvenientes en los procedimientos para llegar a las proporciones satisfactorias (Shetty M. , 2005).

## 8.2 Objetivos

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

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

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

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

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

El concreto debe ser fabricado para tener siempre una trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuadas a las condiciones de trabajo. La trabajabilidad es una medida de lo fácil o difícil que resulta colocar,



consolidar y darle acabado al concreto. La consistencia es la facultad del concreto fresco para fluir. La plasticidad determina la facilidad de moldear al concreto. Si se usa más agregado en una mezcla de concreto o si se agrega menos agua, la mezcla se vuelve más rígida, (menos plástica y menos trabajable) y difícil de moldear. No se pueden considerar plásticas a las mezclas muy secas o muy desmoronables ni a las muy aguadas o fluidas. El concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar ni sangrar excesivamente. 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 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).

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

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



y otros, para que respondan a las condiciones de los proyectos o de los reglamentos (Instituto del Concreto, 1997).

2. El segundo objetivo es hacer el concreto de la manera más económica, es decir, todos los concretos dependen principalmente de dos factores (Shetty M. S., 2005).

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

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

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

La comprensión de los principios básicos del diseño de mezclas es tan importante como la realización de los cálculos mismos. Solamente con la selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla así como con un proporcionamiento adecuado se pueden obtener las



propiedades anteriores al producir un concreto (Kosmatha & Panarese, 1992).

### 8.3 Método del ACI 211

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

Consiste en seguir en forma adecuada una secuencia de pasos y determinar la cantidad de cada material en masa y volumen, para 1 m<sup>3</sup> de concreto. Sin embargo, el método del ACI ha sido concebido de tal manera que el proporcionamiento de los agregados se hace teniendo en cuenta que estos cumplen con las recomendaciones granulométricas de la Norma ASTM C-33 (Instituto del Concreto, 1997).

Este método volumétrico es más exacto que otros métodos ya que involucra los valores de densidades de todos los ingredientes para calcular el volumen absoluto que cada ingrediente ocupará en la unidad de volumen de concreto (Kosmatha & 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.

*Tabla 8-1 Revenimiento recomendado para diversos tipos de construcción (ACI 211, 1991).*

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

- 2. Elección del tamaño máximo del agregado:** Los concretos con tamaños más grandes de agregado 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.

- 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 aparecen valores estimados del agua de mezclado requerida para concretos hechos con diversos tamaños máximos de agregados, con o sin aire incluido.

Tabla 8-2 Requerimientos de agua de mezclado y contenido de aire (ACI 211, 1991)

| Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado |                            |      |      |     |        |     |     |     |                   |
|--|----------------------------|------|------|-----|--------|-----|-----|-----|-------------------|
| Agua Kg/m <sup>3</sup> de concreto   |                            |      |      |     |        |     |     |     |                   |
| Tamaños máximos nominales de agregado  | 3/8"                       | 1/2" | 3/4" | 1"  | 1 1/2" | 2"  | 3"  | 6"  | in                |
|  | 10                         | 12.5 | 20   | 25  | 40     | 50  | 70  | 150 | cm                |
| Revenimiento en cm   | Concreto sin aire incluido |      |      |     |        |     |     |     |                   |
| 2.5 a 5  | 207                        | 199  | 190  | 179 | 166    | 154 | 130 | 113 | Kg/m <sup>3</sup> |
| 7.5 a 10   | 228                        | 216  | 205  | 193 | 181    | 169 | 145 | 124 | Kg/m <sup>3</sup> |
| 15 a 18  | 243                        | 228  | 216  | 202 | 190    | 178 | 160 | --- | Kg/m <sup>3</sup> |
| % de aire incluido   | 3                          | 2.5  | 2    | 1.5 | 1      | 0.5 | 0.3 | 0.2 |                   |
| Concreto con aire incluido   |                            |      |      |     |        |     |     |     |                   |
| 2.5 a 5  | 181                        | 175  | 168  | 160 | 150    | 142 | 122 | 107 | Kg/m <sup>3</sup> |
| 7.5 a 10   | 202                        | 193  | 184  | 175 | 165    | 157 | 133 | 119 | Kg/m <sup>3</sup> |
| 15 a 18  | 216                        | 205  | 197  | 184 | 174    | 166 | 154 | --- | Kg/m <sup>3</sup> |
| Promedio recomendado del contenido total del aire, porcentaje de acuerdo con el nivel de exposición                                  |                            |      |      |     |        |     |     |     |                   |
| Exposición ligera  | 4.5                        | 4    | 3.5  | 3   | 2.5    | 2   | 1.5 | 1   |                   |
| Exposición moderada  | 6                          | 5.5  | 5    | 4.5 | 4.5    | 4   | 3.5 | 3   |                   |
| Exposición severa  | 7.5                        | 7    | 6    | 6   | 5.5    | 5   | 4.5 | 4   |                   |

- 4. Selección de la relación agua/cemento:** La relación agua/cemento será una de las características más importantes, pues al ser lo más baja posible nos brindará un concreto de mayor durabilidad, a la vez debe ser aquella que permita a la mezcla tener una trabajabilidad adecuada. La resistencia media,



que es mayor que el  $f'c$  se llama  $f'cr$ , y es la resistencia requerida en el diseño de la mezcla. El  $f'cr$  se obtiene de sumar a la resistencia de proyecto  $f'c$  la desviación estándar de la resistencia del concreto. Este valor se define de acuerdo al procedimiento de fabricación de la mezcla.

Tabla 8-3 Desviación estándar de la resistencia del concreto (ACI 211, 1991).

| Desviación estándar de la resistencia del concreto en Kgf/cm <sup>2</sup>  |                                       |  |
|--|---------------------------------------|--|
| Procedimiento de fabricación   | $f'c \leq 200$<br>Kgf/cm <sup>2</sup> | $200 \leq f'c \leq 300$<br>Kgf/cm <sup>2</sup> |
| Mezclado mecánico, proporcionamiento, corrección por humedad y absorción de los agregados de una misma fuente y de calidad controlada. | 30                                    | 35   |
| Mezclado mecánico, proporcionamiento por masa.   | 35                                    | 45   |
| Mezclado mecánico, proporcionamiento por volumen; volúmenes cuidadosamente controlados   | 50                                    | 60   |

La tabla muestra las fórmulas con las cuales se determina el  $f'cr$  en el diseño de la mezcla.

Tabla 8-4 Fórmulas para determinar el  $f'cr$  en el diseño de la mezcla

| Fórmulas para determinar el $f'cr$ |
|------------------------------------|
| $f'cr = f'c + 1.28 * c$            |
| $f'cr = f'c + 2.52 * c - 35$       |
|                                    |

La tabla contiene los valores de la relación agua/cemento correspondientes a las distintas resistencias a la compresión a la edad de 28 días.

Tabla. Selección de la relación agua/cemento (ACI 211, 1991).

Tabla 8-5 Selección de la relación agua/cemento (ACI 211, 1991).

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

**5. Cálculo 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.

**6. Estimación del contenido de agregado grueso:** Se puede ver que para una trabajabilidad igual, el volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto depende sólo de su tamaño máximo nominal y del módulo de finura del agregado fino. Este volumen se convierte a masa seca del agregado grueso requerido en un metro cúbico de concreto, multiplicándolo por la masa unitaria de varillado en seco por metro cúbico de agregado grueso (ACI 211, 1991).

*Tabla 8-6 Estimación del agregado grueso (ACI 211, 1991).*

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

- Los volúmenes se basan en agregados en condiciones de varillado seco, como se describe en la norma ASTM C29. Estos volúmenes se han seleccionado a partir de las relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado a la construcción.
- Para concretos más trabajables véase la ASTM Método 136 para el cálculo del módulo de finura.

**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, el cual inicia con el cálculo de la masa de la grava y el volumen de la grava, haciendo uso de la densidad de la misma. El método del volumen absoluto implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes. En este caso, el volumen total desplazado por los componentes conocidos (agua, aire, cemento y agregado grueso) se restan del volumen unitario de



concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen ocupado por cualquier componente en el concreto es igual a su masa dividida entre la densidad de ese material (siendo esta el producto del masa unitario del agua y de la gravedad específica del material).

- 8. Ajustes por humedad del agregado:** Una vez que ya se tiene calculada la cantidad de material necesario para  $1 \text{ m}^3$  de mezcla se realizan las correcciones por humedad del agregado, esta corrección consiste en restar al porcentaje de la humedad actual el porcentaje de la humedad de absorción del material (porcentaje de humedad actual – porcentaje de absorción). Por lo tanto a los materiales pétreos, al considerarse superficialmente secos y saturados se les debe restar el porcentaje de absorción correspondiente.
- 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.

El equipo utilizado para el cuarteo es:

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



*Ilustración 9-1 Cuarteo mediante el divisor de muestras (López Reyes S).*

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 toman muestras con la pala en diferentes partes del agregado tanto en altura como en profundidad.
3. Una vez que se obtuvo la arena que se consideró necesaria, se hizo el cuarteo por medio de palas.
4. Se vació la muestra en una superficie limpia y trabajable para secarse por medio de los rayos del sol.
5. Una vez secado el material se coloca en forma de cono y se cambia de un lado a otro procurando que se mezcle completamente.
6. Terminado el mezclado se aplana el cono dejando un círculo para posteriormente dividirlo en cuatro partes.

Por medio del cuarteo por palas se obtuvo una muestra representativa de 20 kilos de arena aproximadamente, para hacer la prueba de granulometría se requiere una muestra de 1 kilo de arena, por lo que se tuvo que realizar el cuarteo por el método de divisor de muestras para obtener una muestra representativa de menor tamaño, para la granulometría de la grava se requiere aproximadamente 16 kilos y se realiza



el mismo procedimiento que para la grava pero en un recipiente de mayor tamaño de aberturas.



*Ilustración 9-2 Cuarteo por medio de palas (López Reyes S.)*

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.

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-030-ONNCCE, 2004).

#### 9.1.2 Humedad actual en arenas y gravas

Para elaborar un concreto es de vital importancia controlar la cantidad de agua que será requerida, 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 la elaboración.

Equipo necesario para realizar la prueba:

- Una muestra representativa del agregado (Aproximadamente 1 kg).
- Una Parilla.
- 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 (Ms).
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.

$$\% \text{ Hum. act} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-166-ONNCCE, 2006)

### 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**

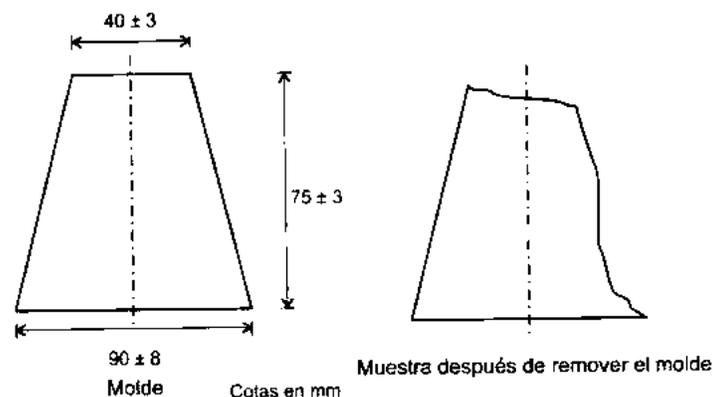
Equipo:

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



Procedimiento para efectuar la prueba:

1. Del procedimiento de cuarteo se obtiene una muestra representativa de los agregados pétreos de aproximadamente 1 kg.
2. Se coloca el material en una charola con agua y se deja saturando durante 24 horas.
3. Se seca el material superficialmente, como se establece a continuación:
  - Se retira el exceso del agua de la muestra saturada y se coloca en la parrilla a temperatura constante.
  - Para determinar si la arena 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 primer capa, 10 a la segunda, 3 a la tercera y 2 a la cuarta.
  - Se retira el cono de manera vertical y si el material comienza a disgregarse quiere decir que el material está superficialmente seco.



*Ilustración 9-3 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 9-4 En la izquierda se muestra 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 (López Reyes S.)

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

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-165-ONNCCE, 2014)

### Humedad de absorción en gravas

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 la 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 (Ms).
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 9-5 Material saturado a 24 horas y seco superficialmente (López Reyes S).

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

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-164-ONNCCE, 2014)

#### 9.1.4 Método de prueba para la masa volumétrica seca suelta

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



Equipo:

- 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 9-6 Proceso para la obtención de la MVSS (López Reyes S.).*



**Fórmula:**

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

**Donde:**

$M_v$  = masa volumétrica de los agregados, en  $\text{Kg}/\text{m}^3$ .

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

$T$  = masa del recipiente, en Kg.

$V$  = volumen del recipiente, en  $\text{m}^3$ .

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)

**9.1.5 Método de prueba para la masa volumétrica seca varillada**

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

**Equipo:**

- Recipiente
- 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 9-7 Proceso para la obtención de la MVSV (López Reyes S.).*

#### **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>.

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

#### **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.

### 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 decimo de gramo

*Ilustración 9-8 Equipo Raf-tap utilizado (López Reyes S.).*

Existen composiciones granulométricas que en base a estudios empíricos, han demostrado comportarse mejor mecánicamente, por lo tanto la norma mexicana (NMX-C-111-ONNCCE, 2004) especifica un rango del porcentaje que pasa para cada tamaño de las partículas de arena con referencia al número de malla anteriormente tabulado.

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-077-ONNCCE, 1997).

### Granulometría en gravas

Lo ideal para tener una granulometría uniforme, de acuerdo a la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2004), 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
- Cucharon
- Bascula

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 es malla se pasan por las siguientes mallas en el mismo orden.
3. De esta manera se tienen los retenidos de cada malla y se pesa cada retenido.



*Ilustración 9-9 Granulometría en gravas mediante las mallas (López Reyes S.).*

La norma que rige esta prueba es la (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.

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  $130 \text{ cm}^3$  (ml).
3. Se agrega la solución de sosa cáustica hasta que el volumen del agregado y de la solución se aproxime a  $206 \text{ cm}^3$  (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.

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-088-ONNCCE, 1997)



*Ilustración 9-10 Comparación del color del sedimento con la tabla colorimétrica (López Reyes S.).*

### 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:



- 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 9-11 Muestra de sedimentación trascurridas 24 horas (López Reyes S.).*



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.

El equipo utilizado es el siguiente:

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

El procedimiento es el siguiente:

1. Se toma la muestra y se cuartea para obtener una muestra representativa de 300 gramos como mínimo 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  $M_f$ .

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

Especificaciones:

Las especificaciones correspondientes a los límites permisibles se muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 9-1 Especificaciones material que pasa la malla NO. 200 ASTM.*

| 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.

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-084-ONNCCE, 1997).

### 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.



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.

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

Especificaciones:

Los límites máximos de partículas deleznable se muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 9-2 Especificación cantidad máxima de terrones de arcilla o material deleznable.*

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

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-071-ONNCCE, 2004)



### 9.1.11 Determinación de la densidad en arenas y gravas

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

La densidad del agregado 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.

#### Densidad de la arena

El equipo utilizado para la densidad es:

- Muestra representativa de arena
- Una balanza
- Frasco
- Una parilla
- 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 el agregado, se pesa una muestra registrándola como masa del agregado ( $S_s$ ).
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 el agregado al caer tenga una absorción rápida.
4. Se vacía la muestra del agregado ( $S_s$ ), 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).

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

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-165-ONNCCE, 2014).

### Densidad de la grava

Equipo:

- Muestra representativa de grava
- Picnómetro
- Probeta de 250 ml
- Franela

Procedimiento:

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

1. Una vez seco superficialmente el material, se pesan 300 gramos de grava seca superficialmente, registrándola como masa húmeda (mh).
2. Se llena el picnómetro, se deja reposar hasta que deje de gotear.
3. Se coloca la probeta de 250 ml debajo del orificio, después se vierte la muestra (mh) sobre el picnómetro procurando no salpicar agua.
4. Se deja reposar hasta que el picnómetro deje de gotear, se mide el volumen desalojado y se registra como (vf).



Ilustración 9-12 Volumen de agua desalojado por el picnómetro.

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

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-164-ONNCCE, 2014).

#### 9.1.12 Equivalente de arena

La normativa mexicana (NMX-C-480-ONNCCE, Industria de la construcción - Geotecnia - Equivalente de arena de agregados finos - Método de ensayo., 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  $85 \pm 5$  mi (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  $LNS_{\text{finos}}$ .
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  $LNS_{\text{arena}}$ .

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

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

## 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 respecto a la masa del cemento para que sea 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 modifica el porcentaje de agua hasta que la penetración de la aguja quede dentro del rango.



*Ilustración 9-13 En la izquierda se muestra la formación de la esfera y en la derecha la penetración de la aguja (López Reyes S.).*

### 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 Gillmore, 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.

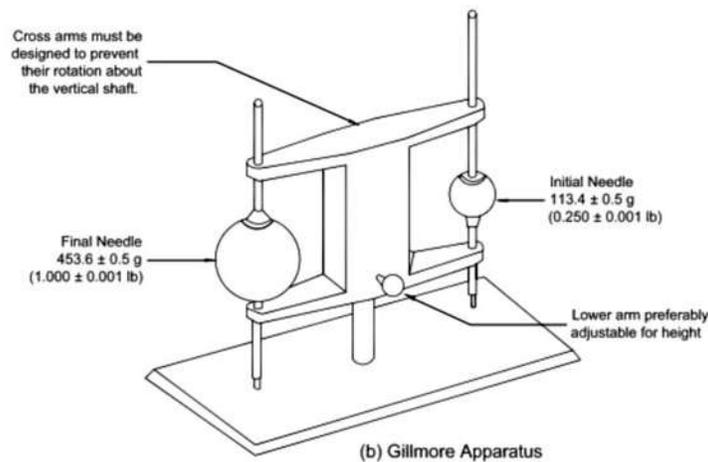
Procedimiento:

1. Con la pasta que se obtuvo en la prueba de consistencia normal, se aplana 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.



*Ilustración 9-14 Descripción del aparato de Gillmore.*

### 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-C-152-ONNCCE, 2010).

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).

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



*Ilustración 9-15 Frasco Le Chatelier sumergido en agua y muestra de cemento para la prueba (López Reyes S.).*

### 9.3 Pruebas realizadas a concreto fresco

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

La prueba e 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. El revenimiento de diseño fue de 15 cm y el revenimiento obtenido de los ensayos estuvo entre los 13 cm y los 17 cm, dichos valores están permitidos de acuerdo la norma mexicana (NMX-C-156-ONNCCE, 2010) que establecen los parámetros indicados en la tabla 9-3.

*Tabla 9-3 Parámetros de tolerancia para el revenimiento*

| Revenimiento     | Tolerancia |
|------------------|------------|
| R < 5 cm         | ±1.5       |
| 5 cm < R < 10 cm | ±2.5       |
| R > 10 cm        | ±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.

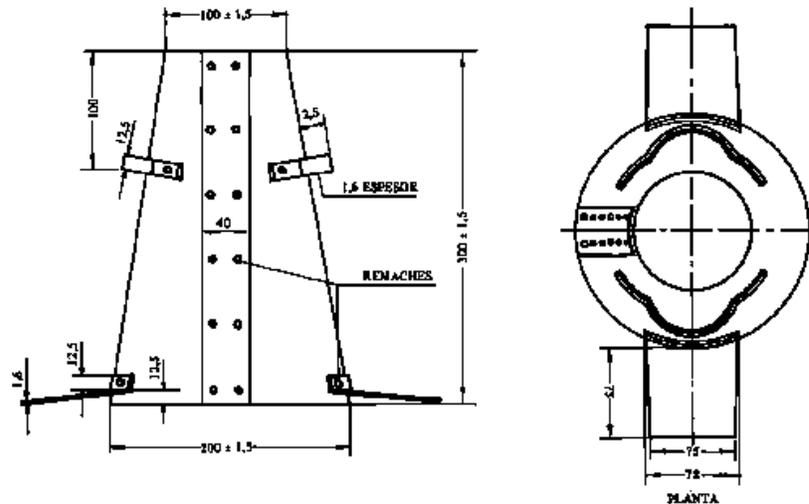


Ilustración 9-16 Medidas del molde metálico para el revenimiento (Rodríguez, 2013).

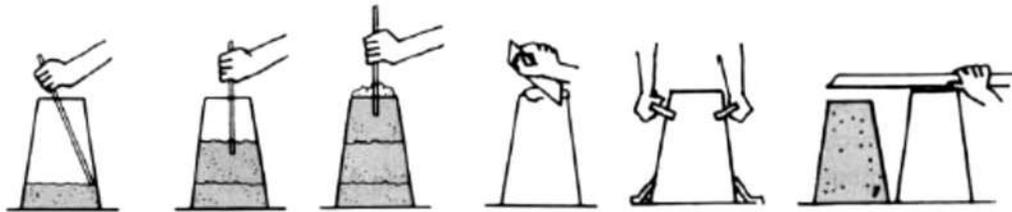
#### Procedimiento:

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 para 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 16 de altura. Al apisonar la capa inferior se darán los primeros golpes con la varilla 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, enrasa 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 9-17 Proceso para la obtención del revenimiento (Rodríguez, 2013).*

### 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. La sigla significa "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.



Ilustración 9-18 Comparación del pH con la muestra (López Reyes S.).

### 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-C-1064

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. Asegurar que el espesor de la capa de concreto sea 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 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 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). 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 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 (Powers, 1949) 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 de prueba.
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 pueda ser colocado en el molde.
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.

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 realizó en una máquina universal “Forney” Modelo Tb. Todas las pruebas a la compresión se realizaron en el rango de 75 toneladas. Esta prueba se realizó 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 9-19 Máquina universal Forney (López Reyes S.).*

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 9-20 Prueba de compresión (López Reyes S.).*

Para obtener la resistencia a la compresión se realiza con la siguiente ecuación:

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

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

F es la carga máxima en  $\text{kgf}$

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 ( $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ ).

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

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 basada 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.



Ilustración 9-21 Prueba de flexión en vigas (López Reyes S.).

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

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.

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

Equipo:

- Espécimen 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.



*Ilustración 9-22 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico (López Reyes S.).*



La (Red Durar, 2000) especifica criterios de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU (tabla 9-4).

*Tabla 9-4 Criterio de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU (CYDET-DURAR, 1998).*

| <b>Velocidad de propagación</b> | <b>Calidad del hormigón</b> |
|---------------------------------|-----------------------------|
| < 2000 m/s                      | Deficiente                  |
| 2001 a 3000 m/s                 | Normal                      |
| 3001 a 4000 m/s                 | Alta                        |
| > 4000 m/s                      | Durable                     |

#### 9.4.3.2 Resistividad eléctrica

Esta prueba fue realizada con el equipo “Nilson electrical” con el cual se puede determinar la resistencia eléctrica en ohm.

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 la intención 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.

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.



Ilustración 9-23 Prueba de resistividad eléctrica (López Reyes S.).

La (Red Durar, 2000) especifica los criterios generales de valores de resistividad eléctrica del hormigón.

Tabla 9-5 Criterio general de valores de resistividad eléctrica del hormigón (CYDET-DURAR, 1998)

| Valor                                    | Criterio        |
|--|-----------------|
| $p > 2000 \text{ k}\Omega\text{-cm}$     | Poco riesgo     |
| $200 > p > 10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ | Riesgo moderado |
| $p < 10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$       | Alto riesgo     |

La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-514-ONNCCE, 2016).



## 10. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 10.1 Agregados pétreos

#### 10.1.1 Arena

Los resultados de la caracterización de la arena se muestran en la tabla 10-1, como se puede observar, cada una de las pruebas cumple con los límites establecidos por sus normas, por lo tanto la arena es de buena calidad.

*Tabla 10-1 Resumen de resultados arena de Chamacuero.*

| <b>Pruebas de caracterización de la arena de "chamacuero"</b> |                       |              |                   |                     |
|---|-----------------------|--------------|-------------------|---------------------|
| <b>Prueba</b>   | <b>Norma</b>          | <b>Valor</b> | <b>Unidad</b>     | <b>Límite Norma</b> |
| Humedad de absorción  | NMX-C-165-ONNCCE-2014 | 5,86         | %                 | No establece        |
| MVSS  | NMX-C-073-ONNCCE-2004 | 1,292        | g/cm <sup>3</sup> | No establece        |
| MVSV  | NMX-C-073-ONNCCE-2004 | 1,379        | g/cm <sup>3</sup> | No establece        |
| Colorimetría  | NMX-C-088-ONNCCE-1997 | 2            |                   | No. 3 máx.          |
| Sedimentación   | Manual Laboratorio    | aceptable    |                   | No establece        |
| Pasa malla no 200   | NMX-C-084-ONNCCE-1997 | 6.5          | %                 | 15% máx.            |
| Terrones de arcilla   | NMX-C-071-ONNCCE-2004 | 0,2          | %                 | 3% máx.             |
| Densidad  | NMX-C-165-ONNCCE-2014 | 2,44         | g/cm <sup>3</sup> | No establece        |
| Equivalente de arena  | NMX-C-480-ONNCCE-2014 | 95.3         | %                 | 85% min             |
| Módulo de finura  | NMX-C-111-ONNCCE-2004 | 2,7          |                   | 2,30-3,10           |

#### **Granulometría**

La granulometría obtenida (ilustración 10-1) queda dentro de los límites establecidos en la (NMX-C-077-ONNCCE, 1997), por lo tanto se considera una arena con granulometría buena.

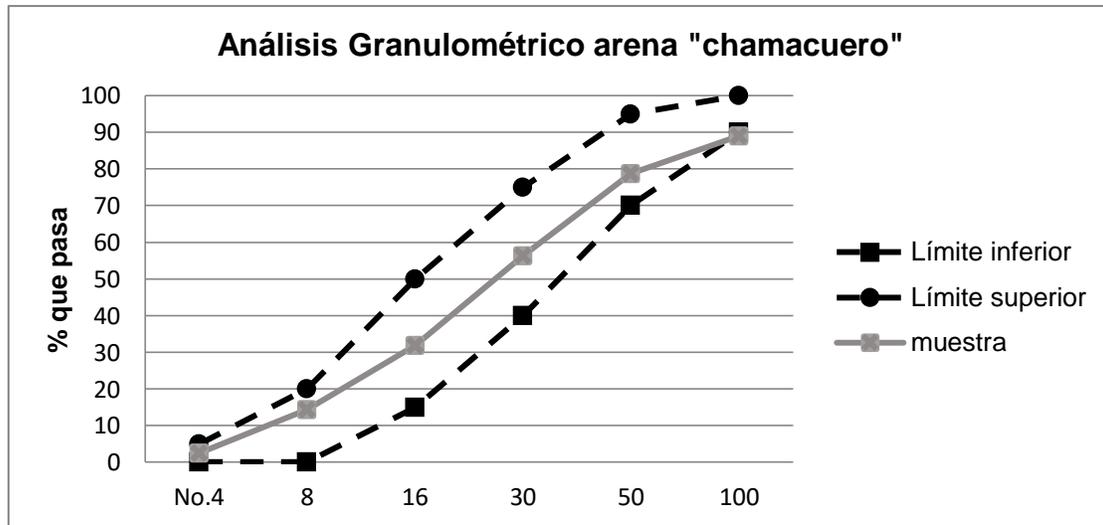


Ilustración 10-1 Granulometría obtenida de la arena de Chamacuero.

### 10.1.2 Grava

Los resultados de la caracterización de la grava se muestran en la tabla 10-2.

Tabla 10-2 Resumen de resultados grava Chamacuero.

| Pruebas de caracterización de la grava de "tracsa" |                       |       |                   |              |
|--|-----------------------|-------|-------------------|--------------|
| Prueba   | Norma                 | Valor | Unidad            | Límite Norma |
| Humedad de absorción                               | NMX-C-164-ONNCCE-2014 | 2,36  | %                 | No establece |
| MVSS   | NMX-C-073-ONNCCE-2004 | 1425  | g/cm <sup>3</sup> | No establece |
| MVSV   | NMX-C-073-ONNCCE-2004 | 1581  | g/cm <sup>3</sup> | No establece |
| TMA  | NMX-C-77-ONNCCE-1997  | 3/4   | in                | No establece |
| Densidad   | NMX-C-164-ONNCCE-2014 | 2,5   | g/cm <sup>3</sup> | No establece |

### Granulometría

La granulometría de la grava obtenida (ilustración 10-2) queda dentro de los límites establecidos en la (NMX-C-077-ONNCCE, 1997), por lo tanto se considera una grava de buena calidad.

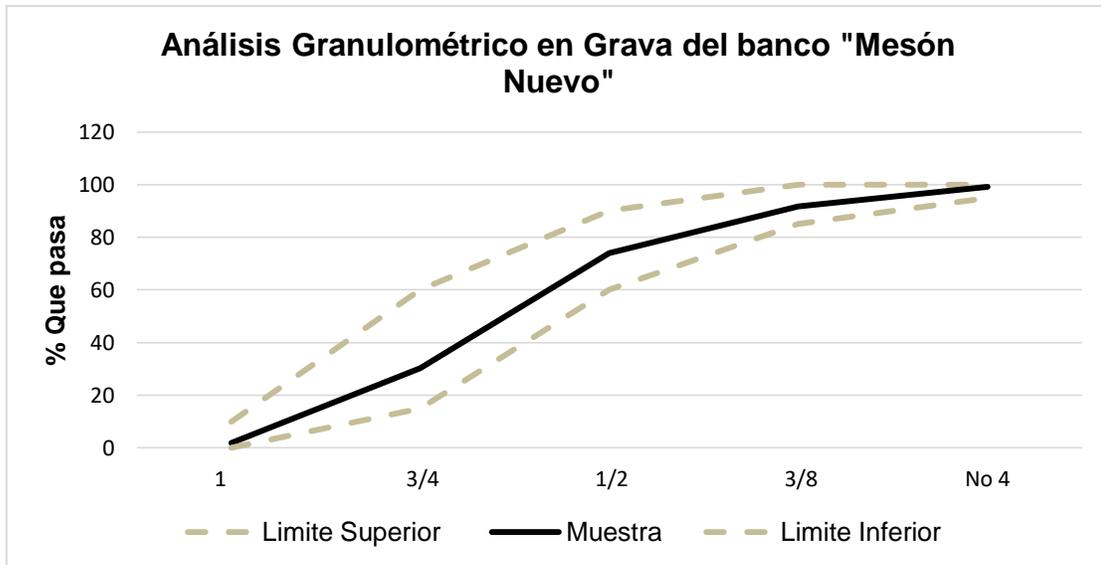


Ilustración 10-2 Granulometría obtenida de la grava Mesón Nuevo.

## 10.2 Cemento

Los resultados de las pruebas realizadas al cemento se muestran en la tabla (10-3), estos resultados cumplen con los límites establecidos en las normas, excepto el fraguado final ya que el cemento retarda considerablemente el fraguado.

Tabla 10-3 Resumen de resultados cemento CPC 40 RS.

| Pruebas de caracterización del cemento |                       |       |                   |              |
|--|-----------------------|-------|-------------------|--------------|
| Prueba                                 | Norma                 | Valor | Unidad            | Límite Norma |
| Densidad                               | NMX-C-152-ONNCCE-2010 | 3,1   | g/cm <sup>3</sup> | 2,9-3,15     |
| Consistencia normal                    | NMX-C-157-ONNCCE-2010 | 28    | %                 | 23-33        |
| Fraguado inicial                       | NMX-C-059-ONNCCE-2010 | 215   | min               | >45 min      |
| Fraguado final                         | NMX-C-059-ONNCCE-2010 | 555   | min               | <420 min     |

## 10.3 Diseño de mezclas

El proporcionamiento para la mezcla testigo se muestra en la siguiente tabla:



Tabla 10-4 Resumen del proporcionamiento para 1 m<sup>3</sup> de concreto

| Resumen de las cantidades para el proporcionamiento |             |           |                     |
|---|-------------|-----------|---------------------|
| Material  | Volumen (L) | Masa (kg) | Masa corregida (kg) |
| Cemento   | 116,86      | 354,10    | 354,10              |
| Agua  | 216,00      | 216,00    | 273,16              |
| Grava   | 341,50      | 853,74    | 833,59              |
| Arena   | 305,64      | 797,72    | 760,71              |
| Aire  | 20,00       | 0,00      | 0,00                |

Para las otras mezclas se tomó como base el proporcionamiento de la mezcla testigo (tabla 10-4) y utilizando el aditivo fluidificante se obtuvieron:

**M7-C:** 0.3 % de fluidificante y -20 % de cemento, el agua se agregó para obtener un revenimiento de 15 cm.

**M1-C:** 0.5 % fluidificante y -20 % de agua.

**M6-C:** 0.3 % fluidificante, - 14 % de cemento y -10 % de agua.

#### 10.4 Concreto fresco

El revenimiento de diseño fue de 15 cm, por lo tanto los resultados se mantuvieron dentro del rango de 15±3.5 cm, la temperatura oscilo entre los 18 y 21 °C y el pH entre 12 y 13 (tabla 10-4). Los valores del pH deben ser mayores a 9 para evitar que el acero de refuerzo sufra corrosión.

Tabla 10-5 Resultados del concreto fresco.

| Pruebas realizadas al concreto fresco |              |             |    |
|---------------------------------------|--------------|-------------|----|
| Mezclas                               | Revenimiento | Temperatura | pH |
| Testigo                               | 14,5         | 18          | 13 |
| M7-C                                  | 13,8         | 21          | 13 |
| M6-C                                  | 14           | 19          | 12 |
| M1-C                                  | 14,2         | 19          | 12 |

#### 10.5 Concreto endurecido

##### 10.5.1 Cilindros

#### Resistencia a la compresión



En las ilustraciones 10-3, 10-4 y 10-5 se observan las resistencias a compresión en las diferentes edades de prueba (7, 14 y 28 días), la mezcla M7-C da los mejores resultados ya que es la que mejor se acerca al  $f'c$  deseado.

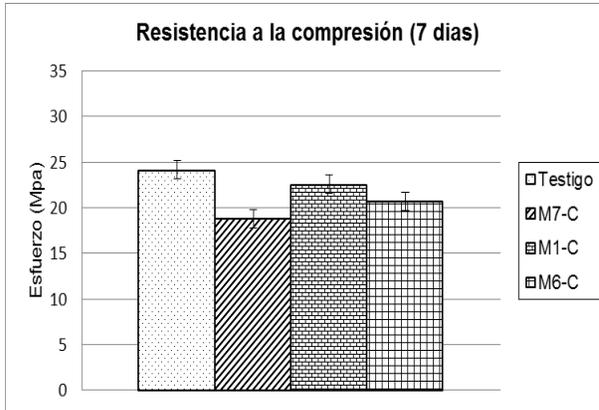


Ilustración 10-4 Resistencia a la compresión (7 días)

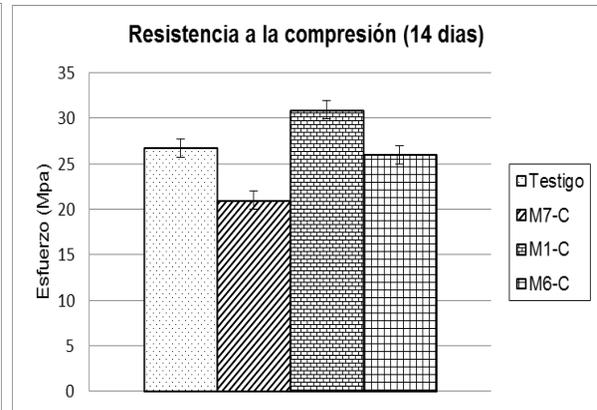


Ilustración 10-3 Resistencia a la compresión (14 días)

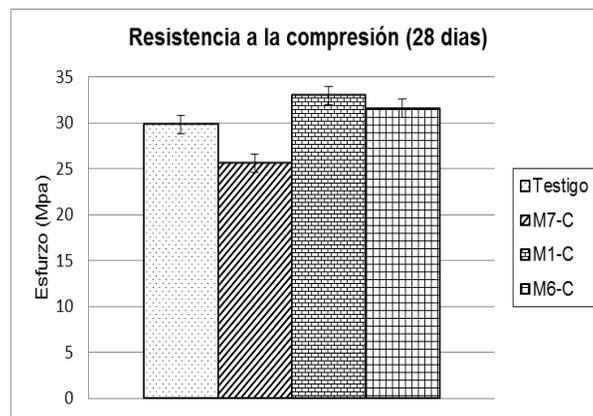


Ilustración 10-5 Resistencia a la compresión (28 días)

En la siguiente ilustración (10-6) se muestra el resumen de resultados para los diferentes días de prueba.

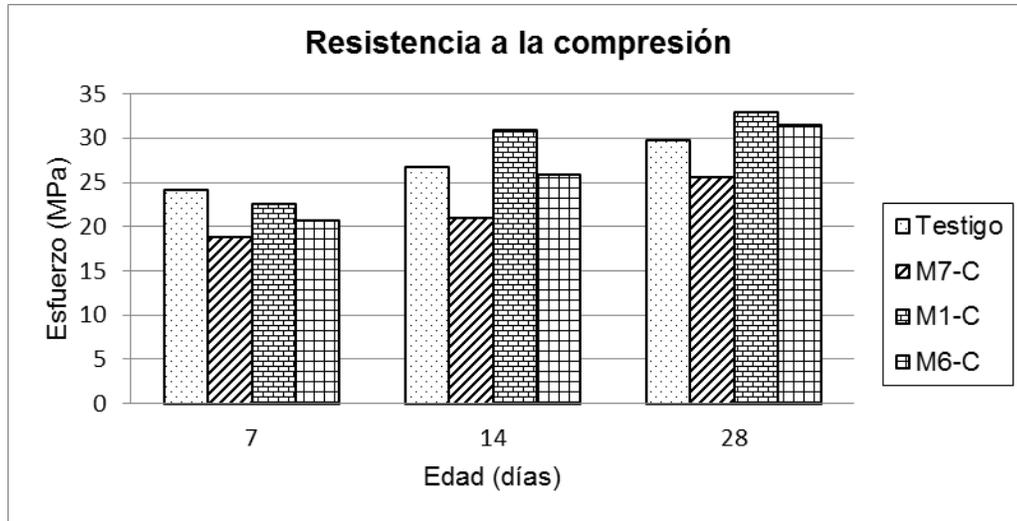


Ilustración 10-6 Resumen de resultados obtenidos de la prueba de resistencia a la compresión.

### Velocidad de pulso ultrasónico

En las ilustraciones 10-7,10-8 y 10-9 se muestran los resultados obtenidos para la prueba de velocidad de pulso ultrasónico, los cuales a la edad de 28 días muestran una calidad durable de acuerdo a lo establecido en la (Red Durar, 2000), tabla 9-4.

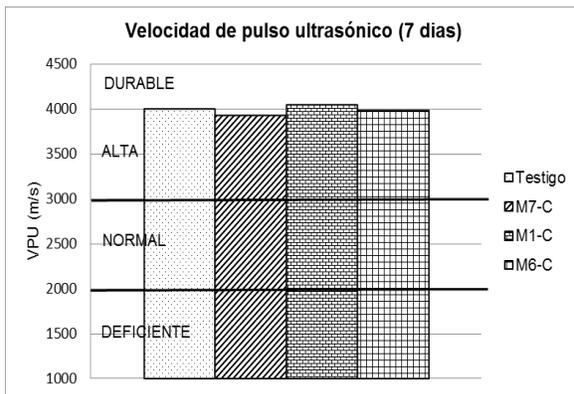


Ilustración 10-7 velocidad de pulso ultrasónico (7 días)

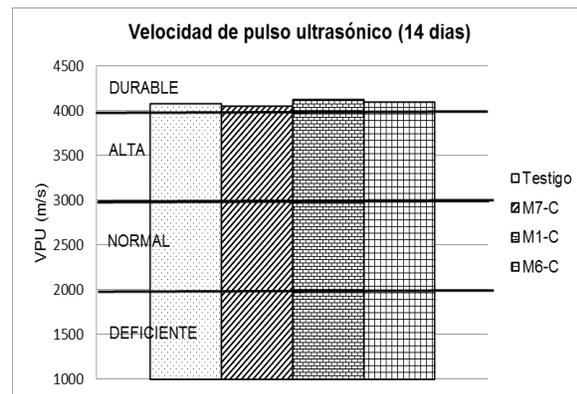


Ilustración 10-8 velocidad de pulso ultrasónico (14 días)

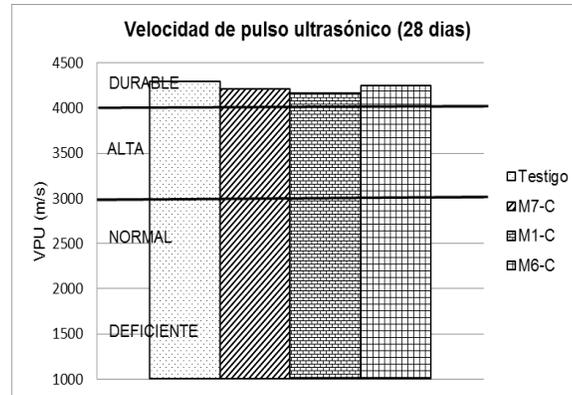


Ilustración 10-9 velocidad de pulso ultrasónico (28 días)

En la siguiente ilustración (10-10) se muestra el resumen de resultados para los diferentes días de prueba.

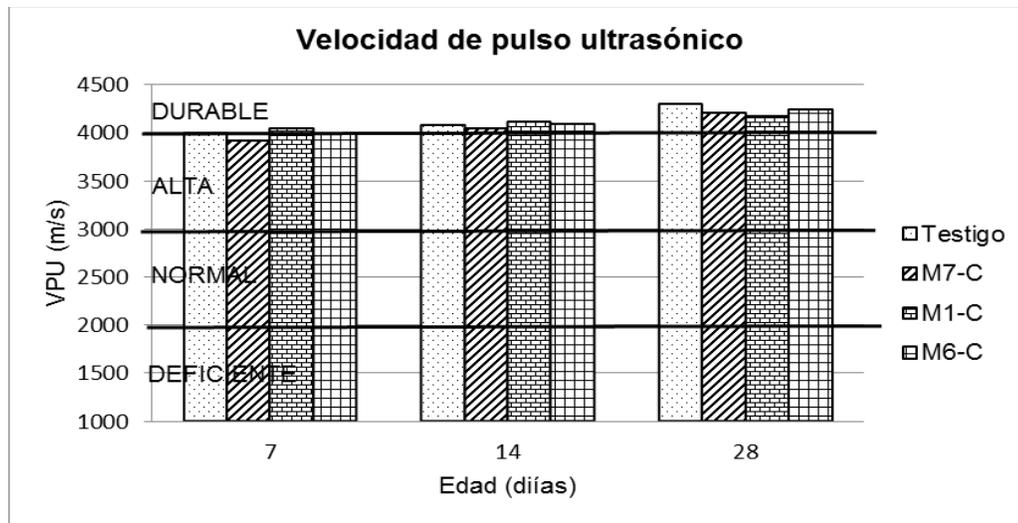


Ilustración 10-10 Resumen de resultados obtenidos de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico.



## Resistividad eléctrica

En las ilustraciones 10-11, 10-12 y 10-13 se muestran los resultados obtenidos para la prueba de resistividad eléctrica, los cuales a la edad de 28 días muestran un criterio general de riesgo moderado de acuerdo en lo establecido en la (Red Durar, 2000), tabla 9-5.

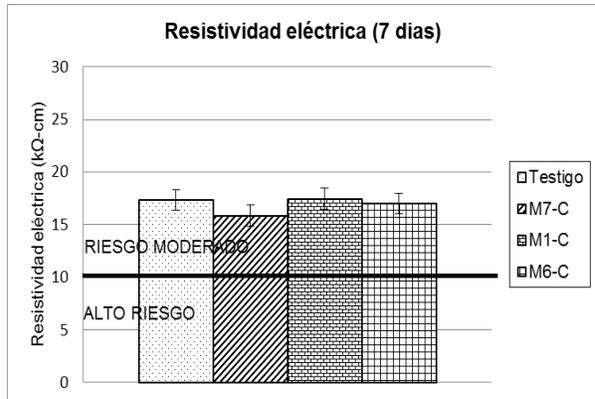


Ilustración 10-12 Resistividad eléctrica (7 días).

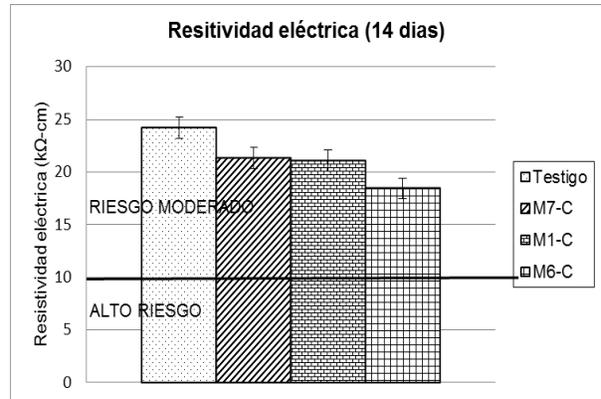


Ilustración 10-11 Resistividad eléctrica (14 días).

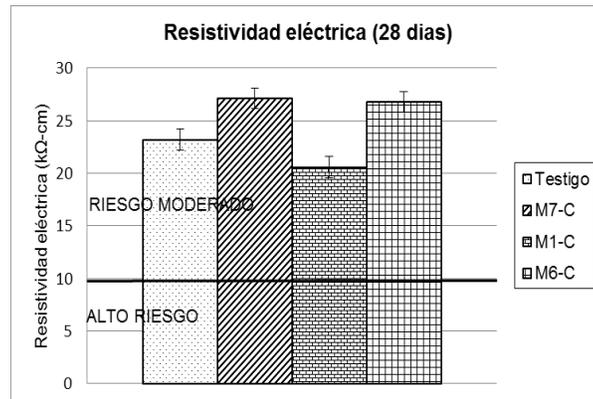


Ilustración 10-13 Resistividad eléctrica (28 días).

En la siguiente ilustración (10-14) se muestra el resumen de resultados para los diferentes días de prueba.

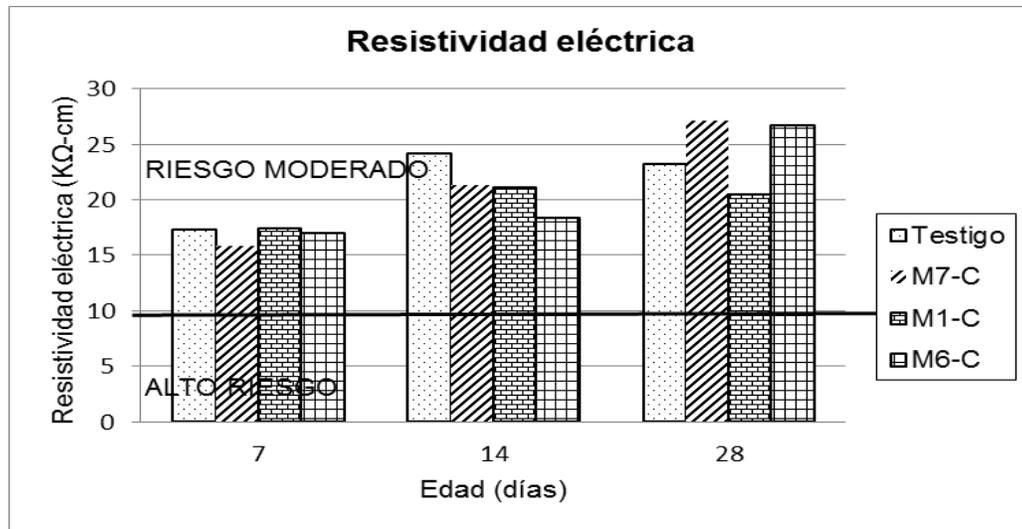


Ilustración 10-14 Resumen de resultados obtenidos de la prueba de resistividad eléctrica.

### 10.5.2 Vigas

Las vigas solo se elaboraron para la mezcla testigo y para la mezcla con el mejor f'c de diseño (M7-C), únicamente se realizaron pruebas para obtener la resistencia a flexión (MR). Los resultados se muestran en las tablas 10-15, 10-16 y 10-17.

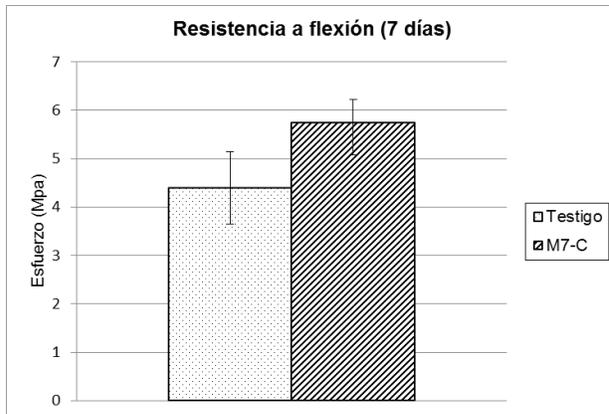


Ilustración 10-16 Resistencia a la flexión (7 días)

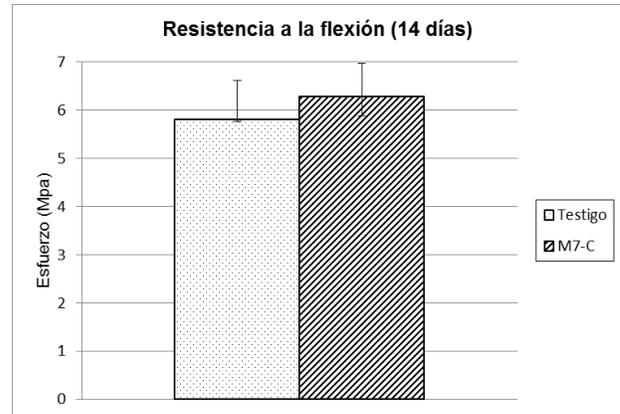


Ilustración 10-15 Resistencia a la flexión (14 días)

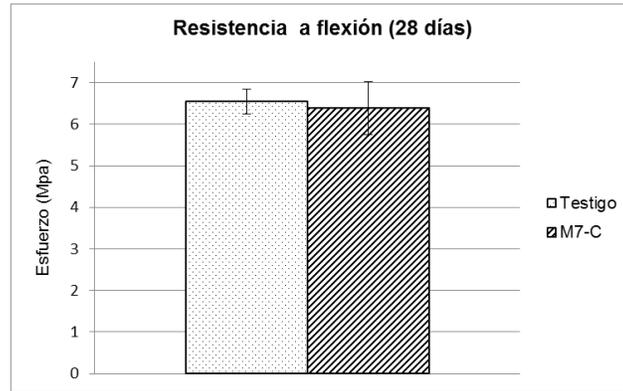


Ilustración 10-17 Resistencia a la flexión (28 días).

En la siguiente ilustración (10-17) se muestra el resumen de resultados para los diferentes días de prueba.

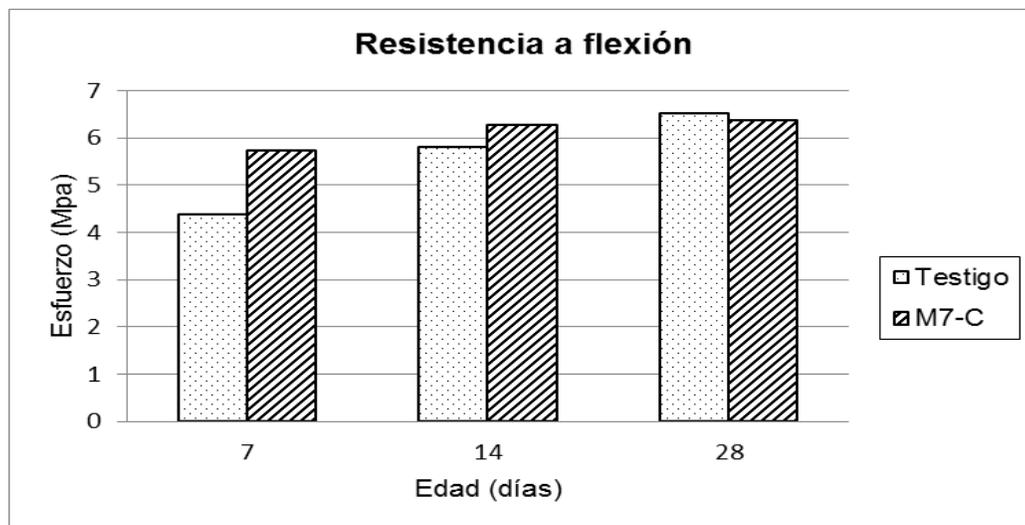


Ilustración 10-18 Resumen de resultados obtenidos de la prueba de flexión.



## 11 CONCLUSIONES

Los concretos de alta resistencia y durabilidad se fabrican con materiales de buena calidad y diseñados con una relación agua/cemento optima, sin restarle menor importancia al proceso de elaboración, transporte, colocación y terminado. Al fallar una parte de todo el proceso, la calidad también bajara. Para la elaboración del concreto con un  $f'c=250 \text{ kgf/cm}^2$  se agregó un aditivo fluidificante buscando el proporcionamiento optimo que nos diera la resistencia adecuada sin afectar la trabajabilidad del concreto.

Las cuatro mezclas mostraron buenos resultados en todas las pruebas, pero la mezcla M7-C es la que resulto ser la ideal ya que cumplió con la resistencia esperada y para las pruebas no destructivas (velocidad de pulso y resistividad) presento valores buenos de acuerdo a lo establecido en los parámetros de la Red DURAR.

Los resultados para la prueba de flexión fueron buenos, para la mezcla testigo fue de un 22 % del  $f'c$  y para la mezcla M7-C del 24% del  $f'c$ .

Finalmente si se logró el objetivo principal de diseñar una mezcla de concreto con aditivo fluidificante para reducir la cantidad de agua y cemento en proporción optima y así poder reducir su costo.

Debido a que se tuvieron buenos resultados en la mezcla ideal, se concluye que con los agregados de esos bancos de material, el cemento CPC 40 RS y la incorporación del aditivo fluidificante se puede obtener una mezcla que cumpla con el  $f'c$  y revenimiento de diseño, sin dejar de tener las características de un concreto de calidad.



## 12 BIBLIOGRAFÍA

- Abrams, D. A. (1919). *Design of Concrete Mixtures, Bulletin No 1, Structural Materials Research Laboratory*. Lewis Institute, Chicago.
- ACI 211, A. C. (1991). *ACI Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, reapproved 1986, ACI Committee 214 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.
- Arguello Hernández, S. d. (2012). *Análisis comparativo entre Técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a morteros con sustituciones minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas e inorgánicas, residuos industriales y fibras de cactus*. Morelia: Facultad de Ingeniería Civil.
- ASTM-C-1064-86. (1993). *MÉTODO ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL CONCRETO FRESCO DE CEMENTO PORTLAND*. ASTM.
- ASTM-C150. (2005). *Standard Specifications for Portland Cement*. ASTM.
- ASTM-C-150. (2016). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM.
- ASTM-C-151. (2015). *Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement*. ASTM.
- ASTM-C-191. (2013). *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. 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.
- Cámara Nacional del Cemento. (2016). *Procesos de Producción*.



- Cement Sustainability Initiative. (2016). *CO2 and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry*. Cement Sustainability Initiative. Conches-Geneva: WBCSD.
- CEMEX. (2016). *Cemento*. CEMEX S.A.B. de C.V. San Pedro Garza García: CEMEX.
- CHRISTIANSON S.A. de C.V. (s.f.). *CRISOTAN R-5. DISPERSANTES PARA CONCRETOS. BOLETÍN TÉCNICO*. CDMX.
- CYCNA. (2017). Recuperado el 16 de JUNIO de 2017, de <http://www.cycna.mx/cpc-40-rs/>
- Federación Interamericana del Cemento. (2013). *Informe Estadístico*. FICEM. Bogotá: FICEM.
- Fundación Laboral del Cemento y Medio Ambiente. (2015). *Fabricación del cemento*. Madrid: Fundación Laboral del Cemento y Medio Ambiente.
- GeoXNet. (18 de Noviembre de 2016). *GeoXNet.com*. Obtenido de GeoXNet.com: <http://www.geoxnet.com/CicloRocas.php>
- HOLCIM. (2015). *Proceso de fabricación del cemento*. HOLCIM-Apasco. Cuajimalpa, CDMX: HOLCIM.
- IMCYC. (2006). Los aditivos para concreto en seis pasos. *Revista IMCYC Tecnología*, 8.
- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*. Bogotá: Asociación Colombiana de Productores de Concreto.
- Juárez Badillo, E., & Rodríguez, R. (2005). *Mecánica de Suelos*. CDMX: Limusa.
- Kosmatha, S., & Panarese, C. (1992). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC), primera edición. México.
- NATIONALGEOGRAPHIC. (s.f.). *NATIONALGEOGRAPHIC*. Recuperado el 14 de JUNIO de 2017, de NATIONALGEOGRAPHIC:



[http://www.nationalgeographic.com.es/historia/grandes-reportajes/creso-de-lidia\\_7759/2](http://www.nationalgeographic.com.es/historia/grandes-reportajes/creso-de-lidia_7759/2)

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*. México: Trillas.

NMX-C-030-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-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 CEMENTANTES*. CDMX: ONNCCE.

NMX-C-062-ONNCCE. (2010). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CEMENTOS HIDRÁULICOS-DETERMINACIÓN DE LA SANIDAD DE 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-MÉTODO DE PRUEBA*. CDMX: ONNCCE.

NMX-C-077-ONNCCE. (1997). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS PARA CONCRETO-ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS-MÉTODO 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-ONNCCE. (1997). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS PARA CONCRETO-PARTÍCULAS MÁS FINAS QUE LA CRIBA 0,075 mm (No 200) POR MEDIO DE LAVADO-MÉTODO DE PRUEBA*. CDMX: ONNCCE.

NMX-C-088-ONNCCE. (1997). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS- DETERMINACIÓN DE IMPUREZAS ORGÁNICAS EN EL AGREGADO FINO*. CDMX: ONNCCE.

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*. CDMX: ONNCCE.

NMX-C-152-ONNCCE. (2010). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CEMENTO HIDRÁULICO-DETERMINACIÓN 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). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO- ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE ENSAYO*. CDMX: ONNCCE.

NMX-C-164-ONNCCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO GRUESO*. CDMX: ONNCCE.

NMX-C-165-ONNCCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO-MÉTODO DE ENSAYO*. CDMX: ONNCCE.



- NMX-C-166-ONNCCE. (2006). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-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 FLEXIÓN DEL CONCRETO USANDO UNA VIGA SIMPLE CON CARGA EN LOS TERCIOS DEL CLARO*. ONNCCE.
- NMX-C-255-ONNCCE. (2013). *Industria de la Construcción-Aditivos Químicos para Concreto-Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-275-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO-DETRMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PULSO A TRAVÉS DEL CONCRETO-MÉTODO DE ULTRASONIDO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2010). *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-480-ONNCCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-GEOTECNIA-EQUIVALENTE DE ARENA AGREGADOS FINOS-MÉTODO DE ENSAYO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-514-ONNCCE. (2016). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO HIDRÁULICO-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO*. CDMX: ONNCCE.
- Powers, T. (1949). *The non-evaporable water content of hardened cement paste: its significance for concrete research and its method of determination*". ASTM.
- Red Durar. (2000). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (Tercera edición)*. CDMX: CYTED.



Rivera, G. A. (2010). *CONCRETO SIMPLE*. Popayan, Colombia: Universidad del Cauca.

Rodríguez, A. P. (2013). *Manual de Prácticas del Laboratorio de Concreto*. Chihuahua: UACH.

Shetty, M. (2005). *Concrete technology Theory and Practice*. Ram Nagar, New Dheli, India: S. Chand and Companu LTD.

Shetty, M. S. (2005). *Concrete Technology Theory an Practice*. Nueva Dheli: S. Chand.

Trujillo Calderón, I. (2016). *Comparativa de concreto hidraulico sometido a curado por inmersion y curado al interperie*. Morelia.