Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias (Construcción)

Evaluación y análisis de la resistencia a la compresión del concreto hidráulico variando la granulometría de los agregados pétreos

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener grado de Maestro en Ciencias con Línea Terminal en Construcción

Presenta:

Ing. Eduardo Baltazar Méndez

Dirigido por:

M. en C. Joaquín Noriega Montes

SINODALES

M. en C. Joaquín Noriega Montes Presidente	Firma
M. en C. Rubén Ramírez Jiménez Secretario	Firma
M. en C. José Luis Reyes Araiza Vocal	Firma
M. en C. Hilda Edith Jiménez Robles Suplente	Firma
M. en A. Wilfrido Martínez Molina Suplente	Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Junio de 2008
México

Resumen

En este trabajo de investigación se expone la modificación de la granulometría de los agregados pétreos, con la finalidad de realizar una evaluación y un análisis de la resistencia a la compresión del concreto hidráulico elaborado con dichas modificaciones. Primeramente se presenta una revisión bibliográfica de los aspectos básicos del concreto y, los materiales que lo constituyen tales como los agregados pétreos, el agua de mezclado y el cemento Portland, así como los aspectos generales del concreto. Enseguida se exponen los materiales y métodos utilizados para la elaboración de las mezclas de concreto. Los materiales utilizados se sometieron a diversas pruebas y análisis, tal fue el caso de los agregados pétreos de los cuales se obtuvieron sus propiedades físicas. Una vez determinadas estas, los agregados gruesos y finos se prepararon para fabricar una mezcla base y seis mezclas modificadas, las modificaciones fueron con base en las curvas de la norma ASTM C 33. La mezcla base se diseñó con una relación a/c = 0.585 y un revenimiento de 10 cm, a partir de la cual se elaboraron dos grupos de mezclas, el primero utilizando la misma cantidad de agua y cemento que la mezcla base, pero con, una granulometría modificada con respecto a la granulometría de referencia, de las cuales se obtuvieron revenimientos superiores a los 10 cm, por lo que se decidió fabricar un segundo grupo de mezclas, en el cual se utilizaron las mismas granulometrías modificadas, pero, se modificó la cantidad de agua y cemento manteniendo la relación de 0.585 y para obtener un revenimiento de 10 cm. Para todas las mezclas se obtuvieron los valores de resistencia a la compresión, porcentaje de vacios y resistividad eléctrica, para así conseguir como resultado dos mezclas modificadas que superaron, en los parámetros antes señalados, a la mezcla base. Los resultados demuestran que el concreto elaborado con modificación en la granulometría de los agregados pétreos, aumenta la compacidad y por ende la resistencia a la compresión del concreto, por ello estos son considerados aspectos relevantes para la elaboración de las mezclas de concreto.

(**Palabras clave**: granulometría, agregados pétreos, concreto, revenimiento, porcentaje de vacíos, resistencia a la compresión, compacidad, resistividad eléctrica.)

Summary

In this research the modification of the grading of stony aggregates is exposed, in order to evaluate and analyze the compressive strength of the concrete hydraulic made with these modifications. First a bibliographical revision about the basic aspects of concrete and materials that constitute it is made, including stony aggregates, water and the Portland cement, as well as aspects of the concrete. Afterwards the materials and methods used for the elaboration of the mixtures of concrete are exposed. The used materials were put under diverse tests and analysis, so was the case of the stony aggregates from who the physical properties were obtained, of the heavy and fine aggregate, immediately the stony aggregates prepared themselves to make a mixture bases and six modified mixtures, these modifications were with base in the curves of norm ASTM C 33. The control mixture designed with a relation a/c = 0.585 and a slum of 10 cm, taking as it bases this one made two groups of mixtures, first of them having the same amount of water and cement that the mixture bases, but, a grading modified with respect to the grading of this, obtaining slums superiors to the 10 cm, reason why was decided to make a second group of mixtures, in which the same modified gradings were used, but, the amount of water and cement modified maintaining the 0.585 relation and looking for a slum of 10 cm. For all the mixtures the values of compressive strength were obtained, percentage of voids and electrical resistivity, having as result two modified mixtures that surpassed, on the parameters before indicated, to the mixture bases. The results demonstrate that the concrete one elaborated with modification in the grading of stony aggregates, increases to the compactness and therefore the compressive strength of the concrete one, being these aspects of most important to take considering elaborating mixtures of concrete.

(**Key words**: grading, aggregates, concrete, slum, percentage of voids, compressive strength, compactness, electrical resistivity.)

Dedicatorias

A DIOS
Por darme salud y fuerza en muchos momentos de desesperación y así poder alcanzar mis sueños, por permitirme despertar día a día y darme el privilegio de disfrutar el don de la vida, por rodearme de personas que me apoyan y me quieren, por cuidarme y enseñarme que hay que sacrificarse para obtener las metas planteadas.

A MIS PADRES
Eduardo Baltazar Bermúdez y Edith Méndez Salgado.
Por estar siempre a mi lado, apoyándome y dándome fuerza para seguir adelante, por enseñarme a valorar la vida, por darme tanto amor y cariño. Gracias a los dos por haberme dado la vida.

A MI NOVIA
Estrella Adhara Soto Román, con todo mi amor, por ser la luz que llegó a iluminar mi vida, por compartir tantas cosas juntos, por apoyarme incondicionalmente y enseñarme el camino correcto, por darme tanto amor y tanto respeto… Este logro es para los dos.

A MIS HERMANOS
Lilia, Mauricio y Uriel, con los que he compartido toda mi vida, por tener siempre su apoyo y cariño. Lilia gracias por estar siempre cuando te necesité ayudándome en aspectos importantes, gracias por traer a la vida a Leonardo, Mauricio gracias por apoyarme en mis momentos de desesperación y gracias por traer al mundo a una personita que le da mucha alegría a mi vida: Valeria, Uriel gracias por compartir tantas cosas y confiar en mí. Gracias por ser mi familia y estar unidos.

A MIS ABUELOS
Francisco Baltazar Reyes, Rafaela Bermúdez Farfán, Felipe Méndez Alvarado y Esperanza Salgado Chávez.
Gracias por su apoyo y sus sabios consejos en los momentos más importantes de mi vida.

A TODA MI FAMILIA
Porque todos contribuyeron con su granito de arena a mi formación personal. Gracias.

Agradecimientos

A la **Universidad Autónoma de Querétaro** en especial al **Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería**, por el apoyo con personal y equipo.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACyT) por el apoyo económico brindado para poder realizar esta investigación.

Al **Ing. Joaquín Noriega Montes** por su apoyo en los momentos de desesperación, y además de ser mi asesor también es un amigo.

A mis compañeros y amigos **Julio Cesar Romero Cervantes** y **Fernando Vladimir Bernal Elías** por su apoyo en todo momento.

Índice

Resumen i
Summary ii
Dedicatorias iii
Agradecimientos iv
Índice v
Índice de tablas viii
Índice de figuras xi
1. INTRODUCCIÓN 1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 6
2.1. Aspectos básicos sobre el concreto 6
2.1.1. Antecedentes históricos del uso del concreto 6
2.1.2. ¿Qué es el concreto? 8
2.1.3. Materiales que constituyen el concreto 12
2.1.3.a. Agregado pétreos 13
2.1.3.b. Agua de mezclado 19
2.1.3.c. Cemento Pórtland 20
2.2. Aspectos aplicados 25
2.2.1. Aspectos generales del concreto 25
2.3. Aspectos específicos del proyecto 26
2.3.1. Influencia de los agregados pétreos en las propiedades del concreto fresco 26
2.3.2. Influencia de los agregados pétreos sobre las propiedades del concreto endurecido 28
2.4. Fundamentos de resistividad eléctrica aplicados al concreto 31
3. MATERIALES Y MÉTODOS 33
3.1. Agregados pétreos 33
3.1.1. Agregado grueso 33
3.1.1.a. Ubicación del sitio de extracción del agregado grueso 33

3.1.2. Agregado fino 34
3.1.2.a. Ubicación del sitio de extracción del agregado fino 34
3.2. Propiedades físicas de los agregados 34
3.2.1. Propiedades físicas del agregado grueso 34
3.2.1.a. Granulometría 35
3.2.1.b. Humedad 37
3.2.1.c. Absorción 38
3.2.1.d. Densidad relativa 39
3.2.1.e. Peso volumétrico seco y compacto 40
3.2.2. Propiedades físicas del agregado fino 41
3.2.2.a. Granulometría 42
3.2.2.b. Modulo de finura 43
3.2.2.c. Humedad 44
3.2.2.d. Absorción 44
3.2.2.e. Densidad relativa 46
3.2.2.f. Peso volumétrico seco y compacto 47
3.3. Preparación de los agregados pétreos para la elaboración de las mezclas de concreto 47
3.3.1. Obtención de los agregados pétreos para las mezclas de control 48
3.3.2. Obtención de los agregados pétreos para las mezclas modificadas 51
3.3.2.a. Modificaciones del agregado grueso para las mezclas modificadas 52
3.3.2.b. Modificación del agregado fino para las mezclas modificadas 57
3.4. Proporcionamiento de mezclas de concreto 60
3.5. Ensayes de laboratorio 70
3.5.1. Revenimiento 70
3.5.2. Resistencia a la compresión 71
3.5.3. Porcentaje de vacíos 72

3.5.4. Resistividad eléctrica en el concreto 73
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 77
4.1. Revenimiento 77
4.2. Resistencia a la compresión 80
4.3. Porcentaje de vacíos 86
4.4. Resistividad eléctrica en el concreto 90
5. CONCLUSIONES 92
6. RECOMENDACIONES 93
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 94
Apéndice 98
Anexos 120

Índice de tablas

	Página
2.1 Requisitos de granulometría para el agregado grueso de acuerdo a las normas ASTM C33.	16
2.2. Requisitos de granulometría para el agregado fino de acuerdo a las normas ASTM C33.	18
2.3 Valores característicos y limites máximos tolerables de sales e impurezas en el agua (SCT N-CMT-2-02-003, 2002).	20
2.4 Composición típica del cemento Pórtland ordinario (Mindess y Young, 1981).	22
2.5 Clases resistentes de los cementos Pórtland (SCT N-CMT-2-02-001, 2002).	23
2.6 Características especiales de los cementos Pórtland (SCT N-CMT-2-02-001, 2002).	23
2.7 Composición de los cementos Pórtland.	24
2.8 Resistividad eléctrica de algunos materiales (Wikipedia, 2008).	32
3.1 Características físicas del agregado grueso y fino para las mezclas base.	49
3.2 Requisitos para la clasificación de los agregados gruesos (ASTM C 33, 2003).	52
3.3 Cantidades en peso de material requerido para la primera modificación.	53
3.4 Características físicas del agregado grueso para la primera modificación.	54
3.5 Cantidades en peso de material requerido para la segunda modificación.	54
3.6 Características físicas del agregado grueso para la segunda modificación.	55
3.7 Cantidades en peso de material requerido para la segunda modificación.	56

3.8 Características físicas del agregado grueso para la tercera modificación. 57
3.9 Requisitos para la clasificación de los agregados finos (ASTM C 33, 2003). 57
3.10 Cantidades en peso de material requerido para la modificación de la arena. 58
3.11 Características físicas del agregado fino utilizado para toda las mezclas modificadas. 59
3.12 Tabla con los datos para el diseño de las mezclas de concreto. 61
3.13 Tabla con el revenimiento recomendado por el ACI. 62
3.14 Tabla para determinar la cantidad de agua de mezclado. 63
3.15 Tabla para determinar el grado de supervisión durante la fabricación del concreto. 64
3.16 Tabla para obtener la relación agua/cemento en base a la resistencia a los 28 días. 64
3.17 Determinación de la cantidad de cemento requerida por la mezcla. 65
3.18 Tabla para determinar la cantidad de agregado grueso. 66
3.19 Determinación del peso del agregado grueso. 66
3.20 Determinación del volumen y peso del agregado fino. 67
3.21 Corrección por humedad de los agregados. 68
3.22 Tabla con el proporcionamiento de la mezcla de concreto ya corregida por humedad. 68
3.23 Proporcionamiento de la mezcla de concreto para la fabricación de cilindros de concreto. 69
4.1 Tabla que muestra el proporcionamiento utilizado en la fabricación de las mezclas de concreto y el revenimiento obtenido en las mezclas B1, M1, M2 y M3. 78
4.2 Tabla que muestra el proporcionamiento utilizado en la fabricación de las mezclas de concreto y revenimiento obtenido en las mezclas M1A, M2A y M3A. 79

4.3 Tabla que muestra los resultados promedio obtenidos de los cilindros de concreto sometidos a un esfuerzo de compresión simple y así como la desviación estándar para las mezclas B1, M1 y M1A. 81
4.5 Tabla que muestra los resultados promedio obtenidos de los cilindros de concreto sometidos a un esfuerzo de compresión simple para las mezclas B1, M3 y M3A. 84
4.6 Tabla que muestra los resultados promedio de los porcentajes de vacíos y otras propiedades de los concretos endurecidos para las diferentes mezclas. 87
4.7 Tabla que muestra los resultados promedio de los porcentajes de vacios y resistencia a la compresión de las mezclas M2A, M3A, M1A y B1. 89
4.8 Tabla que muestra los resultados promedio obtenidos de los cilindros de concreto sometidos a resistividad eléctrica. 90

Índice de figuras

Página

2.1 Sección transversal de un cilindro de concreto que muestra tanto el acomodo entre las partículas como el de los poros (Narayanan et al.,2006). 10

2.2 Esquema de integración del concreto (CFE, 1994). 13

2.3 Volumen total de la mezcla de concreto (IMCYC, 2004). 14

2.4 Limites granulométricos específicos para el agregado grueso de acuerdo a las normas ASTM C 33. 17

2.5 Limites granulométricos específicos para el agregado fino de acuerdo a las normas ASTM C 33. 18

3.1 Localización de la planta de trituración Abraham González “La Cañada”(http://maps.google.com/maps?ll=20.600579,100.3808&z=12&hl=es&t=h). 33

3.2 Localización del banco de material de “Saldarriaga” (http://maps.google.com/maps?ll=20.600579,100.3808&z=12&hl=es&t=h) 34

3.3 Juego de mallas para el cribado del material grueso. 36

3.4 Balanza con capacidad de 5 kg y aproximación de 0.5 g. 36

3.5 Cuarteo de material grueso. 36

3.6 Cribado de material. 36

3.7 Material retenido en cada malla. 37

3.8 Horno eléctrico. 37

3.9 Picnómetro y probeta graduada. 39

3.10 Medición del volumen desalojado por el material grueso. 40

3.11 Recipiente volumétrico de 10 l para determinar el peso volumétrico seco y compacto del agregado grueso. 41

3.12 Obtención del peso del recipiente con el material grueso. 41

3.13 Juego de mallas para el cribado del agregado fino. 42

3.14 Material retenido en las diferentes mallas. 43

3.15 Material retenido en la malla No. 4. 43

3.16 Material retenido en la malla No. 8. 43
3.17 Material retenido en la malla No. 16. 43
3.18 Material retenido en la malla No. 30. 44
3.19 Material retenido en la malla No. 50. 44
3.20 Material retenido en la malla No. 100. 44
3.21 Molde troncocónico de bronce y pisón. 45
3.22 Obtención del estado saturado y superficialmente seco en el agregado fino. 45
3.23 Determinación del la densidad relativa en el agregado fino. 46
3.24 Recipiente volumétrico de 3 l para determinar el peso volumétrico seco y compacto del agregado fino. 47
3.25 Compactación del material fino para determinar el peso volumétrico seco y compacto. 47
3.26 Esquema que muestra la obtención de las porciones representativas de las características físicas de los bancos. 48
3.27 Granulometría del agregado grueso para mezclas de control. 50
3.28 Granulometría del agregado fino para mezclas de control. 50
3.29 Esquema que muestra la obtención de las porciones para las mezclas modificadas. 51
3.30 Granulometría determinada para la primera modificación. 53
3.31 Granulometría determinada para la segunda modificación. 55
3.32 Granulometría determinada para la tercera modificación. 56
3.33 Granulometría determinada para la modificación de la arena. 59
3.34 Cilindros de concreto de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. 70
3.35 Varillado del concreto fresco para determinar el revenimiento 71
3.36 Medición del revenimiento 71
3.37 Elementos que conforman la maquina universal Forney. 72
3.38 Cilindros en estado fresco. 72
3.39 Cilindros durante el curado. 72
3.40 Cilindro sometido a esfuerzo de compresión. 72

3.41 Ejemplo de las muestras de concreto endurecido con un volumen de 380cm^3 aproximadamente. 73
3.42 Muestras durante el secado para determinar la densidad, absorción y porcentaje de vacios. 73
3.43 Muestras sometido a hervido. 73
3.44 Determinación de las características físicas de las muestras de concreto después del corte. 74
3.45 Muestras saturadas y listas para medir su resistencia. 74
3.46 Medición de la resistencia eléctrica de la muestra. 74
3.47 Muestra de concreto entre los electrodos de cobre. 74
3.48 Elementos que conforman la medición de la resistencia eléctrica. 75
3.49 Descripción física del aparato medidor de resistencia marca Nilsson modelo 400. 76
4.1 Grafica que muestra la cantidad de agua y cemento añadida a las diferentes mezclas elaboradas. 80
4.2 Grafica de esfuerzo a la compresión simple de las mezclas B1, M1 y M1A. 82
4.3 Grafica de esfuerzo a la compresión simple de las mezclas B1, M2 y M2A. 83
4.4 Grafica de esfuerzo a la compresión simple de las mezclas B1, M3 y M3A. 85
4.5 Grafica que concentra los esfuerzos a la compresión obtenidos de las diferentes mezclas. 85
4.6 Grafica que muestra la relación de la porosidad con la resistencia a la compresión de las mezclas elaboradas. 88
4.7 Grafica que muestra el esfuerzo a la compresión contra el porcentaje de vacios de las mezclas M2A, M3A, M1A y B1. 89

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es el material de construcción más empleado a nivel mundial, gran parte de la infraestructura de los países esta elaborada con él, por lo cual el conocimiento sobre sus propiedades y tecnología de producción son primordiales para los especialistas encargados de alguna etapa del proceso constructivo (Neville, 2001).

Las dos ventajas que ha tenido el concreto sobre su principal competidor, el acero, han sido: un menor valor del costo inicial y un menor requerimiento de desarrollo industrial para su producción; lo cual ha hecho su uso especialmente ventajoso para los países de menor desarrollo (Mehta y Monteiro, 1998).

Idorn y Mehta (1992, 2001) han anunciado que el concreto certificado para una mayor durabilidad que sea elaborado con la calidad requerida, será un elemento básico en el desarrollo de las políticas de economía de recursos en todo el mundo.

El paradigma mundial es diseñar un concreto con propiedades óptimas mediante un mejor control de calidad y una tecnología de preparación de las mezclas avanzada derivadas de un conocimiento científico (Hernández et al., 2005).

Debido a su consistencia rígida, el concreto, anteriormente se creía que este tenía una larga vida útil; sin embargo, la experiencia ha demostrado que no siempre es así. Los ejemplos en la construcción de estructuras de concreto con problemas, ante condiciones de servicio son abundantes y de diferente naturaleza.

Estos se han tenido que explicar, enfrentar y resolver desde diferentes puntos de vista como investigaciones serias, teorías, fórmulas, sistemas constructivos, pruebas de laboratorio y campo, todo ello con el objetivo de

diagnosticar las causas de los problemas y conocer los factores que en ellas intervienen (Hernández et al., 2005).

Debido a que el volumen de vacíos es una variable que influye en la resistencia del concreto (Neville, 1999), en esta investigación se estudiará el efecto de reducción de volumen de vacíos modificando las curvas granulométricas de los agregados pétreos, obteniendo un acomodo adecuado entre los agregados finos y gruesos con el propósito de aumentar su resistencia a la compresión y compacidad.

El indicador fundamental de la resistencia del concreto es la resistencia específica a la compresión, denominada f'c. Este indicador corresponde al esfuerzo unitario de compresión utilizado en el diseño estructural, cuyo valor óptimo es el objetivo principal del diseño de una mezcla (Parker y Ambrose, 2004).

La compacidad es de suma importancia, siendo un parámetro inversamente proporcional a la porosidad; mientras más alta sea la compacidad, mayor es el grado de protección del acero de refuerzo contra los ataques de los iones malignos (Carrión et al., 1999).

Uno de los antecedentes de mayor importancia para esta investigación constituye el artículo publicado por José Luís Chan Yam (2003) denominado "Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto". Este trabajo habla sobre la importancia que tienen los agregados pétreos sobre las propiedades de los concretos en estado fresco y endurecido, así como la influencia de estos en la zona de interface y en el módulo de elasticidad. Uno de los puntos clave de la investigación de Chan Yam para nuestra investigación es la conclusión dada la cual dice: para lograr un concreto óptimo se debe buscar una estructura de agregados con la forma y secuencia de tamaños adecuados, para que se acomoden lo más densamente posible (logrando así la más alta

compacidad), combinándose esta estructura con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos entre las partículas pétreas.

Objetivos

Los objetivos y las hipótesis de la presente investigación se derivan de la siguiente conjetura:

Un acomodo adecuado de los agregados pétreos en el concreto será aquel que asegura su mayor compacidad y resistencia, las cuales se derivan del porcentaje de los componentes de las mezclas.

Objetivo general

Lograr un acomodo adecuado entre los agregados pétreos para aumentar la resistencia y compacidad del concreto y así reducir el consumo de cemento.

Objetivos específicos

1. Analizar y comparar la resistencia de los concretos en función de las curvas granulométricas de los agregados pétreos.

2. Seleccionar una curva granulométrica que proporcione una menor porosidad al concreto.

3. Reducir el consumo de cemento en la fabricación de las mezclas de concreto.

Hipótesis

Hipótesis general

Es factible lograr un acomodo adecuado entre los agregados finos y gruesos al cambiar su granulometría y propiedades físicas originales.

Hipótesis especificas

1. La compacidad de un concreto varia al cambiar la granulometría de los agregados pétreos y la cantidad de agua y cemento en la misma proporción, por lo cual es viable llegar a una mezcla que proporcione una resistencia apropiada.

2. Del acomodo adecuado de los agregados pétreos y de la cantidad apropiada de agua y cemento se deriva una baja porosidad del concreto.

3. El acomodo adecuado entre los agregados finos y gruesos reduce el consumo de cemento.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos básicos sobre el concreto

2.1.1. Antecedentes históricos del uso del concreto

Por miles de años el hombre se ha esforzado en crear construcciones que alberguen su civilización (Esqueda, 1994). La obra más antigua de concreto de la cual se tiene evidencia está fechada alrededor de los años 5600 a. C. y fue descubierta durante excavaciones en las riberas del río Danubio en Lepenski Vir (Yugoslavia). Allí el concreto fue empleado para hacer pisos de chozas en un pueblo de la edad de piedra. Luego la técnica parece haberse olvidado por un largo periodo de tiempo.

La más antigua referencia gráfica que se tiene sobre trabajos de concreto proviene de un mural de Tebas (Egipto) que data del año 1950 a. C. aproximadamente y muestra varias etapas en la manufactura y usos de mortero y concreto. A partir de esta fecha y por varios años el concreto fue usado como material de relleno en muros de piedra y solamente más tarde fue empleado como material estructural.

El arte de hacer concreto pasó de Egipto al mediterráneo occidental y alrededor del año 500 a. C. fue utilizado por los antiguos griegos. Cabe recordar que, previo al concreto como tal, se empleó el llamado “seudo-concreto” que consistía en una piedra fracturada en forma tosca y unida mediante una mezcla entre cal y arena.

La civilización romana probablemente copió a los griegos la idea de la manufacturación del concreto. Se han encontrado concretos romanos fechados con anterioridad al año 300 a. C. Durante el siglo II a. C. explotaron una cantera de material con apariencia de arena rosada, en un lugar cercano a la población de

Puzzoli. Con agradable sorpresa encontraron que esta arena, mezclada con cal, proporcionaba mucha mayor resistencia al material en comparación con las mezclas previamente producidas por ellos. De hecho, el material empleado no era una simple arena sino una ceniza volcánica que contenía sílice y alúmina, que se combinaban químicamente con la cal resultando en lo que luego se conociera como un cemento puzolánico. Este material fue empleado a gran escala en el año 75 a. C. en la construcción del teatro de Pompeya.

Los romanos intentaron desarrollar un tipo de concreto aligerado. Los primeros ensayos fueron hechos dejando jarras de barro dentro de los muros y arcos, siguiendo luego con su uso como agregado, de roca volcánica triturada: la pumicita (Gómez, 1994).

Los romanos constituyeron una revolución tecnológica en la construcción, realizando edificaciones magníficas desde el punto de vista estructural y estético. Con la caída del Imperio Romano, el uso del concreto declina y prácticamente desaparece hasta 1824, cuando Joseph Aspdin inventó en Inglaterra el Cemento Pórtland (Esqueda, 1994). Joseph Aspdin, patentó un producto al que llamó Cemento Pórtland (le nombró Pórtland porque al endurecerse adquiere un color semejante al de una piedra que existe en la región de Pórtland, de Inglaterra) (Wikipedia, 2008).

En México, los mayas erigieron edificios de grandes dimensiones gracias a sus adelantos tecnológicos en el uso de materiales y métodos constructivos (Marquina, 1951; Kubler, 1986). Para ello utilizaron, principalmente, la piedra caliza, con lo cual iniciaron el uso progresivo de los materiales cementantes a base de cal que les permitió elaborar estucos, morteros y concretos.

El concreto de los mayas es una mezcla de cemento con agregados graduados que fue utilizado con fines estructurales para construir basamentos y muros de contención, además de, probablemente, pilas y estribos para puentes,

así como obras de protección, caminos, puertos y cisternas. Inicialmente el concreto fue utilizado como un material de relleno, una especie de concreto ciclópeo agregando piedras de diferente tamaño. Se trataba de un material muy poroso y heterogéneo. Al darse cuanta de sus ventajas constructivas, los ingenieros mayas depuraron sus procedimientos y seleccionaron sus agregados para lograr un material denso y resistente que, en muchos casos, conserva sus propiedades a pesar del intemperismo (Ramírez et al., 1999).

En el último medio del siglo XX, la utilización del Cemento Pórtland ha continuado extendiéndose hasta tal punto que casi ninguna construcción, grande o pequeña, se ejecuta sin el uso de concreto de Cemento Pórtland en alguna parte de la obra (Esqueda, 1994).

2.1.2. ¿Qué es el concreto?

El concreto es un material pétreo, artificial, que se obtiene de la mezcla de arena, grava, piedra triturada u otro agregado, y se mantiene unida por una pasta endurecida de cemento y agua (Hornbostel, 2004).

El concreto se clasifica de la siguiente manera:

Concreto normal

El concreto normal es aquel que se elabora con agregados pétreos densos, para alcanzar una masa volumétrica seca mayor de 2000 kg/m^3, una vez compactado.

Concreto ligero

El concreto ligero es aquel que se elabora con agregados pétreos de baja densidad, para alcanzar una masa volumétrica seca menor de 2000 kg/m^3, una vez compactado.

Concreto lanzado

El concreto lanzado es aquel que mediante la fuerza controlada de aire a presión a través de una boquilla, se proyecta sobre una superficie a fin de obtener una capa de recubrimiento compacta, homogénea y resistente.

Concreto ciclópeo

El concreto ciclópeo es aquel que esta formado por una mezcla cuyos agregados pétreos se componen hasta en un 60 % por fragmentos de roca con una masa máxima de 30 kg por pieza, que se colocan a mano embebidos en el concreto normal, en el lugar definitivo de la obra (SCT N-CTR-CAR-1-02-003, 2004).

La calidad del concreto producido dependerá, en gran medida, del cuidado puesto en la conservación de la calidad de los ingredientes utilizados. El uso de material contaminado y de pobre granulometría, o de cementos viejos solo puede ocasionar dificultades. Problemas de rendimiento alto o bajo, de resistencia baja y de deterioro, resultan a menudo del almacenamiento y manejo inadecuado de los materiales (ACI 311-99, 2002).

La pasta llena los huecos entre las partículas del agregado, y después de que se ha colocado el concreto fresco, se endurece como resultado de reacciones químicas exotérmicas entre el cemento y el agua para formar un material sólido y de estructura durable (Ferguson, 1983).

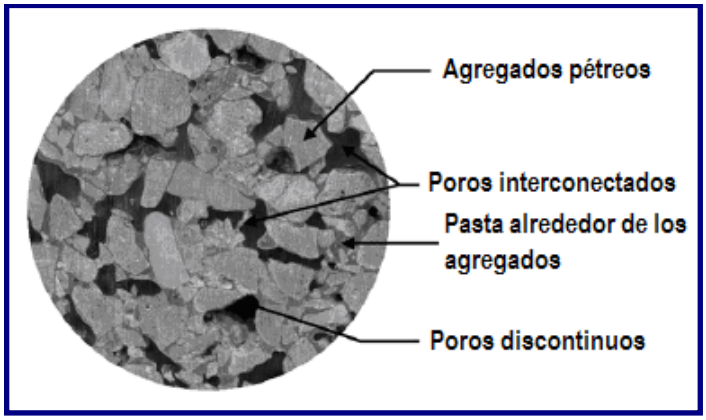


Figura 2.1 Sección transversal de un cilindro de concreto que muestra tanto el acomodo entre las partículas como el de los poros (Narayanan et al.,2006).

El *módulo de elasticidad* (Ec) para concretos clase 1 y agregado grueso basáltico se establece mediante una fórmula que incorpora la resistencia del concreto (NTCDF, 2004):

$$\mathbf{Ec = 11000\sqrt{f'c}}, \qquad \text{Ec. 2.1}$$

donde:
f'c es la resistencia del concreto en kg/cm^2.

El concreto alcanza la *resistencia a la compresión* (f'c) o a la *tensión* (T), a los veintiocho días de edad, que se haya establecido en el proyecto (SCT N-CMT-2-02.005, 2004).

Como resultado de la compresión simple en cilindros de concreto la resistencia soportada por el espécimen se determina por medio de la siguiente ecuación (SCT M-MMP-2-02.058, 2004):

$$\mathbf{f'c = \frac{P}{A}}, \qquad \text{Ec. 2.2}$$

donde:

f'c es el esfuerzo a compresión en kg/cm^2;

P es la carga de ruptura en kg;

A es el área de la sección transversal en cm^2.

La resistencia del concreto es fundamentalmente una función del volumen de sus vacíos. En términos estrictos, la resistencia del concreto esta influenciada por el volumen de todos los vacíos dentro del concreto ocupados por el aire atrapado, poros capilares, poros de gel y aire incluido si esta presente.

Además de su volumen, la forma y el tamaño de los poros sobre la calidad del concreto también influyen los siguientes factores: la forma de las partículas sólidas y sus módulos de elasticidad, los cuales también influyen en la distribución de esfuerzo y por lo tanto, en la concentración de esfuerzo dentro del concreto.

No hay duda de que la porosidad definida como el volumen total del volumen de poros mayores que los poros de gel, expresada como un porcentaje del volumen global de la pasta de cemento hidratado, es un factor primario que tiene influencia en la resistencia de la pasta de cemento.

Además, dentro de la porosidad total debe considerarse el efecto de la distribución del tamaño de poro sobre la resistencia. Generalmente, a una porosidad dada, los poros menores conducen a una resistencia más alta de la pasta de cemento (Neville, 1999).

La medición de la densidad relativa (adimensional, ρ), absorción (%) y los vacíos (%) en las muestras de concreto ya endurecido se determinan aplicando las siguientes ecuaciones (ASTM C 642, 1997):

Absorción después de la saturación (%) = $\left(\frac{B-A}{A}\right)(100)$; Ec. 2.3

Absorción después de saturación y hervido (%) = $\left(\frac{C-A}{A}\right)(100)$; Ec. 2.4

Densidad seca (adimensional) = $\left(\frac{A}{C-D}\right)(\rho) = g_1$; Ec. 2.5

Densidad después de saturación (adimensional)= $\left(\frac{B}{C-D}\right)(\rho)$; Ec. 2.6

Densidad después de saturación y hervido (adimensional) = $\left(\frac{C}{C-D}\right)(\rho)$; Ec. 2.7

Densidad aparente (adimensional) = $\left(\frac{A}{A-D}\right)(\rho) = g_2$; Ec. 2.8

Porcentaje de vacios (%) = $\left(\frac{g_2-g_1}{g_2}\right)(100)$. Ec. 2.9

donde:

A es el peso de la muestra secada al horno en gr;

B es el peso de la muestra saturada y superficialmente seca en gr;

C es el peso de la muestra saturada, hervida y superficialmente seca en gr;

D es el peso de la muestra sumergida en agua, después de saturación y hervido en gr;

ρ es la densidad del agua (1 gr/cm^3).

2.1.3. Materiales que constituyen el concreto

El concreto de uso común, o convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales: cemento, agua y agregados, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que generalmente se designa como aditivo (ver Figura 2.2) (CFE, 1994).

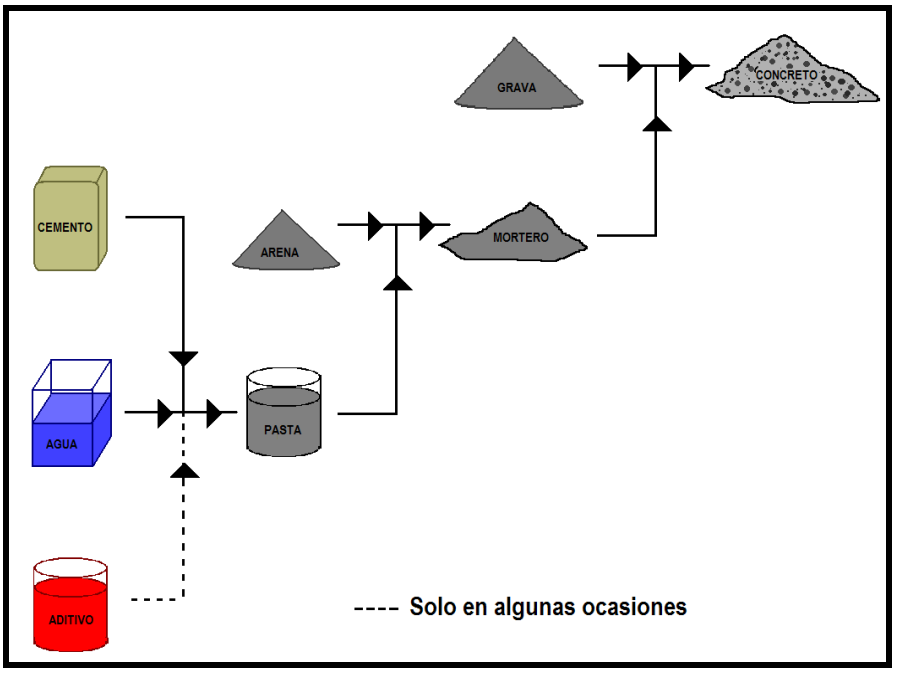


Figura 2.2 Esquema de integración del concreto (CFE, 1994).

2.1.3.a. Agregado pétreos

Al menos tres cuartas partes del volumen del concreto esta ocupado por los agregados. No es de extrañar que la calidad de estos sea de suma importancia (Neville, 1999). La resistencia de los agregados pétreos tiene un efecto importante en la resistencia del concreto, y las propiedades de estos afectan considerablemente su durabilidad (McCormac, 2005).

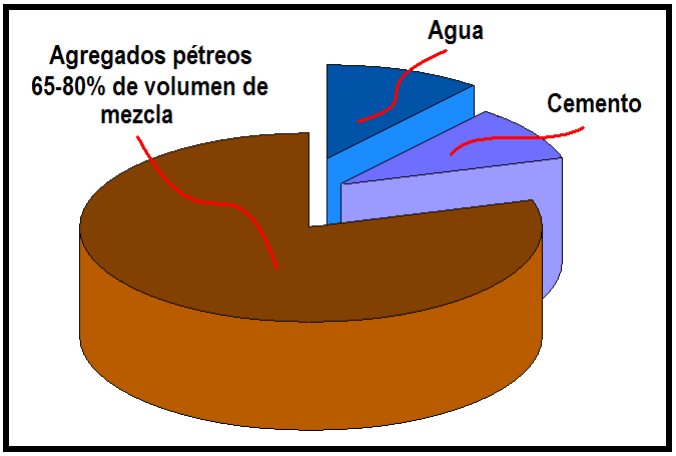


Figura 2.3 Volumen total de la mezcla de concreto (IMCYC, 2004).

Anteriormente, los agregados se consideraban un material inerte, que se repartía en toda la pasta de cemento, más que nada por razones económicas. Sin embargo, es posible asumir un punto de vista opuesto y pensar que los agregados son un material de construcción unido a un todo cohesivo por medio de la pasta de cemento.

Los agregados no son del todo inertes ya que sus propiedades físicas, térmicas y químicas, influyen en el comportamiento del concreto (Neville, 1999).

Los agregados son más económicos que el cemento y, por lo cual, es deseable usar la mayor cantidad de ellos como sea posible (McCormac, 2005). No obstante, la economía no es la única razón para utilizar agregados ya que estos proporcionan al concreto una notable ventaja técnica, al darle una mayor estabilidad volumétrica y más durabilidad en comparación si se emplea solamente cemento Portland (Neville, 1999).

Composición granulométrica

Por el tamaño de sus partículas los agregados se dividen en: agregado grueso y agregado fino; el agregado grueso es una grava natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado con partículas de tamaño máximo, comprendido entre 4.75 mm (No. 4) y 25 mm (1”) en tanto que el agregado fino es

una arena natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, con partículas de tamaño comprendido entre 0.075 mm (No. 200) y 4.75 mm (No. 4) (SCT N-CMT-2-02-002, 2002).

Para mezclas de consistencia plástica, es deseable que dentro de esos intervalos dimensionales se encuentren representados todos los tamaños de partículas, es decir que exista continuidad en la distribución granulométrica (CFE, 1994).

Por granulometría podemos entender como la distribución de partículas del material granular entre varios tamaños; usualmente se expresa en términos de porcentajes acumulativos (IMCYC, 2002).

En general, el agregado debe estar bien graduado, con una porción de partículas grandes a pequeñas en un intervalo que asegure que las partículas más pequeñas llenen los espacios que se forman al empaquetarse las grandes. De este modo, el volumen del concreto queda virtualmente determinado por el volumen total del agregado, ya que el agua y el cemento llenan los espacios que quedan entre las partículas más pequeñas del agregado (Parker y Ambrose, 2004).

Agregado grueso

De igual modo que en el caso de la arena, es deseable que el agregado grueso en conjunto posea continuidad de tamaños en su composición granulométrica, a pesar de que el efecto de la granulometría de la grava sobre la manejabilidad de las mezclas de concreto no es tan notoria como el de la arena.
Para analizar la composición granulométrica de la grava en conjunto, se le criba por mallas cuyas aberturas se seleccionan de acuerdo con el intervalo dimensional dado por su tamaño máximo, buscando dividir este intervalo en suficientes fracciones que permita estimar su distribución a fin de compararla con los límites granulométricos que se le aplican.

Para establecer una curva granulométrica suele apoyarse en pruebas que demuestren la formación de mezclas de concreto manejables y cohesivas con grava de la granulometría propuesta, y que una vez endurecido, el concreto obtenga las propiedades requeridas a un costo conveniente.

Después de establecer la granulometría adecuada de la grava total esta se debe conservarse uniforme para no ser una fuente de cambios imprevistos en las características y propiedades del concreto durante su producción. Para ello, es necesario dividir la grava en fracciones cuya separación por cribado se realice constantemente de manera precisa, con objeto de que cada fracción se mantenga dentro de los límites granulométricos que le correspondan, particularmente en lo relativo al contenido de sub-tamaños y sobre-tamaños. Las excesivas variaciones de estos dificultan el control de la uniformidad al hacer la integración granulométrica de la grava total en el concreto (CFE, 1994).

En la Tabla 2.1 y Figura 2.4 se muestran los límites recomendados por las normas ASTM C 33 para el agregado grueso con un tamaño máximo de 3/4" a 3/8" (ASTM C 33, 2003).

Tabla 2.1 Requisitos de granulometría para el agregado grueso de acuerdo a las normas ASTM C33.

ASTM (pulg)	Abertura (mm)	Límite superior (%)	Límite inferior (%)
1	25.000	100	100
3/4	19.000	100	90
1/2	12.500	55	20
3/8	9.500	15	0
4	4.750	5	0

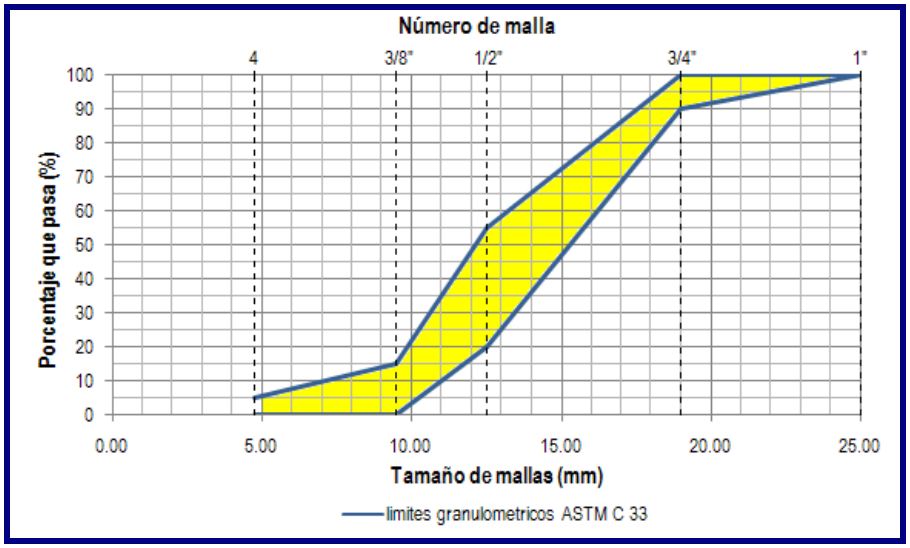


Figura 2.4 Limites granulométricos específicos para el agregado grueso de acuerdo a las normas ASTM C 33.

Agregado fino

La composición granulométrica de la arena se analiza acribándola a través de mallas con aberturas normalizadas como “serie estándar”, cuyos tamaños se duplican sucesivamente a partir de las más pequeñas.

De esta manera, para asegurar una razonable continuidad en la granulometría de la arena, las especificaciones de agregado para concreto (ASTM C 33) requieren que encada fracción exista una proporción de partículas comprendida dentro de ciertos límites establecidos empíricamente (ver Tabla 2.2 y la Figura 2.5).

Tabla 2.2. Requisitos de granulometría para el agregado fino de acuerdo a las normas ASTM C33.

ASTM (No. de malla)	Abertura (mm)	Limite superior (%)	Limite inferior (%)
4	4.750	100	95
8	2.400	100	80
16	1.200	85	50
30	0.600	60	25
50	0.300	30	5
100	0.150	10	0
200	0.075	0	0

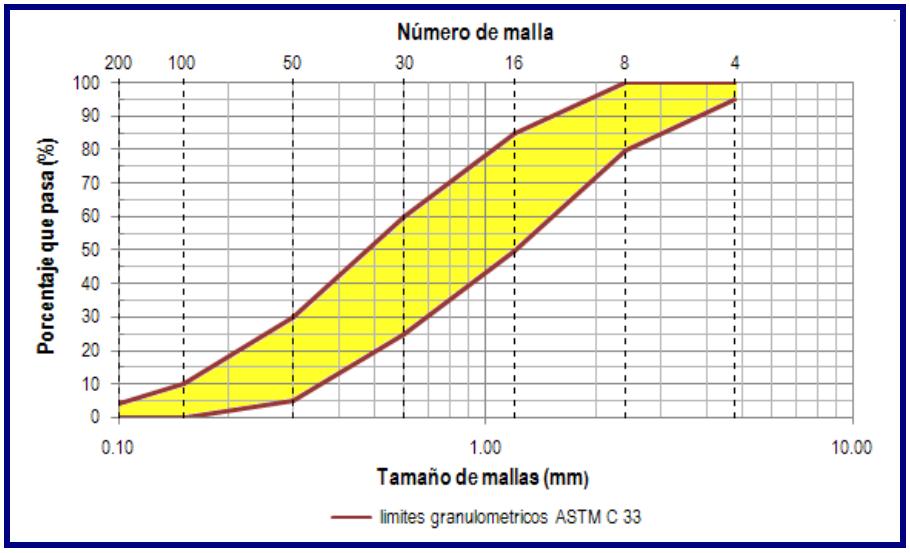


Figura 2.5 Limites granulométricos específicos para el agregado fino de acuerdo a las normas ASTM C 33.

El análisis granulométrico de la arena se complementa calculando su *módulo de finura* (MF), el cual se determina a través de la siguiente formula:

$$\mathbf{MF} = \frac{\mathbf{\%\ de\ retenidos\ acumulados}}{\mathbf{100}}; \qquad \text{Ec. 2.10}$$

donde:
% de retenidos acumulados es la suma de los porcentajes acumulados hasta la malla número 100 dividido entre 100.

Se considera que la arena que presenta un módulo de finura no menor de 2.30 ni mayor de 3.10 es adecuado para la fabricación de concreto convencional (NOM C111, 1982; ASTM C 33, 2003).

2.1.3.b. Agua de mezclado

El agua es el componente que se utiliza para generar las reacciones químicas entre los cementantes del concreto hidráulico, esta puede ser potable, es decir, aquella que por sus características químicas y físicas es útil para el consumo humano (SCT N-CMT-2-02-003, 2004).

Los requisitos de calidad del agua de mezclado para concreto no tienen ninguna relación con el aspecto bacteriológico (como es el caso de las aguas potables), sino que se refieren a sus características físico-químicas y a sus efectos sobre el comportamiento y las propiedades del concreto (CFE, 1994).

La calidad del agua desempeña un papel muy importante, por lo cual, debe estar suficientemente limpia, libre de aceite, materia orgánica o cualquier otra sustancia (Parker y Ambrose, 2004), ya que las impurezas del agua pueden interferir con el fraguado del cemento, así como, afectar adversamente la resistencia del concreto o causar manchas en su superficie (Neville, 1999).

El agua que se utilice para la elaboración del concreto hidráulico de cemento Pórtland deberá cumplir con los requisitos indicados en la tabla siguiente (SCT N-CMT-2-02-003, 2004):

Tabla 2.3 Valores característicos y limites máximos tolerables de sales e impurezas en el agua (SCT N-CMT-2-02-003, 2002).

Valores en partes por millón (ppm)

Impurezas	Tipo de cemento	
	Cementos ricos en calcio	Cementos resistente a los sulfatos (RS)
Sólidos en suspensión en aguas naturales (limos y arcillas), máximo	2 000	2 000
Sólidos en suspensión en aguas recicladas [1]: (finos de cemento y de agregados), máximo	50 000	35 000
Cloruros como Cl [2]:		
• Para concreto con acero de presfuerzo y piezas de puentes [3], máximo	400	600
• Para concretos reforzados que estén en ambiente húmedo o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares [3], máximo	700	1 000
Sulfato como SO_4= [2], máximo	3 000	3 500
Magnesio como Mg++ [2], máximo	100	150
Carbonatos como CO_3=, máximo	600	600
Bióxido de carbono disuelto como CO_2, máx	5	3
Álcalis totales como Na+, máximo	300	450
Total de impurezas en solución, máximo	3 500	4 000
Grasas o aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido) [4], máximo	150	150
Potencial de hidrógeno (pH), mínimo	6	6,5

[1] Se considera como agua reciclada, la que se usó en el lavado de unidades revolvedoras de concreto, que después de un proceso incompleto de sedimentación se emplea en la fabricación del concreto hidráulico y que contiene en suspensión un alto porcentaje de finos del cemento y de los agregados, sales solubles del cemento y aditivos.

[2] El agua que exceda los límites listados para cloruros, sulfatos y magnesio, podrá 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, no excede dichos límites.

[3] Cuando se utilice cloruro de calcio ($CaCl_2$) como aditivo acelerante, se tomará en cuenta la cantidad de éste para no exceder el límite de cloruros indicado en esta Tabla.

[4] El agua que no cumpla con el contenido máximo indicado se podrá usar siempre y cuando el agregado fino que se emplee en el concreto, probada conforme al procedimiento indicado en el Manual M·MMP·2·02·026, *Impurezas Orgánicas en Agregados Finos*, no produzca un líquido más oscuro que la solución normalizada N°3.

2.1.3.c. Cemento Pórtland

El cemento es material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto. Los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer bajo o sumergidos en agua por ello se les denomina cementos hidráulicos (Neville, 1999).

El cemento Pórtland se obtiene mediante un proceso industrial, pulverizando una mezcla fina de arcilla y materiales calcáreos hasta un grado de finura determinado, previamente sometida la mezcla a cocción, que se denomina clinker Pórtland, al cual se le adiciona sulfato de calcio como anhidrita ($CaSO_4$), yeso ($CaSO_4$-$2H_2O$) o hemihidrato ($CaSO_4$-$1/2H_2O$), para regular el tiempo de fraguado. Según las propiedades que se requieran o para auxiliar la molienda, además se pueden incorporar otros materiales como:

- Puzolanas;
- Escorias granulada de alto horno;
- Humo de sílice;
- Caliza.

Según los materiales que los componen, los cementos Pórtland se clasifican como:

Tipo CPO (cemento Pórtland ordinario)

Es producido mediante la molienda del clínker Pórtland y sulfato de calcio. Cuando el proyecto no establezca el tipo de cemento Pórtland por usar en cada caso, se entenderá que se trata de cemento Tipo CPO.

Tipo CPP (cemento Pórtland puzolánico)

Es el que resulta de la molienda conjunta del clínker Pórtland, puzolanas y sulfato de calcio.

Tipo CPEG (cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno)

Es producido mediante la molienda conjunta del clínker Pórtland, escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.

Tipo CPC (cemento Pórtland compuesto)

Es el que se obtiene de la molienda conjunta del clinker Pórtland, puzolanas, escoria de alto horno, caliza y sulfato de calcio. En este tipo de cemento la caliza puede ser el único componente adicional al clinker Pórtland con sulfato de calcio.

Tipo CPS (cemento Pórtland con humo de sílice)

Es el que resulta de la molienda conjunta del clinker Pórtland, humo de sílice y sulfato de calcio.

Tipo CEG (cemento con escoria granulada de alto horno)

Es producido mediante la molienda conjunta del clinker Pórtland, sulfato de calcio y mayoritariamente escoria granulada de alto horno (SCT N-CMT-2-02-001, 2002).

A continuación se muestran los componentes principales del cemento Pórtland ordinario:

Tabla 2.4 Composición típica del cemento Pórtland ordinario (Mindess y Young, 1981).

Nombre del compuesto	Composición química	Abreviatura	Porcentaje en peso
Silicato tricálcico	$3CaO\text{-}SiO_2$	C3S	50
Silicato dicálcico	$2CaO\text{-}SiO_2$	C2S	25
Aluminato tricálcico	$3CaO\text{-}Al_2O_3$	C3A	12
Aluminato tetracálcico	$4CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}Fe_2O_3$	C4AF	8
Sulfato Cálcico Dihidratado (yeso)	$CaSO_4\text{-}2H_2O$	CSH2	3.5

Clases resistentes de los cementos Pórtland

De acuerdo a su resistencia mecánica a la compresión los cementos Pórtland se clasifican en las clases resistentes que se indican en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Clases resistentes de los cementos Pórtland (SCT N-CMT-2-02-001, 2002).

Clase resistente	Resistencia a la compresión		
	A 3 días[1] Mínimo (kg/cm^2)	A 28 días[2]	
		Mínimo (kg/cm^2)	Máximo (kg/cm^2)
20	--	204	408
30	--	306	510
30R	204	306	510
40	--	408	--
40R	306	408	--

1 Corresponde a la resistencia inicial del cemento

2 Corresponde a la resistencia normal del cemento

Características espaciales de los cementos Pórtland

Los cementos Pórtland pueden clasificarse de acuerdo a sus características especiales como se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Características especiales de los cementos Pórtland (SCT N-CMT-2-02-001, 2002).

Características especiales	Nomenclatura
Resistencia a los sulfatos	RS
Baja reactividad álcali-agregado	BRA
Bajo calor de hidratación	BCH
Blanco	B

Para identificar un cemento Pórtland con una característica especial, la nomenclatura de esta será anotada inmediatamente después de la designación del tipo de cemento y la clase resistente (ejemplo: CPO 30 RS).

Composición del Cemento

La composición de los diferentes tipos de cemento Pórtland estará comprendida dentro de los límites que se establecen en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Composición de los cementos Pórtland.

Unidades en % en masa							
Cemento Pórtland		**Clinker Portland + sulfato de calcio**	**Componentes principales**				**Componentes minoritarios[2]**
Tipo	**Denominación**		**Puzolanas[1]**	**Escoria granulada de alto horno**	**Humo de sílice**	**Caliza**	
CPO	Cemento Pórtland ordinario	95 – 100	--	--	--	--	0 – 5
CPP	Cemento Pórtland puzolánico	50 – 94	6 – 50	--	--	--	0 – 5
CPEG	Cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno	40 – 94	--	6 – 60	--	--	0 – 5
CPC[3]	Cemento Pórtland compuesto	50 – 94	6 – 35	6 – 35	1 – 10	6 – 35	0 – 5
CPS	Cemento Pórtland con humo de silice	90 – 99	--	--	1 – 10	--	0 – 5
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno	20 – 39	--	61 – 80	--	--	0 – 5

1 Las puzolanas pueden ser naturales, artificiales y cenizas volantes.

2 Los componentes minoritarios pueden ser uno o más de los componentes principales, salvo que estén incluidos ya como tales en el cemento.

3 El cemento Pórtland compuesto contendrá dos componentes principales, excepto cuando se trate de caliza, la que puede ser el componente principal.

2.2. Aspectos aplicados

2.2.1. Aspectos generales del concreto

La resistencia del concreto, de una determinada edad, y un curado en agua a una cierta temperatura, depende primariamente de la relación agua-cemento (a/c) y del grado de compactación (Neville, 1999).

La trabajabilidad de un concreto en estado fresco debe ser tal que sea fácil su manipulación al ser colocado en la cimbra (Parker y Ambrose, 2004).

Los concretos con relaciones a/c altas serán los que se vean más afectados por la falta de curado debido a la gran red de poros que contienen, lo que facilitará que el agua capilar se evapore; y por otro lado, dejará grandes accesos a los agentes ambientales, por lo cual su pronóstico de durabilidad será negativo.

El término de curado se utiliza tanto para describir el proceso natural por medio del cual el concreto de cemento hidráulico madura y desarrolla sus propiedades mecánicas típicas del material en estado endurecido, como para describir las acciones tomadas por el constructor para mantener el concreto húmedo y dentro de un rango de temperatura adecuada, de tal manera que se promueva la hidratación del cemento.

Los principales agentes agresores del concreto son cloruros, sulfatos y la humedad, los cuales penetran a través de la red de poros de este, provocando daños directamente al concreto (Solís y Moreno, 2005).

Un material alcanza el final de su vida de servicio cuando sus propiedades se han deteriorado a tal punto que se considera inseguro o antieconómico continuar utilizándolo (Moreno et al., 2001).

2.3. Aspectos específicos del proyecto

2.3.1. Influencia de los agregados pétreos en las propiedades del concreto fresco

La absorción es quizás la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben el agua directamente de la mezcladora, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla.

Si dos tipos de agregados tienen absorción similar, otros factores secundarios serán de importancia en la consistencia de la mezcla, tales como: la forma, el tamaño y la graduación; ya que mientras mayor superficie del agregado sea necesario para cubrirla con pasta, se tendrá menos fluidez.

Una buena consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción y un coeficiente de forma apropiado, cuando las partículas son aproximadamente redondas (Alaejos y Fernández, 1996).

Las formas básicas de éstos se pueden simplificar en 4 tipos, que son: equidimensional o esférica, prismática, tubular o elíptica, e irregular. De todas éstas, la que mayor problema puede ocasionar a la trabajabilidad es aquella que es de tipo tubular que además está alargada (conocidas como piezas planas y alargadas). Estas piezas pueden provocar disminución de la trabajabilidad ya que las partículas pueden orientarse muy fácilmente y de manera preferencial en un solo plano, de modo que el agua y el espacio poroso se acumulan debajo de ellas. Además, las gravas con esta forma ocasionan mayores requerimientos de arena, y eso hace necesario un incremento en el volumen de agua para la mezcla (Uribe, 1991).

Entonces, es deseable que los agregados, particularmente los gruesos, tengan una forma un tanto angular y cúbica (Chan, 1993).

Los agregados se pueden calificar por su forma, con base en su grado de redondez y esfericidad, obteniéndose una medida relativa de carácter comparativo y descriptivo. La manera como esta característica puede influir en el concreto fresco es variable, logrando producir, por ejemplo, a mayor grado de redondez menor relación de vacíos. Pero, por otra parte, un menor valor de este parámetro, reduce la capacidad de compactación (Neville, 1999).

La granulometría y el tamaño máximo del agregado (TMA) para las gravas, afectan las porciones relativas de los agregados, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, la economía y la durabilidad del concreto.

Cuando los agregados son muy gruesos, pueden producir mezclas rígidas; mientras que aquellos agregados que no poseen una gran deficiencia o exceso de algún tamaño y tienen una curva granulométrica suave, producirán los resultados más satisfactorios en las propiedades del concreto fresco (Kosmatka y Panarese, 1992).

En el agregado fino, hay dos elementos que deben ser considerados, por un lado, el módulo de finura (MF), y por el otro la continuidad en los tamaños, ya que algunas arenas pueden tener módulos de finuras aceptables (entre 2.2 y 3.1) y carecer de la presencia de alguna clase granulométrica.

Si consideramos únicamente el módulo de finura, pueden obtenerse dos condiciones desfavorables: una de ellas existe cuando el módulo de finura es mayor a 3.1 (arena gruesa), en donde pueden formarse mezclas poco trabajables, faltando cohesión entre sus componentes y requiriendo mayores consumos de cemento para mejorar su trabajabilidad; la otra condición es cuando el módulo de finura es menor a 2.2 (arena fina), en este caso, puede ocurrir que los concretos

sean pastosos y que haya mayor consumo de cemento y agua para una resistencia determinada, y también una mayor probabilidad de que ocurran agrietamientos del tipo contracción por el secado (Uribe, 1991).

En el agregado grueso un contenido excesivo de materiales finos puede provocar problemas similares en el concreto a los que suele causar una arena con un módulo de finura menor a 2.2. Por medio de la prueba de pérdida por lavado se puede determinar este contenido, cuyo valor se expresa como un porcentaje de la muestra (Chan, 2003).

2.3.2. Influencia de los agregados pétreos sobre las propiedades del concreto endurecido

Frecuentemente, la variación de la resistencia del concreto puede explicarse por el cambio de la relación a/c, no obstante, existe evidencia en la literatura que éste no siempre es el caso. Además, por consideraciones teóricas, independientemente de la relación a/c, las características de las partículas del agregado tales como el tamaño, la forma, la textura de la superficie y el tipo de mineral, influyen en las propiedades de la zona de transición, y por lo tanto, afectan la resistencia del concreto (Mehta y Monteiro, 1998).

En cuanto a la interrelación mecánica entre la matriz y el agregado grueso, la textura superficial de éste es responsable principal de la adherencia. La roca triturada produce una adherencia superior comparado con la grava de canto rodado; aunque en la adherencia también tiene influencia la relación a/c que afecta tanto física como químicamente la zona de interface.

En la literatura se ha encontrado que, los concretos fabricados con agregados triturados resisten más que los de canto rodado. El esfuerzo de compresión a los 28 días para los concretos hechos con agregados gruesos de grava redonda estuvo entre el 10 y 20 % más bajo que los concretos preparados

con agregados triturados. Lo anterior puede ser atribuido tanto a la superficie lisa de los agregados de canto rodado, como a su posible resistencia menor, en relación a los agregados triturados, que fueron de basalto y caliza (Özturan y Çeçen, 1997).

El efecto del tamaño máximo del agregado sobre la resistencia también es conocido. La tendencia observada indica que mientras que el TMA disminuye, la resistencia decrece. Este fenómeno se ha observado para gravas de 75.0, 37.5, 19.0 y 9.5 mm (3”, 1 1/2”, 3/4”, y 3/8”). En contraste, no sucede lo mismo para el concreto hecho usando un TMA de 4.75 mm. (No. 4), lo cual se atribuye al tamaño pequeño del agregado y al hecho de que esta mezcla representa, básicamente, mortero o micro concreto (Issa et al., 2000).

Se ha observado que concretos con bajos contenidos de agregados resisten altos esfuerzos a la edad de un día, excepto los hechos con grava triturada. Al contrario, los concretos con altos contenidos de agregados presentan bajas resistencias de compresión a edades tempranas, fallando probablemente por la concentración de esfuerzos alrededor de los agregados, ya que en éstos sus propiedades físicas no varían con el tiempo, mientras que la resistencia y el módulo de elasticidad de la pasta de cemento están todavía por debajo de su valor final (Cetin y Carrasquillo, 1998).

La capacidad de absorción de un material incide directamente sobre el grado de alteración que este mismo puede sufrir. La cantidad de espacios vacíos como son poros y fisuras, y la permeabilidad, son factores que influyen sobre la durabilidad de cualquier estructura de concreto. Un ejemplo típico de esto son los concretos que se encuentran en sitios donde el proceso de congelamiento y deshielo es común, ya que el agua al congelarse se expande hasta un 9%. Este cambio volumétrico altera fuertemente la estructura interna del concreto.

Una propiedad de los agregados que resulta ser de vital importancia es la densidad, ya que si se emplea un material con una densidad ≥ 2.25, el concreto resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendrá una influencia directa sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión del mismo. El volumen que ocupa un agregado según su peso es un indicador de las características del mismo en cuanto a ligereza, porosidad y permeabilidad, propiedades que pueden afectar al concreto resultado en un mayor requerimiento de cemento para una resistencia específica y con esto afectando directamente la economía de la mezcla.

Por otro lado, es conocido que a mayor porosidad es mayor la fuerza de adhesión del material, de manera que los agregados gruesos con una mayor densidad y resistencia al desgaste presentan una menor porosidad, y como consecuencia una menor adherencia y cantidad de finos que pasan por la malla No. 200 (Cerón et al., 1996).

En los agregados la presencia de un porcentaje importante de materia orgánica puede provocar problemas en la fabricación de concreto, ya que trae consigo los efectos secundarios como la inhibición de la adecuada hidratación del cemento, causando por lo tanto un retraso en el endurecimiento del mismo. Los agregados contaminados pueden ser a su vez la causa de reducción en la resistencia del concreto a compresión; y además, pueden contener sustancias nocivas que afecten químicamente y de diversas formas al material (Uribe, 1991).

Un porcentaje máximo del volumen de agregados, sobre todo gruesos, tiene un efecto positivo tanto sobre su resistencia, como sobre sus características de flujo plástico, contracción por secado y permeabilidad, hecho que se presenta debido a que la pasta de cemento endurecido constituye el elemento más débil en lo que se refiere a las propiedades antes citadas (Palbol,1996).

2.4. Fundamentos de resistividad eléctrica aplicados al concreto

La *resistividad eléctrica* (ρ) de un material describe la dificultad que encuentra la corriente eléctrica a su paso por dicho material. De igual manera se puede definir la *conductividad* (s) como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. La *resistencia eléctrica* (R) que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo la resistencia eléctrica es:

$$\mathbf{R} = \rho \frac{\mathbf{l}}{\mathbf{s}}; \qquad \text{Ec. 2.11}$$

donde:
s es el área de la sección transversal de la muestra;
l es la longitud de la muestra.

A partir de la Ecuación 2.11 podemos despejar la resistividad.

$$\rho = \frac{\mathbf{R} \cdot \mathbf{s}}{\mathbf{l}}; \qquad \text{Ec. 2.12}$$

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro ($\Omega \cdot$m). La conductividad se define como el inverso de la resistividad.

$$\sigma = \frac{\mathbf{1}}{\rho}; \qquad \text{Ec. 2.13}$$

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional es el siemens (S). La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la

temperatura, humedad o presión. Estrictamente hablando todos los cuerpos son eléctricamente conductores dado que permiten, en mayor o menor medida, el paso de portadores de cargas eléctricas (Gasulla, 1999).

Tabla 2.8 Resistividad eléctrica de algunos materiales (Wikipedia, 2008).

Material	**Resistividad (en 20° C a 25° C) (Ω·m)**
Plata	1.55×10^{-8}
Cobre	1.70×10^{-8}
Oro	2.22×10^{-8}
Aluminio	2.82×10^{-8}
Wolframio	5.65×10^{-8}
Níquel	6.40×10^{-8}
Hierro	8.90×10^{-8}
Platino	$10,60 \times 10^{-8}$
Estaño	11.50×10^{-8}
Acero inoxidable 301	72.00×10^{-8}
Grafito	60.00×10^{-8}

Un valor alto de resistividad indica que el material es mal conductor mientras que uno bajo indicará que es un buen conductor (Wikipedia, 2008).

La resistividad eléctrica en el concreto depende en gran parte del grado de saturación de los poros de cemento y, en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Es una función de las variables tales como tipo del cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, porosidad de la estructura, entre otras (Troconis, 2000).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Agregados pétreos

3.1.1. Agregado grueso

3.1.1.a. Ubicación del sitio de extracción del agregado grueso

El agregado grueso utilizado para este trabajo fue producto de la trituración del material original que se obtuvo de la planta de trituración Abraham González “La Cañada”, ubicada en el kilómetro 8.3 de la Carretera: Querétaro – La Cañada.

Figura 3.1 Localización de la planta de trituración Abraham González “La Cañada”
(http://maps.google.com/maps?ll=20.600579,100.3808&z=12&hl=es&t=h).

La planta de trituración Abraham González “La Cañada”, pertenece al municipio de El Marqués, estado de Querétaro.

En cuanto a la geología del agregado grueso es una roca ígnea extrusiva de tipo basáltica. El agregado grueso utilizado en la elaboración de los cilindros de concreto provine de la trituración de un macizo rocoso el cual esta compuesto

principalmente de los siguientes minerales: Feldespatos, calcita, olivino y anfíboles, los que definen sus propiedades principales como lo son: dureza, tenacidad, su color, entre otras características (Garnica et al., 2001).

3.1.2. Agregado fino

3.1.2.a. Ubicación del sitio de extracción del agregado fino

El agregado fino utilizado en esta investigación proviene del banco de material de “Saldarriaga” el cual se encuentra localizado en la población de Saldarriaga, municipio El Marqués, estado de Querétaro.

Figura 3.2 Localización del banco de material de “Saldarriaga”
(http://maps.google.com/maps?ll=20.600579,100.3808&z=12&hl=es&t=h).

3.2. Propiedades físicas de los agregados

3.2.1. Propiedades físicas del agregado grueso

Las propiedades físicas estudiadas para el agregado grueso fueron **granulometría, humedad, absorción, densidad relativa y peso volumétrico seco y compacto.**

3.2.1.a. Granulometría

La granulometría del agregado se controló de acuerdo a la norma ASTM C 33 la cual señala los requisitos de granulometría que debe cumplir el material al considerar un tamaño máximo de agregado (TMA) de 3/4” (19 mm) a 3/8” (9.5 mm) (ver Tabla 2.1 y la Figura 2.4).

Para llevar a cabo esta prueba se utilizó un juego de mallas – 3/4” (19.00 mm), 1/2” (12.50 mm), 3/8” (9.50 mm) y No. 4 (4.75 mm) – con las siguientes características:

Cada malla esta formada por alambres de bronce o acero inoxidable tejido en forma de cuadricula, con abertura dependiendo del material a estudiar.

El tejido estará sostenido mediante un bastidor circular metálico de lámina de bronce o de latón de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor (ver Figura 3.3) (SCT M-MMP 4 04 01, 2003).

Además para determinar los pesos retenidos en cada malla se utilizó una balanza con capacidad de 5 kg y aproximación de 0.5 g (ver Figura 3.4).

Figura 3.3 Juego de mallas para el cribado del material grueso.

Figura 3.4 Balanza con capacidad de 5 kg y aproximación de 0.5 g.

Para realizar esta prueba se tomaron aproximadamente 10 kg del material previamente cuarteado, que se cribó a través de las malla de 1”, 1/2”, 3/8” y No. 4.

Figura 3.5 Cuarteo de material grueso.

Figura 3.6 Cribado de material.

Durante el proceso se tuvo cuidado de no perder material para evitar tener resultados incorrectos.

Una vez que se terminó de cribar el material, se obtuvo el peso retenido parcial del material en cada malla y así se estableció el porcentaje que pasó en cada criba y se dibujó la curva granulométrica que le corresponde al material en estudio.

Figura 3.7 Material retenido en cada malla.

3.2.1.b. Humedad

La humedad de los agregados gruesos al momento de realizar el análisis se midió de acuerdo al procedimiento de la norma ASTM C 566.

Para llevar a cabo esta prueba se utilizó un horno eléctrico con dimensiones de 50 x 80 x 30 cm provisto de termostato capaz de mantener una temperatura constante de 105 ± 5° C; así como una balanza de 5 kg con aproximación de 0.5 g (ver Figura 3.4).

Figura 3.8 Horno eléctrico.

Esta prueba consistió en pesar aproximadamente 500 g de material, los cuales se dejaron a secar durante 24 h en un horno eléctrico a temperatura constante de 105°± 5°. Una vez transcurrido ese tiempo se procedió a determinar el porcentaje de humedad del material según la siguiente ecuación:

$$P = \frac{W - D}{D}(100), \qquad \text{Ec. 3.1.}$$

Donde:

P es el porcentaje de humedad (%);

W es el peso húmedo del material (g);

D, es el peso seco del material (g).

Con los valores de humedad obtenidos se calcularon las proporciones de las mezclas de concreto.

3.2.1.c. Absorción

Esta propiedad se midió de acuerdo con la norma ASTM C 127. Para determinar la absorción del agregado grueso se utilizó un horno eléctrico (ver Figura 3.8) y una balanza electrónica (ver Figura 3.4).

La prueba consistió en pesar aproximadamente 500 g de material que se dejó saturarse durante 24 h. Después de ese tiempo, se procedió a secar el material, con una franela húmeda para quitarle el exceso de humedad, hasta dejarlo *saturado y superficialmente seco* (SSS).

Una vez que se logró la condición SSS, la muestra se pesó y se dejó secar en un horno eléctrico a una temperatura constante de 105°± 5°C durante 24 h. Pasado ese tiempo, se procedió a pesarlo y a determinar el porcentaje de absorción según la siguiente ecuación:

$$\%\ \text{absorcion} = \frac{(B - A)}{A}(100), \qquad \text{Ec. 3.2.}$$

Donde:

% absorción es el porcentaje de absorción del material (%);

B es el peso del material en estado SSS (g);
A es el peso seco del material (g).

3.2.1.d. Densidad relativa

La densidad relativa de los agregados se midió con base en la norma ASTM C127. Para medir esta propiedad se utilizó un picnómetro tipo sifón, el cual esta formado por un cilindro metálico de 163 mm de diámetro y 370 mm de altura, el sifón esta colocado a 250 mm de su base, además, se utilizó una probeta graduada de 250 ml de capacidad y aproximación de 1 ml.

Figura 3.9 Picnómetro y probeta graduada.

Esta prueba consistió en pesar 500 g de material los cuales se dejaron saturando durante 24 h, una vez transcurrido ese tiempo la muestra se secó hasta llegar a SSS y poder así pesarla, una vez hecho esto se procedió a vaciar el material en el picnómetro para medir el volumen desalojado y estimar la densidad relativa del material según la siguiente ecuación:

$$D_{rg} = \frac{(P_i)}{V_t(D_w)}, \qquad \text{Ec. 3.3}$$

Donde:
D_{rg} es la densidad del material (adimensional);

P_i es el peso del material en condición SSS (g);

V_t es el volumen del agua desalojada por el material (cm^3);

D_w es la densidad del agua, que se considera igual a 1 g/cm^3.

Figura 3.10 Medición del volumen desalojado por el material grueso.

3.2.1.e. Peso volumétrico seco y compacto

El peso volumétrico seco y compacto se midió con base a la norma ASTM C 29. Para esto se utilizó un recipiente metálico con una capacidad de 10 l cuya altura debe ser aproximadamente igual a su diámetro, pero no menor del 80% ni mayor del 150% de este, además, se utilizó una varilla punta de bala la cual debe ser recta y lisa con un diámetro 16 mm (5/8”) y 60 cm de longitud con uno de sus extremos de forma semiesférica del mismo diámetro que la varilla. También, se utilizó una balanza con capacidad de 20 kg y aproximación de 1 g.

La prueba se llevó a cabo tomando una muestra de aproximadamente 30 kg, la cual se cuarteó para posteriormente tomar con el cucharón el material y así llenar el recipiente de 10 l en forma uniforme y en tres capas, aplicando 25 golpes a cada capa en forma uniforme con la varilla punta de bala.

Después de haber llenado el recipiente y de darle los 25 golpes a la última capa, esta se enrazó eliminado el material sobrante y se procedió inmediatamente

a pesarlo para determinar su peso volumétrico seco y compacto según la siguiente ecuación:

$$\mathbf{M = \frac{(G - T)}{V}}, \qquad \text{Ec. 3.4.}$$

Donde:

M es el peso volumétrico seco y compacto (kg/m^3);

G es el peso del recipiente con material (kg);

T es el peso del recipiente (kg);

V es el volumen del recipiente (m^3).

Figura 3.11 Recipiente volumétrico de 10 l para determinar el peso volumétrico seco y compacto del agregado grueso.

Figura 3.12 Obtención del peso del recipiente con el material grueso.

3.2.2. Propiedades físicas del agregado fino

Las propiedades físicas estudiadas para el agregado fino fueron **granulometría, humedad, módulo de finura, absorción, densidad relativa y peso volumétrico seco y compacto.**

3.2.2.a. Granulometría

La granulometría del agregado fino se obtuvo con base en la norma ASTM C 33 la cual indica los requisitos con los cuales debe cumplir el material en estudio (ver Tabla 2.2 y la Figura 2.5).

Para realizar esta prueba se utilizaron las mallas del No. 4 (4.75 mm), 8 (2.40 mm), 16 (1.20 mm), 30 (0.60 mm), 50 (0.30 mm), 100 (0.15 mm) y 200(0.075 mm), además de un horno eléctrico (ver Figura 3.8) y de una balanza electrónica (ver Figura 3.4).

Figura 3.13 Juego de mallas para el cribado del agregado fino.

Se tomaron 500 g de material, que se colocó en un vaso de aluminio y se dejó saturar por 24 h. Una vez transcurrido ese tiempo el material se lavó agitando con una varilla, se dejo reposar y el agua se decantó a través de la malla 200, este paso se repitió hasta obtener el agua limpia que pasa a través de la malla 200.

Posteriormente, el material se secó con ayuda de un horno eléctrico durante 24 h, transcurrido ese tiempo la muestra seca se pesó y se pasó por el juego de mallas: No. 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200.

Una vez que terminó el cribado las fracciones retenidas se pesaron y se determinó la granulometría del material utilizado.

Figura 3.14 Material retenido en las diferentes mallas.

3.2.2.b. Módulo de finura

El módulo de finura se determinó de acuerdo con la norma ASTM C 125. Esta propiedad se obtuvo después de cribar el material y de obtener los porcentajes retenidos acumulativos.

Para obtener el módulo de finura se deben sumar los porcentajes acumulativos hasta la malla No. 100 y esta suma se divide entre 100 (ver Ec. 2.10).

Figura 3.15 Material retenido en la malla No. 4.

Figura 3.16 Material retenido en la malla No. 8.

Figura 3.17 Material retenido en la malla No. 16.

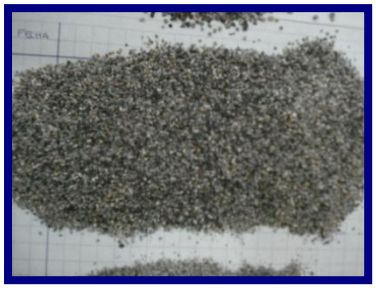


Figura 3.18 Material retenido en la malla No. 30.

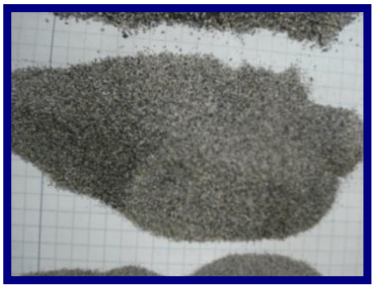


Figura 3.19 Material retenido en la malla No. 50.

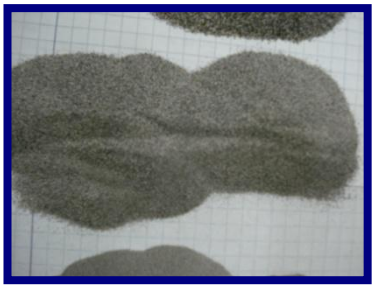


Figura 3.20 Material retenido en la malla No. 100.

3.2.2.c. Humedad

La humedad de la arena se midió siguiendo el procedimiento establecido por la norma ASTM C 566. Esta prueba se realizó de la misma forma que la descrita anteriormente (3.2.1.b. Humedad) para los agregados gruesos, aplicando la Ec. 3.1.

3.2.2.d. Absorción

La absorción se calculó de acuerdo con la norma ASTM C 128, utilizando un molde troncocónico de bronce, el cual tiene las dimensiones siguientes: en la parte superior su diámetro es de 40 ± 3 mm, en la parte inferior es de 90 ± 3 mm. La altura es de 75 ± 3 mm y el espesor 0.8 mm., además, se utilizó un pisón el cual debe tener un peso de 340 ± 15 g y un diámetro de 25 ± 3 mm, así como un horno eléctrico.

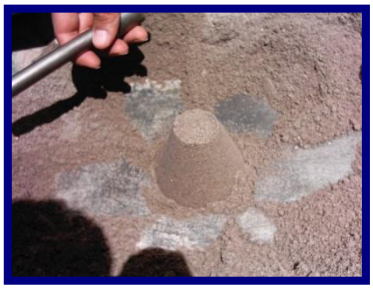
Figura 3.21 Molde troncocónico de bronce y pisón.

Para poder realizar esta prueba primero se saturó el material durante 24 h, pasado ese tiempo se procedió a secar la muestra dejándola SSS, esto se comprobó utilizando el molde troncocónico y el pisón.

El cono se llenó y con el pisón se aplicaron 25 compactaciones sin hacer presión únicamente utilizando su propio peso sobre una sola capa, terminado esto se retiró el cono y se evaluó si este conserva o no su forma, si el cono de arena se destruye se considera que el material esta SSS.

a. Llenado del molde troncocónico.

b. Compactación del material.



c. Material con agua en exceso.

Figura 3.22 Obtención del estado saturado y superficialmente seco en el agregado fino.

Enseguida se tomaron 200 g de material, estos se secaron hasta un peso constante y se determinó el porcentaje de absorción según la Ec. 3.2.

3.2.2.e. Densidad relativa

La densidad relativa del material se determino mediante la norma ASTM C 128. Para obtener la densidad relativa del material fino se utilizó un matraz tipo Pírex, aforado, de 500 ml de capacidad.

Para medir esta propiedad, de la prueba anterior (3.2.2.d. Absorción) se tomaron 200 g de material en condición SSS. Este se secó y se colocó en un matraz aforado, posteriormente, se le agregó agua colocando la muestra en una bomba de vacío para extraerle el aire.

a. Peso del material en estado SSS.

b. Colocación del material seco en el matraz.

c. Extracción de aire del material.

Figura 3.23 Determinación del la densidad relativa en el agregado fino.

Después de haberle extraído el aire se midió la temperatura y se pesó el matraz con el material determinando la densidad relativa de la arena (D_{RA}) según la ecuación siguiente:

$$D_{RA} = \frac{P_s}{(P_s + P_M + A) - (P_M + m + A)}, \qquad \text{Ec. 3.5.}$$

Donde:

D_{RA} es la densidad relativa de la arena (adimensional);

P_s es el peso del material seco (g);

P_M es el peso del matraz (g);

m es el peso del material en estado SSS (g);
A es el peso del agua hasta el nivel de aforo (g).

3.2.2.f. Peso volumétrico seco y compacto

El peso volumétrico seco y compacto se midió tomando como referencia la norma ASTM C 29.

Esta propiedad se midió de la misma manera que la descrita anteriormente para el agregado grueso (3.2.1.e. Peso volumétrico compacto) con la única diferencia de que se utiliza un recipiente de 3 l, el cálculo se basa en la Ec. 3.4.

Figura 3.24 Recipiente volumétrico de 3 l para determinar el peso volumétrico seco y compacto del agregado fino.

Figura 3.25 Compactación del material fino para determinar el peso volumétrico seco y compacto.

3.3. Preparación de los agregados pétreos para la elaboración de las mezclas de concreto

Como se describió anteriormente el agregado grueso fue obtenido de la planta de trituración de Abraham González “La Cañada” y el agregado fino se obtuvo del banco de materiales de “Saldarriaga” (ver inciso 3.1.1.a. y 3.1.2.a.), posteriormente, este material fue transportado a el laboratorio de resistencia de

materiales y mecánica de suelos de la Universidad Autónoma de Querétaro para ser almacenado y a la postre determinar sus propiedades físicas.

3.3.1. Obtención de los agregados pétreos para las mezclas de control

Del material total almacenado, agregado grueso y fino, se tomó una parte de cada uno de estos cuidando que la porción fuera representativa de las características del banco de donde se tomó cada uno de los agregados pétreos (ver Figura 3.26), para después realizar diversas pruebas a las porciones de material y a su vez determinar si estas eran apropiadas para ser utilizadas en la elaboración de las mezclas de concreto, obteniendo así las propiedades físicas de estas (ver Tabla 3.1).

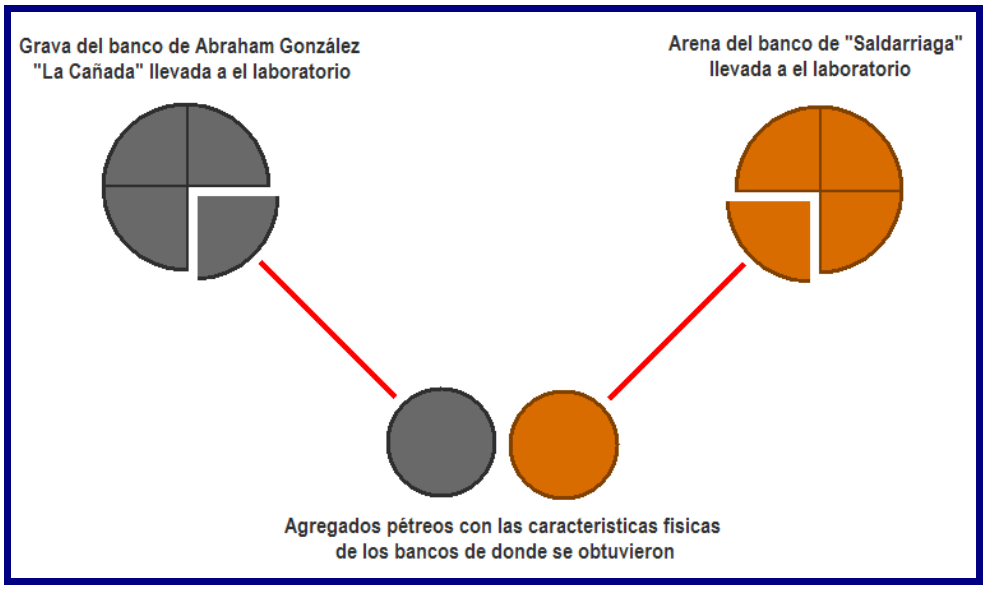


Figura 3.26 Esquema que muestra la obtención de las porciones representativas de las características físicas de los bancos.

Tabla 3.1 Características físicas del agregado grueso y fino para las mezclas base.

Características físicas	Agregado grueso	Agregado fino	Unidades
Porcentaje de desperdicios	0.589	11.756	%
Porcentaje de humedad	1.458	8.124	%
Peso volumétrico suelto	1384.097	961.133	kg/m^3
Peso volumétrico seco y suelto	1362.313	890.278	kg/m^3
Peso volumétrico compacto	1516.776	1120.005	kg/m^3
Peso volumétrico seco y compacto	1492.905	1037.439	kg/m^3
Tamaño máximo nominal	20	---	mm
Modulo de finura	---	2.9	
Porcentaje de absorción	2.196	9.184	%
Densidad relativa	2.664	2.362	(Alim.)
Desgaste de los ángeles	13.761	---	%
Equivalente de arena	---	72.973	
Contenido de materia orgánica	---	Ninguna	

En las Figuras 3.27 y 3.28 se muestra la composición granulométrica tanto del agregado grueso como fino que se utilizó para elaborar las mezclas que nos servirán como base.

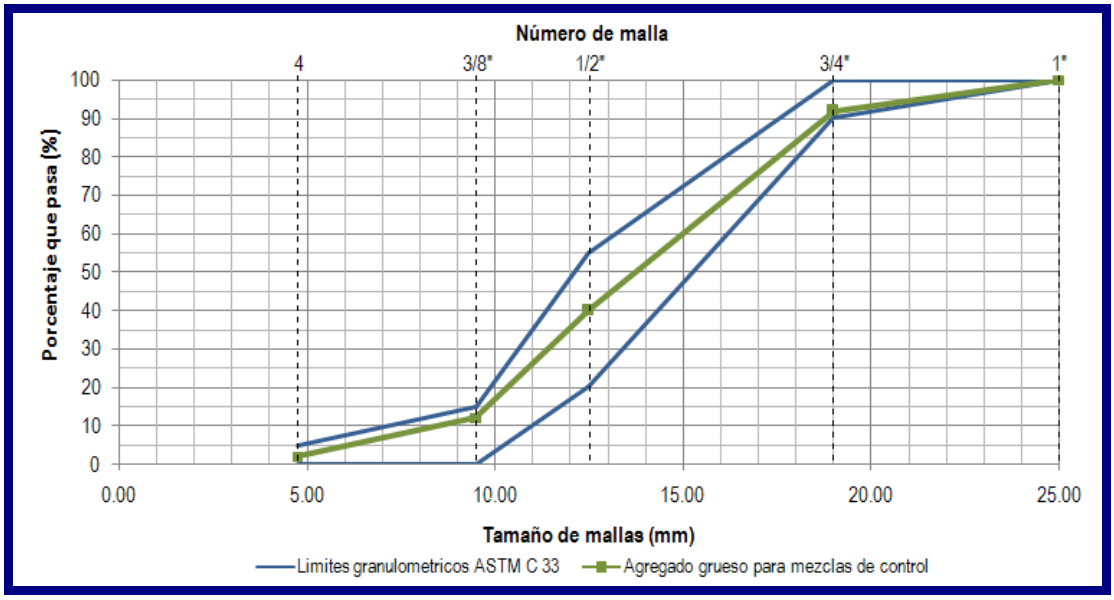


Figura 3.27 Granulometría del agregado grueso para mezclas de control.

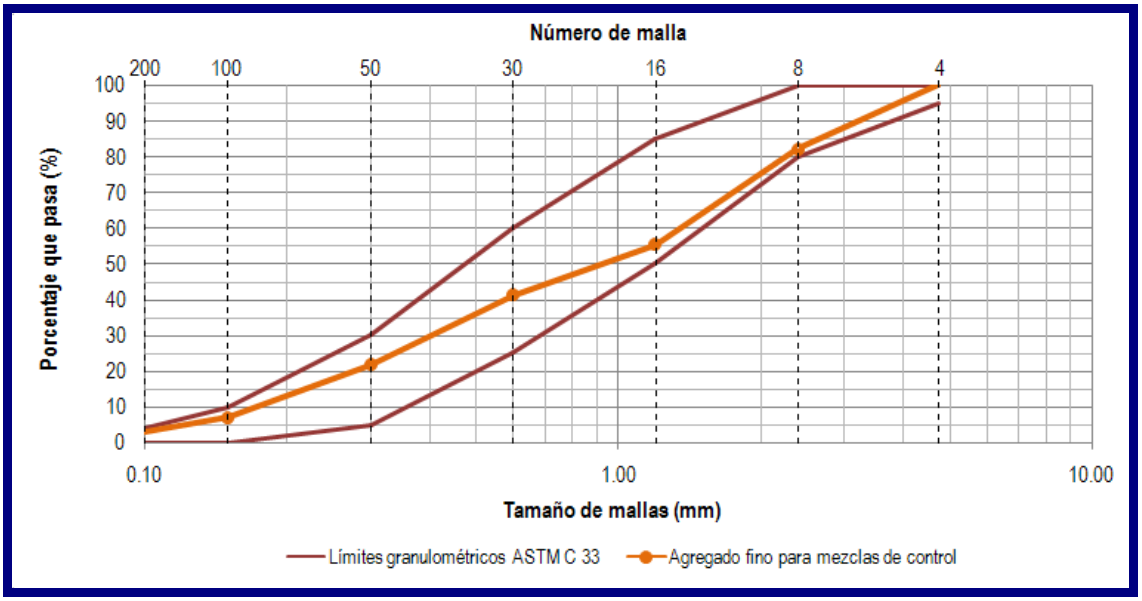


Figura 3.28 Granulometría del agregado fino para mezclas de control.

Con base en los valores obtenidos en la caracterización se determinó que el material cumple con las especificaciones requeridas para ser utilizado en la elaboración de las mezclas de concreto.

3.3.2. Obtención de los agregados pétreos para las mezclas modificadas

El material restante, agregado grueso y fino, se sometió a un proceso de cribado con la finalidad de separar las partículas de cada uno de los agregados de acuerdo a su tamaño, las porciones resultantes se almacenaron en bolsas plástico para evitar la contaminación del material.

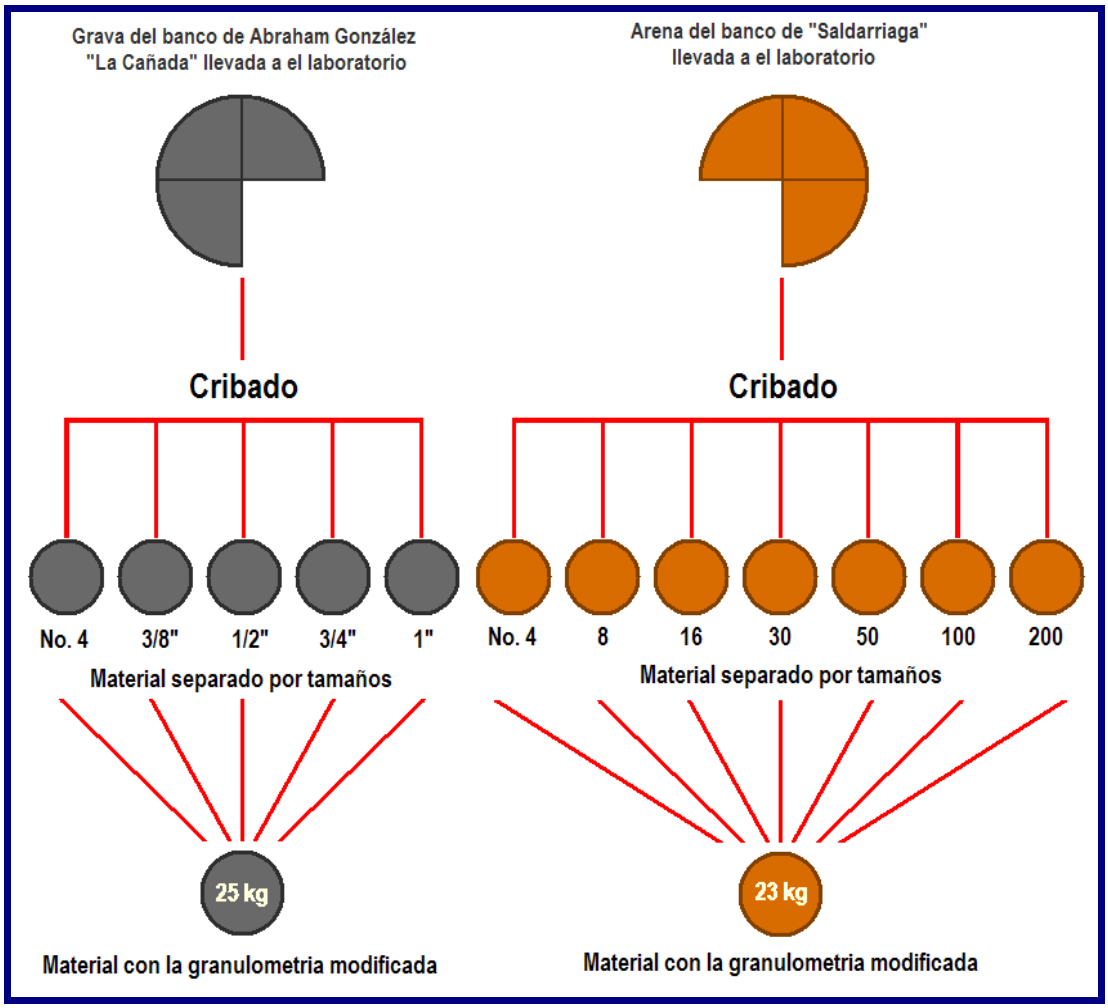


Figura 3.29 Esquema que muestra la obtención de las porciones para las mezclas modificadas.

3.3.2.a. Modificaciones del agregado grueso para las mezclas modificadas

Una vez separado el agregado grueso por tamaños, se tomaron pequeñas cantidades de las porciones cribadas y se mezclaron, con la finalidad de obtener el material que cumpliera con las curvas granulométricas deseadas tomando como limites los requisitos granulométricos que marca la norma ASTM C 33 para agregado grueso de tamaño máximo nominal de 3/4” a 3/8” (ver Tabla 3.2 y Figura 2.4).

Tabla 3.2 Requisitos para la clasificación de los agregados gruesos (ASTM C 33, 2003).

Grading Requirements for Coarse Aggregates

Size Number	Nominal Size (Sieves with Square Openings)	Amounts Finer than Each Laboratory Sieve (Square-Openings), Mass Percent													
		100 mm (4 in.)	90 mm (3½ in.)	75 mm (3 in.)	63 mm (2½ in.)	50 mm (2 in.)	37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (⅜ in.)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	300 µm (No.50)
1	90 to 37.5 mm (3½ to 1½ in.)	100	90 to 100	...	25 to 60	...	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
2	63 to 37.5 mm (2½ to 1½ in.)	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
3	50 to 25.0 mm (2 to 1 in.)	...	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...
357	50 to 4.75 mm (2 in. to No. 4)	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	...	0 to 5	...	...	...
4	37.5 to 19.0 mm (1½ to ¾ in.)	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...
467	37.5 to 4.75 mm (1½ in. to No. 4)	...	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	0 to 5	...	...	...
5	25.0 to 12.5 mm (1 to ½ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	...	...	...
56	25.0 to 9.5 mm (1 to ⅜ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 85	10 to 40	0 to 15	0 to 5	...	...	...
57	25.0 to 4.75 mm (1 in. to No. 4)	...	...	...	...	...	100	95 to 100	...	25 to 60	...	0 to 10	0 to 5	...	...
6	19.0 to 9.5 mm (¾ to ⅜ in.)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	0 to 5	...	...	...
67	19.0 to 4.75 mm (¾ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	...	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	...
7	12.5 to 4.75 mm (½ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 70	0 to 15	0 to 5	...	...
8	9.5 to 2.36 mm (⅜ in. to No. 8)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 30	0 to 10	0 to 5	...
89	9.5 to 1.18 mm (⅜ in. to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	5 to 30	0 to 10	0 to 5
9[A]	4.75 to 1.18 mm (No. 4 to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 40	0 to 10	0 to 5

[A] Size number 9 aggregate is defined in Terminology C 125 as a fine aggregate. It is included as a coarse aggregate when it is combined with a size number 8 material to create a size number 89, which is a coarse aggregate as defined by Terminology C 125.

Primera modificación

Para la primera modificación se formó una muestra de agregado grueso con un peso de 25 kg, en la Tabla 3.3 se muestra el porcentaje que pasa y las cantidades en peso de material requerido para formar la curva granulométrica (Modificación1) que se muestra en la Figura 3.30.

Tabla 3.3 Cantidades en peso de material requerido para la primera modificación.

Malla número	Abertura (mm)	% que pasa	% Retenido acumulado	% Retenido parcial	Peso retenido parcial (kg)
1	25.000	**100.00**	0.00	0.00	**0.00**
3/4"	19.000	**95.00**	5.00	5.00	**1.25**
1/2"	12.500	**37.50**	62.50	57.50	**14.38**
3/8"	9.500	**7.50**	92.50	30.00	**7.50**
No. 4	4.750	**0.00**	100.00	7.50	**1.88**
Total				100.00	**25.00**

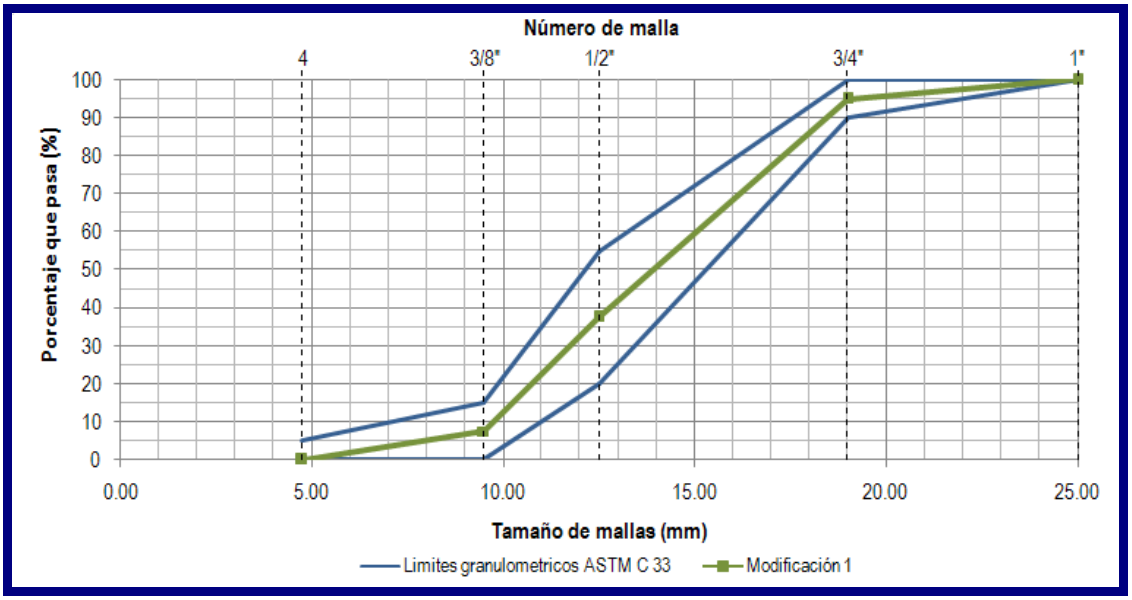


Figura 3.30 Granulometría determinada para la primera modificación.

Debido al proceso de cribado y a la separación de los tamaños del agregado grueso se modificaron algunas de las propiedades físicas, esto debido a que se cambió la granulometría del agregado al momento de volver a mezclar las partículas de estos. Siendo estas propiedades las más importantes para el diseño de las mezclas (ver inciso 3.4. Proporcionamiento de mezclas de concreto).

Tabla 3.4 Características físicas del agregado grueso para la primera modificación.

Características físicas	Agregado grueso	Unidades
Porcentaje de humedad	1.020	%
Peso volumétrico compacto	1569.626	kg/m^3
Peso volumétrico seco y compacto	1553.782	kg/m^3
Tamaño máximo nominal del agregado	20	mm
Porcentaje de absorción	1.387	%
Densidad relativa	2.762	(adim.)

Segunda modificación

De igual forma, para la segunda modificación se integró una muestra de agregado grueso con un peso de 25 kg, en la Tabla 3.5 se muestra el porcentaje que pasa y las cantidades en peso de material requerido para formar la curva granulométrica (Modificación 2) que se muestra en la Figura 3.31.

Tabla 3.5 Cantidades en peso de material requerido para la segunda modificación.

Malla número	Abertura (mm)	% que pasa	% Retenido acumulado	% Retenido parcial	Peso retenido parcial (kg)
1	25.000	**100.00**	0.00	0.00	**0.00**
3/4"	19.000	**100.00**	0.00	0.00	**0.00**
1/2"	12.500	**55.00**	45.00	45.00	**11.25**
3/8"	9.500	**15.00**	85.00	40.00	**10.00**
No. 4	4.750	**0.00**	100.00	15.00	**3.75**
Total				100.00	**25.00**

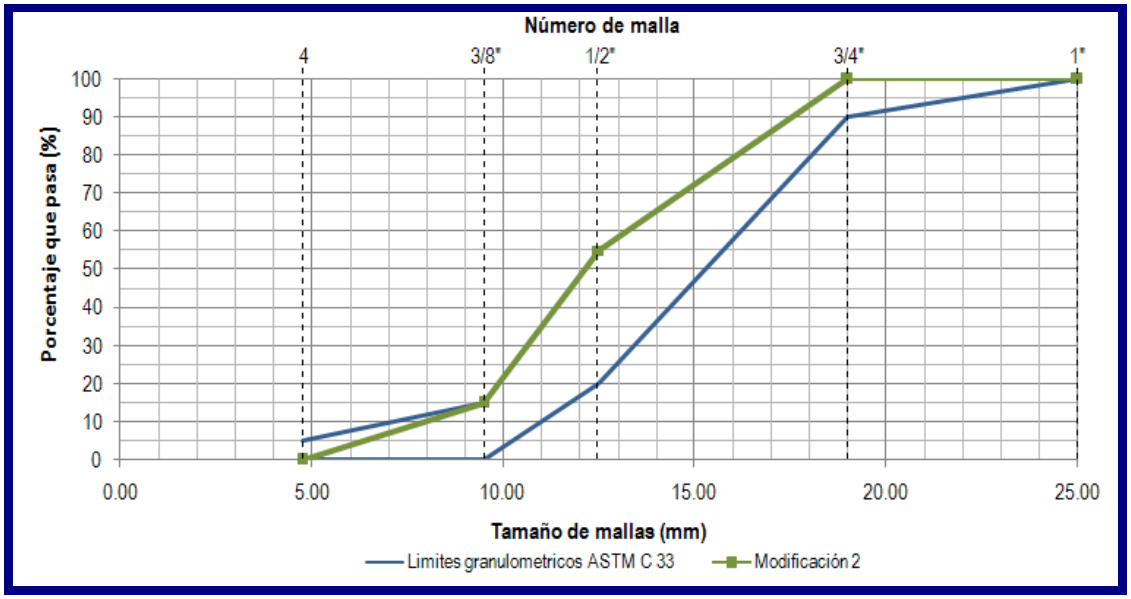


Figura 3.31 Granulometría determinada para la segunda modificación.

Como ya se mencionó anteriormente, debido al proceso de cribado y a la separación de los tamaños del agregado grueso se modificaron algunas de las propiedades físicas. A continuación se muestran estas propiedades para la segunda modificación.

Tabla 3.6 Características físicas del agregado grueso para la segunda modificación.

Características físicas	Agregado grueso	Unidades
Porcentaje de humedad	1.020	%
Peso volumétrico compacto	1567.157	kg/m^3
Peso volumétrico seco y compacto	1552.081	kg/m^3
Tamaño máximo nominal del agregado	20	mm
Porcentaje de absorción	1.387	%
Densidad relativa	2.762	(adim.)

Tercera modificación

Finalmente, para la tercera modificación se conformó una muestra de agregado grueso con un peso de 25 kg, en la Tabla 3.7 se muestra el porcentaje que pasa y las cantidades en peso de material requerido para formar la curva granulométrica (Modificación 3) que se muestra en la Figura 3.32.

Tabla 3.7 Cantidades en peso de material requerido para la segunda modificación.

Malla número	Abertura (mm)	% que pasa	% Retenido acumulado	% Retenido parcial	Peso retenido parcial (kg)
1	25.000	**100.00**	0.00	0.00	**0.00**
3/4"	19.000	**90.00**	10.00	10.00	**2.50**
1/2"	12.500	**20.00**	80.00	70.00	**17.50**
3/8"	9.500	**0.00**	100.00	20.00	**5.00**
No. 4	4.750	**0.00**	100.00	0.00	**0.00**
Total				100.00	**25.00**

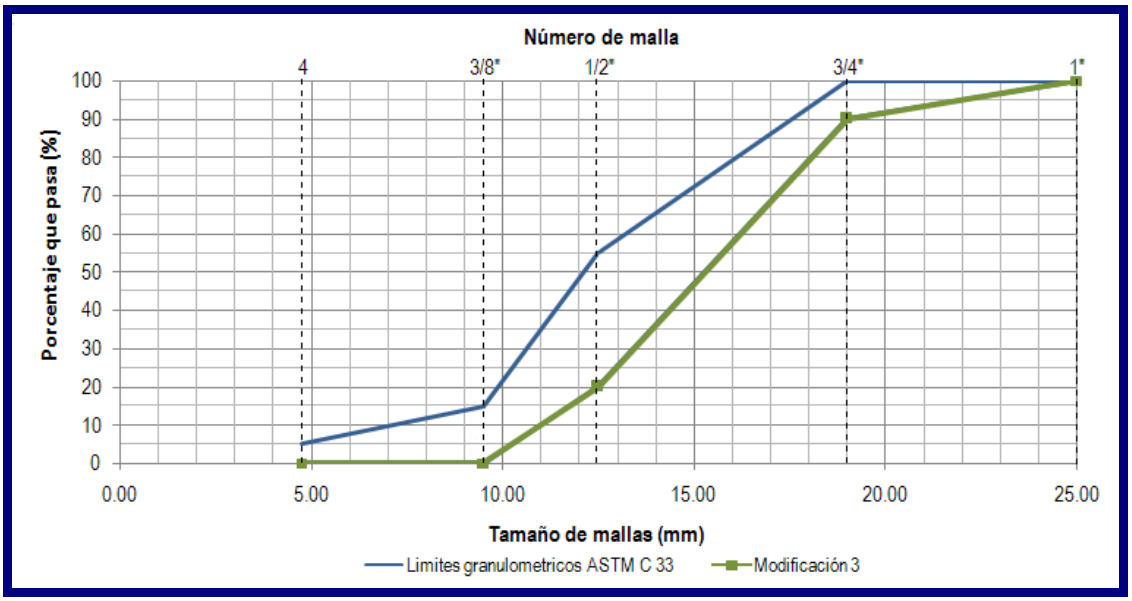


Figura 3.32 Granulometría determinada para la tercera modificación.

A continuación se muestran las propiedades físicas para la tercera modificación.

Tabla 3.8 Características físicas del agregado grueso para la tercera modificación.

Características físicas	Agregado grueso	Unidades
Porcentaje de humedad	1.020	%
Peso volumétrico compacto	1550.398	kg/m^3
Peso volumétrico seco y compacto	1535.261	kg/m^3
Tamaño máximo nominal del agregado	20	mm
Porcentaje de absorción	1.387	%
Densidad relativa	2.762	(adim.)

3.3.2.b. Modificación del agregado fino para las mezclas modificadas

Separado el agregado fino por tamaños, se eligieron pequeñas cantidades de las porciones cribadas y se combinaron, con la finalidad de obtener el material que satisficiera la curva granulométrica deseada tomando como límites los requisitos granulométricos que marca la norma ASTM C 33 para la clasificación de agregado fino (ver Tabla 3.9 y Figura 2.5).

Tabla 3.9 Requisitos para la clasificación de los agregados finos (ASTM C 33, 2003).

Tamiz	Porcentaje que pasa
No. 4	100 – 95
No. 8	100 – 80
No. 16	85 – 50
No. 30	60 – 25
No. 50	30 – 5
No. 100	10 – 0

Para la modificación se formó una muestra de 23 kg con agregado fino, cabe mencionar que se trabajó con la misma granulometría del agregado fino para las tres modificaciones de la curva granulométrica del agregado grueso, en la Tabla 3.10 se muestra el porcentaje que pasa y las cantidades en peso de material requerido para formar la curva granulométrica (Modificación de la arena) que se muestra en la Figura 3.33.

Tabla 3.10 Cantidades en peso de material requerido para la modificación de la arena.

Malla número	Abertura (mm)	% que pasa	% Retenido acumulado	% Retenido parcial	Peso retenido parcial (kg)
4	4.750	**100.00**	0.00	0.00	**0.00**
8	2.400	**90.00**	10.00	10.00	**2.30**
16	1.200	**67.50**	32.50	22.50	**5.18**
30	0.600	**42.50**	57.50	25.00	**5.75**
50	0.300	**17.50**	82.50	25.00	**5.75**
100	0.150	**5.00**	95.00	12.50	**2.88**
200	0.075		100.00	5.00	**1.15**
Total				100.00	**23.00**

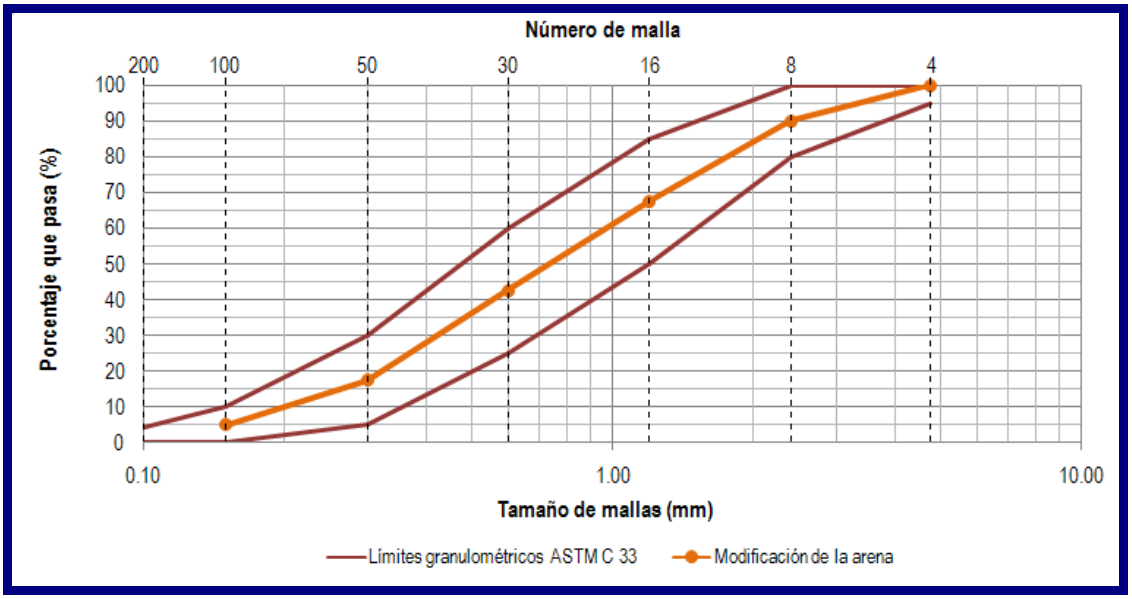


Figura 3.33 Granulometría determinada para la modificación de la arena.

De igual forma, el agregado fino también sufrió algunos cambios en algunas de sus características físicas debido al ajuste en su granulometría, estas características físicas modificadas se muestran a continuación.

Tabla 3.11 Características físicas del agregado fino utilizado para toda las mezclas modificadas.

Características físicas	Agregado fino	Unidades
Porcentaje de humedad	2.262	%
Peso volumétrico compacto	1371.540	kg/m^3
Peso volumétrico seco y compacto	1341.199	kg/m^3
Modulo de finura	2.8	
Porcentaje de absorción	8.234	%
Densidad relativa	2.545	(adim.)

3.4. Proporcionamiento de mezclas de concreto

Las mezclas de concreto a utilizar se diseñaron con base en el método del ACI (American Concrete Institute), el cual se tomó del libro “Práctica para dosificar concreto normal, concreto pesado y concreto masivo (ACI 211)” publicado por IMCYC (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto), este método se realiza en los siguientes nueve pasos:

1. Selección del revenimiento.
2. Estimación de la cantidad de agua para el mezclado.
3. Selección de la relación agua/cemento en peso.
4. Cálculo de la cantidad de cemento.
5. Estimación de la cantidad de agregado grueso.
6. Estimación de la cantidad de agregado fino.
7. Corrección por humedad de los agregados.
8. Proporcionamiento.
9. Ajustes a las mezclas de prueba.

Para facilitar el diseño de las mezclas de concreto se elaboró una hoja de cálculo en Microsoft Excel 2007, la cual se presenta y se describe su operación con ayuda de las siguientes tablas y figuras.

En la Tabla 3.12 se muestran los datos necesarios para el diseño de las mezclas de concreto fresco de interés, los cuales fueron obtenidos de la caracterización de los agregados pétreos.

Tabla 3.12 Tabla con los datos para el diseño de las mezclas de concreto.

Datos		
Grava grueso		
Porcentaje de humedad =	1.405	%
Peso volumetrico seco y compacto =	1492.905	kg/m^3
Tamaño maximo NOMINAL del agregado=	20	mm
Porcentaje de absorción =	2.196	%
Densidad relativa =	2.664	(adim)
Agregado fino		
Porcentaje de humedad =	7.958	%
Peso volumetrico seco y compacto =	1037.439	kg/m^3
Modulo de finura =	2.9	
Porcentaje de absorción =	9.184	%
Densidad relativa =	2.362	(adim.)

Para que la hoja de cálculo funcione adecuadamente, los valores obtenidos de las tablas proporcionadas por ACI (celdas achuradas) se introducen únicamente en las celdas con línea punteada y de color verde. Los valores que se encuentren en las celdas con línea continua y de color rojo son los valores calculados por la hoja de cálculo.

1. Selección del revenimiento

El primer paso contempló la selección del revenimiento, cuando este no se especifica, el informe del ACI incluye la Tabla 3.13 en la que se recomiendan diferentes valores de revenimiento de acuerdo al tipo de construcción que se pretenda diseñar. Los valores son aplicables cuando se emplea el vibrado para compactar el concreto. En el caso contrario dichos valores deben ser incrementados en 2.5 cm.

Tabla 3.13 Tabla con el revenimiento recomendado por el ACI.

Revenimiento

Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción

Tipo de construcción	Rev. en cm.	
	Maximo*	Minimo
Muros de cimentación y zapatas reforzadas	8	2
Zapatas, campanas y muros de sub estructura sencillos	8	2
Vigas y muros reforzados	10	2
Columnas para edificios	10	2
Pavimentos y losas	8	2
Concreto masivo	5	2
* Puede incrementarse en 2.5 cm para métodos de compactación que no sean mediante vibracion		

Selecciona el revenimiento de acuerdo con el tipo de construcción

8 a 2

2. Estimación de la cantidad de agua para el mezclado

Como segundo paso, se presenta la Tabla 3.14 con los contenidos de agua recomendables en función del revenimiento requerido y el tamaño máximo nominal del agregado, considerando un concreto sin o con aire incluido.

Tabla 3.14 Tabla para determinar la cantidad de agua de mezclado.

Estimacion de la cantidad de agua de mezclado

Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños maximos NOMINALES de agregado

Revenimiento (cm)	Agua kg/m³ de concreto para los tamaños maximos NOMINALES de agregados, indicados en mm							
	10*	12.5*	20*	25*	40*	50	70	150
Concreto sin aire								
De 3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
De 8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
De 15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	----
Cantidad de aire aprox. Atrapado en el concreto sin inclusión de aire	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
De 3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
De 8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
De 15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	----
Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo con el nivel de exposición								
Ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Selecciona la cantidad de agua en base al revenimiento y al tamaño maximo de agregados

Agua = 200 **kg/m³**

Porcentaje de aire incluido = 2 **%**

3. Selección de la relación agua/cemento (en peso)

Para el cálculo se tomó en cuenta el grado de supervisión que se iba a tener durante la fabricación de la mezcla de concreto. Es decir, si se tiene una rigurosa supervisión al momento de la dosificación y fabricación de los cilindros de concreto se aumentara la *resistencia de proyecto* (f´c) 25 kg/cm^2, si se tiene una regular supervisión la resistencia de proyecto se aumentara 50 kg/cm^2, pero, si se tiene una deficiente supervisión la resistencia de proyecto aumentara 100 kg/cm^2, lo anterior para evitar que obtener resistencias inferiores a las que requiere el proyecto.

Tabla 3.15 Tabla para determinar el grado de supervisión durante la fabricación del concreto.

Selección de la relacion agua-cemento en peso

Seleciona un resistencia a la compresión en base a la supervicion que se tenga

fcr = f'c + 25kg/cm2	Para una buena supervisión
fcr = f'c + 50kg/cm2	Para una regular supervisión
fcr = f'c + 100kg/cm2	Para una deficiente o nula supervisión

Escribe la resistencia de proyecto

f 'c = 250 kg/cm^2

Selecciona el tipo de supervisión

Escribe la palabra buena, regular y defieciente

buena

fcr = 275 kg/cm^2

En la Tabla 3.16 se proporcionan valores de la relación agua/cemento de acuerdo con la resistencia a la compresión a los 28 días que se requirió. Por supuesto, la resistencia promedio seleccionada debió exceder la resistencia de proyecto como se mostró en la Tabla 3.15 con un margen suficiente para evitar que los valores de resistencia a la compresión sean inferiores a los que solicita el diseño.

Tabla 3.16 Tabla para obtener la relación agua/cemento en base a la resistencia a los 28 días.

Relación existente entre la relación agua-cemento y la resistencia a la compresión del concreto

Resistencia a la compresión a los 28 dias kg/cm^{2*}	Relación agua/cemento en peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450	0.380	---
400	0.430	---
350	0.480	0.400
300	0.550	0.460
275	0.585	0.495
250	0.620	0.530
200	0.700	0.610
150	0.800	0.710

Relación agua-cemento en base al frc (Solo para concretos sin aire incluido)

A/C = 0.585

4. Cálculo de la cantidad de cemento

El contenido de cemento se calculó con la cantidad de agua, determinada en el paso 2, y la relación agua/cemento, obtenida en el paso 3, una vez conocidos estos valores se obtuvo la cantidad de cemento requerido (ver Tabla 3.17).

Tabla 3.17 Determinación de la cantidad de cemento requerida por la mezcla.

Cálculo de la cantidad de cemento		
Relación = Agua / Cemento		
Despejamos el cemento de la formula anterior		
Cemento = Agua / Relación		
Cemento =	**341.880**	**kg/m^3**

5. Estimación de la cantidad de agregado grueso

En la Tabla 3.18 se muestra el volumen del agregado grueso por volumen unitario de concreto, los valores dependen del tamaño máximo nominal del agregado grueso y del módulo de finura de la arena.

Tabla 3.18 Tabla para determinar la cantidad de agregado grueso.

Estimación de la cantidad de grava o de agregado grueso

Tamaño maximo NOMINAL del agregado grueso = 20 mm

Modulo de finura = 2.9

Volumenes de agregado grueso por volumen unitario de concreto

Tamaño maximo NOMINAL del agregado (mm)	Volumen del agregado grueso** varillado en seco por volumen unitario de concreto para distintos modulos de finura de la arena						
	Modulo de finura						
	2.40	2.50	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00
10 (3/8")	0.50	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53
20 (3/4")	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.60
25 (1")	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65
40 (1 1/2")	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.70
50 (2")	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72
70 (3")	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75
150 (6")	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81

El volumen de la grava representó la cantidad requerida en estado seco y compacto en un metro cúbico de concreto, este volumen se convirtió a peso seco y compacto del agregado grueso requerido en un metro cúbico de concreto, multiplicándolo por el peso volumétrico seco y compacto del agregado grueso (ver inciso 3.2.1.e. Peso volumétrico seco y compacto).

Tabla 3.19 Determinación del peso del agregado grueso.

Volumen de la grava (Vg) = 0.61

Calculo del peso de la grava

$$Pg = (Vg)(PVSCg)$$

Donde:

Pg = Peso de la grava
Vg = Volumen de la grava
PVSCg = Peso volumetrico seco y compacto de la grava

Peso volumetrico seco y compacto de la grava = 1492.905 kg/m^3

Peso de la grava (Pg) = (0.61) (1492.905) = 910.672 kg/m^3

6. Estimación de la cantidad de agregado fino

Hasta el paso anterior, se estimaron todos los componentes del concreto, excepto el volumen del agregado fino, cuya cantidad se calculó por diferencia.

Para determinar la cantidad de arena en peso se multiplicó el volumen de la arena (Va) por la densidad de la arena (Da) y por el peso del agua en un metro cúbico.

Tabla 3.20 Determinación del volumen y peso del agregado fino.

Estimación de la cantidad de arena o agregado fino

$$Va = 1000 - \left(\frac{Pc}{Dc} + \frac{PA}{DA} + \frac{Pg}{Dg}\right)$$

Va = Volumen de la arena		
Pc = Peso del cemento de acuerdo al calculo =	341.880	kg/m^3
PA = Peso del agua de acuerdo al calculo =	200.000	kg/m^3
Pg = Peso de la grava de acuerdo al calculo =	910.672	kg/m^3
Dc = Densidad del cemento =	3.150	
DA = Densidad del agua =	1.000	
Dg = Densidad de la grava =	2.664	

$$Va = 1000 - \left(\frac{341.880}{3.150} + \frac{200.000}{1.000} + \frac{910.672}{2.664}\right) = 349.572 \text{ kg}$$

Pa = Peso de la arena

$$Pa = Va(Da)$$

$$Pa = (349.572)(2.362) = 825.656 \ kg/m^3$$

7. Corrección por humedad de los agregados

Una vez que se determinaron todas las cantidades de material a emplear antes de fabricar la mezcla se obtuvo un testigo de humedad, esto es para corregir la humedad en los agregados pétreos ya sea por que tenían agua en exceso o carecían de ella.

Tabla 3.21 Corrección por humedad de los agregados.

Correccion por humedad		
Arena		
Porcentaje de humedad =	7.958	%
Porcentaje de absorción =	9.184	%
Cantidad de agua libre =	-1.226	%
Grava		
Porcentaje de humedad =	1.405	%
Porcentaje de absorción =	2.196	%
Cantidad de agua libre =	-0.790	%
Cemento =	**341.880**	kg
Agua =	**217.316**	kg
Arena =	**891.363**	kg
Grava =	**923.470**	kg

8. Proporcionamiento

Una vez que se corrigieron los agregados pétreos y la cantidad de agua por humedad se procedió a determinar la cantidad necesaria de agregado grueso, fino y agua para un saco de cemento.

Tabla 3.22 Tabla con el proporcionamiento de la mezcla de concreto ya corregida por humedad.

Material	Cantidades por m^3 en kg	Correccion por humedad	Proporciones en peso	Cantidades en kg por saco de 50 kg	Volumenes aparentes por saco en litros	Cantidades en botes alcoholeros
Cemento (C)	341.880	341.880	1.000	50.000	33.00	2
Agua (A)	200.000	217.316	0.636	31.782	31.78	1 3/4
Arena (a)	825.656	891.363	2.607	130.362	125.66	7 2/4
Grava (g)	910.672	923.470	2.701	135.057	90.47	5 1/4
	2278.209					

Nota: los botes alcoholeros son de 18 litros pero se considera de 17 litros porque generalmente no se llenan a toda su capacidad

9. Ajustes a las mezclas de prueba.

Las cantidades calculadas en el paso anterior se redujeron a cantidades de laboratorio para la elaboración de cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, considerando un 20% de desperdicio.

Tabla 3.23 Proporcionamiento de la mezcla de concreto para la fabricación de cilindros de concreto.

Reducción a cantidades de laboratorio

Considerando cilindros de 10 cm de diametro y 20 cm de altura

Volumen de cilindros

Datos			Area		Volumen	
Diametro	10	cm	78.54	cm	1570.80	cm^3
Altura	20	cm			1.57	lt

Considerando un 20 % más del volumen calculado

Volumen = 1.88 lt

Número de cilindros a fabricar = 12 Cilindros

Cantidades mezcla por todos los cilindro: 22.620 litros
Cantidades de cemento 7.733 kg de cemento

Calculo de las cantidades para los cilindros a fabricar

Material	Proporciones en peso	Cantidades de materiales	Unidades
Cemento (C)	1.000	7.733	kg
Agua (A)	0.636	4.916	kg
Arena (a)	2.607	20.162	kg
Grava (g)	2.701	20.888	kg

Cemento =	7.733	kg
Agua =	4.916	kg
Arena =	20.162	kg
Grava =	20.888	kg

Como se pudo observar, con la hoja de cálculo resulto más rápido y sencillo el diseño de las mezclas de concreto, ya que únicamente se introdujeron valores correspondientes a la caracterización de los agregados pétreos y algunos valores de tablas proporcionadas por el ACI y automáticamente obtenemos las cantidades de material a emplear en la fabricación de cilindros de concreto. En la sección correspondiente a anexos se muestra el algoritmo que se siguió para el diseño de las mezclas de concreto con base en el método del ACI.

3.5. Ensayes de laboratorio

Los ensayes de laboratorio practicados fueron: en estado fresco el revenimiento y en estado endurecido la resistencia a la compresión (kg/cm^2, f'c), el porcentaje de vacíos (%) y la resistividad ($\Omega \cdot$m, ρ).

Estas pruebas se hicieron con base en las normas ASTM C 143 (Slump of Hydraulic-Cement Concrete) para el revenimiento, ASTM 39 (Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens) para la resistencia a la compresión y para el porcentaje de vacíos con la norma ASTM C 642 (Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.).

Para el estudio de las propiedades de los concretos ya endurecidos se fabricaron cilindros de concreto de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura.

Figura 3.34 Cilindros de concreto de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura.

3.5.1. Revenimiento

La prueba del revenimiento es una prueba que permite determinar la consistencia del concreto en estado fresco, esta prueba se lleva a cabo con un molde troncocónico el cual tiene como características físicas: 20 cm de diámetro en la base inferior, 10 cm de diámetro en la base superior y 30 cm de altura.

Para la medición del revenimiento se utilizó un molde troncocónico el cual se llenó con concreto recién mezclado en tres capas, cada una de las capas fue varillada con una barra terminada en punta de bala. Una vez que se llenó el molde, el concreto se enrasó con la varilla y el molde se levantó en dirección vertical en un tiempo de 5 ± 2 s y enseguida se midió el revenimiento.

Figura 3.35 Varillado del concreto fresco para determinar el revenimiento

Figura 3.36 Medición del revenimiento

3.5.2. Resistencia a la compresión

Los ensayes de laboratorio fueron realizados con una máquina universal Forney cuya capacidad es de 150 ton con aproximación mínima de 5 kg y máxima de 250 kg, además la maquina cuenta con un control de velocidad de aplicación de carga. La máquina esta equipa con dos bloques sólidos de acero, para la aplicación de la carga. El bloque superior cuenta con un asiento esférico y esta fijo en el cabezal de la maquina y cuenta con un dispositivo de carátula provisto de una escala graduada cuya división mínima es de 5 kg a su vez cuenta con una aguja indicadora de carga y cuenta con una aguja de arrastre.

a. Maquina universal Forney.

b. Bloques de acero para la aplicación de la carga.

c. Dispositivo de caratula para la lectura de la carga.

Figura 3.37 Elementos que conforman la maquina universal Forney.

Los cilindros de concreto, una vez fabricados y desmoldados se depositaron en una cámara de curado para evitar que estos perdieran humedad, posteriormente, cada cilindro se sometió a un esfuerzo de compresión a diferentes edades (7, 14 y 28 días), los resultados se procesaron determinando la resistencia que lograron aplicando la Ec. 2.2.

Figura 3.38 Cilindros en estado fresco.

Figura 3.39 Cilindros durante el curado.

Figura 3.40 Cilindro sometido a esfuerzo de compresión.

3.5.3. Porcentaje de vacíos

Después de haber transcurrido 28 días en la cámara de curado, se tomó un cilindro representativo de la serie fabricada cortándolo de tal manera que se

obtuvo aproximadamente 380 cm^3 de concreto endurecido, posteriormente, la muestra se dejo secar en un horno eléctrico por 24 h para enseguida ser pesada, a continuación, la muestra se dejo saturando en agua durante 24 h a una temperatura constante, una vez pasado ese tiempo, la muestra se seco hasta dejarla SSS después fue pesada.

Figura 3.41 Ejemplo de las muestras de concreto endurecido con un volumen de 380cm3 aproximadamente.

Figura 3.42 Muestras durante el secado para determinar la densidad, absorción y porcentaje de vacios.

Figura 3.43 Muestras sometido a hervido.

Luego, la muestra SSS se hirvió durante 5 h para después pesarla, por ultimo, se pesó la muestra sumergida en agua, ya obtenidos todos estos pesos, se determinaron las variables mencionadas de acuerdo a las Ecuaciones 2.3., 2.4., 2.5., 2.6., 2.7., 2.8. y 2.9.

3.5.4. Resistividad eléctrica en el concreto

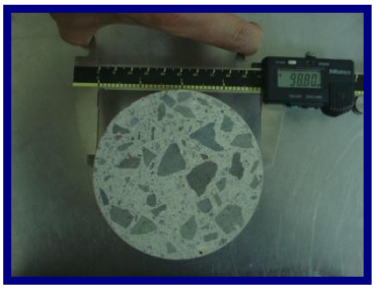
El propósito de esta prueba es el establecer la resistividad eléctrica del concreto en el laboratorio. Es importante mencionar que de las mismas mezclas con que se elaboraron los cilindros de concreto para determinar la resistencia a la compresión, la densidad, la absorción y el porcentaje de vacios se elaboraron los especímenes de concreto para determinar la resistividad eléctrica.

Fabricados, desmoldados y curados, los cilindros fueron cortados para formar muestras de aproximadamente 5 cm de longitud, una vez cortadas las

muestras se procedió a tomar las dimensiones como son longitud y diámetro este último para determinar el área de la sección transversal de la muestra (s).

a. Muestras de concreto después del corte.

b. Obtención de la longitud de las muestras de concreto.



c. Obtención del diámetro de las muestras de concreto.

Figura 3.44 Determinación de las características físicas de las muestras de concreto después del corte.

Posteriormente, las muestras se dejaron en agua durante 48 h, esto con la finalidad de asegurar que las muestras estuvieran completamente saturadas, para luego hacer las mediciones, estas se efectuaron empleando un medidor de resistencia de suelos marca Nilsson, modelo 400 de onda cuadrada de 97 Hz, cabe mencionar que el medidor de resistencia que se utilizó esta diseñado para medir la resistencia en suelos, pero este se adecuó para ser utilizado en las muestras de concreto, adaptando como electrodos dos placas de cobre de forma circular (con diámetro de 10 cm).

Figura 3.45 Muestras saturadas y listas para medir su resistencia.

Figura 3.46 Medición de la resistencia eléctrica de la muestra.

Figura 3.47 Muestra de concreto entre los electrodos de cobre.

En la Figura 3.48 se muestra la forma que se sigue para determinar la resistencia eléctrica, así como los elementos que se utilizan para obtener esta.

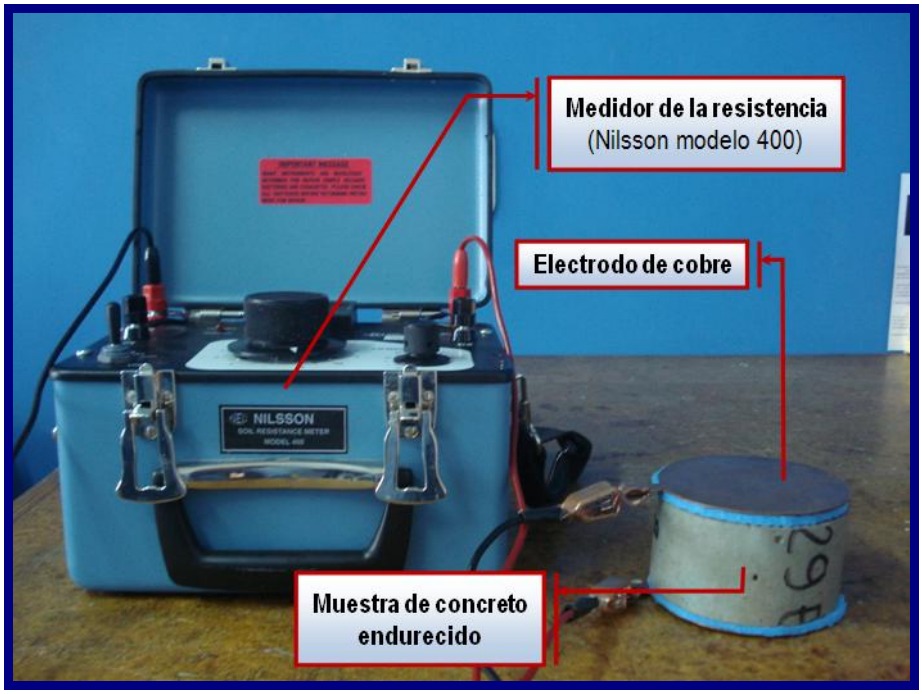


Figura 3.48 Elementos que conforman la medición de la resistencia eléctrica.

A continuación se muestra una imagen con la ubicación física de los componentes que conforman el medidor de resistencia eléctrica

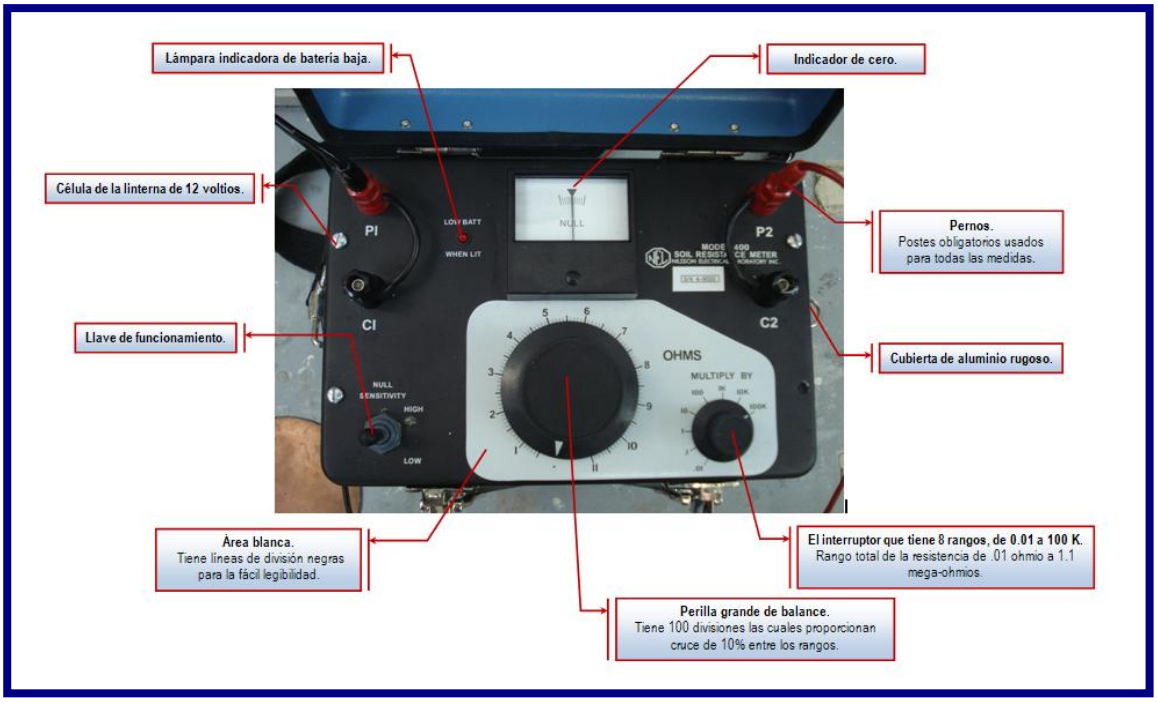


Figura 3.49 Descripción física del aparato medidor de resistencia marca Nilsson modelo 400.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este cápitulo se concentran los resultados arrojados por las pruebas aplicadas a las muestras de concreto fresco y concreto endurecido, habiéndose modificado la composición granulométrica de los agregados pétreos para cada mezcla (ver inciso 3.3. Preparación de los agregados pétreos para la elaboración de las mezclas de concreto), dichos resultados fueron determinados por las variables planteadas en las hipótesis.

Para establecer una comparación entre las mezclas se fabricó una mezcla base (B1), la cual conservó la granulometría de sus agregados sin modificar, es decir se conservaron las características físicas de los bancos de origen, esta se tomó como referente en la comparación de los resultados obtenidos de las mezclas con la granulometría modificada (M1, M2, M3, M1A, M2A y M3A).

4.1. Revenimiento

El revenimiento es la primera medición que se hizo a las mezclas de concreto al momento de su fabricación, es importante señalar que la medición del revenimiento se considera como un indicador de la consistencia y, para ciertas mezclas, también puede ser indicativa de la trabajabilidad, por lo anterior se consideró importante medir este parámetro (Mather et al., 2004).

Antes de presentar los resultados obtenidos de las pruebas de revenimientos es importante mencionar las consideraciones que se tomaron en cuenta para la elaboración de las diferentes mezclas: primeramente, se fabricó la mezcla B1, la cual se elaboró con la proporción obtenida del diseño, pero al momento de medir el revenimiento este resultó menor de 10 cm por lo que se decidió aumentar la cantidad de agua y de cemento en una proporción de 0.585 (a/c=0.585) hasta obtener el revenimiento de 10 cm -Neville (1999) considera 10

cm como una trabajabilidad alta-, esto dio como resultado agregar un 23.276% más de agua y de cemento a la mezcla, tomando como referencia la mezcla B1 se decidió fabricar las mezclas M1, M2 y M3 con el porcentaje de agua y de cemento mencionado.

Tabla 4.1 Tabla que muestra el proporcionamiento utilizado en la fabricación de las mezclas de concreto y el revenimiento obtenido en las mezclas B1, M1, M2 y M3.

Material	Cantidades de material calculado para elaborar un m^3 (kg)			
	B1	M1	M2	M3
Cemento	421.470	421.470	421.470	421.470
Agua	246.560	246.560	246.560	246.560
Agregados grueso	910.672	963.345	962.290	951.862
Agregados fino	825.656	872.011	872.983	882.593
Revenimiento	**10**	**15**	**15**	**20**

Como se observa en la Tabla 4.1 los valores de los revenimientos obtenidos en las mezclas M1, M2 y sobretodo M3 exceden el valor del revenimiento esperado, esto pudo deberse a que la granulometría y el tamaño máximo del agregado afectan las porciones relativas, así como la trabajabilidad y los requisitos de agua y cemento (Kosmatka y Panarese, 1992). Además esto traería como consecuencia la segregación de los agregados al momento de vaciar el concreto (IMCYC, 2006).

Debido a lo anterior, con el fin de obtener un revenimiento de 10 cm, se decidió elaborar tres mezclas más (M1A, M2A y M3A) las cuales conservaron la granulometría y las cantidades de agregado grueso y fino de las mezclas M1, M2 y M3, con la única diferencia de haber modificado tanto la cantidad de agua como la de cemento guardando la relación a/c de 0.585. Obteniendo como resultado los siguientes porcentajes de incremento en agua y cemento para cada mezcla: para la mezcla M1A 11.638 %, para M2A 19.397 % y finalmente 11.638 % para M3A,

observando que el porcentaje tanto en M1A como en M3A es el mismo (ver Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Tabla que muestra el proporcionamiento utilizado en la fabricación de las mezclas de concreto y revenimiento obtenido en las mezclas M1A, M2A y M3A.

Material	Cantidades de material calculado para elaborar un m^3 (kg)		
	M1A	M2A	M3A
Cemento	381.668	408.195	381.668
Agua	223.276	238.794	223.276
Agregados grueso	963.345	962.290	951.862
Agregados fino	872.011	872.983	882.593
Revenimiento	**10**	**10**	**10**

En la Figura 4.1 se muestra la grafica que compara el porcentaje tanto de agua como de cemento añadido a las siete muestras así como el revenimiento correspondiente a estas. Como se observa en esta figura las mezclas que requirieron menos cantidad de agua y cemento fueron las mezclas M1A y M3A para obtener un revenimiento de 10 cm, mientras que la mezcla B1 requirió mayor cantidad de agua y cemento para conseguir un revenimiento de 10 cm y así obtener una trabajabilidad alta.

Por lo tanto se puede concluir que el comportamiento fue el esperado, ya que los cambios en la granulometría del agregado grueso afectan los requerimientos de agua y cemento y por lo tanto cambia la consistencia del concreto fresco (IMCYC, 2006), esto se debe a que mientras mayor superficie del agregado sea necesario cubrir con pasta, la mezcla tendrá menos fluidez (Alaejos y Fernández, 1996).

Para observar que las mezclas M1A y M3A tienen una granulometría modificada con mayor cantidad de partículas grandes se pueden consultar las Tablas 3.4 y 3.8.

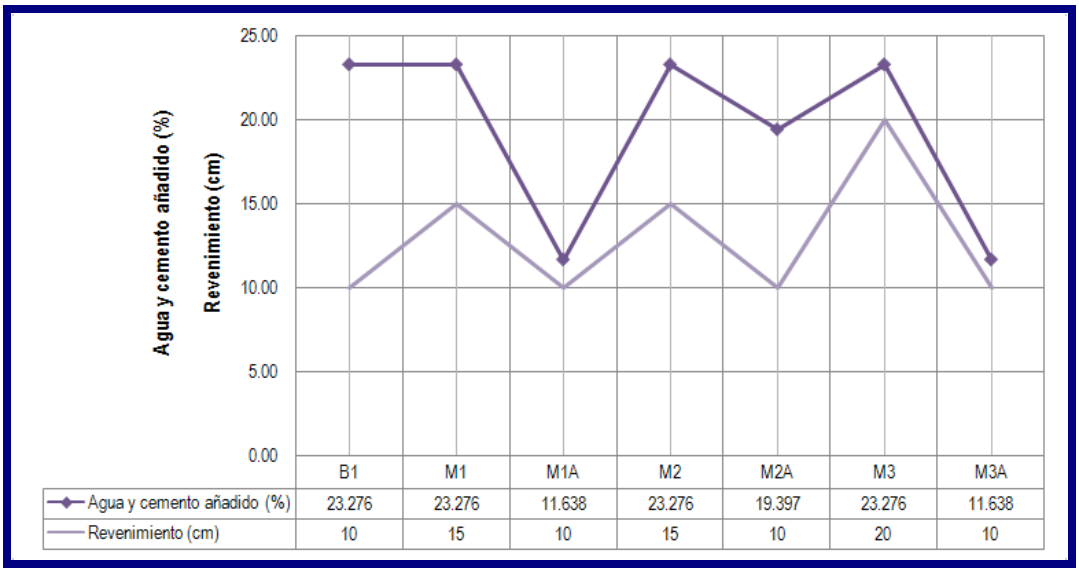


Figura 4.1 Grafica que muestra la cantidad de agua y cemento añadida a las diferentes mezclas elaboradas.

4.2. Resistencia a la compresión

Una de las propiedades más importantes del concreto y a la vez común es la resistencia a la compresión, esta propiedad depende en gran medida de la resistencia de la pasta de cemento y de la adherencia entre la pasta y el agregado (IMCYC, 2006).

En la Tabla 4.3, 4.4 y 4.5 se presentan los resultados promedio obtenidos de los cilindros de concreto sometidos a un esfuerzo de compresión simple, estos resultados fueron obtenidos en cilindros probados a diferentes edades los cuales fueron fabricados con las modificaciones en las curvas granulométricas de los agregados pétreos, estas modificaciones fueron descritas en el inciso 3.3 preparación de los agregados pétreos para la elaboración de las mezclas de

concreto. Además se presentan los valores correspondientes a la desviación estándar de los esfuerzos a compresión obtenidos.

La desviación estándar es un parámetro importante ya que es una medida que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable.

Análisis del esfuerzo a compresión de las mezclas B1, M1 y M1A

En siguiente tabla se muestran los esfuerzos a compresión correspondientes a las mezclas B1, M1 y M1A.

Tabla 4.3 Tabla que muestra los resultados promedio obtenidos de los cilindros de concreto sometidos a un esfuerzo de compresión simple y así como la desviación estándar para las mezclas B1, M1 y M1A.

Tipo de mezcla	Edad de los cilindros (Días)	Esfuerzo a la compresión promedio (kg/cm^2)	Desviación estándar (kg/cm^2)
B1	7	163.755	1.815
	14	198.237	2.680
	28	232.320	3.141
M1	7	134.569	1.921
	14	164.916	2.314
	28	208.393	2.925
M1A	7	167.240	2.906
	14	201.791	2.845
	28	227.321	3.205

En la Figura 4.2 se muestra el comportamiento que tuvieron las mezclas endurecidas, en esta grafica se puede observar que las mezclas M1 y M1A resultaron tener un esfuerzo a la compresión simple menor al que se obtuvo en la mezcla B1, por lo tanto se puede decir que la mezcla base fue superior a la

mezcla M1 en un 10.299 %, y con respecto a la mezcla M1A la mezcla B1 fue superior en un 2.152 %, aunque este último porcentaje fue muy pequeño aun así B1 tuvo un mejor desempeño que M1A.

Un punto importante a señalar es que la mezcla M1A a los 7 y 14 días fue levemente superior al esfuerzo de la mezcla base, sin embargo a la edad de 28 días B1 fue superior.

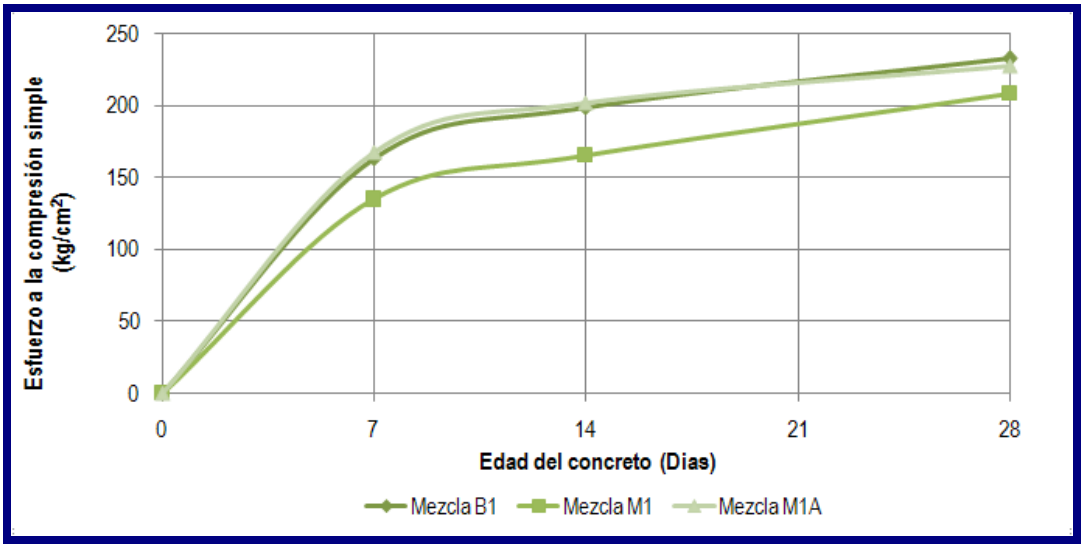


Figura 4.2 Grafica de esfuerzo a la compresión simple de las mezclas B1, M1 y M1A.

Análisis del esfuerzo a compresión de las mezclas B1, M2 y M2A

En Tabla 4.4 se muestran los valores del esfuerzo a compresión correspondientes a las mezclas B1, M2 y M2A.

Tabla 4.4 Tabla que muestra los resultados promedio obtenidos de los cilindros de concreto sometidos a un esfuerzo de compresión simple para las mezclas B1, M2 y M2A.

Tipo de mezcla	Edad de los cilindros (Días)	Esfuerzo a la compresión promedio (kg/cm^2)	Desviación estándar (kg/cm^2)	Coeficiente de variación
B1	7	163.755	1.815	1.109
	14	198.237	2.680	1.352
	28	232.320	3.141	1.352
M2	7	140.720	2.775	1.972
	14	172.487	2.519	1.460
	28	202.813	2.962	1.460
M2A	7	204.201	3.252	1.593
	14	252.861	2.645	1.046
	28	284.423	2.975	1.046

En la Figura 4.3 se observa el esfuerzo a la compresión de las mezclas B1, M2 y M2A, también se puede apreciar que M2 obtuvo un 12.701 % menos resistencia que la mezcla base y M2A fue la mezcla que obtuvo mayor resistencia a la compresión, es decir fue un 22.427 % mayor que B1.

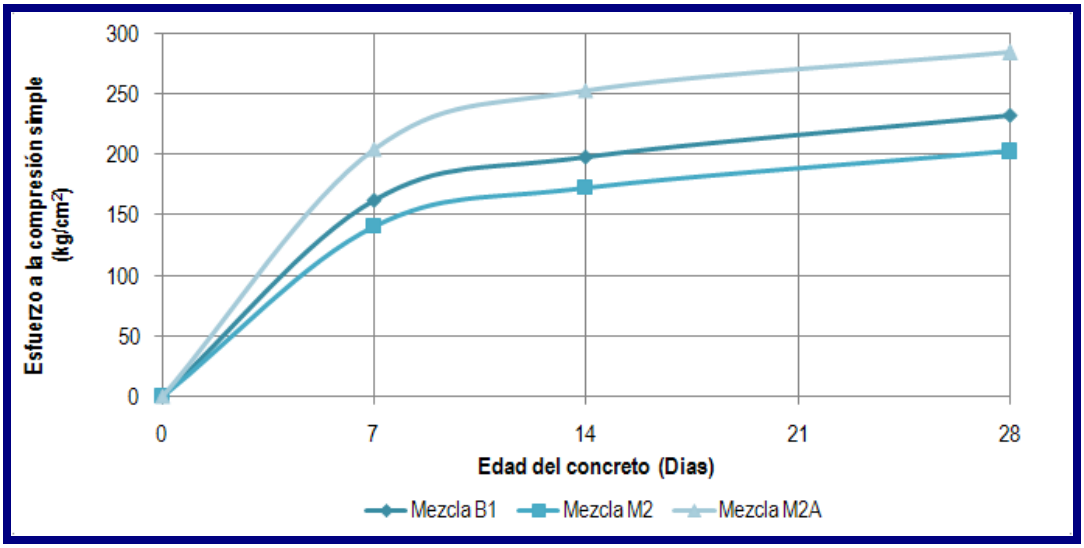


Figura 4.3 Grafica de esfuerzo a la compresión simple de las mezclas B1, M2 y M2A.

Análisis del esfuerzo a compresión de las mezclas B1, M3 y M3A

En Tabla 4.5 se presentan los esfuerzos de compresión correspondientes a las mezclas B1, M3 y M3A.

Tabla 4.5 Tabla que muestra los resultados promedio obtenidos de los cilindros de concreto sometidos a un esfuerzo de compresión simple para las mezclas B1, M3 y M3A.

Tipo de mezcla	Edad de los cilindros (Días)	Esfuerzo a la compresión promedio (kg/cm^2)	Desviación estándar (kg/cm^2)	Coeficiente de variación
B1	7	163.755	1.815	1.109
	14	198.237	2.680	1.352
	28	232.320	3.141	1.352
M3	7	143.343	2.792	1.948
	14	186.761	2.353	1.260
	28	213.916	2.695	1.260
M3A	7	179.994	2.743	1.524
	14	207.956	3.792	1.824
	28	243.006	4.432	1.824

En la Figura 4.4 se presenta el esfuerzo a la compresión de B1, M3 y M3A, se observa que la mezcla M3 fue la que presentó menos resistencia a la compresión y la mezcla M3A fue la que mostró mayor resistencia, es decir, M3 es un 7.922 % menor que la mezcla base y, M3A es un 4.600 % mayor que B1.

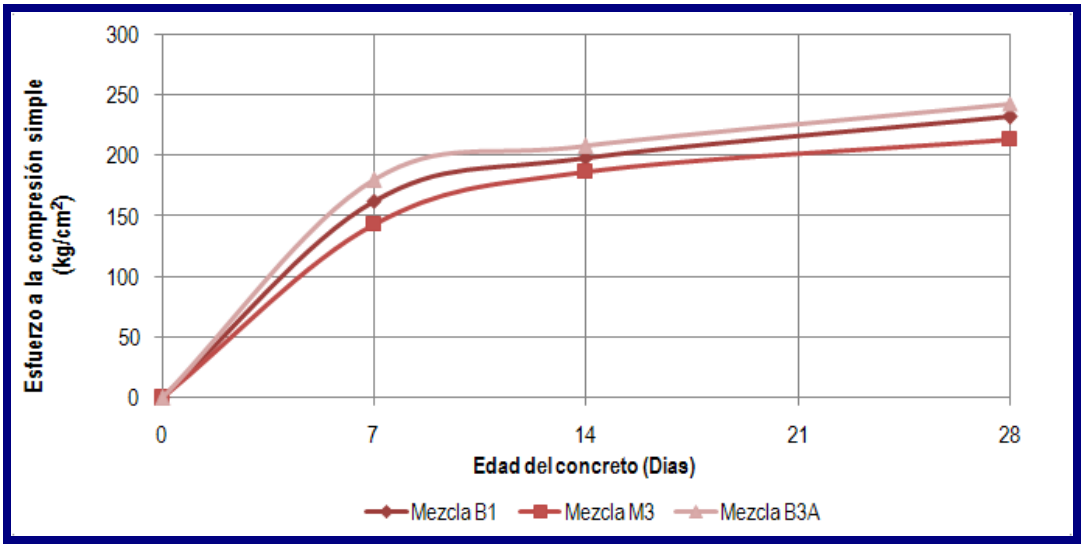


Figura 4.4 Grafica de esfuerzo a la compresión simple de las mezclas B1, M3 y M3A.

Resumen de los resultados de los esfuerzos a la compresión obtenidos de las diferentes mezclas

La Figura 4.5 muestra los resultados obtenidos del esfuerzo a la compresión de cada una de las mezclas que se fabricaron para la presente investigación, con la finalidad de hacer un análisis comparativo entre todas y cada una de ellas.

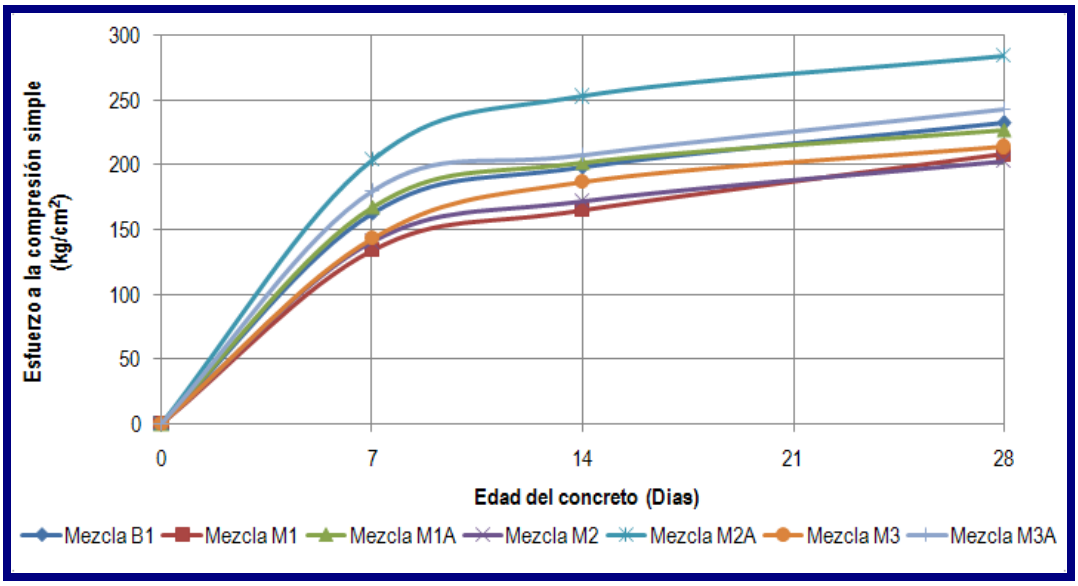


Figura 4.5 Grafica que concentra los esfuerzos a la compresión obtenidos de las diferentes mezclas.

Como se observa en la grafica la mezcla que presentó mayor resistencia a la compresión simple fue la M2A superando al resto de las mezclas claramente, también se puede observar que la mezcla con menor resistencia fue la M2 habiendo una diferencia de 28.693 % entre estas dos mezclas.

4.3. Porcentaje de vacíos

La compacidad del concreto es la propiedad más importante para los efectos de su resistencia a la penetración de los agentes agresivos externos. Esta es inversamente proporcional a la porosidad y mientras más alta sea la primera, es mayor el grado de protección del acero estructural contra los ataques de agentes agresivos.

El grado de protección que el concreto puede impartir al acero estructural, no está necesariamente en función del espesor de la capa de concreto, sino de su impermeabilidad a la humedad. Por tal motivo, una buena compacidad y homogeneidad del concreto proporcionarán al acero de refuerzo una adecuada protección, independientemente de su espesor (Carrión et al., 1999).

En la Tabla 4.6 se muestran los valores de los porcentajes de vacíos obtenidos para las diferentes muestras de concreto endurecido, además se presentan los diferentes pesos que ayudaron a determinar las propiedades que en esta tabla se presentan.

Tabla 4.6 Tabla que muestra los resultados promedio de los porcentajes de vacíos y otras propiedades de los concretos endurecidos para las diferentes mezclas.

Características físicas medidas	B1	M1	M1A	M2	M2A	M3	M3A
Pesos de las muestras (cortadas)							
Peso de la muestra seca al horno (kg)	722.230	772.234	819.652	785.346	826.570	795.541	806.266
Peso de la muestra saturada y superficialmente seca (kg)	802.078	854.581	892.046	868.872	895.716	874.519	878.960
Peso de la muestra saturada, hervida y superficialmente seca (kg)	802.659	854.706	892.255	868.479	895.156	872.708	878.566
Peso de la muestra sumergida en agua, después de saturada y saturada (kg)	414.644	471.989	494.789	479.711	497.066	483.822	482.345
Propiedades medidas							
Absorción después de la saturación (%)	11.071	10.676	8.852	10.635	8.378	9.958	9.024
Absorción después de saturación y hervido (%)	11.151	10.692	8.878	10.585	8.312	9.731	8.977
Densidad seca (adimensional)	1.861	2.018	2.062	2.020	2.076	2.046	2.035
Densidad después de saturación (adimensional)	2.067	2.233	2.244	2.235	2.250	2.249	2.218
Densidad después de saturación y hervido (adimensional)	2.068	2.234	2.244	2.234	2.249	2.245	2.217
Densidad aparente (adimensional)	2.348	2.572	2.522	2.570	2.509	2.552	2.489
Porcentaje de vacíos (%)	20.732	21.546	18.279	21.377	17.239	19.825	18.251
Resistencia a la compresión promedio a los 28 días							
Resistencia a la compresión (kg/cm^2)	232.320	208.393	227.321	202.813	284.423	213.916	243.006

El determinar el porcentaje de vacíos y por ende la compacidad fue de suma importancia para la investigación ya que se relacionó el esfuerzo a compresión con el porcentaje de vacíos, para tratar de determinar que a menor porosidad mayor es el esfuerzo a compresión y viceversa, esto se puede observar en la Figura 4.6.

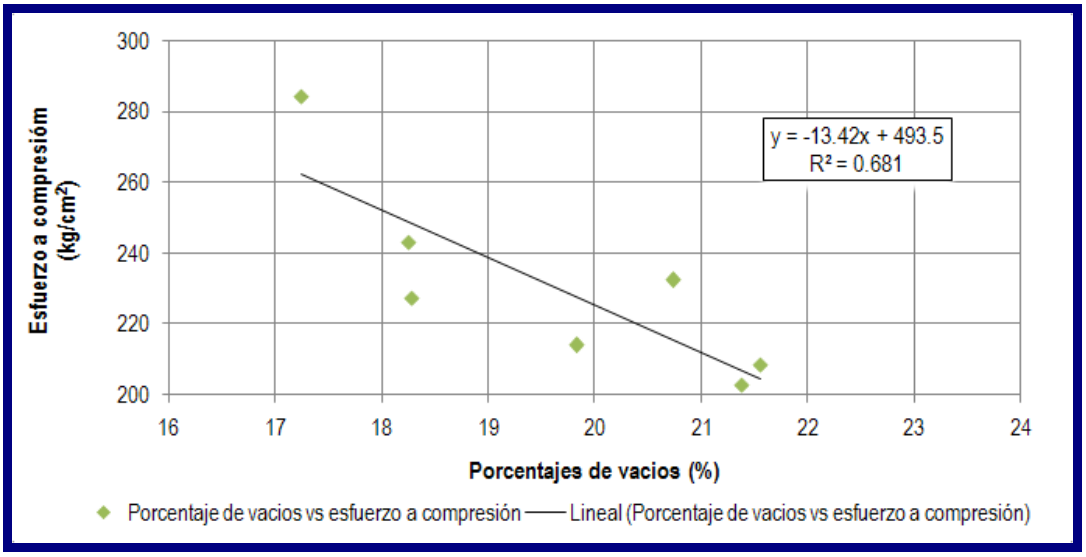


Figura 4.6 Grafica que muestra la relación de la porosidad con la resistencia a la compresión de las mezclas elaboradas.

En la Tabla 4.7 y en la Figura 4.7 se muestra la relación de las mezclas tanto base (B1) como las modificadas (M1A, M2A y M3A) las cuales tuvieron el mismo revenimiento de 10 cm y la única modificación que tuvieron fue la granulometría del agregado grueso, en la Figura 4.7 se observa que el porcentaje de vacíos esta relacionado directamente con la resistencia a la compresión, además se observa que para M1A y M3A el porcentaje de vacíos es similar, pero la diferencia de resistencias entre estos es significativa, y en otro caso se ve que B1 tiene mayor porosidad y ligeramente mayor resistencia que M1A.

Tabla 4.7 Tabla que muestra los resultados promedio de los porcentajes de vacios y resistencia a la compresión de las mezclas M2A, M3A, M1A y B1.

Mezclas modificas	Porcentaje de vacios (%)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm^2)
M2A	17.239	284.423
M3A	18.251	243.006
M1A	18.279	227.321
B1	20.732	232.320

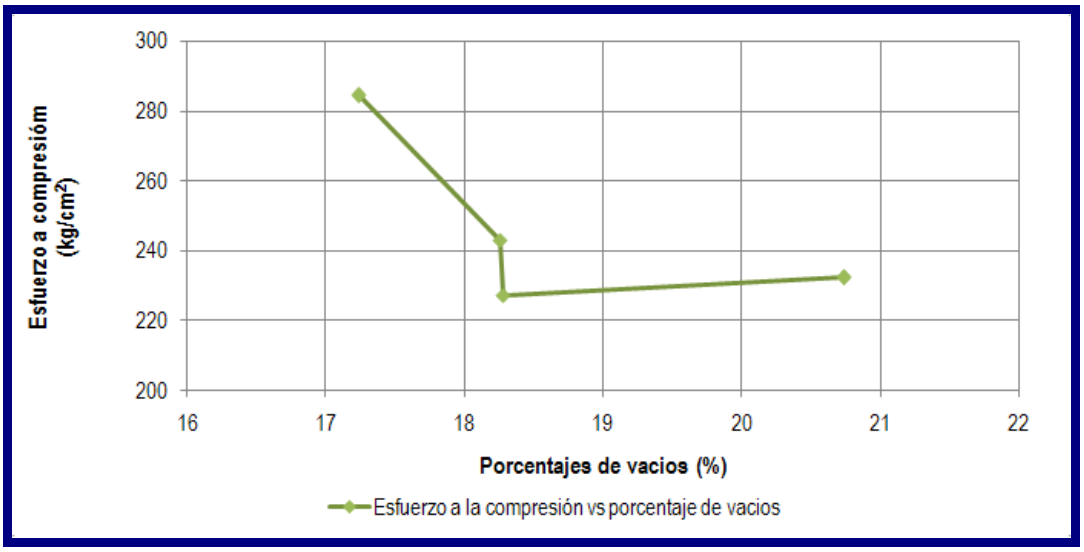


Figura 4.7 Grafica que muestra el esfuerzo a la compresión contra el porcentaje de vacios de las mezclas M2A, M3A, M1A y B1.

Por lo tanto se observa que la modificación de la granulometría del agregado tiene cierta influencia tanto en el porcentaje de vacíos como en la resistencia a la compresión.

4.4. Resistividad eléctrica en el concreto

La resistividad eléctrica del concreto es un parámetro que depende fundamentalmente del contenido de humedad y de los electrolitos presentes en el concreto (cloruros, sulfatos, etc.), así como de la estructura y la porosidad del concreto (Morris et al., 2002)

En la Tabla 4.8 se concentran los resultados de la prueba de resistividad para las diferentes mezclas fabricadas.

Tabla 4.8 Tabla que muestra los resultados promedio obtenidos de los cilindros de concreto sometidos a resistividad eléctrica.

Mezclas modificas	Área de la muestra (m^2)	Longitud muestra (m)	Lectura de la resistencia eléctrica (Ω)	Resistividad eléctrica (Ω·m)
B1	0.00771	0.04736	423.333	**68.857**
M1	0.00769	0.04970	560.000	**86.832**
M1A	0.00773	0.05102	643.333	**97.659**
M2	0.00771	0.04997	556.667	**85.934**
M2A	0.00773	0.05049	633.333	**94.509**
M3	0.00771	0.04978	506.667	**78.571**
M3A	0.00776	0.05052	640.000	**98.171**

Para el cálculo de la resistividad eléctrica se tomaron en cuenta los parámetros que se presentaron en la Tabla 4.8, como son área de la sección transversal de la muestra, longitud promedio de la muestra y lectura de la resistencia eléctrica. En esta tabla se observa que la resistividad eléctrica esta en un intervalo de 68.857 Ω·m hasta el valor más alto, el cual es de 98.171 Ω·m. se observa también que las muestras de concreto endurecido con los mas altos valores de resistividad son las modificas M1A, M2A y M3A, sin embargo se

observa que M3A es la muestra que presenta mayor resistividad y por lo tanto menor conductividad y porosidad, esto es debido a que teóricamente la resistividad en un material poroso se basa en la cantidad de aire o agua que se aloja en los poros y vasos capilares, por ello se estima que altas resistividades se relacionan con materiales menos poros y por lo tanto menos agua alojada.

Comparando los valores de resistividad con los resultados del porcentaje de vacíos, se observa que las muestras con mayor resistividad y menor porcentaje de vacios son la M1A, M2A y M3A, siendo estas las que tuvieron mejor resistencia al esfuerzo de compresión y un revenimiento de 10 cm.

5. CONCLUSIONES

Una vez obtenidos y analizados los resultados de esta investigación, se demostró que la trabajabilidad del concreto es afectada por las características de los agregados pétreos, como son el tamaño y la granulometría, esto se pudo apreciar en las mezclas en donde se modificó únicamente la granulometría y se mantuvieron los porcentajes de agua y cemento, conservando una relación de 0.585. Los agregados pétreos también influyeron en las características de los concretos en estado endurecido, ya que se pudieron observar variaciones significativas en la resistencia, porosidad y resistividad eléctrica, modificando la composición granulométrica de la mezcla y variando la cantidad de agua y cemento para obtener una trabajabilidad acorde a las necesidades.

Las mezclas que presentaron un mejor desempeño fueron la M2A y la M3A, la primera de ellas tuvo un 18.31 % mayor resistencia y un 3.15 % menor consumo de agua y cemento con respecto a B1; la mezcla M3A presentó un 3.40 % mayor resistencia a la compresión y un 9.44 % menor consumo de agua y cemento que la mezcla base.

Se demostró que al modificar las curvas granulométricas de los agregados pétreos es posible reducir el porcentaje de vacios y por consecuencia aumentar la compacidad y la resistencia en las mezclas de concreto endurecido.

Por los resultados obtenidos y por lo descrito anteriormente las mezclas M2A y M3A fueron las mezclas de mejor desempeño.

6. RECOMENDACIONES

A continuación se sugieren algunas recomendaciones que se pueden seguir para complementar esta investigación las cuales son:

1. Realizar pruebas de permeabilidad a las muestras de concreto endurecido elaboradas con la granulometría modificada.

2. Proponer otras curvas granulométricas fuera de los límites establecidos en esta investigación, con el fin de analizar el comportamiento de diferentes mezclas.

3. Se sugiere hacer un análisis petrográfico para analizar la distribución y comportamiento de los agregados en la matriz del concreto.

4. Es necesario desarrollar más trabajos experimentales para poder emplear las mediciones de resistividad como un indicador seguro de la porosidad en el concreto.

5. Se recomienda realizar un estudio de análisis de costos de producción de las mezclas de concreto fabricadas con las condiciones mencionadas en este trabajo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 311-99. 2002. Manual para Supervisar Obras de Concreto, American Concrete Institute.
- Alaejos P., Fernández M. 1996. High-performance concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning, ACI Materials journal.
- ASTM C 125. 2003. Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates
- ASTM C 127. 2001. Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
- ASTM C 128. 2001. Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of fine Aggregate.
- ASTM C 29. 2003. Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregates.
- ASTM C 33. 2003. Concrete Aggregates.
- ASTM C 39. 2003. Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM C 143. 2003. Slump of Hydraulic-Cement Concrete.
- ASTM C 566. 1997. Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying.
- ASTM C 642. 1997. Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- Carrión Villamontes Francisco Javier, Hernández Rivera Jaime, Acosta Esqueda Miguel Antonio. 1999. Estudios de corrosión en puentes de concreto pre-esforzado.
- Cerón M., Duarte F., Castillo W. 1996. Propiedades físicas de los agregados pétreos de la ciudad de Mérida. Boletín académico FIUADY.
- Cetin A., Carrasquillo R., 1998. High-performance concrete: influence of coarse aggregates on mechanical properties. ACI Materials journal.
- CFE. 1994. Manual de Tecnología del Concreto, Sección 1.
- Chan P. 1993. Quantitative analysis of aggregate shape based on fractals. ACI Materials journal.
- Chan Yam José Luís, Solís Carcaño Rómel, Moreno Eric Iván. 2003. Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto.

- Esqueda Huidobro Heraclio. 1994. Concreto arquitectónico.
- Ferguson Phil M. 1983. Fundamentos del concreto reforzado.
- Garnica Anguas Paul, Álvarez Manilla Aceves Alfonso, Báez Andrade Francisco Javier. 2001. Evaluación de la pérdida de resistencia en concretos asfálticos por contacto de sustancias agresivas.
- Gasulla Forner Manuel. 1999. Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales.
- Gómez C. José Gabriel. 1994. Historia del cemento y del concreto.
- Hernández-Castañeda O., Mendoza-Escobedo. 2005. Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico.
- Hornbostel. 2004. Materiales para construcción tipos, usos y aplicaciones.
- http://en.wikipedia.org/wiki/Cement. 2008.
- http://es.wikipedia.org/wiki/Resistividad. 2008.
- http://maps.google.com/maps?ll=20.600579,100.3808&z=12&hl=es&t=h. 2008.
- Idorn-Gunna M.I. 1992. Durabilidad del concreto y economía de recursos. Construcción y Tecnología.
- IMCYC. 2004. Practica para dosificar concreto norma, concreto pesado y concreto masivo ACI 211.
- IMCYC. 2002. Terminología del cemento y del concreto ACI 116 R-00.
- IMCYC. 2004. Conceptos básicos del concreto. capitulo 1
- IMCYC. 2006. Guía para uso de agregados ACI 221 R-01.
- Issa S.A., Islam M.S., Issa Ma.A., Yousif A.A., Issa Mo.A. 2000. Specimen and aggregate size effect on concrete compressive strength. Cement, concrete and aggregates.
- Kosmatka S., Panarese W. 1992. Diseño y control de mezclas de concreto. IMCYC.
- Kubler G. 1986. Arte y arquitectura en la América precolombina (Los pueblos mexicanos, mayas y andinos), Editorial Cátedra, S. A. Madrid.
- Marquina I. 1951. Arquitectura prehispanica. INAH.

- Mather B., Ozyildirim C. 2004. Cartilla del Concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).
- McCormac. 2005. Diseño de concreto reforzado.
- Mehta K., Monteiro P. 1998. Concreto, estructura, propiedades y materiales. IMCYC.
- Mehta-Kumar. 2001. Reducing the Enviromental Impact of Concrete. Concrete international.
- Mindess Sidney, Young J. Francis. 1981. Concreto.
- Moreno, E.I., Pérez, T., y Torres, A. 2001. Mecanismos de deterioro en ambientes marinos y urbanos, en Infraestructura de Concreto Armado: Deterioro y Opciones de Preservación. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Morris W., Vico A., Vazquez M. y Rosso S. 2002. Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity.
- Narayanan Neithalath, Jason Weiss, Jan Olek. 2006. Characterizing Enhanced Porosity Concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance.
- Neville A. 1999. Tecnología del concreto. IMCYC.
- Neville A. 2001. Maintenance and Durability of Concrete Structures. Concrete International.
- NOM C111. 1982. Especificaciones de agregados para concreto.
- NTCDF (Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción para el Distrito Federal). 2004.
- Özturan T., Çeçen C. 1997. Effect coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. Cement and concrete research.
- Parker Harry y Ambrose James, 2004. Diseño simplificado de concreto reforzado.
- Palbol L. 1996. Optimización de los agregados para concreto. Construcción y tecnología.
- Ramírez del Alba Horacio, Pérez Campos Ramiro y Díaz Coutiño Heriberto. 1999. El cemento y el concreto de los mayas, Ciencia Ergo Sum.

- SCT M-MMP 4 04 01. 2003. Cubrimiento de Asfalto Mediante el Método Ingles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. pp 1
- SCT M-MMP-2-02.058. 2004. Resistencia a la Compresión Simple de Cilindros de Concreto. Secretaria de Comunicaciones y Transportes
- SCT N-CMT-2-02.005. 2004. Calidad del Concreto Hidráulico. Secretaria de Comunicaciones y Transportes.
- SCT N-CMT-2-02-002. 2002. Calidad de Agregados Pétreos para Concreto Hidráulico. Secretaría de comunicaciones y transportes.
- SCT N-CMT-2-02-001. 2002. Calidad del Cemento Pórtland. Secretaria de comunicaciones y transportes
- SCT N-CMT-2-02-003. 2004. Calidad del Agua para Concreto Hidráulico. Secretaría de comunicaciones y transportes.
- SCT N-CTR-CAR-1-02-003. 2004. Concreto hidráulico. Secretaria de comunicaciones y transportes.
- Solís Carcaño R., Moreno E. 2005. Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo.
- Taylor-Peter C. 2002. Designing Concrete for Durability-A case Study. Concrete Inter-national.
- Troconis de Rincón O. 2000. Evaluation and Diagnosis of Corrosion in Reinforced Concrete Structures.
- Uribe R. 1991. El control de calidad en los agregados para concreto 3a parte. Construcción y tecnología.

Apéndice

Tipo de la mezcla	Edad del cilindro	Número de cilindro	Altura promedio (cm)	Peso del cilindro (kg)	Carga de ruptura (kg)	Área de la sección transversal (cm^2)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm^2)	Promedio (kg/cm^2)	Desviación estándar
B1	7	1	20.024	3.2430	12700	77.270	164.359	163.755	1.815
		6	20.121	3.2949	12300	78.166	~~157.358~~		
		12	20.062	3.2320	12800	76.946	166.351		
		1	20.020	3.2566	12515	77.553	161.378		
		6	20.069	3.2230	12926	79.028	163.560		
		12	20.118	3.2902	12721	77.978	163.130		
	14	2	20.052	3.2342	15250	77.553	196.639	198.237	2.680
		7	20.059	3.3234	15750	79.028	199.298		
		11	20.108	3.2776	15500	77.978	198.774		
		2	20.043	3.2338	15018	77.551	193.653		
		7	20.104	3.2784	15530	77.626	200.060		
		11	20.073	3.3230	15487	77.052	200.997		
	28	3	19.898	3.2230	17600	77.551	226.948	232.320	3.141
		5	20.015	3.2716	18200	77.626	234.457		
		10	20.019	3.2337	18150	77.052	235.555		
		3	19.978	3.2172	17872	77.553	230.447		
		5	19.909	3.2683	18458	79.028	233.563		
		10	20.046	3.2428	18165	77.978	232.950		

Tabla que muestra a detalle la determinación de los esfuerzos a compresión de la muestra B1 de concreto endurecido.

Características físicas medidas	Mezcla B1	Mezcla B1	Mezcla B1	Promedio
Pesos de las muestras (cortadas)				
Peso de la muestra seca al horno (kg)	708.550	708.840	749.300	722.230
Peso de la muestra saturada y superficialmente seca (kg)	790.250	789.873	826.110	802.078
Peso de la muestra saturada, hervida y superficialmente seca (kg)	790.790	790.387	826.800	802.659
Peso de la muestra sumergida en agua, después de saturada y saturada (kg)	403.333	405.233	435.367	414.644
Propiedades medidas				
Absorción después de la saturación (%)	11.531	11.432	10.251	11.071
Absorción después de saturación y hervido (%)	11.607	11.504	10.343	11.151
Densidad seca (adimensional)	1.829	1.840	1.914	1.861
Densidad después de saturación (adimensional)	2.040	2.051	2.110	2.067
Densidad después de saturación y hervido (adimensional)	2.041	2.052	2.112	2.068
Densidad aparente (adimensional)	2.321	2.335	2.387	2.348
Porcentaje de vacíos (%)	21.226	21.173	19.799	20.732

Tabla que muestra los valores del porcentaje de vacíos y otras propiedades de las muestra B1 de concreto endurecido.

Características físicas medidas	Mezcla B1	Mezcla B1	Mezcla B1	Promedio
Características físicas de las muestras (cortadas)				
Diámetro promedio de la muestra (m)	0.09920	0.09909	0.09892	0.09907
Área de la sección transversal de la muestra (m^2)	0.00773	0.00771	0.00768	0.00771
Longitud promedio de la muestra (m)	0.04136	0.05211	0.04862	0.04736
Lectura de la resistencia eléctrica (Ω)	360.000	450.000	460.000	423.334
Resistividad eléctrica (Ω·m)	67.26806	66.59255	72.71123	68.85728

Tabla que muestra la determinación de los valores de resistividad eléctrica de la muestra B1 de concreto endurecido.

Tipo de la mezcla	Edad del cilindro	Número de cilindro	Altura promedio (cm)	Peso del cilindro (kg)	Carga de ruptura (kg)	Área de la sección transversal (cm^2)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm^2)	Promedio (kg/cm^2)	Desviación estándar
M1	7	1	20.031	3.4766	8625	77.221	~~111.693~~	134.569	1.921
		6	20.048	3.4836	10550	77.910	135.412		
		12	20.004	3.4555	10500	76.757	136.796		
		1	20.005	3.4719	10224	77.190	132.450		
		6	20.027	3.4573	10583	79.206	133.616		
		12	20.049	3.4865	9185	77.952	~~117.835~~		
	14	2	20.027	3.4714	12800	77.190	165.826	164.916	2.314
		7	20.003	3.5676	13250	79.206	167.285		
		11	20.078	3.5235	11500	77.952	~~147.527~~		
		2	19.998	3.4727	12504	77.270	161.818		
		7	20.075	3.5208	12741	77.343	164.735		
		11	20.036	3.5690	11831	76.783	~~154.084~~		
	28	3	19.878	3.4544	15800	77.270	204.478	208.393	2.925
		5	19.994	3.4756	16100	77.343	208.164		
		10	20.027	3.4994	14950	76.783	~~194.706~~		
		3	19.966	3.4540	16174	77.190	209.542		
		5	19.888	3.4990	16743	79.206	211.386		
		10	20.045	3.4765	14532	77.952	~~186.419~~		

Tabla que muestra a detalle la determinación de los esfuerzos a compresión de la mezcla M1.

Características físicas medidas	Mezcla M1	Mezcla M1	Mezcla M1	Promedio
Pesos de las muestras (cortadas)				
Peso de la muestra seca al horno (kg)	748.440	773.533	794.730	772.234
Peso de la muestra saturada y superficialmente seca (kg)	830.977	861.163	871.603	854.581
Peso de la muestra saturada, hervida y superficialmente seca (kg)	831.480	860.250	872.387	854.706
Peso de la muestra sumergida en agua, después de saturada y saturada (kg)	455.867	468.467	491.633	471.989
Propiedades medidas				
Absorción después de la saturación (%)	11.028	11.329	9.673	10.676
Absorción después de saturación y hervido (%)	11.095	11.211	9.771	10.692
Densidad seca (adimensional)	1.993	1.974	2.087	2.018
Densidad después de saturación (adimensional)	2.212	2.198	2.289	2.233
Densidad después de saturación y hervido (adimensional)	2.214	2.196	2.291	2.234
Densidad aparente (adimensional)	2.558	2.536	2.622	2.572
Porcentaje de vacíos (%)	22.108	22.134	20.396	21.546

Tabla que muestra los valores del porcentaje de vacíos y otras propiedades de las muestra M1 de concreto endurecido.

Características físicas medidas	Mezcla M1	Mezcla M1	Mezcla M1	Promedio
Caracteristicas fisicas de las muestras (cortadas)				
Diametro promedio de la muestra (m)	0.09894	0.09907	0.09890	0.09897
Área de la sección transversal de la muestra (m^2)	0.00769	0.00771	0.00768	0.00769
Longitud promedio de la muestra (m)	0.04978	0.05071	0.04860	0.04970
Lectura de la resistencia electrica (Ω)	510.000	530.000	640.000	560.000
Resistividad eléctrica (Ω·m)	78.76785	80.57487	101.15381	86.83218

Tabla que muestra la determinación de los valores de resistividad eléctrica de la muestra M1 de concreto endurecido.

Tipo de la mezcla	Edad del cilindro	Número de cilindro	Altura promedio (cm)	Peso del cilindro (kg)	Carga de ruptura (kg)	Área de la sección transversal (cm^2)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm^2)	Promedio (kg/cm^2)	Desviación estándar
M1A	7	1	19.970	3.5676	12700	79.038	~~160.682~~	167.240	2.906
		6	19.982	3.5583	13550	78.957	171.613		
		12	19.976	3.5630	13125	78.997	166.145		
		1	19.970	3.5630	13009	79.075	164.516		
		6	19.976	3.5583	13462	79.809	168.676		
		12	19.982	3.5676	13133	79.472	165.248		
	14	2	19.974	3.5876	15800	79.075	199.811	201.791	2.845
		7	20.001	3.5984	16350	79.809	204.863		
		11	20.012	3.5933	15950	79.472	200.700		
		2	19.976	3.5877	15712	79.485	197.675		
		7	20.015	3.5931	16156	79.059	204.354		
		11	19.996	3.5985	16200	79.670	203.345		
	28	3	19.997	3.5869	17700	79.485	222.683	227.321	3.205
		5	20.032	3.5692	18200	79.059	230.208		
		10	19.938	3.5956	18250	79.670	229.071		
		3	19.989	3.5704	17799	79.075	225.090		
		5	19.942	3.5974	18419	79.809	230.781		
		10	20.036	3.5839	17968	79.472	226.091		

Tabla que muestra a detalle la determinación de los esfuerzos a compresión de la mezcla M1A.

Características físicas medidas	Mezcla M1A	Mezcla M1A	Mezcla M1A	Promedio
Pesos de las muestras (cortadas)				
Peso de la muestra seca al horno (kg)	786.590	813.883	858.483	819.652
Peso de la muestra saturada y superficialmente seca (kg)	860.947	887.090	928.100	892.046
Peso de la muestra saturada, hervida y superficialmente seca (kg)	861.263	887.023	928.480	892.255
Peso de la muestra sumergida en agua, después de saturada y saturada (kg)	471.933	488.867	523.567	494.789
Propiedades medidas				
Absorción después de la saturación (%)	9.453	8.995	8.109	8.852
Absorción después de saturación y hervido (%)	9.493	8.987	8.154	8.878
Densidad seca (adimensional)	2.020	2.044	2.120	2.062
Densidad después de saturación (adimensional)	2.211	2.228	2.292	2.244
Densidad después de saturación y hervido (adimensional)	2.212	2.228	2.293	2.244
Densidad aparente (adimensional)	2.500	2.504	2.563	2.522
Porcentaje de vacíos (%)	19.180	18.370	17.287	18.279

Tabla que muestra los valores del porcentaje de vacíos y otras propiedades de las muestra M1A de concreto endurecido.

Características físicas medidas	Mezcla M1A	Mezcla M1A	Mezcla M1A	Promedio
Características físicas de las muestras (cortadas)				
Diámetro promedio de la muestra (m)	0.09930	0.09917	0.09923	0.09923
Área de la sección transversal de la muestra (m^2)	0.00774	0.00772	0.00773	0.00773
Longitud promedio de la muestra (m)	0.05121	0.05206	0.04978	0.05102
Lectura de la resistencia eléctrica (Ω)	680.000	580.000	670.000	643.334
Resistividad eléctrica (Ω·m)	102.83872	86.05162	104.08685	97.65906

Tabla que muestra la determinación de los valores de resistividad eléctrica de la muestra M1A de concreto endurecido.

Tipo de la mezcla	Edad del cilindro	Número de cilindro	Altura promedio (cm)	Peso del cilindro (kg)	Carga de ruptura (kg)	Área de la sección transversal (cm^2)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm^2)	Promedio (kg/cm^2)	Desviación estándar
B1	7	1	20.089	3.4740	10750	77.371	138.940	140.720	2.775
		6	20.079	3.4784	10700	78.210	136.811		
		12	20.016	3.4617	11050	77.026	143.458		
		1	20.021	3.4714	10851	76.576	141.697		
		6	20.061	3.4627	11299	79.185	142.694		
		12	20.101	3.4800	10443	77.457	~~134.818~~		
	14	2	20.026	3.4768	13300	76.576	173.684	172.487	2.519
		7	20.046	3.5638	13850	79.185	174.907		
		11	20.115	3.5032	12800	77.457	~~165.253~~		
		2	20.015	3.4700	13055	77.587	168.259		
		7	20.109	3.5146	13395	77.465	172.916		
		11	20.062	3.5592	13310	77.083	172.669		
	28	3	19.892	3.4636	15350	77.587	197.842	202.813	2.962
		5	20.043	3.4859	15750	77.465	203.318		
		10	20.039	3.4554	15650	77.083	203.027		
		3	19.991	3.4525	15638	76.576	204.222		
		5	19.905	3.4841	16285	79.185	205.658		
		10	20.077	3.4683	15050	77.457	~~194.307~~		

Tabla que muestra a detalle la determinación de los esfuerzos a compresión de la mezcla M2.

Características físicas medidas	Mezcla M2	Mezcla M2	Mezcla M2	Promedio
Pesos de las muestras (cortadas)				
Peso de la muestra seca al horno (kg)	785.623	786.237	784.177	785.346
Peso de la muestra saturada y superficialmente seca (kg)	870.497	872.103	864.017	868.872
Peso de la muestra saturada, hervida y superficialmente seca (kg)	870.493	872.227	862.717	868.479
Peso de la muestra sumergida en agua, después de saturada y saturada (kg)	479.100	479.667	480.367	479.711
Propiedades medidas				
Absorción después de la saturación (%)	10.803	10.921	10.181	10.635
Absorción después de saturación y hervido (%)	10.803	10.937	10.016	10.585
Densidad seca (adimensional)	2.007	2.003	2.051	2.020
Densidad después de saturación (adimensional)	2.224	2.222	2.260	2.235
Densidad después de saturación y hervido (adimensional)	2.224	2.222	2.256	2.234
Densidad aparente (adimensional)	2.563	2.565	2.581	2.570
Porcentaje de vacíos (%)	21.684	21.905	20.541	21.377

Tabla que muestra los valores del porcentaje de vacíos y otras propiedades de las muestra M2 de concreto endurecido.

Características físicas medidas	Mezcla M2	Mezcla M2	Mezcla M2	Promedio
Características físicas de las muestras (cortadas)				
Diámetro promedio de la muestra (m)	0.09919	0.09903	0.09894	0.09905
Área de la sección transversal de la muestra (m^2)	0.00773	0.00770	0.00769	0.00771
Longitud promedio de la muestra (m)	0.05085	0.05007	0.04898	0.04997
Lectura de la resistencia eléctrica (Ω)	540.000	520.000	610.000	556.667
Resistividad eléctrica (Ω·m)	82.05680	79.99515	95.75138	85.93444

Tabla que muestra la determinación de los valores de resistividad eléctrica de la muestra M2 de concreto endurecido.

Tipo de la mezcla	Edad del cilindro	Número de cilindro	Altura promedio (cm)	Peso del cilindro (kg)	Carga de ruptura (kg)	Área de la sección transversal (cm^2)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm^2)	Promedio (kg/cm^2)	Desviación estándar
M2A	7	1	20.044	3.5516	15602	79.175	~~197.058~~	204.201	3.252
		6	20.009	3.5488	15800	78.875	200.316		
		12	19.994	3.5709	17350	79.183	~~219.114~~		
		1	19.990	3.5571	16091	79.375	202.724		
		6	20.016	3.5451	16538	79.862	207.083		
		12	20.041	3.5691	16457	79.625	206.680		
	14	2	20.002	3.5876	19800	79.375	249.450	252.861	2.645
		7	19.993	3.5976	20350	79.862	254.814		
		11	19.943	3.5601	20250	79.625	254.318		
		2	19.947	3.5623	19870	79.554	249.766		
		7	20.011	3.5818	20270	79.290	255.641		
		11	19.979	3.6012	20181	79.712	253.174		
	28	3	20.044	3.6002	22350	79.554	280.943	284.423	2.975
		5	20.020	3.5673	22800	79.290	287.551		
		10	19.925	3.5910	22700	79.712	284.776		
		3	19.996	3.5692	22271	79.375	280.587		
		5	19.933	3.6031	22890	79.862	286.620		
		10	20.059	3.5862	22778	79.625	286.062		

Tabla que muestra a detalle la determinación de los esfuerzos a compresión de la mezcla M2A.

Características físicas medidas	Mezcla M2A	Mezcla M2A	Mezcla M2A	Promedio
Pesos de las muestras (cortadas)				
Peso de la muestra seca al horno (kg)	806.033	823.237	850.440	826.570
Peso de la muestra saturada y superficialmente seca (kg)	879.173	892.553	915.423	895.716
Peso de la muestra saturada, hervida y superficialmente seca (kg)	879.183	891.817	914.467	895.156
Peso de la muestra sumergida en agua, después de saturada y saturada (kg)	484.333	496.033	510.833	497.066
Propiedades medidas				
Absorción después de la saturación (%)	9.074	8.420	7.641	8.378
Absorción después de saturación y hervido (%)	9.075	8.331	7.529	8.312
Densidad seca (adimensional)	2.041	2.080	2.107	2.076
Densidad después de saturación (adimensional)	2.227	2.255	2.268	2.250
Densidad después de saturación y hervido (adimensional)	2.227	2.253	2.266	2.249
Densidad aparente (adimensional)	2.506	2.516	2.504	2.509
Porcentaje de vacíos (%)	18.526	17.328	15.863	17.239

Tabla que muestra los valores del porcentaje de vacíos y otras propiedades de las muestra M2A de concreto endurecido.

Características físicas medidas	Mezcla M2A	Mezcla M2A	Mezcla M2A	Promedio
Características físicas de las muestras (cortadas)				
Diámetro promedio de la muestra (m)	0.09915	0.09914	0.09925	0.09918
Área de la sección transversal de la muestra (m^2)	0.00772	0.00772	0.00774	0.00773
Longitud promedio de la muestra (m)	0.04978	0.05130	0.05038	0.05049
Lectura de la resistencia eléctrica (Ω)	570.000	690.000	640.000	633.334
Resistividad eléctrica (Ω·m)	86.02680	103.83267	93.66856	94.50935

Tabla que muestra la determinación de los valores de resistividad eléctrica de la muestra M2A de concreto endurecido.

Tipo de la mezcla	Edad del cilindro	Número de cilindro	Altura promedio (cm)	Peso del cilindro (kg)	Carga de ruptura (kg)	Área de la sección transversal (cm^2)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm^2)	Promedio (kg/cm^2)	Desviación estándar
M3	7	1	20.018	3.5038	11700	77.473	~~151.021~~	143.343	2.792
		6	20.023	3.4788	11400	77.553	146.996		
		12	19.982	3.5006	9800	76.348	~~128.359~~		
		1	19.986	3.4944	11034	76.594	144.056		
		6	20.008	3.4808	11149	78.962	141.191		
		12	20.030	3.5080	10957	77.639	141.129		
	14	2	19.994	3.4938	14400	76.594	188.005	186.761	2.353
		7	19.979	3.5401	14550	78.962	184.266		
		11	20.040	3.4933	14300	77.639	184.185		
		2	19.973	3.4822	14580	77.088	189.134		
		7	20.036	3.5091	14536	77.234	188.213		
		11	20.004	3.5359	13794	77.016	~~179.110~~		
	28	3	19.874	3.4705	16700	77.088	216.635	213.916	2.695
		5	19.991	3.4728	16650	77.234	215.580		
		10	19.992	3.4689	15800	77.016	~~205.153~~		
		3	19.952	3.4688	16494	76.594	215.341		
		5	19.884	3.4727	16666	78.962	211.059		
		10	20.020	3.4707	16379	77.639	210.966		

Tabla que muestra a detalle la determinación de los esfuerzos a compresión de la mezcla M3.

Características físicas medidas	Mezcla M3	Mezcla M3	Mezcla M3	Promedio
Pesos de las muestras (cortadas)				
Peso de la muestra seca al horno (kg)	774.807	786.507	825.310	795.541
Peso de la muestra saturada y superficialmente seca (kg)	858.820	870.560	894.177	874.519
Peso de la muestra saturada, hervida y superficialmente seca (kg)	856.570	869.467	892.087	872.708
Peso de la muestra sumergida en agua, después de saturada y saturada (kg)	465.767	476.700	509.000	483.822
Propiedades medidas				
Absorción después de la saturación (%)	10.843	10.687	8.344	9.958
Absorción después de saturación y hervido (%)	10.553	10.548	8.091	9.731
Densidad seca (adimensional)	1.983	2.002	2.154	2.046
Densidad después de saturación (adimensional)	2.198	2.216	2.334	2.249
Densidad después de saturación y hervido (adimensional)	2.192	2.214	2.329	2.245
Densidad aparente (adimensional)	2.507	2.539	2.609	2.552
Porcentaje de vacíos (%)	20.922	21.122	17.431	19.825

Tabla que muestra los valores del porcentaje de vacíos y otras propiedades de las muestra M3 de concreto endurecido.

Características físicas medidas	Mezcla M3	Mezcla M3	Mezcla M3	Promedio
Características físicas de las muestras (cortadas)				
Diámetro promedio de la muestra (m)	0.09924	0.09906	0.09896	0.09909
Área de la sección transversal de la muestra (m^2)	0.00773	0.00771	0.00769	0.00771
Longitud promedio de la muestra (m)	0.05068	0.05029	0.04836	0.04978
Lectura de la resistencia eléctrica (Ω)	480.000	510.000	530.000	506.667
Resistividad eléctrica (Ω·m)	73.25521	78.16610	84.29152	78.57094

Tabla que muestra la determinación de los valores de resistividad eléctrica de la muestra M3 de concreto endurecido.

Tipo de la mezcla	Edad del cilindro	Número de cilindro	Altura promedio (cm)	Peso del cilindro (kg)	Carga de ruptura (kg)	Área de la sección transversal (cm^2)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm^2)	Promedio (kg/cm^2)	Desviación estándar
M3A	7	1	20.047	3.5391	14000	79.075	177.048	179.994	2.743
		6	20.008	3.5807	13600	79.169	171.784		
		12	20.017	3.5195	14500	79.438	182.533		
		1	20.004	3.5464	13551	79.259	170.969		
		6	20.024	3.5152	14237	79.857	178.280		
		12	20.045	3.5777	14494	79.588	182.115		
	14	2	20.004	3.5451	15800	79.259	199.347	207.956	3.792
		7	20.032	3.5972	16600	79.857	207.872		
		11	19.980	3.5529	16900	79.588	212.344		
		2	19.980	3.5370	16260	79.591	204.290		
		7	20.032	3.5651	16687	79.033	211.145		
		11	20.006	3.5932	16260	79.654	204.128		
	28	3	20.048	3.5787	19000	79.591	238.722	243.006	4.432
		5	20.033	3.5505	19500	79.033	246.733		
		10	19.964	3.6015	19000	79.654	238.532		
		3	20.015	3.5514	18463	79.259	232.946		
		5	19.970	3.6024	19398	79.857	242.908		
		10	20.060	3.5769	19748	79.588	248.134		

Tabla que muestra a detalle la determinación de los esfuerzos a compresión de la mezcla M3A.

Características físicas medidas	Mezcla M3A	Mezcla M3A	Mezcla M3A	Promedio
Pesos de las muestras (cortadas)				
Peso de la muestra seca al horno (kg)	789.247	802.373	827.177	806.266
Peso de la muestra saturada y superficialmente seca (kg)	864.110	875.547	897.223	878.960
Peso de la muestra saturada, hervida y superficialmente seca (kg)	864.577	874.787	896.333	878.566
Peso de la muestra sumergida en agua, después de saturada y saturada (kg)	471.067	477.667	498.300	482.345
Propiedades medidas				
Absorción después de la saturación (%)	9.485	9.120	8.468	9.024
Absorción después de saturación y hervido (%)	9.545	9.025	8.360	8.977
Densidad seca (adimensional)	2.006	2.020	2.078	2.035
Densidad después de saturación (adimensional)	2.196	2.205	2.254	2.218
Densidad después de saturación y hervido (adimensional)	2.197	2.203	2.252	2.217
Densidad aparente (adimensional)	2.481	2.471	2.515	2.489
Porcentaje de vacíos (%)	19.143	18.235	17.374	18.251

Tabla que muestra los valores del porcentaje de vacíos y otras propiedades de las muestra M3A de concreto endurecido.

Características físicas medidas	Mezcla M3A	Mezcla M3A	Mezcla M3A	Promedio
Características físicas de las muestras (cortadas)				
Diámetro promedio de la muestra (m)	0.09932	0.09949	0.09931	0.09937
Área de la sección transversal de la muestra (m^2)	0.00775	0.00777	0.00775	0.00776
Longitud promedio de la muestra (m)	0.05082	0.04994	0.05079	0.05052
Lectura de la resistencia eléctrica (Ω)	590.000	550.000	780.000	640.000
Resistividad eléctrica (Ω·m)	89.94561	85.61758	118.94972	98.17097

Tabla que muestra la determinación de los valores de resistividad eléctrica de la muestra M3A de concreto endurecido.

Anexos

Algoritmo para el diseño de mezclas de concreto con base en método del ACI

Dosificación de mezclas de concreto aplicando el método del ACI 211.

Determinación de las propiedades físicas de los agregados pétreos.

Agregado fino:

- Porcentaje de humedad
- Peso volumétrico seco y compacto.
- Modulo de finura.
- Porcentaje de absorción
- Densidad relativa.

Agregado grueso:

- Porcentaje de humedad.
- Peso volumétrico seco y compacto.
- Tamaño máximo nominal.
- Porcentaje de absorción.
- Densidad relativa

1. Selección de revenimiento

Se selecciona del revenimiento con base en la Tabla 3.13 de acuerdo con el tipo de elemento que se desea fabricar.

2. Estimación de la cantidad de agua para el mezclado

Con el tamaño máximo nominal del agregado grueso y con la selección de revenimiento se determina el agua de mezclado con ayuda de la Tabla 3.14.

3. Selección de la relación agua/cemento

Se toma en cuenta el grado de supervisión que se va a tener durante la elaboración y colocación de la mezcla, y dependiendo de esto se aumenta la resistencia de proyecto de acuerdo a las condiciones siguientes:

fcr = f´c + 25 kg/cm^2	Buena supervisión.
fcr = f´c + 25 kg/cm^2	Regular supervisión.
fcr = f´c + 25 kg/cm^2	Nula supervisión.

Una vez calculado el fcr se procede a determinar la relación agua/cemento dependiendo de la resistencia a la compresión a los 28 días (ver Tabla 3.16).

4. Cálculo de la cantidad de cemento

Una vez que se obtiene la cantidad de agua (paso 2) y la relación agua/cemento (paso 3) se determina la cantidad de cemento de acuerdo a la siguiente ecuación:

cemento = agua / relación a/c

5. Estimación de la cantidad de agregado grueso

Con ayuda de la Tabla 3.18 y con los valores del tamaño máximo nominal y el módulo de finura se determina el volumen del agregado grueso para un metro cúbico de concreto.

Con el volumen del agregado grueso se determina el peso del agregado con ayuda de la siguiente ecuación:

$$Pg = (Vg)*(PVSCg),$$

donde:

Pg es el peso del agregado grueso;

Vg es el volumen del agregado grueso;

PVSCg es el peso volumétrico seco y compacto del agregado grueso.

6. Estimación de la cantidad de agregado fino

Conocidas las cantidades de agua (paso 2), cemento (paso 4), la cantidad de agregado grueso (paso 5) y sus respectivas densidades, se determina el volumen del agregado fino con ayuda de la siguiente ecuación:

$$Va = 1000 - (Pc/Dc + PA/DA + Pg/Dg),$$

donde:

Va es el volumen del agregado fino;

Pc es el peso del cemento calculado;

PA es el peso del agua calculado;

Pg es el peso del agregado grueso;

Dc es la densidad del cemento (3.15);

DA es la densidad del agua (1.00);

Dg es la densidad del agregado grueso.

Determinado el volumen del agregado fino se procede a conocer el peso de este, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Pa = (Va)*(Da),$$

donde:

Da es la densidad del agregado fino.

7. Corrección por humedad de los agregados

Antes de la elaboración de la mezcla de concreto se determina el porcentaje de humedad presente en los agregados pétreos, así como la absorción de estos, con la finalidad de conocer la cantidad de agua libre en los agregados, esto se obtiene como sigue:

Cantidad de agua libre = % de humedad - % de absorción

Determinada la cantidad de agua libre tanto para el agregado grueso como fino se procede a corregir por humedad a estos agregados de la siguiente forma:

Agua corregida = Agua calculada-[(Cant. de grava calculada)*(% agua libre grava)- (Cant. de arena calculada)*(% agua libre arena)],

Arena corregida = Cant. de arena calculada + [(Cant. de arena calculada)*(% de humedad de la arena)],

Grava corregida = Cant. de grava calculada + [(Cant. de grava calculada)*(% de humedad de la grava)].

8. Proporciona-miento

Para determinar las proporciones en peso se aplica la siguiente ecuación para cada uno de los materiales:

Proporciones en peso = Peso del material corregido por humedad / Peso del cemento calculado.

Las cantidades en kg, por saco de 50 kg se determinan de la siguiente forma:

Cantidades en kg por saco de 50 kg = (50)*(Proporciones en peso).

Los volúmenes aparentes por saco en litros = (Cant. en kg por saco de 50 kg / Peso volumétrico seco y compacto)*(1000).

Nota: Para el cemento el peso volumétrico seco y compacto se considero de 1515.

Cantidades en botes alcoholeros =Volúmenes aparentes por saco en litros / Volúmenes de botes en litros

9. Ajustes a las mezclas de prueba

Para determinar las cantidades de material que se utilizara en el laboratorio se hace lo siguiente:

Se determina el volumen del cilindro a utilizar, considerando un 20 % más del volumen calculado (desperdicio).

Se obtiene la cantidad de mezcla para todos los cilindros, multiplicando el número de cilindros a utilizar por el volumen de uno de estos.

Se determina la cantidad de cemento que se utilizará aplicando la siguiente ecuación:

Cantidad de cemento = [(Cant. de cemento calculada (paso 4))*(Cant. de mezcla para todos los cilindros)] / 1000

Para obtener las cantidades de material de los cilindros a fabricar se aplica la siguiente ecuación:

Cantidades de material = (Proporciones en peso)*(Cantidad de cemento)