

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



“Influencia de la Morfología de Pétreos: Volcánicos, Triturados y Cantos Rodados; correlacionando matemáticamente los Módulos de Elasticidad, Estático y Dinámico, en cilindros de concreto de 10cm x 20cm”

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTA

Nalleli de Jesús Alvarado Alcaraz

ASESOR DE TESIS

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

COASESOR DE TESIS

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

Morelia, Michoacán, México, Noviembre de 2010





Dedicatorias

A DIOS:

Por permitirme llegar a este momento tan importante y especial en mi vida, por ser amparo y fortaleza en los momentos difíciles y por hacer palpable su amor a través de cada una de las personas que me ayudaron desinteresadamente.

A MIS PADRES:

Por ser mis amigos, mis guías, mis apoyos incondicionales, mis maestros y mi orgullo, por estar siempre ahí cuando más los he necesitado, por haberse sacrificado tanto para darme una excelente vida y por hacerme sentir siempre lo más importante en su vida. ¡Los Quiero Mucho!

AL FLAQUITO DE MI ERICK:

Por ser la persona que me ha impulsado a ser mejor mujer, ser mejor amiga, mejor hermana y mejor hija, por todos aquellos momentos en que me ha hecho sentirme única y especial y por demostrarme que su apoyo y amor es incondicional. ¡Te Amo!

A MIS HERMANOS:

Que aunque ya no vivamos juntos, siguen siendo una parte muy importante de mi vida, son la sonrisa de mi pasado, las ganas de vivir de mi presente y el orgullo de mi futuro.

A MIS SOBRINOS JUAN, VALERIA, ALEX Y JENNY:

Por ser esas personitas únicas y especiales que con una simple mirada te alegran el día y que con una sencilla sonrisa te cambian la vida.



Agradecimientos

A mis padres y a Erick, ya que sin su enorme ayuda, esfuerzo, entrega y amor esta tesis no habría sido posible.

A mi asesora de tesis y amiga, Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por la gran confianza que ha tenido en mí, por la motivación, consejos y enseñanzas que me sirvieron de herramientas para la realización de esta tesis.

Al M. A. Ing. Wilfrido Martínez Molina, por su asesoramiento en bibliografía y por la paciencia que me tuvo al responder mis dudas.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Rúelas”, Sección de Resistencia de Materiales, por las instalaciones y equipos facilitados.

A la Universidad Marista de Querétaro, por facilitarme también las instalaciones y equipos del laboratorio de materiales. En especial al Dr. Andrés Torres por consejos, hospitalidad y orientación académica durante mi estancia en Querétaro.

Al Laboratorio de Materiales “SISCCO” por haber sido mi refugio y apoyo cuando las instalaciones de la Universidad de Morelia están cerradas. Es especial un sincero agradecimiento a mi Bipadrino Arturo García por su enorme paciencia, ayuda incondicional y gran apoyo que me brindó durante la realización de gran parte de las pruebas. Así mismo al C. Fermín Rodríguez por haberme ayudado a conseguir el material que ocupaba, aconsejarme y darme ánimos cuando ya estaba cansada.

A mis amigos Estrella Córdoba e Ing. Tarsicio Hurtado por haberme ayudado y apoyado cuando ya no podía más. Por estar ahí con sus consejos y bromas para que la investigación fuera más ligera y divertida.

Al personal del laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas”: Carmelita, Dany, Cindy, Don Chora, Don Chuy, Don Rube, Hugo Luis, José Alberto, Marco Navarrete, Marco Mondragón, Noel, Núñez y Sandra, por haberme aconsejado, apoyado y darme ánimos durante la estancia en el laboratorio y la realización de esta tesis.



Resumen

Debido a la importancia del concreto en la industria de la construcción y a su demandante utilización, es de vital importancia seguir realizar investigaciones sobre sus propiedades mecánicas y la influencia que tienen los agregados en él. En el presente trabajo de investigación el objetivo, principal fue estudiar la influencia de la morfología de los agregados pétreos más comunes en el estado de Michoacán, sobre el módulo de elasticidad estático y dinámico del concreto, realizando ensayos comparativos entre concreto con agregados volcánicos, concreto con agregados volcánicos y triturados y concreto con agregados redondeados, para lo cual se realizaron 105 especímenes cilíndricos de concreto de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, curados por inmersión hasta la fecha de prueba; conservando constante la relación A/C ≈ 0.50 y el tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ " para un $f'c = 250 \text{ Kg/cm}^2$, $fcr \approx 300 \text{ Kg/cm}^2$, cabeceo con azufre y método ACI. El cemento utilizado corresponde a un Cemento Pórtland Compuesto 30R-RS (Tipo V) que se emplea especialmente donde los suelos o aguas freáticas tienen un alto contenido de sulfato. La morfología de los agregados volcánicos, es muy porosa e irregular con masas unitarias y densidades bajas; para los agregados triturados, es de forma irregular angular con baja porosidad, presencia de polvo producto de la reducción de tamaño, masas unitarias altas y densidades bajas; y para los cantos rodados, es de forma redondeada, con mínimos porcentajes de absorción, altas masas unitarias y densidades promedio. Se realizaron pruebas destructivas y no destructivas para determinar las ecuaciones de correlación. Las solicitaciones destructivas a los especímenes fueron: compresión, $f'c$, con el cual se obtiene el módulo de elasticidad estático, E_c , y tensión por compresión diametral, f_t . Las solicitaciones no destructivas fueron: módulo de elasticidad dinámico, E_d , por el método de velocidad de pulso y por el método de frecuencias de resonancia, y resistividad eléctrica. Los resultados obtenidos de las pruebas destructivas, demuestran que la mezcla de agregados volcánicos produjo una mayor resistencia a la compresión, mayor módulo de elasticidad estático y una baja resistencia a la tensión por compresión diametral. En cambio, la mezcla de agregados triturados, arrojó resultados bajos de resistencia a la compresión pero mayores resistencias por compresión diametral. Los resultados de la mezcla de agregados redondeados se mantuvieron en la media de los otros resultados. Para las pruebas no destructivas los mejores resultados en todas las pruebas los obtuvo la mezcla de agregados triturados seguida de la mezcla de agregados volcánicos y siendo la mezcla de agregados redondeados la que ahora obtuvo los resultados más bajos. Es de resaltar que existen variables en los agregados que no están incluidas en el diseño de las mezclas y que podrían afectar en gran medida las propiedades mecánicas del concreto. Una de ellas, la morfología.

Palabras Claves: concreto, módulo de elasticidad, morfología, agregados.



Abstract

The concrete has an important and demanding use in the construction industry therefore it is important to keep researching its mechanical properties and the influence of aggregates on it. In this thesis the main objective was to study the influence of the aggregates morphology, most common in the state of Michoacan, on the static and dynamic modulus of elasticity of concrete, making comparative tests between samples of concrete with volcanic aggregates, concrete with volcanic and crushed aggregates and concrete with rounded aggregates, for which 105 cylinder concrete specimens (10 cm in diameter and 20 cm in height) were making. This specimens were cured by immersion until the test date, maintaining a constant ratio $W/C \approx 0.50$ and maximum size of aggregate of $\frac{3}{4}$ " for a $f_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$, $f_{cr} \approx 300 \text{ Kg/cm}^2$ and ACI method. The cement used was a type V (CPC 30R-RS) which it is used where the soil or groundwater have a high sulfur content. The morphology of volcanic aggregates is very porous and irregular with lower unit masses and densities. The crushed aggregates have angular shapes with low porosity, presence of dust from the reduction in size, high unit masses and low densities. For the rounded aggregates the absorption rates are minimum and the densities and unit masses are high. The trials were conducting by destructive and nondestructive tests to determine the correlation equations. The destructive tests to the specimens were: compressive strength, f_c , obtaining with this the static modulus of elasticity, E_c , and splitting tensile strength, f_t . The non-destructive tests were: dynamic modulus of elasticity, E_d , using two methods, the pulse velocity and resonant frequencies, and electrical resistivity. The results of destructive tests show that the mixture of volcanic aggregates produced a higher compressive strength, higher static modulus of elasticity and lower splitting tensile strength. In contrast the mixture of crushed aggregate showed lower compressive strength but higher splitting tensile strength. The results of the mixture of rounded aggregates remained at the average of the other results. For non-destructive tests the best results in all the tests were obtaining by the crushed aggregate mixture followed by the volcanic aggregates mixture and rounded aggregates were the lowest results. It is noteworthy that there are variables in the aggregate which are not included in the mix design and greatly affect the mechanical properties of concrete. One of them, morphology.

Key words: concrete, modulus of elasticity, morphology, aggregates



Objetivos

Objetivo General

Evaluar la influencia de la morfología de los agregados pétreos: volcánicos, triturados y cantos rodados, utilizando cilindros de concreto de 10cm x 20cm, para determinar las propiedades mecánicas del concreto.

Objetivos Específicos

- Realizar pruebas de control de calidad a los diferentes tipos de agregados, además de elaborar un análisis comparativo con las normas vigentes.
- Determinar el comportamiento mecánico del cemento CPC 30R-RS (Tipo V, ASTM-C-150) para compararlo después compararlo con el cemento tipo I.
- Diseñar y elaborar mezclas de concreto, conservando constante la relación agua cemento ($A/C \approx 0.50$), el tamaño máximo del agregado (T.M. = $\frac{3}{4}$ ") y la resistencia de proyecto ($f'c = 250$ Kgf/cm²), para las tres mezclas.
- Efectuar pruebas de laboratorio que permitan conocer el comportamiento del concreto en estado fresco y en estado endurecido.
- Determinar ecuaciones de correlación matemáticas entre pruebas destructivas, entre pruebas no destructivas y correlaciones entre ambas.



Justificación

La importancia de producir concreto de buena calidad, de bajo costo y de durabilidad óptima con las proporciones adecuadas, dependiendo de la forma de los agregados en el estado de Michoacán, es la razón principal de esta investigación, debido a que estos aspectos son los que tiene que tener en cuenta el Ingeniero Civil al momento de realizar una construcción.

Tener resultados satisfactorios es realmente difícil, ya que existen muchas variaciones a causa de no llevar un adecuado control de calidad y de no tener los conocimientos adecuados de los diferentes componentes del concreto.

De esta forma, esta tesis permitirá al Ingeniero Civil ampliar sus conocimientos en cuanto a procesos de control calidad, especificaciones de los componentes del concreto en diferentes normativas y familiarizarse con los cambios que sufre el concreto dependiendo de la forma del agregado pétreo que posee en su interior.



ÍNDICE

DEDICATORIAS	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT.....	IV
OBJETIVOS	V
JUSTIFICACIÓN	VI
ÍNDICE.....	VII
ÍNDICE DE CUADROS	IX
INDICE DE FIGURAS.....	XI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ESTADO DEL ARTE	3
CAPÍTULO 2. MATERIALES	6
2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	7
2.2. COMPONENTES DEL CONCRETO.....	9
2.2.1. CEMENTO	9
2.2.1.1. Proceso de Fabricación.....	10
2.2.1.2. Clasificación	11
2.2.1.3. Propiedades del Cemento	12
2.2.1.4. Especificaciones.....	17
2.2.1.5. Cemento Utilizado en la Investigación	19
2.2.2. AGUA.....	20
2.2.2.1. Características del Agua	20
2.2.2.2. Especificaciones.....	21
2.2.2.3. Agua Utilizada en la Investigación	22
2.2.3. AGREGADOS	23
2.2.3.1. Origen de los Agregados.....	23
2.2.3.2. Clasificación de los agregados.....	25
2.2.3.3. Propiedades de los agregados.....	27
2.2.3.4. Sustancias perjudiciales:.....	31
2.2.3.5. Agregados Utilizados en la Investigación	32
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE MEZCLAS	33
3.1. INTRODUCCIÓN	34
3.2. OBJETIVOS	34
3.3. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO DE MEZCLAS	37
3.4. DIVERSOS MÉTODOS DE PROPORCIONAMIENTO.....	38
3.5. CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD DEL CONCRETO	39
3.6. MÉTODO DEL ACI 211	42
CAPÍTULO 4. PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS.....	50



4.1. AGREGADOS PÉTREOS	51
4.1.1. PRÁCTICA ESTÁNDAR PARA EL MUESTREO DE AGREGADOS	52
4.1.2. PRÁCTICA ESTÁNDAR PARA REDUCIR MUESTRAS DE AGREGADOS A TAMAÑOS DE PRUEBA	54
4.1.3. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA EL CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD EVAPORADO POR SECADO	56
4.1.4. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA MASA UNITARIA (MASA VOLUMÉTRICA SUELTA Y COMPACTA) EN AGREGADOS	57
4.1.5. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO	59
4.1.6. DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO	62
4.1.7. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA MATERIALES QUE PASAN LA MALLA No. 200 EN AGREGADOS POR LAVADO	65
4.1.8. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA TERRONES DE ARCILLA EN AGREGADOS	67
4.1.9. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LAS IMPUREZAS ORGÁNICAS EN AGREGADO FINO PARA CONCRETO	69
4.1.10. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS FINOS Y GRUESOS	70
4.1.11. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA EL VALOR DE EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS	76
4.2. CEMENTO	79
4.2.1. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO HIDRÁULICO	79
4.2.2. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA EL TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRÁULICO POR LA AGUJA DE VICAT	82
4.2.3. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO	84
4.3. CONCRETO FRESCO	86
4.3.1. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA EL REVENIMIENTO DEL CONCRETO DE CEMENTO HIDRÁULICO	86
4.3.2. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA MASA UNITARIA DEL CONCRETO	89
4.3.3. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES DE PRUEBA EN EL LABORATORIO	91
4.4. CONCRETO ENDURECIDO	93
4.4.1. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA EL CURADO DE ESPECÍMENES DE PRUEBA EN EL LABORATORIO	93
4.4.2. PRÁCTICA ESTÁNDAR PARA EL CABECEO DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO	95
4.4.3. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO	97
4.4.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO DEL CONCRETO	101
4.4.5. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL DE CILINDROS DE CONCRETO	103
4.4.6. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA VELOCIDAD DE PULSO A TRAVÉS DEL CONCRETO	105
4.4.7. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA FUNDAMENTALES LONGITUDINALES DE ESPECÍMENES DE CONCRETO	107
4.4.8. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	109
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	111
5.1. AGREGADOS PÉTREOS	112
5.2. CEMENTO	121
5.3. DISEÑO DE MEZCLAS	122
5.4. CONCRETO FRESCO	131
5.5. CONCRETO ENDURECIDO	133
5.6. ECUACIONES DE CORRELACIÓN	160
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN	161
CAPÍTULO 7. CONCLUSIÓN	169
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA	171



ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1. Coeficientes recomendados para el agregado grueso [Parrot, 1979].....	5
Cuadro 2.1. Comparativa del cemento por su desempeño con otras normas [NMX-C-414-ONNCCE-2004].	11
Cuadro 2.2. Clasificación del los Cementos [NMX-C-414-ONNCCE-2004]	11
Cuadro 2.3. Abreviaturas de los óxidos del cemento [Instituto del Concreto, 1997].....	12
Cuadro 2.4. Componentes principales del cemento [Shetty, 2005].	12
Cuadro 2.5. Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos del cemento [Instituto del Concreto, 1997]. ..	14
Cuadro 2.6. Componentes de los cementos [NMX-C-414-ONNCCE-2004].	17
Cuadro 2.7. Requisitos de los componentes principales [NMX-C-414-ONNCCE-2004].	17
Cuadro 2.8. Especificaciones físicas [NMX-C-414-ONNCCE-2004].	18
Cuadro 2.9. Especificaciones químicas [NMX-C-414-ONNCCE-2004].....	18
Cuadro 2.10. Especificaciones del cemento con características especiales [NMX-C-414-ONNCCE-2004].....	18
Cuadro 2.11. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas [NMX-C-122-ONNCCE-2004]	21
Cuadro 2.12. Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en las aguas [Instituto del Concreto, 1997].	22
Cuadro 2.13. Clasificación según el tamaño [Instituto del Concreto, 1997].	26
Cuadro 2.14. Clasificación de los agregados según su densidad [Instituto del Concreto, 1997].	26
Cuadro 2.15. Clasificación de las partículas según su forma [Instituto del Concreto, 1997].	29
Cuadro 2.16. Clasificación de la textura superficial de los agregados [Instituto del Concreto, 1997].	29
Cuadro 3.1. Diferentes valores de la desviación estándar, dependiendo del control de calidad [ACI 214].....	41
Cuadro 3.2. Coeficientes de Variación en concretos estructurales [Arnal y Betancourt, 1997].	42
Cuadro 3.3. Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción [ACI 211].	43
Cuadro 3.4. Requerimientos de Agua aproximada de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado [ACI 211].	45
Cuadro 3.5. Relaciones entre la relación Agua/Cemento y la resistencia a la compresión del concreto [ACI 211].	45
Cuadro 3.6. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra [ACI 318].....	46
Cuadro 3.7. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra [Reglamento del Edo. de Michoacán Artículo 308].	46
Cuadro 3.8. Factor de Modificación para la desviación Estándar de la Muestra cuando se dispone de menos de 30 ensayos [ACI 318].....	47
Cuadro 3.9. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra [ACI 318].....	47
Cuadro 3.10. Desviación Estándar de la Resistencia del concreto en Kg/cm ² [Reglamento del Edo. de Michoacán Artículo 308].	47
Cuadro 3.11. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen del concreto [ACI 211].....	48
Cuadro 4.1. Número, Frecuencia y Tamaño del Muestreo [M-MMP-4-04-001/02]	53
Cuadro 4.2. Materiales finos que pasan por la criba 0.075mm (No. 200).....	66
Cuadro 4.3. Límites máximos de partículas deleznable [NMX-C-111-ONNCCE-2004 y ASTM-C-33-03].	68
Cuadro 4.4. Carta Colorimétrica para determinar impurezas orgánicas [ASTM-C-40-04].	69
Cuadro 4.5. Límites del Módulo de Finura [NMX-C-111-ONNCCE-2004 y ASTM-C-33-03].	72
Cuadro 4.6. Límites de Granulometría para agregado Fino.....	72
Cuadro 4.7. Límites Granulométricos del agregado grueso, en porcentaje que pasa [ASTM-C-33-03].	75
Cuadro 4.8. Especificaciones Físicas [NMX-C-414-ONNCCE-2004].....	83
Cuadro 4.9 Valor Nominal del Revenimiento y Tolerancias.	88



Cuadro 4.10. Valores Permitidos de Masa Unitaria [NMX-C-155-ONNCCE-2004].....	90
Cuadro 4.11. Número de Capas requeridas para los especímenes [NMX-C-159-ONNCCE-2004].	92
Cuadro 4.12. Diámetro de Varilla y número de penetraciones empleados para moldear los especímenes de prueba [NMX-C-159-ONNCCE-2004 y ASTM-C-192].	92
Cuadro 4.13. Resistencia a la compresión y espesor máximo del mortero de azufre [NMX-C-109-ONNCCE-2004].	96
Cuadro 4.14. Tolerancias [NMX-C-083-ONNCCE-2002].	100
Cuadro 4.15. Módulos de Elasticidad dependiendo de la resistencia del concreto [Romo, 2009]	102
Cuadro 4.16. Criterios de Evaluación para la Calidad del Concreto [Red Durar, 2000]	106
Cuadro 4.17. Criterios de Evaluación [Red Durar, 2000]	110
Cuadro 6.1. Resumen Calidades de los Agregados Pétreos.....	163
Cuadro 6.2. Resumen de Proporcionamientos [ACI 211].	164



INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Calor de Hidratación de los componentes principales del cemento [Instituto del Concreto, 1997].	14
Figura 2.2. Resistencia de los componentes principales del cemento Pórtland [Instituto del Concreto, 1997].	14
Figura 4.1. Muestreo de Materiales Pétreos. (a) Cantos rodados en río de Queréndaro, Mich. (b) Grava triturada del banco SUPRA, Mich. (c) Agregado Volcánico en el depósito del Banco Joyitas, Mich.	52
Figura 4.2. Cuarteo en superficie dura, limpia y nivelada [Procedimiento ASTM-C-70-03].	55
Figura 4.3. Secado de las muestras (Grava triturada)	56
Figura 4.4. Vertido del agregado en el molde (Arena de río)	57
Figura 4.5. Nivelado del recipiente (Grava de río)	57
Figura 4.6. Se llena el recipiente en tres capas dando 25 golpes a cada capa (Grava de río)	58
Figura 4.7. Al terminar el llenado, se enrasa el recipiente con la misma varilla utilizada (Grava de río)	58
Figura 4.8. Secado superficial de la arena por medio del molde troncocónico (Arena volcánica)	61
Figura 4.9. Agitado del matraz Chapman para expulsar el aire atrapado (Arena de río)	61
Figura 4.10. Llenado del matraz hasta la marca de aforo (Arena de río)	61
Figura 4.11. Determinación de la masa del matraz lleno (Arena volcánica)	61
Figura 4.12. Secado de la muestra para eliminar por completo el agua absorbida (Arena volcánica)	61
Figura 4.13. Determinación de la masa final después del secado (Arena de río)	61
Figura 4.14. Secado superficial de la grava (Grava volcánica)	64
Figura 4.15. Introducción de la muestra al picnómetro (Grava volcánica)	64
Figura 4.16. Recolección del líquido desalojado por la muestra (Grava volcánica)	64
Figura 4.17. Determinación de la masa de la muestra superficialmente seca (Grava volcánica)	64
Figura 4.18. Secado de la muestra para eliminar por completo el agua absorbida (Grava volcánica)	64
Figura 4.19. Se vierte agua para hacer el lavado (Arena volcánica)	65
Figura 4.20. Agitado del vaso en forma de “ochos” (Arena volcánica)	65
Figura 4.21. Secado del material (Arena volcánica)	65
Figura 4.22. Se rompen los terrones de arcilla que existan en la muestra (Arena volcánica)	68
Figura 4.23. Se seca el material a una temperatura constante (Arena volcánica)	68
Figura 4.24. Agitado de la botella (Arena de río)	69
Figura 4.25. Comparación del color de la botella con la carta colorimétrica (Arena volcánica)	69
Figura 4.26. Cribado de cada malla después del cribado general (Arena Volcánica)	71
Figura 4.27. Determinación de la masa que se retiene en cada malla (Arena de río)	71
Figura 4.28. Resultado final del cribado (Arena volcánica)	71
Figura 4.29. Resultado final del cribado (Arena de río)	71
Figura 4.30. Cribado de la muestra (Grava de río)	73
Figura 4.31. Resultado final del cribado (Grava de río)	73
Figura 4.32. Resultado final del cribado (Grava volcánica)	74
Figura 4.33. Resultado final del cribado (Grava triturada)	74
Figura 4.34. Medición del nivel de finos (Arena volcánica)	77
Figura 4.35. Medición del nivel de arena (Arena volcánica)	78
Figura 4.36. Amasado de la pasta (Cemento Tolteca CPC-30R)	81
Figura 4.37. Lanzado de la esfera formada con la pasta (Cemento Tolteca CPC-30R)	81
Figura 4.38. Aparato de Vicat [NMX-C-057-1997-ONNCCE]	81
Figura 4.39. Lectura inicial después de los 30 segundos que se terminó de hacer la pasta	81
Figura 4.40. La aguja de 1mm penetra visiblemente en la pasta de cemento	83
Figura 4.41. Fraguado final en el que la guja de 1 mm no penetra en la pasta de cemento	83



Figura 4.42. Matraz Lechatelier con keroseno sumergido en un baño de agua	85
Figura 4.43. 60 gramos de cemento Tolteca CPC-30R antes de ser introducido al matraz.....	85
Figura 4.44. Introducción del cemento con embudo para evitar adhesión del cemento con las paredes del matraz. .	85
Figura 4.45. Colocación del molde en superficie plana, rígida, húmeda y no absorbente.	87
Figura 4.46. Llenado del molde en tres capas dando 25 golpes con la varilla a cada capa.....	87
Figura 4.47. Se mantiene el nivel del concreto por encima del borde del molde en la tercera capa	87
Figura 4.48. Enrasado del molde después del llenado de la última capa.....	88
Figura 4.49. Forma correcta de colocar el molde para la medición del revenimiento	88
Figura 4.50. Llenado del recipiente en tres capas iguales dando 25 golpes a cada una.....	89
Figura 4.51. En la segunda y tercera capa, la varilla debe penetrar 2 cm en la capa inferior.....	89
Figura 4.52. Enrasado del recipiente y recipiente listo para ser pesado y determinar su masa unitaria.....	90
Figura 4.53. Varillado del concreto en 3 capas.....	91
Figura 4.54. Golpeado de los cilindros para eliminar vacíos.	91
Figura 4.55. Enrasado de los cilindros para dar el acabado final.	92
Figura 4.56. Cilindros cubiertos de plástico para evitar pérdidas de agua.....	92
Figura 4.57. Pila de curado donde se almacenan los cilindros de concreto después de ser descimbrados.	94
Figura 4.58. Procedimiento de cabeceo: vertido del azufre, colocación del cilindro y secado del azufre.	96
Figura 4.59. Prensa utilizada para la realización de la prueba, cilindros montados para la aplicación de la carga y espécimen fallado después de la prueba.....	98
Figura 4.60. Diagrama de fallas de cilindros sometidos a compresión [NMX-C-083-ONNCCE-2002].	99
Figura 4.61. Gráfica Esfuerzo-Deformación Unitaria para diferentes resistencias del concreto [Romo, 2009]	101
Figura 4.62. Forma correcta de colocar el espécimen en la máquina [NMX-C-163-1997-ONNCCE].	104
Figura 4.63. Colocación del cilindro en la máquina universal.....	104
Figura 4.64. Cilindro fallado después de la aplicación de la carga.....	104
Figura 4.65. Calibración del equipo de Velocidad de Pulso con Ultrasonido.	106
Figura 4.66. Realización de la prueba. Transductores colocados en el cilindro para transmisión directa.	106
Figura 4.67. Colocación del cilindro en el aparato E-Meter para medir la resonancia.....	107
Figura 4.68. Centrado del espécimen a fin de que coincida el transmisor con el receptor.	107
Figura 4.69. Vibración del cilindro a varias frecuencias.	108
Figura 4.70. Se registra la frecuencia más alta detectada para el espécimen ensayado.....	108
Figura 4.71. Equipo utilizado para medir la resistencia eléctrica.	109
Figura 4.72. Montado de la muestra en el equipo	109
Figura 6.1. Falla por medio del agregado (Arena y grava volcánica)	166
Figura 6.2. Falla en la interface de contacto entre la pasta y el agregado (Arena volcánica y Grava Triturada)	166
Figura 6.3. Falla Mixta, por medio del agregado y en la interface de contacto (Arena y grava de río)	166



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN



Debido a la importancia del concreto en la industria de la construcción, es de vital importancia conocer sus propiedades físicas, químicas y mecánicas para entender mejor su comportamiento y producir mezclas de mejor calidad al menor costo.

El concreto es un material heterogéneo que depende de numerosas variables, como lo es la calidad de cada uno de los materiales que lo componen, del método de diseño para determinar las proporciones de los agregados y de las operaciones de mezclado, transporte, colocación y curado. Esto provoca que en un mismo concreto puedan existir variantes en sus propiedades mecánicas.

Anteriormente, los agregados pétreos fueron considerados como materiales químicamente inertes, pero ahora se ha reconocido que algunos de los agregados son químicamente activos y ciertos agregados muestran enlaces químicos agregados en la interfaz del agregado y la pasta de cemento. El sólo hecho de que los agregados ocupan del 70 al 80% del volumen del concreto, su impacto en diversas características y propiedades del concreto es, sin duda, considerable.

Es por ello que en el presente trabajo de investigación se pretende evaluar la influencia de la morfología de los agregados pétreos más comunes en el estado de Michoacán en las características del concreto en estado fresco y en estado endurecido, siendo una guía para lograr una mejor comprensión del importante papel que los agregados desempeñan en el concreto.

En función de esto, el presente trabajo fue dividido en ocho capítulos. En el primer capítulo se presenta la justificación de esta investigación así como los objetivos, las limitantes que presenta, los alcances e información relacionada con los antecedentes de la investigación.

En el segundo capítulo se describen los antecedentes históricos del concreto así como los materiales básicos que lo conforman. Al final de cada componente se describen brevemente los materiales utilizados para esta investigación.

El tercer capítulo comprende el diseño de mezclas, los diversos factores que intervienen en el Diseño, control estadístico de calidad del concreto y el método del ACI 211 que se utilizó en esta investigación.



En el cuarto capítulo, se presenta el desarrollo de la etapa experimental donde se describe paso a paso el procedimiento seguido en el laboratorio para realizar los ensayos, que son la parte fundamental de este estudio.

En el quinto capítulo se presentan los resultados obtenidos luego de ser realizadas las pruebas, estos datos son ordenados en cuadros y para su mejor comprensión se presentan también en forma de gráficas comparando estos resultados con sus respectivas especificaciones. En este mismo capítulo se establecen las ecuaciones de correlación encontradas en esta investigación.

En el sexto capítulo se presenta el análisis y discusión de los resultados obtenidos. Así como en el séptimo capítulo, se establecen las conclusiones obtenidas durante el desarrollo práctico de la investigación, para finalizar con el octavo capítulo, donde se encuentran las referencias bibliográficas utilizadas a lo largo de todo el escrito y proceso experimental.

1.1. Estado del Arte

1.1.1. Antecedentes

La resistencia a la compresión es medida usualmente sobre cilindros estándar de 15cm x 30cm. La nueva tendencia de utilizar concreto de alta resistencia en la construcción, ha provocado que las máquinas de prueba no sean capaces de producir la fuerza necesaria para romper cilindros de 15cm x 30cm. Debido a esa necesidad se están usando actualmente cilindros de 10cm x 20cm para las pruebas de calidad [Dennis Jr., and Schindler, A., 2006].

Varios investigadores han comparado resistencias logradas con diferentes tamaños de muestras cilíndricas de concreto de alta resistencia. Carrasquillo [1981] informó que la relación promedio de resistencia a la compresión entre cilindros de 15cm x 30cm y cilindros de 10cm x 20cm fue de 0.9 independientemente de la fuerza y la edad de ensayo. Una contradicción con este hallazgo se informó más tarde por Carrasquillo [1988], que informó que la resistencia a la compresión de los cilindros de 10cm x 20cm era 7% más baja que en los cilindros de 15cm x 30cm.



French [1993] observó en su estudio que la resistencia de los cilindros de 10cm x 20cm fue 6% mayor que los cilindros de 15cm x 30cm. Aïtcin [1994] informó que los cilindros grandes dan lugar a menores resistencias a la compresión aparente, y que esta resistencia no es sensible al tamaño del cilindro de concreto de muy alta resistencia.

Otras consideraciones para decidir si se utilizan cilindros grandes o pequeños, es que los cilindros de 10cm x 20cm tienen una masa de aproximadamente 4 Kg mientras que los cilindros de 15cm x 30cm tienen una masa de aproximadamente 13 Kg.

Esto podría sugerir que debido a que los cilindros de 10cm x 20cm son más ligeros y manejables, la recopilación de las muestras para el control de calidad sería más fácil para los contratistas y los inspectores. Es por ello que las ventajas de la utilización de los especímenes más pequeños son las siguientes: facilidad para ser manejados, menor espacio de almacenamiento requerido y máquinas de prueba de menor capacidad para las pruebas [Dennis Jr., and Schindler, A., 2006].

Es debido a estas ventajas que en la presente tesis se usarán cilindros de 10 cm x 20 cm para realizar las pruebas destructivas y las no destructivas. El objetivo fundamental es encontrar ecuaciones de correlación matemáticas entre el módulo de elasticidad estático y dinámico y para ello existen antecedentes en las pruebas.

Para determinar el módulo de elasticidad dinámico, Powers [1938] determinó la frecuencia de resonancia igualando el sonido musical creado por unas vigas de concreto, cuando se golpeaban con un martillo, con el tono creado por un conjunto de campanas de orquesta calibradas a cierta frecuencia. Este método fue la base para los subsecuentes desarrollos de métodos más sofisticados ya que a partir de la frecuencia de resonancia el módulo de elasticidad dinámico puede ser conocido [Malhotra and Carino, 2004].

Otro método más reconocido para determinar el módulo de elasticidad dinámico, es el de la velocidad de pulso que ha sido utilizado exitosamente para determinar la calidad del concreto por más de 60 años. Su desarrollo comenzó en Canadá y en Inglaterra casi al mismo tiempo durante la segunda guerra mundial [Malhotra and Carino, 2004].



En Canadá, Leslie y Cheesman [1949] desarrollaron un instrumento llamado “soniscope” mientras que en Inglaterra, Jones [1948] desarrolló un instrumento llamado “ensaye ultrasónico”. En principio, ambos eran muy similares. El instrumento de prueba consta de medios para producir e introducir un pulso de onda en el concreto (pulso generado y transmitido) y medios de detección de la llegada del pulso (receptor) y medir con precisión el tiempo que toma el pulso para viajar a través del concreto.

Para determinar el módulo de elasticidad estático, Parrot [1979] desarrolló una ecuación que puede estimar el módulo de elasticidad estático del concreto; se debe hacer notar que su modelo es el único que relaciona el módulo de elasticidad con la resistencia a compresión del concreto y el tipo de agregado:

$$E_c = K_0 + 0.2f'_c$$

Donde E_c es el módulo de elasticidad estático, K_0 es un factor que depende del tipo de agregado y f'_c es la resistencia a la compresión del concreto en el rango de 200 a 700 Kgf/cm²

Cuadro 1.1. Coeficientes recomendados para el agregado grueso [Parrot, 1979]

Tipo de agregado grueso	Factor K_0 recomendado
Grava de piedra arenisca	0.71
Grava silíceo	0.76
Piedra caliza	0.92
Dolomita	0.92
Cuarcita	0.97
Granito	0.82



CAPÍTULO 2. MATERIALES



2.1. Antecedentes Históricos

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

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

Como los morteros de cal viva no resistían bien la acción del agua durante períodos largos, se presume que a esta mezcla se incorporaron toda clase de agregados y durante estas pruebas empíricas se descubrió que las arenas provenientes de ciertas rocas volcánicas tenían mayor resistencia y durabilidad tanto en aguas dulces como saladas [Instituto del Concreto, 1997].

Por ejemplo, los griegos emplearon una toba volcánica extraída de la Isla de Santorín y los romanos usaron un material con apariencia de arena rosada que se encuentra en gran cantidad alrededor de la bahía de Nápoles, el cual es una ceniza volcánica que contiene sílice y alúmina que se combinan químicamente con la cal dando como resultado lo que luego se conociera como cemento puzolánico. Este nombre obedece a que se le encontró por primera vez en la región donde estaba la población de Puzzulí, cerca de Vesubio.

Con la caída del imperio romano declinó el uso del concreto y muchos de los conocimientos desarrollados desaparecieron completamente. Durante la Edad Media y el Renacimiento el concreto fue poco empleado. Posiblemente no se usó en gran escala por la mala calidad, debida a una cocción incompleta de la cal, descuido en la mano de obra y carencia de tobas volcánicas. Después del siglo XII, mejoró la calidad y de nuevo se utilizó gracias a una perfecta calcinación de la cal y al uso de algún material similar en propiedades a las tobas volcánicas anteriormente mencionadas [Instituto del Concreto, 1997].



Posteriormente el 21 de Octubre de 1824, Joseph Aspdin un constructor de Leeds (Inglaterra), calcinó en un horno una mezcla de tres partes de piedra caliza por una de arcilla, la cual molió y pulverizó y consiguió la patente para producir el primer cemento Pórtland; así llamado porque la coloración del mismo le recordaba al inventor, el color grisáceo de las rocas de Pórtland.

El proceso de producción del cemento fue mejorado por Isaac Johnson en 1845 cuando logró con éxito, fabricar este producto quemando una mezcla de caliza y arcilla hasta la formación del Clínter, el cual después fue pulverizado obteniendo un compuesto fuertemente cementante. Johnson encontró que la temperatura de calcinación debía elevarse hasta el máximo que pudiera lograrse con métodos de ese tiempo y describió sus experimentos más explícitamente que Aspdin.

Únicamente hasta el año 1900, aproximadamente, empezó el crecimiento notable de la industria del cemento, debido fundamentalmente a dos factores: en primer lugar, los experimentos realizados por los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y por el alemán Michaélis, con los cuales se logró producir cemento de calidad uniforme, que pudiera ser usado en la industria de la construcción.

En segundo lugar, dos invenciones mecánicas muy importantes se hicieron al principio del siglo: los hornos rotatorios para la calcinación y el molino tubular para la molienda. Con estas dos máquinas, pudo producirse el cemento Pórtland en cantidades comerciales. A partir de ese momento, se desarrolla el rápido crecimiento de esta industria, que hoy produce un material de construcción imprescindible, dentro del actual sistema de vida [Instituto del Concreto, 1997].



2.2. Componentes del Concreto

Según diversas fuentes, el concreto se puede definir de la forma siguiente:

El concreto puede ser definido como la mezcla de un material aglutinante (normalmente cemento Pórtland Hidráulico), un material de relleno (agregados), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un sólido compacto y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión [Instituto del Concreto, 1997].

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento Pórtland y agua, une a los agregados (arena y grava o piedra triturada) para formar una masa semejante a una roca pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua [Kosmatha y Panarese, 1992].

El concreto es una roca artificial hecha por el hombre. Está elaborado con cemento, agregados pétreos grueso y fino, agua y en ocasiones aditivos [Martínez, 2007].

De esta manera se llega a la conclusión de que **el concreto es una roca artificial hecha por el hombre que después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión y está elaborado con cemento, agregados gruesos y finos, agua y en ocasiones aditivos.**

2.2.1. Cemento

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, formando un todo compacto. En la construcción se ha generalizado la utilización de la palabra cemento para designar un tipo de aglutinante específico que se denomina Cemento Pórtland, debido a que es el más común. El cemento Pórtland es la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia del agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación [Instituto del Concreto, 1997].



2.2.1.1. Proceso de Fabricación

El proceso de fabricación empleado en determinada planta productora de cemento varía de acuerdo con sus circunstancias particulares, pero en general todas realizan las siguientes 6 etapas:

1. Explotación de materias primas: este procedimiento se hace de acuerdo a las normas y parámetros convencionales. Dependiendo de la dureza de los materiales se usan explosivos y trituración posterior, en otros casos el simple arrastre es suficiente. Una vez extraídos los materiales de las respectivas canteras, se lleva a un proceso de trituración primaria para obtener tamaños máximos de 1". Los materiales que no requieran trituración se llevan a un lugar de almacenamiento [Instituto del Concreto, 1997].

2. Dosificación, molienda y homogenización de materias primas: las materias primas seleccionadas se trituran, muelen y dosifican de tal manera que la mezcla resultante tenga la composición química deseada. Se puede utilizar un proceso seco o húmedo. En el proceso seco, la molienda y el mezclado se realizan con materiales secos. En el proceso húmedo, las operaciones de molienda y de mezclado se efectúan con los materiales en forma de lechada [Kosmatha y Panarese, 1992].

3. Clinkerización: Luego del mezclado, la materia prima molida se alimenta por el extremo superior de un horno, pasa a una velocidad que se controla por medio de la pendiente y la velocidad rotacional del horno. En el extremo inferior del horno el combustible para calcinar es inyectado; donde las temperaturas de 1 420°C a 1 650°C transforman químicamente a la materia prima en clínker de cemento, que tiene la forma de pelotillas negro-grisáceas de 12 mm de diámetro [Kosmatha y Panarese, 1992].

4. Enfriamiento: el material transformado en clínker debe ser enfriado rápidamente a 70°C para garantizar que el cemento fabricado, después de fraguado, no presente cambio de volumen.

5. Molienda de Clínker, adiciones de yeso: en este proceso se transforma el clínker en polvo y se agregan las adiciones (puzolanas o escoria de alto horno). Luego se introduce el yeso, se muele tan finamente que casi en su totalidad logra pasar la malla No. 200 y así se hace obtiene el cemento Pórtland propiamente dicho. El yeso es indispensable para controlar el endurecimiento del cemento una vez entra en contacto con el agua, porque cuando su cantidad es muy baja el endurecimiento puede ocurrir de manera instantánea.

6. Empaque y distribución: el cemento resultante del molino se transporta en forma mecánica o neumática a silos de almacenamiento y posteriormente se empaca en bultos. También se puede descargar directamente en carros cisternas para su distribución a granel [Instituto del Concreto, 1997].



2.2.1.2. Clasificación

Anteriormente los cementos estaban clasificados de acuerdo a las normas mexicanas NMX-C-001, NMX-C-002 y NMX-C-175 como se muestra en el *Cuadro 2.1*, pero ahora la normativa cambió y obtuvieron nuevos nombres como se indica en el *Cuadro 2.2*. Cabe destacar que esta nomenclatura sólo se utiliza en México; a nivel mundial la nomenclatura sigue conservando los números romanos.

Cuadro 2.1. Comparativa del cemento por su desempeño con otras normas [NMX-C-414-ONNCCE-2004].

NMX-C-414-ONNCCE (Vigente)	NMX-C-001 (CANCELADA) NORMA ASTM C-150
CPO 30, CPO 30R, CPC 30 y CPC 30R	Tipo I (Portlánd Normal)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH y RS	Tipo II (Portlánd Moderada resistencia a los sulfatos)
CPO 40, CPO 40R y CPC 40R	Tipo III (Portlánd Fraguado rápido, alta resistencia inicial)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH	Tipo IV (Portlánd Bajo calor de Hidratación)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial RS	Tipo V (Portlánd Alta resistencia a los sulfatos)
CPO ó CPC que cumpla con la característica especial B	Blanco
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BRA	Especial, bajo álcali Todos los tipos

Cuadro 2.2. Clasificación del los Cementos [NMX-C-414-ONNCCE-2004]

Tipo	Denominación	Clase Resistente	Características Especiales
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	20	RS Resistente a los sulfatos
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	30	BRA Baja Reactividad Álcali agregado
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R (R = resistencia rápida)	BCH Bajo calor de Hidratación
CPC	Cemento Pórtland Compuesto	40	B Blanco
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice	40 R	-
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	-	-



2.2.1.3. Propiedades del Cemento

El estudio de las propiedades del cemento, permite conocer algunos aspectos de su bondad como material cementante. Estas propiedades son de carácter químico, físico y mecánico y dependen del estado en el cual se encuentren.

2.2.1.3.1. Propiedades Químicas

El proceso de clinkerización del cemento involucra la transformación de las materias primas a productos más complejos, por medio de reacciones en estado sólido. Razón por la cual, la química del cemento frecuentemente emplea un modelo basado en abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes, indicados en el *Cuadro 2.3*. Los cuatro compuestos principales del cemento se forman a partir de estos óxidos, como se muestra en el *Cuadro 2.4*.

Cuadro 2.3. Abreviaturas de los óxidos del cemento [Instituto del Concreto, 1997].

Fórmula	Nombre	Abreviatura
CaO	Óxido de calcio "Cal"	C
SiO ₂	Dióxido de Sílice "Silicato"	S
Al ₂ O ₃	Óxido de Aluminio "Aluminato"	A
Fe ₂ O ₃	Óxido de Hierro "Hierro"	F

Cuadro 2.4. Componentes principales del cemento [Shetty, 2005].

Nombre	Composición	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO.SiO ₃	C ₃ A
Aluminoferrito tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

De esta forma se habla de las fases:

- **Halita, con alto contenido de C₃S:** es la fase principal de la mayoría de los clíners Portland, y de ella dependen en buena parte las características de desarrollo de resistencia mecánica. Reacciona rápidamente con el agua, endurece en corto tiempo y tiene alto calor de hidratación, de tal manera, que afecta el tiempo de fraguado y la resistencia inicial [Instituto del Concreto, 1997].



- **Belita, a base de C_2S :** es usualmente la segunda fase en importancia del clínker. Su componente principal (C_2S) reacciona lentamente con el agua, con un consecuente bajo calor de hidratación y una contribución al desarrollo de la resistencia a partir de siete días.

La fase belita y halita, determinan decisivamente el desarrollo de la resistencia y difieren entre sí en su tasa de endurecimiento y de liberación de calor de hidratación. El contenido de estas dos suman aproximadamente de 70 a 80% del cemento. Se supone que de manera aproximada, el C_3S aporta una resistencia a corto y mediano plazo (contribución al desarrollo de la resistencia durante las primeras cuatro semanas) y el C_2S a mediano y largo plazo (contribución al desarrollo de la resistencia de la cuarta semana en adelante).

- **Aluminato, rica en C_3A :** este compuesto no es puro, sino más bien una solución sólida de C_3A con algo de impurezas de SiO_2 y MgO que reacciona de manera rápida con agua, contribuye con calor alto de hidratación y a una alta resistencia inicial. Además, confiere al concreto propiedades indeseables, como cambios volumétricos y poca resistencia a la acción de los sulfatos razón por la cual su contenido se limita entre 5 y 15% según el tipo de cemento [Instituto del Concreto, 1997].
- **Ferrito C_4AF , solución sólida compuesta por ferritos y aluminatos de calcio:** este componente está presente en pequeñas cantidades en el cemento y en comparación con los otros tres componentes, no influye en forma significativa en su comportamiento, colaborando escasamente a la resistencia del concreto, siendo relativamente inactivo, pero es útil al facilitar la fusión durante el calcinamiento del clínker [Neville, 1998].

Las cantidades efectivas de los diferentes tipos de compuestos varían considerablemente de un cemento a otro y realmente es posible obtener distintas clases de él, agregando en forma proporcional los materiales correspondientes.

En la *Cuadro 2.5* se enumeran algunos valores típicos de la composición de los diferentes tipos de cemento. En la *Figura 2.1* se muestra esquemáticamente la contribución de los componentes principales del cemento, en calor de hidratación y en la *Figura 2.2* la resistencia a la compresión [Instituto del Concreto, 1997].



Cuadro 2.5. Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos del cemento [Instituto del Concreto, 1997].

Cemento	Composición química en %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Portland				
Tipo I	48	27	12	8
Tipo II	40	35	5	13
Tipo III	62	13	9	8
Tipo IV	25	50	5	12
Tipo V	38	37	4	9

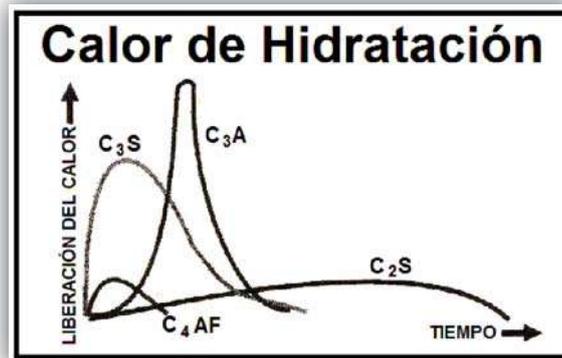


Figura 2.1. Calor de Hidratación de los componentes principales del cemento [Instituto del Concreto, 1997].

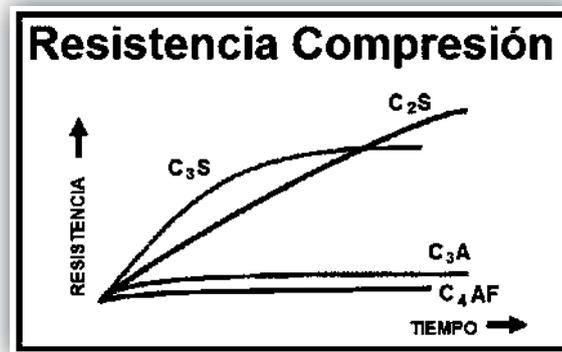


Figura 2.2. Resistencia de los componentes principales del cemento Pórtland [Instituto del Concreto, 1997].

En todo caso, se puede decir que todos y cada uno de los componentes del cemento contribuyen de una u otra forma a la resistencia, pues es claro que todos los productos de hidratación llenan espacios, reduciendo con ellos la porosidad en el cemento [Neville, 1998].

Hidratación del cemento: la reacción mediante la cual el cemento Pórtland se transforma en un agente de enlace, se genera por los procesos químicos responsables de la formación de compuestos durante la hidratación, los cuales originan propiedades mecánicas útiles en aplicaciones estructurales.



Calor de hidratación: durante el proceso de hidratación, se efectúan reacciones químicas exotérmicas, es decir reacciones que liberan calor, haciendo que los concretos al fraguar y endurecer aumenten de temperatura. Este incremento es importante en estructuras de concreto, ya que cuando ha ocurrido el fraguado y se inicia el descenso de la temperatura, se origina contracción del material, que puede conducir a la formación de grietas y fisuras. El calor de hidratación se define como la cantidad de calor en calorías por gramo de cemento deshidratado, después de una hidratación completa a una temperatura dada. Depende de la composición del cemento y es aproximadamente igual a la suma de los calores de hidratación de los compuestos individuales. El C₃A y el C₃S son los compuestos particularmente responsables del elevado desarrollo de calor [Instituto del Concreto, 1997].

2.2.1.3.2. Propiedades Físicas y Mecánicas.

Las propiedades físicas más importantes del cemento son: densidad, finura, consistencia normal, tiempos de fraguado y expansión; mientras que las mecánicas son: resistencia a la compresión, tensión y flexión.

- **Densidad:** es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco, y en un cemento Pórtland normal, suele estar muy cercano a 3.15 g/cm³. En el caso de cementos adicionados, es menor porque el contenido de clínker por tonelada de cemento es inferior dando valores del orden de 2.9 gr/cm³, dependiendo del porcentaje de adiciones. La densidad no indica directamente la calidad del cemento pero analizándola en conjunto con otras propiedades, puede determinar si el cemento tiene adiciones.
- **Finura:** el proceso de molienda de clínker y yeso determina la finura del cemento, que es el tamaño de las partículas de cemento. Está íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia. Un cemento de alta finura, endurece con mayor velocidad (mayor rapidez de hidratación) y tiene un desarrollo rápido de resistencia.
- **Consistencia normal:** es la propiedad que indica el grado de fluidez o dificultad con que la pasta puede ser manejada. Cuando los cementos tienen adiciones, los requerimientos de agua son mayores que en los cementos normales. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 23 y 33% [Instituto del Concreto, 1997].



➤ **Tiempos de fraguado:**

- **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que la pasta plástica que se forma cuando el cemento se mezcla con agua va perdiendo su fluidez, hasta llegar a un momento en que ya no tiene toda su viscosidad y se eleva su temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra parcialmente hidratado.
- **Fraguado final:** tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta ya esta dura.
- **Fraguado rápido o relámpago:** es una reacción violenta que lleva a un inmediato endurecimiento de la pasta, se caracteriza por su velocidad de desarrollo de calor.
- **Fraguado falso:** fenómeno que ocurre cuando la pasta de cemento adquiere una rigidez prematura y anormal, dentro de los primeros minutos después de mezclar el cemento y el agua. No despiden calor en forma apreciable y si la pasta se remezcla sin adicionar agua, se restablece su plasticidad sin afectar el fraguado y la resistencia.

➤ **Expansión en autoclave:** para que un cemento sea estable es necesario que ninguno de sus componentes, una vez hidratados, sufra expansión perjudicial o destructiva. Las normas NMX-C-062 y ASTM-C-151, limitan la expansión potencial de un cemento por medio del ensayo de autoclave. Este consiste en medir el cambio de longitud de barras de 2.5cm x 2.5cm x 25.4cm hechas de pasta de cemento y sometidas durante tres horas a alta temperatura y presión. El cambio de longitud en porcentaje es la expansión.

➤ **Resistencia a la compresión:** este ensayo se realiza de acuerdo a las normas NMX-C-061 y ASTM-C-109 sobre cubos de mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada) de 5.08 cm de arista.

➤ **Resistencia a la flexión:** con este ensayo se realiza de acuerdo a la norma ASTM-C-348 en la que se pretende conocer el comportamiento del mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada) cuando es sometido a esfuerzos de flexión en prismas de 40x40x160 mm [Instituto del Concreto, 1997].



2.2.1.4. Especificaciones

Los componentes de los cementos deben cumplir con los límites en el *Cuadro 2.6*.

Cuadro 2.6. Componentes de los cementos [NMX-C-414-ONNCCE-2004].

Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					Minoritarios ⁽¹⁾
		Principales			Humo de sílice	Caliza	
		Clínker Pórtland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos ⁽²⁾			
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	95-100	-	-	-	-	0-5
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	50-94	-	6-50	-	-	0-5
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	40-94	6-60	-	-	-	0-5
CPC	Cemento Pórtland Compuesto ⁽³⁾	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice	90-99	-	-	1-10	-	0-5
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	20-39	61-80	-	-	-	0-5

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

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

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

Los requisitos que deben cumplir los componentes principales del cemento están mostrados en el *Cuadro 2.7*.

Cuadro 2.7. Requisitos de los componentes principales [NMX-C-414-ONNCCE-2004].

Componente Principal	Índice de actividad con cemento CPO 30 a 28 días (% mínimo)	Carbonatos totales (% mínimo)
Escoria granulada de alto horno	75	-
Puzolana	75	-
Humo de sílice	100	-
Caliza	-	75



Las especificaciones físicas de la resistencia mecánica a la compresión a los 28 días, resistencia mecánica a la compresión a los 3 días para los cementos 30 R y 40 R, tiempo de fraguado y expansión/contracción del cemento, están indicadas en el *Cuadro 2.8*.

Cuadro 2.8. Especificaciones físicas [NMX-C-414-ONNCCE-2004].

Clase Resistente	Resistencia a compresión (N/mm ²)			Tiempo de fraguado (min)		Estabilidad de volumen en autoclave (%)	
	3 días Mínimo	28 días Mínimo	Máximo	Inicial Mínimo	Final Máximo	Expansión Máximo	Contracción Máximo
20	-	20	40	45	600	0.80	0.20
30	-	30	50	45	600	0.80	0.20
30 R	20	30	50	45	600	0.80	0.20
40	-	40	-	45	600	0.80	0.20
40 R	30	40	-	45	600	0.80	0.20

Para los siguientes tipos de cemento y todas las clases resistentes se deben cumplir con las especificaciones químicas del *Cuadro 2.9*.

Cuadro 2.9. Especificaciones químicas [NMX-C-414-ONNCCE-2004].

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

Cuando se requiera que un cemento tenga alguna característica especial, de acuerdo a lo indicado en el *Cuadro 2.2*, este debe cumplir con las especificaciones indicadas en el *Cuadro 2.10*.

Cuadro 2.10. Especificaciones del cemento con características especiales [NMX-C-414-ONNCCE-2004].

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



2.2.1.5. Cemento Utilizado en la Investigación

Para el desarrollo de esta tesis, el cemento utilizado es Tolteca CPC 30R RS.

Esto significa que es un Cemento Pórtland Compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a 3 días de 20 MPa y resistente los sulfatos [NMX-C-414-ONNCCE-2004].

Este tipo de cemento ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos y se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de éstos, especialmente donde los suelos o aguas freáticas tengan alto contenido de sulfato. La desventaja de este cemento con los cementos normales, es que adquiere más lentamente la resistencia. Este cemento genera moderado calor de hidratación ya que el C_3S y el C_3A , que son los que producen alto calor de hidratación, disminuyen notablemente.

El ataque de los sulfatos ocurre porque uno de los componentes del cemento, denominado aluminato tricálcico (C_3A), reacciona químicamente con los sulfatos presentes en el medio ambiente formando un compuesto de mayor volumen, llamado sulfoaluminato de calcio, el cual por ocupar más espacio, origina esfuerzos internos en la pasta de cemento que pueden llegar a desintegrarla

Es por ello que el cemento CPC 30R RS hace una fuerte reducción del contenido de sulfoaluminato de calcio, para cuando el concreto sea atacado por los sulfatos, y evitar que la sustancia que se forma cuando está endurecido, produzca su destrucción [Instituto del Concreto, 1997].



2.2.2. Agua

El agua es un ingrediente fundamental en la elaboración de concreto y mortero debido a que desempeña una función importante en estado fresco y endurecido. Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto la cantidad para proveer una relación agua/cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero es evidente, que para usarla en el lavado de agregados, en la preparación de la mezcla o durante el curado del concreto, no solamente su cantidad es importante, sino también su calidad química y física.

2.2.2.1. Características del Agua

2.2.2.1.1. Agua de lavado de agregados

Es la utilizada durante el proceso de trituración, para retirar impurezas y exceso de finos presentes en los conglomerados de los que provienen, así como las partículas muy finas formadas durante la trituración. Debe ser lo suficientemente limpia como para no introducir contaminación a los materiales procesados, como puede ser exceso de partículas en suspensión, especialmente materia orgánica o sales, que posteriormente afectan la calidad del concreto producido con éstos.

2.2.2.1.2. Agua de mezclado

Se adiciona junto con los agregados y el cemento. Se necesita éste último para producir una pasta hidratada con fluidez tal, que permita la lubricación adecuada de la mezcla de concreto cuando se encuentre en estado plástico. Dependiendo de la cantidad de agua adicionada, la fluidez de la pasta será mayor o menor, y al endurecerse una cantidad del agua quedará fija como parte de la estructura y otra permanecerá como agua libre. Si la medida de agua de mezclado aumenta, la parte fija es la misma y por consiguiente el agua libre aumenta, con lo cual se aumenta la porosidad, debido a que con el tiempo, esta agua libre se evapora dejando unos conductos dentro del concreto endurecido.

2.2.2.1.3. Agua de curado

Una vez que el concreto ha fraguado, es necesario el suministro de agua para garantizar la completa hidratación del grano de cemento. El objeto del curado es mantener el concreto saturado, a lo más próximo posible a la saturación, hasta que los espacios que inicialmente estaban saturados de agua se llenen hasta un nivel deseado con los productos de la hidratación del cemento [Instituto del Concreto, 1997].



En la evaluación de las impurezas que contienen las aguas de curado se deben tener las siguientes dos consideraciones: que no manchen las superficies del concreto y que no ataquen ni deterioren el concreto.

2.2.2.2. Especificaciones

Las aguas a que se refiere la norma NMX-C-122-ONNCCE-2004, que se pretendan usar para la elaboración y curado del concreto hidráulico, excluyendo de ellas las aguas de mar, deben cumplir los requisitos que aparecen en *Cuadro 2.11*. El agua de mar cuando sea imprescindible su empleo, se debe usar únicamente para la fabricación y curado de concretos sin acero de refuerzo. El agua cuyo análisis muestre que excede alguno o algunos de los límites de *Cuadro 2.11*, se puede utilizar si se demuestra que en concretos de características semejantes elaborados con esta agua han acusado un comportamiento satisfactorio a través del tiempo en condiciones similares de exposición.

Cuadro 2.11. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas [NMX-C-122-ONNCCE-2004]

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio	Cementos sulforesistentes
	Límites en p.p.m.	Límites en p.p.m.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2 000	2 000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50 000	35 000
Cloruros como CL (a)		
Para concreto con acero de preesfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1 000 (c)
Sulfato como SO ₄ ⁼ (a)	3 000	3 500
Magnesio como Mg ⁺⁺ (a)	100	150
Carbonatos como CO ₃	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO ₂	5	3
Álcalis totales como Na ⁺	300	450
Total de impurezas en solución	3 500	4 000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 6.5

(a) Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.

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

(c) Cuando se use cloruro de calcio (CaCl₂) como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.



Cementos Pórtland ricos en calcio: se consideran como tales los cementos Pórtland Ordinarios con contenido de cal libre en el límite tolerable y ricos en silicato tricálcico.

Cementos sulforesistentes: Se consideran como tales a los cementos Pórtland referidos en la NMX -C-414-ONNCCE con la característica RS (resistente a los sulfatos).

En el *Cuadro 2.12* aparecen los efectos de las impurezas sobre las propiedades del concreto.

Cuadro 2.12. Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en las aguas [Instituto del Concreto, 1997].

Impurezas	Fraguado	Endurecimiento	Eflorescencias	Corrosión	Adherencia	Expansión	Aire incluido	Hidratación
pH	X	X	---	---	---	---	---	---
Sustancias solubles	X	X	X	X	X	---	---	---
Sulfatos	X	X	X	X	X	X	---	---
Cloruros	X	X	X	X	---	---	---	---
Hidratos de carbono	X	X	---	---	---	---	---	---
Sustancias orgánicas solubles en éter	X	X	---	---	---	---	X	X
X Causa efecto negativo				--- No causa efecto negativo				

2.2.2.3. Agua Utilizada en la Investigación

El agua usada proviene de la red de agua potable del laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

El agua se tomó tal y como venía para así realizar las mezclas lo más apegado posible al agua que se utiliza en la obra, en condiciones reales.



2.2.3. Agregados

Los agregados son los componentes importantes en el concreto. Ellos dan cuerpo al concreto, reducen pérdidas y afectan la economía. Anteriormente, los agregados fueron considerados como materiales químicamente inertes, pero ahora se ha reconocido que algunos de los agregados son químicamente activos y ciertos agregados muestran enlaces químicos agregados en la interfaz del agregado y la pasta de cemento.

El sólo hecho de que los agregados ocupan del 70 al 80% del volumen del concreto, su impacto en diversas características y propiedades del concreto es, sin duda, considerable. Para saber más sobre el concreto es muy importante que uno aprenda más acerca de los agregados que constituyen el mayor volumen del concreto. La profundidad y el alcance de los estudios que se requieren para entender sus efectos variables y su influencia en las propiedades del concreto no pueden ser subestimados [Shetty, 2005].

La fuente de materiales debe ser localizada a una distancia razonable del sitio de trabajo y para su selección hay que tener presente que sus propiedades difieren considerablemente de una a otra. Cada una puede variar en la mineralogía de sus componentes o de las condiciones físicas de sus partículas, tales como, la distribución de tamaños, la forma y la textura [Instituto del Concreto, 1997].

2.2.3.1. Origen de los Agregados

Casi todos los materiales áridos naturales provienen de rocas madre. De esta forma, existen tres tipos de rocas: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Estas clasificaciones se basan en el modo de formación de las rocas.

Cabe recordar que las rocas ígneas se forman por el enfriamiento de la lava en la superficie de la cresta (basalto) o muy por debajo de la cresta (granito). Las rocas sedimentarias se forman inicialmente debajo del mar y posteriormente emergen o las aguas modifican su cauce. Las rocas metamórficas son originadas por rocas ígneas o sedimentarias que posteriormente se transforman debido al calor extremo y la presión, flora y fauna [Shetty, 2005].



2.2.3.1.1. Rocas Ígneas

Constituyen la mayor parte de la porción sólida de la tierra, de ellas se derivan los otros grupos de rocas y la mayor parte de los agregados del concreto en América. Estas se forman por el enfriamiento y solidificación del magma y tienen una estructura masiva, totalmente cristalina o vítrea o una combinación entre ellas, dependiendo de la velocidad a la que se enfriaron durante su formación. Dependiendo del porcentaje de sílice que contienen se clasifican en: ácidas, intermedias y básicas. Según el lugar de formación se clasifican en: intrusivas y extrusivas o volcánicas. Las primeras se forman a gran profundidad y las segundas en la superficie [Instituto del Concreto, 1997].

La mayoría de las rocas ígneas son idóneas para producir concreto, ya que normalmente son duras, resistentes y densas. Son los agregados del concreto más químicamente activos y muestran una tendencia a reaccionar con los álcalis en el cemento [Shetty, 2005].

2.2.3.1.2. Rocas Sedimentarias

Las rocas ígneas o rocas metamórficas son sometidas a los agentes de la intemperie como el sol, la lluvia y el viento. Estos agentes descomponen, fragmentan, transportan y depositan las partículas de roca, muy por debajo del lecho marino donde se cementan entre sí por algún material cementante. Los materiales de cementación pueden ser carbonosos, silíceos o arcillosos encontrados en la naturaleza. Al mismo tiempo, el depósito y el material cementante son sometidos a presión estática del agua y se convierten en la capa compacta de roca sedimentaria. La deposición, cementación y consolidación toman lugar capa por capa debajo del lecho marino.

Estas formaciones de rocas sedimentarias subsecuentemente son levantadas y se convierten en continentes. Las rocas sedimentarias de la estructura estratificada se extraen y los agregados de concreto se derivan de ellas. La calidad de los agregados derivados de las rocas sedimentarias variará en calidad dependiendo del material de cementación y la presión bajo la cual estas rocas fueron originalmente compactadas.

Las rocas sedimentarias pueden variar de suaves a duras, de porosas a densas y de ligeras a pesadas. El grado de consolidación, el tipo de cementación, el espesor de las capas y la contaminación, son factores importantes para determinar la conveniencia de las rocas sedimentarias para producir concreto [Shetty, 2005].



2.2.3.1.3. Rocas Metamórficas

Tanto las rocas ígneas como las rocas sedimentarias pueden ser sometidas a altas temperaturas y presiones que causan metamorfismo produciendo un cambio en la estructura y textura de las rocas.

Muchas de las propiedades de los agregados, como composiciones químicas y mineralógicas, descripción petrográfica, peso específico, dureza, resistencia, estabilidad física y química y estructura de poros entre otros, dependen principalmente de la calidad de la roca madre. Sin embargo, algunas propiedades poseídas por los agregados que son importantes, en lo que se refiera a la elaboración del concreto, no tienen ninguna relación con la roca madre, en particular, la forma y tamaño.

Si bien es preciso reconocer que los agregados de una buena roca madre producen un concreto de calidad, puede ser erróneo concluir que un buen concreto no se pueda hacer de los agregados con propiedades ligeramente inferiores, a las sugeridas en reglamentos, obtenidos a partir de rocas madre no tan buenas. Estos agregados, que no son tan buenos, pueden ser utilizados para elaborar concreto satisfactorio debido al hecho de que una capa de pasta de cemento en los agregados, logra mejoras respecto a las características de durabilidad y resistencia. La selección de los agregados debe hacerse con prudencia teniendo en cuenta el factor económico. En general, aquel agregado que proporcionará la calidad deseada en el concreto con el menor gasto, debe ser seleccionado [Shetty, 2005].

2.2.3.2. Clasificación de los agregados.

La clasificación de los agregados para concreto, generalmente se hacen desde el punto de vista de su procedencia, tamaño y densidad.

2.2.3.2.1. Clasificación según su procedencia.

Pueden ser naturales o artificiales. Los agregados naturales se obtienen de depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de río), o glaciares (cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales. Los agregados artificiales son los que se obtienen a partir de procesos industriales, tales como, arcillas expandidas, escorias de alto horno, clínker, y limaduras de hierro, entre otros [Instituto del Concreto, 1997].



2.2.3.2.2. Clasificación según su tamaño.

La forma más empleada para clasificar los agregados naturales es según su tamaño el cual varía desde fricciones de milímetros hasta varios centímetros en sección transversal. La clasificación más general del agregado para elaborar concreto según su tamaño se muestra en el *Cuadro 2.13* donde se indican los nombres más comunes.

Cuadro 2.13. Clasificación según el tamaño [Instituto del Concreto, 1997].

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

2.2.3.2.3. Clasificación según su densidad.

La densidad es la propiedad que relaciona la cantidad de masa con el volumen que ocupa, se pueden clasificar tanto los agregados naturales como los artificiales y se hace en tres diferentes categorías, como se muestran en el *Cuadro 2.14* [Instituto del Concreto, 1997].

Cuadro 2.14. Clasificación de los agregados según su densidad [Instituto del Concreto, 1997].

Clasificación del agregado	Masa unitaria aproximada (Kg/m ³)		Variedades más comunes de agregados	Ejemplo de uso
	Del agregado	Del Concreto		
Liviano	480 – 1 300	500 – 2 000	Pizarras expandidas, esquistos, escoria, arcilla	Concretos livianos estructurales
Normal	1 300 – 2 000	2 000 – 2 500	Arena, grava, piedra triturada, clínker, escoria de fundición	Obras en concreto en general arena, grava, piedra
pesado	2 000 – 5 600	> 2 500	Barrita, limonita, magnetita, limadura de acero, hematita	Concreto para macizos de anclaje, para protección contra radiaciones, etc.



2.2.3.3. Propiedades de los agregados.

2.2.3.3.1. Propiedades químicas.

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

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

2.2.3.3.2. Propiedades físicas

Las propiedades físicas que tienen mayor importancia en el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto son: granulometría, porosidad, masa unitaria y forma y textura de las partículas, mismas que se verán a detalle en el Capítulo 4.

- **Granulometría:** es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregados en una muestra. Esta proporción se suele indicar, de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en masa, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición.
- **Porosidad y absorción:** cuanto más poroso es, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad.
- **Masa unitaria:** la relación entre la masa del material que cabe en un determinado recipiente y el volumen de éste, da una cifra llamada masa unitaria. La masa unitaria compacta es otro buen índice para conocer la calidad del agregado, puesto que cuanto mejor sea la granulometría mayor es el valor numérico de la masa [Instituto del Concreto, 1997].



- **Forma:** La forma de los agregados es una característica importante ya que afecta a la trabajabilidad del concreto, esta forma depende del tipo de roca que lo originó, ya que para ciertas piedras resulta determinante el sistema de clivaje, las posibles instrucciones en la roca y su estado de meteorización.

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

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

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

La textura del agregado también entra en la discusión debido a su estrecha asociación con la forma. Generalmente, los agregados redondeados tienen una textura lisa y los agregados angulares tienen una textura rugosa, pero incluso cuando la superficie del agregado redondeado es lisa, es suficientemente rugosa para desarrollar un vínculo razonablemente bueno entre la superficie y el gel submicroscópico del cemento [Shetty, 2005]. La clasificación más utilizada para definir la forma de las partículas del agregado, se indican en el *Cuadro 2.15*.



Cuadro 2.15. Clasificación de las partículas según su forma [Instituto del Concreto, 1997].

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

- **Textura:** reviste especial importancia por su influencia en la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento fraguado, así como también, por su efecto sobre las propiedades del concreto o mortero endurecido, tales como, densidad, resistencia a la compresión y a la flexión, cantidad requerida de agua, etc. En términos generales, se puede decir que la textura superficial es áspera en las piedras obtenidas por trituración y lisa en los cantos rodados, de río, quebrada o mar. La clasificación más utilizada se encuentra en el *Cuadro 2.16* [Instituto del Concreto, 1997].

Cuadro 2.16. Clasificación de la textura superficial de los agregados [Instituto del Concreto, 1997].

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



2.2.3.3.3. Propiedades mecánicas

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

- **Resistencia:** el agregado grueso, en mayor medida que el fino, va a resultar relacionado con el comportamiento de las resistencias del concreto, por su aporte en tamaños de grano dentro de la masa de la mezcla. En tal sentido, una de las posibilidades de ruptura de la masa es por medio del agregado grueso (las otras son por la pasta y por la interface de contacto entre pasta y agregado). De esta manera, la resistencia de los agregados cobra importancia y se debe buscar que éste nunca falle antes que la pasta de cemento endurezca. La falla a través del agregado grueso se produce bien sea porque tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque previamente se le han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (especialmente cuando éste se hace por voladura) o por un inadecuado proceso de trituración. Adicionalmente, cuando se aumenta la adherencia por la forma o textura superficial del agregado al buscar una alta resistencia del concreto, también aumenta el riesgo de que las partículas del agregado fallen antes de la pasta de cemento endurecida.

- **Tenacidad o resistencia a la falla por impacto:** es una propiedad que depende de la roca de origen y se debe tener en cuenta ya que tiene mucho que ver con el manejo de los agregados, porque si estos son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría y también disminuir la calidad del concreto que con ellos se elabore.

- **Adherencia:** es la interacción que existe en la zona de contacto agregado-pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto. La adherencia depende de la calidad de la pasta de cemento y, en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión. Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas [Instituto del Concreto, 1997].



2.2.3.4. Sustancias perjudiciales:

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

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

- **Sales solubles:** Algunos agregados pueden estar contaminados con un elevado contenido de sulfatos o de cloruros, adheridos a su superficie, por lo cual la arena resulta el agregado de mayor peligro, dada su elevada medida de superficie específica. Estas circunstancias no pueden ser detectadas por la vista ni por el gusto, pues muy pequeñas cantidades ya son suficientes para significar un peligro para el concreto (basta el 1.0% de sulfatos, en masa, o el 0.1% de cloruros, en masa) [Instituto del Concreto, 1997].



Los sulfatos atacan al cemento produciendo reacciones expansivas que agrietan y desmoronan su masa. Los cloruros corroen el acero del concreto armado, perdiendo sus condiciones resistentes, aumenta el volumen, y agrieta las secciones de concreto.

- **Materia orgánica:** la presencia de elevadas cantidades de materia orgánica, no visible que se impregna o adhiere a los granos de concreto, puede interferir con las acciones químicas de la hidratación del cemento, así como también puede resultar en un concreto de menor resistencia y puede afectar la velocidad de reacción del cemento, ocasionando retrasos considerables en su tiempo normal de fraguado [Instituto del Concreto, 1997].

2.2.3.5. Agregados Utilizados en la Investigación

Los agregados pétreos que simularán los tres tipos de morfología usual son los ígneos extrusivos volcánicos, ígneos intrusivos o basaltos triturados y cantos rodados.

***Ígneos extrusivos o volcánicos:** cuyo único tratamiento es la eliminación de sobretamaños; morfología porosa e irregular. Obtenidos de una sucursal del banco “Joyitas”, que es el banco de donde más se extraen materiales para la construcción, ya que cumple con las especificaciones en cuanto a granulometría.

***Ígneos intrusivos o basaltos triturados:** que son estratos sólidos continuos, cuyo tratamiento es la reducción de tamaños por métodos mecánicos; morfología con baja porosidad y presencia de polvo producto de la reducción de tamaño. Obtenidos del banco SUPRA ubicado en la carretera Morelia-Quiroga Km 14+000; aunque este banco se dedica a proveer agregados para carpetas asfálticas principalmente, fue el banco con más disposición y el que presentaba mejores granulometrías que otros.

***Agregados de río ó cantos rodados ó guijarros ó materiales aluviales:** cuyo único tratamiento es la eliminación de sobretamaños; morfología redondeada, con mínimos porcentajes de absorción. Obtenidos del río Queréndaro en Michoacán. Este río iba muy crecido porque al momento que se hizo el muestreo, coincidió con las fuertes tormentas que se presentaron en México durante el mes de agosto de 2010. De esta manera, la grava-arena obtenida presentaba muchas piedras grandes, sin embargo, tenía una granulometría aceptable.



CAPÍTULO 3. DISEÑO DE MEZCLAS



3.1. Introducción

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

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

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

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

3.2. Objetivos

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

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



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

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

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

El concreto debe ser fabricado para tener siempre una trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuadas a las condiciones de trabajo. La trabajabilidad es una medida de lo fácil o difícil que resulta colocar, consolidar y darle acabado al concreto. La consistencia es la facultad del concreto fresco para fluir. La plasticidad determina la facilidad de moldear al concreto. Si se usa más agregado en una mezcla de concreto o si se agrega menos agua, la mezcla se vuelve más rígida, (menos plástica y menos trabajable) y difícil de moldear. No se pueden considerar plásticas a las mezclas muy secas o muy desmoronables ni a las muy aguadas o fluidas. El concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar ni sangrar excesivamente. El sangrado es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos –cemento, arena y piedra- dentro de la masa. El asentamiento es consecuencia del efecto combinado de la vibración y de la gravedad.

Un sangrado excesivo aumenta la relación agua/cemento cerca de la superficie superior, pudiendo dar como resultado una capa superior débil de baja durabilidad, particularmente si se llevan a cabo las operaciones de acabado mientras está presente el agua de sangrado. La segregación es la separación de los distintos componentes de una mezcla de concreto o mortero fresco durante su transporte o colocación [Kosmatha y Panarese, 1992].

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



La resistencia a la compresión se define como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos fuerza por centímetro cuadrado (Kgf/cm^2) a una edad de 28 días y se le asigna con el símbolo f'_c [Kosmatha y Panarese, 1992]. Por lo común las propiedades del concreto fresco se rigen por el tipo de estructura a construir (vigas, muros, zapatas, etc.) y por las técnicas de colocación y transporte (bomba, banda transportadora, carretilla, etc.); así mismo, las propiedades del concreto en estado endurecido quedan especificadas por el ingeniero calculista ya que él proporciona datos tales como la resistencia a los esfuerzos, durabilidad y otros, para que respondan a las condiciones de los proyectos o de los reglamentos [Instituto del Concreto, 1997].

2. El segundo objetivo es hacer el concreto de la manera más económica, es decir, todos los concretos dependen principalmente de dos factores [Shetty, 2005]:

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

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

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



La comprensión de los principios básicos del diseño de mezclas es tan importante como la realización de los cálculos mismos. Solamente con la selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla así como con un proporcionamiento adecuado se pueden obtener las propiedades anteriores al producir un concreto [Kosmatha y Panarese, 1992].

3.3. Factores que intervienen en el Diseño de Mezclas

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

Teniendo los materiales para la realización del concreto, los tres factores variantes que tienen que ser considerados especificando una determinada mezcla de concreto son [Shetty, 2005]:

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

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



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

3.4. Diversos Métodos de Proporcionamiento

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

- Proporción arbitraria (proporcionamiento empírico por ejemplo mezclas 1:2:4)
- Método de módulo de finura
- Método de máxima densidad
- Método de área superficial de los agregados
- Relación de vacíos
- El diseño de mezclas de alta resistencia
- Mezclas de diseño basadas en la resistencia a la flexión
- Contenido de cemento
- Método del ACI 211
- Mezcla de diseño para concreto bombeado

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

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



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

Antes de abordar el método del ACI 211, es necesario familiarizarse con los métodos estadísticos de control de calidad, que son comunes a todos los métodos de diseño de la mezcla [Shetty, 2005].

3.5. Control Estadístico de Calidad del Concreto

El proceso de elaboración del concreto así como la mayoría de otros procesos de construcción, tienen cierto grado de variabilidad, tanto en materiales, como en métodos de construcción. Esto resulta que la resistencia de un concreto varíe de un lote a otro o dentro del mismo y de esta manera es muy difícil evaluar la resistencia del producto final. No es posible tener un gran número de ensayos destructivos para evaluar la resistencia de los productos finales, por lo que se tiene que recurrir a las pruebas ya realizadas de la muestra. Sería muy costoso tener criterios muy rígidos para rechazar la estructura sobre la base de una sola o varias pruebas. La base de la aceptación de una muestra es que se pueda proporcionar un control razonable en la elaboración de concreto, asegurando que la probabilidad del resultado de la prueba caiga por debajo de la resistencia de diseño a un nivel de tolerancia especificado. El objetivo del control de calidad es limitar la variabilidad lo más que se pueda. El método de control estadístico de calidad proporciona un enfoque científico para que el diseñador del concreto comprenda la variabilidad real de los materiales con el fin de establecer las especificaciones de diseño con la tolerancia adecuada para hacer frente a las variaciones inevitables [Shetty, 2005].



3.5.1. Medidas Descriptivas

3.5.1.1. Medidas de Tendencia Central

Estas medidas dan un centro de la distribución de frecuencias, es un valor que se puede tomar como representativo de todos los datos.

- **Muestra:** conjunto de datos (n).
- **Lista Jerarquizada:** en ella se representan los valores en orden creciente de magnitud, lo cual suele denominarse distribución de frecuencias no agrupada.
- **Intervalo:** número entre el cual se divide la muestra para clasificarla (adimensional y subjetivo).
- **Amplitud:** magnitud o tamaño del intervalo
- **Media o media aritmética o promedio (\bar{X}):** es una medida de tendencia central que se define como la suma de valores de toda la muestra sobre el número de elementos que la componen.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- **Mediana:** es una medida de tendencia central que se define como el valor que separa por la mitad las observaciones ordenadas de menor a mayor, de tal forma que el 50% de estas son menores que la mediana y el otro 50% son mayores. Si el número de datos es impar la mediana será el valor central, si es par se toma como mediana la media aritmética de los dos valores centrales. La mediana también se conoce como la observación central de la lista jerarquizada.
- **Moda:** es una medida de tendencia central que se define como el valor de las observaciones que se presentan con mayor frecuencia (puede ser modal, bimodal, trimodal, polimodal), es decir, aquella cuya frecuencia absoluta es mayor. No tiene porque ser única.



- **Rango:** es una medida de dispersión que se obtiene restando el menor valor del mayor, en la muestra. Dentro de ese valor estarán contenidos todos los datos de la muestra.
- **Varianza (σ^2):** es una medida de dispersión que se define como el promedio del cuadrado de las distancias entre cada observación y la media aritmética del conjunto de observaciones. Si el conjunto de valores está formado por n observaciones x_i , cuyo promedio es \bar{X} , se puede mostrar la desviación respecto al promedio ($x_i - \bar{X}$) de cada observación a la cual se le conoce como residuo [Martínez, 2007].

Si $n \geq 31$ elementos:
$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2$$

Si $n \leq 30$ elementos:
$$\sigma^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2$$

- **Desviación Estándar (σ):** es una medida de dispersión que se define como la raíz cuadrada positiva de la varianza y sus unidades son las mismas que las de la variable.

Si $n \geq 31$ elementos:
$$\sigma = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2}$$

Si $n \leq 30$ elementos:
$$\sigma = \left[\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2}$$

Para el caso particular de concreto con $f'c \geq 200 \text{ Kg/cm}^2$, el Comité ACI 214-77 considera los valores de dispersión de la desviación estándar para los diferentes niveles de control de calidad de acuerdo el *Cuadro 3.1*.

Cuadro 3.1. Diferentes valores de la desviación estándar, dependiendo del control de calidad [ACI 214]

Clase de Operación	Excelente	Muy Bueno	Bueno	Aceptable	Pobre
Pruebas de control de campo	$< 25 \text{ Kg/cm}^2$	25-35	34-40	40-50	$> 50 \text{ Kg/cm}^2$
Mezcla de prueba en el laboratorio	$< 15 \text{ Kg/cm}^2$	15-17	17-20	20-25	$> 25 \text{ Kg/cm}^2$



- **Coefficiente de Variación (CV):** es una medida de dispersión que se define como el cociente entre la desviación típica y el valor absoluto de la media aritmética, es adimensional. Este coeficiente se utiliza cuando se quiere comparar el grado de dispersión de dos distribuciones que no vienen dadas en las mismas unidades o que las medias no son iguales; representa el número de veces que la desviación típica contiene a la media aritmética y por lo tanto cuanto mayor es CV mayor es la dispersión y menor la representatividad de la media [Martínez, 2007].

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}}$$

El RDF (Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal) considera que los valores habituales del Coeficiente de Variación de los concretos estructurales son (*Cuadro 3.2*).

Cuadro 3.2. Coeficientes de Variación en concretos estructurales [Arnal y Betancourt, 1997].

Proceso de Manufactura	Coefficiente de Variación (CV)
Concreto premezclado mecánicamente, proporcionado por masa y controlando el contenido de agua de los agregados pétreos	0.15
Concreto mezclado mecánicamente, proporcionado por volumen	0.25
Concreto mezclado manualmente, proporcionado por volumen	0.30

3.6. Método del ACI 211

Este método volumétrico es más exacto que otros métodos ya que involucra los valores de densidades de todos los ingredientes para calcular el volumen absoluto que cada ingrediente ocupará en la unidad de volumen de concreto. [Kosmatha y Panarese, 1992]. El procedimiento siguiente es aplicable al concreto normal.

PASO 1: Elección del Revenimiento: Cuando no se especifica el revenimiento, puede seleccionarse un valor apropiado para la obra de los que aparecen en el *Cuadro 3.3*. Las variaciones de revenimiento que se muestran son aplicables cuando se emplea el vibrador para compactar concreto. Deben emplearse mezclas de consistencia más densa, que pueden colarse con buen rendimiento [ACI 211].



Cuadro 3.3. Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción [ACI 211].

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

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

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

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

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



En el *Cuadro 3.4* aparecen valores estimados del agua de mezclado requerida para concretos hechos con diversos tamaños máximos de agregados, con o sin aire incluido. Según sea la textura y forma del agregado, los requerimientos de agua de mezclado pueden estar por encima o por debajo de los valores tabulados, pero son suficientemente precisos para el primer cálculo.

En la parte superior del *Cuadro 3.4*, se indica la cantidad aproximada de aire atrapado que puede esperarse en concretos sin inclusión de aire, premeditada, y en la parte inferior, el promedio de contenido de aire recomendado para concretos con inclusión de aire. Para el caso de que sea necesario o deseable incluir aire, se señalan tres niveles de contenido de aire para cada tamaño de agregado, los que dependen del propósito de la inclusión de aire y de la severidad de la exposición, si la inclusión de aire está en función de la durabilidad [ACI 211].

Exposición Ligera: cuando se desee la inclusión de aire por otros efectos benéficos que no sean la durabilidad, por ejemplo, para mejorar la cohesión o trabajabilidad, o para incrementar la resistencia del concreto con bajo factor de cemento, pueden emplearse contenidos de aire inferiores a los necesarios para la durabilidad. Esta exposición incluye servicio interior o exterior en climas en los que el concreto no estará expuesto a agentes de congelación y deshielo.

Exposición Moderada: implica el servicio en climas en donde es probable la congelación, pero en los que el concreto no estará expuesto continuamente a la humedad o al agua corriente durante largos periodos antes de la congelación, ni agentes descongelantes u otros productos químicos agresivos.

Exposición Severa: el concreto expuesto a productos químicos descongelantes u otros agentes agresivos, o bien, cuando el concreto pueda resultar altamente saturado por el contacto continuo con humedad o agua corriente antes de la congelación. Ejemplos de estos son: pavimentos, pisos de puentes, guarniciones, desagües, aceras, revestimiento de canales, tanques exteriores para agua o resumideros [ACI 211].



Cuadro 3.4. Requerimientos de Agua aproximada de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado [ACI 211].

Revenimiento, mm	Agua, Kg/m ³ de concreto para tamaño máximo nominal de agregado indicado							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
Concreto Sin Aire Incluido								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
% aire atrapado	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
Concreto Con Aire Incluido								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-
Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo al nivel de exposición								
Exposición Ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición Moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición Severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

PASO 4: Selección de la relación Agua/Cemento: la relación agua/cemento requerida se determina no sólo por los requisitos de resistencia, sino también por otros factores como la durabilidad y las propiedades del acabado.

Puesto que diferentes agregados y cementos producen, generalmente, distintas resistencias empleando la misma relación agua/cemento, es muy deseable establecer una relación entre la resistencia y la relación agua/cemento para los materiales que de hecho van a emplearse. En ausencia de estos datos, pueden tomarse del *Cuadro 3.5* valores aproximados y relativamente conservadores para concretos que contengan cemento Portland CPO.

Cuadro 3.5. Relaciones entre la relación Agua/Cemento y la resistencia a la compresión del concreto [ACI 211].

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

La resistencia se basa en cilindros de 15x30 cm.

NOTA: para resistencias no especificadas es válida la interpolación lineal.



El promedio de la resistencia seleccionada del **Cuadro 3.5**, debe exceder la resistencia especificada con un margen suficiente de error para mantener el número más bajo dentro de los límites de las especificaciones del ACI 214 y ACI 318. Es por ello que se debe de calcular la resistencia promedio a la compresión requerida f'_{cr} , para la cual se realiza un diseño de la mezcla de prueba dependiendo del grado de información de campo disponible [ACI 211].

1. Si se dispone de información de pruebas de campo de más de 30 ensayos consecutivos, la mezcla de prueba se diseñará de acuerdo al **Cuadro 3.6** y **Cuadro 3.7**.

Cuadro 3.6. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra [ACI 318].

Resistencia especificada a la compresión		Resistencia promedio requerida a la compresión	
Mpa	Kgf/cm ²	Mpa	Kgf/cm ²
$f'_c \leq 35$	$f'_c \leq 357$	$f'_{cr} = f'_c + 1.34\sigma$ $f'_{cr} = f'_c + 2.33\sigma - 3.5$	$f'_{cr} = f'_c + 1.34\sigma$ $f'_{cr} = f'_c + 2.33\sigma - 35.68$
$f'_c > 35$	$f'_c > 357$	$f'_{cr} = f'_c + 1.34\sigma$ $f'_{cr} = 0.90f'_c + 2.33\sigma$	$f'_{cr} = f'_c + 1.34\sigma$ $f'_{cr} = 0.90f'_c + 2.33\sigma$

Donde σ es la desviación estándar en MPa
 f'_{cr} se tomará como el mayor de los valores proporcionados por las expresiones anteriores.

Cuadro 3.7. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra [Reglamento del Edo. de Michoacán Artículo 308].

Resistencia promedio requerida a la compresión, en Kgf/cm ²
$f'_{cr} = f'_c + 1.28 \sigma$ $f'_{cr} = f'_c + 2.52 \sigma - 35$

Donde σ es la desviación estándar en Kg/cm²
 f'_{cr} se tomará como el mayor de los valores proporcionados por las expresiones anteriores.

Cuando se dispone de menos de 30 ensayos, pero con un mínimo de 15, la desviación estándar de la muestra calculada se incrementa por el factor indicado en el **Cuadro 3.8**. Este procedimiento da como resultado una resistencia promedio requerida más conservadora (mayor). Los factores del **Cuadro 3.8** están basados en la distribución de muestreo de la desviación estándar de la muestra y proporcionan una protección (equivalente a la del registro de 30 ensayos) contra la posibilidad de que la muestra reducida subestime la verdadera desviación estándar de la población [ACI 318].



Cuadro 3.8. Factor de Modificación para la desviación Estándar de la Muestra cuando se dispone de menos de 30 ensayos [ACI 318].

Número de Ensayes	Factor de Modificación para la desviación Estándar de la Muestra
Menos de 15	Emplee Cuadro 3.9
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o más	1.00

2. Si no se dispone de los registros de las pruebas de resistencia de campo, la resistencia de la mezcla de prueba f'_{cr} puede incrementarse de acuerdo con el *Cuadro 3.9*, o se puede tomar la desviación estándar del *Cuadro 3.10*.

Cuadro 3.9. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra [ACI 318].

Resistencia especificada a la compresión		Resistencia promedio requerida a la compresión	
Mpa	Kg/cm ²	Mpa	Kgf/cm ²
$f'_c < 21$	$f'_c < 214$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$	$f'_{cr} = f'_c + 71.36$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$214 \leq f'_c \leq 357$	$f'_{cr} = f'_c + 8.03$	$f'_{cr} = f'_c + 81.86$
$f'_c > 35$	$f'_c > 357$	$f'_{cr} = 1.10 f'_c + 5.0$	$f'_{cr} = 1.10 f'_c + 50.97$

Cuadro 3.10. Desviación Estándar de la Resistencia del concreto en Kg/cm² [Reglamento del Edo. de Michoacán Artículo 308].

Procedimiento de fabricación	$f'_c < 200$ Kgf/cm ²	$200 \leq f'_c \leq 300$ Kgf/cm ²
Mezclado mecánico, proporcionamiento, corrección por humedad y absorción de los agregados de una misma fuente y de calidad controlada.	30	35
Mezclado mecánico, proporcionamiento por masa	35	45
Mezclado mecánico, proporcionamiento por volumen, volúmenes cuidadosamente controlados	50	60

PASO 5: Cálculo del Contenido de Cemento: la cantidad de cemento por volumen unitario de concreto se rige por las determinaciones expuestas en el paso 3 y 4. El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado, dividido entre la relación A/C. Sin embargo, la especificación incluye un límite mínimo separado sobre el cemento aparte de los requerimientos para la resistencia y durabilidad, la mezcla debe basarse en el criterio que conduzca a una cantidad mayor de cemento.



PASO 6: Estimación del contenido de agregado grueso: los agregados con tamaño máximo nominal y granulometría esencialmente iguales producirán concreto con una trabajabilidad satisfactoria cuando un volumen dado de agregado grueso, seco y varillado, es utilizado por unidad de volumen de concreto. Valores apropiados de volumen para el agregado grueso están dados en el *Cuadro 3.11*. Se puede ver que para una trabajabilidad igual, el volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto depende sólo de su tamaño máximo nominal y del módulo de finura del agregado fino. Este volumen se convierte a masa seca del agregado grueso requerido en un metro cúbico de concreto, multiplicándolo por la masa unitaria de varillado en seco por metro cúbico de agregado grueso [ACI 211].

Cuadro 3.11. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen del concreto [ACI 211].

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

PASO 7: Estimación del contenido de agregado fino: al término del paso 6, todos los ingredientes del concreto han sido estimados excepto el agregado fino, cuya cantidad se determina por diferencia. Para calcular esto se utiliza el método del volumen absoluto, el cual implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes. En este caso, el volumen total desplazado por los componentes conocidos (agua, aire, cemento y agregado grueso) se restan del volumen unitario de concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen ocupado por cualquier componente en el concreto es igual a su masa dividida entre la densidad de ese material (siendo esta el producto del masa unitario del agua y de la gravedad específica del material).



PASO 8: Ajustes por humedad del agregado: las cantidades de agregado que realmente deben pesarse para el concreto deben considerar la humedad del agregado. Los agregados están generalmente húmedos, y sus masas secas deben incrementarse con el porcentaje de agua, tanto absorbida como superficial, que contienen. El agua de mezclado que se añade al lote debe reducirse en cantidad igual a la humedad libre contenida en el agregado, es decir, humedad total menos absorción.

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



CAPÍTULO 4. PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS



4.1. Agregados Pétreos

PRUEBA	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Práctica estándar para el muestreo de agregados.	NMX-C-030-ONNCCE	ASTM-D-75-03
Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba.	NMX-C-170-ONNCCE	ASTM-C-702-03
Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporado por secado.	NMX-C-166-ONNCCE	ASTM-C-566-97
Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados.	NMX-C-073-ONNCCE	ASTM-C-29-97
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino.	NMX-C-165-ONNCCE	ASTM-C-128-04
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso.	NMX-C-164-ONNCCE	ASTM-C-127-04
Método de prueba estándar para materiales finos que pasan la malla No. 200 en agregados por lavado.	NMX-C-084-ONNCCE	ASTM-C-117
Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.	NMX-C-071-ONNCCE	ASTM-C-142-97
Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concretos.	NMX-C-088-ONNCCE	ASTM-C-40-99
Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.	NMX-C-077-ONNCCE	ASTM-C-136-04
Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregado fino.	NMX-C-416-ONNCCE-2003	ASTM-D-2419-02



4.1.1. Práctica Estándar para el Muestreo de Agregados

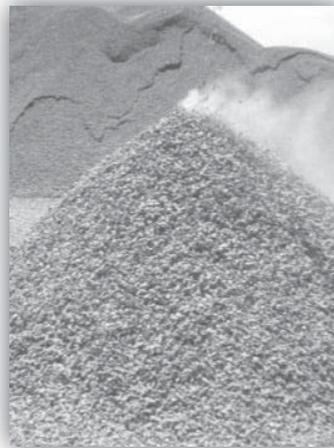
Esta práctica cubre el muestreo de agregado fino y grueso. El muestreo es igualmente importante como las pruebas ya que se tiene que tener mucha precaución para obtener muestras que revelen las condiciones naturales de los materiales que representan.

4.1.1.1. Procedimiento de Prueba

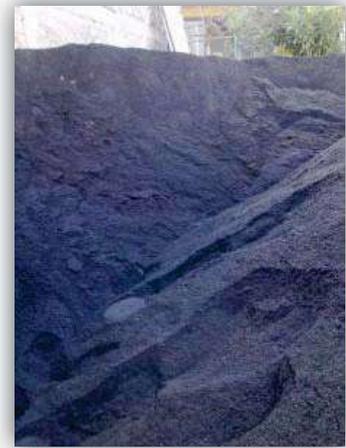
- 1) El muestreo se efectúa directamente en los bancos de material, de los camiones que estén suministrando el material a la obra o del material que se tenga en la obra misma (*Figura 4.1*).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.1. Muestreo de Materiales Pétreos. (a) Cantos rodados en río de Queréndaro, Mich. (b) Grava triturada del banco SUPRA, Mich. (c) Agregado Volcánico en el depósito del Banco Joyitas, Mich.

- 2) El procedimiento se realiza en forma sistemática seleccionando de manera objetiva y aleatoria el material para determinar sus características.
- 3) El tamaño de las muestras parciales, su número y frecuencia para cada tipo de muestreo se realizan como se indica en el *Cuadro 4.1*.
- 4) Las muestras obtenidas se envasan, identifican, transportan y almacenan, tomando en cuenta lo siguiente:
 - a) Las muestras se envasan en los costales que estén limpios antes de ser llenados.
 - b) Se debe de evitar que las muestras se contaminen con polvo u otras materias extrañas.
 - c) Revisar que los costales queden llenos y bien amarrados, con objeto de evitar pérdidas o alteración de su contenido.



- d) Las muestras se identifican mediante dos etiquetas, una en su interior y otra sujeta al exterior. Estas etiquetas incluirán, por lo menos, la siguiente información: nombre de la obra, nombre del banco, tipo de material, localización del sitio de muestreo, responsable del muestreo, fecha y hora del muestreo, uso a que se destina y observaciones. (Estos datos también se anotan en una libreta de campo, así como todas las observaciones que se consideren pertinentes).
- e) Para transportar las muestras del sitio de su obtención al laboratorio, se acomodan en el vehículo de tal modo que se eviten golpes que provoquen la perforación o rotura de los costales, así como la contaminación, alteración o pérdida del material.
- f) Una vez en el laboratorio, las muestras se registran asignándoles un número de identificación y se almacenan dentro de una bodega techada, cerrada, limpia y seca, sobre una tarima que permita el paso del aire, colocada a 15 cm del suelo como mínimo, acomodando los costales de tal forma que no puedan sufrir caídas

Cuadro 4.1. Número, Frecuencia y Tamaño del Muestreo [M-MMP-4-04-001/02]

Tipo	Número y frecuencia	Tamaño de la muestra en kg
Exploración de bancos	*Una muestra por sondeo por cada 20 000 m ³ de material homogéneo	20
	*Una muestra por sondeo por cada 5 000 m ³ de material heterogéneo	
Estudio de bancos	*Una muestra por sondeo por cada 10 000 m ³ de material homogéneo	50
	*Una muestra por sondeo por cada 2 500 m ³ de material heterogéneo	
Estudio de almacenamientos	*Una muestra por cada 400 m ³ de material	20
Control de calidad	*Una muestra por cada 250 m ³ de material	5
	*Una muestra por cada 2 500 m ³ de material	40



4.1.2. Práctica Estándar para Reducir Muestras de Agregados a Tamaños de Prueba

Esta práctica proporciona los procedimientos para reducir una muestra grande obtenida en el campo o producida en el laboratorio a una muestra de tamaño conveniente para la realización de una serie de pruebas para describir el material y medir su calidad, de manera que la porción de muestra más pequeña sea representativa de la muestra más grande, y por tanto de la muestra total.

Si no se siguen cuidadosamente los procedimientos de esta práctica, se pueden obtener muestras no representativas para ser utilizado en las pruebas posteriores.

4.1.2.1. Procedimiento de Prueba

Existen varios procedimientos para reducir las muestras al tamaño de prueba, por lo que solamente se explicarán los dos más comunes:

4.1.2.1.1. Divisor Mecánico, cuarteador de Johnson

- 1) Se toma la muestra representativa en una charola ancha, más o menos del mismo tamaño que el canal de alimentación del divisor.
- 2) Se coloca la muestra en la charola de la parte superior del divisor, distribuyéndola uniformemente de orilla a orilla, de este modo se introducirá en las canaletas aproximadamente una cantidad igual de material en cada uno de los canales, la muestra se distribuye y cae en los recipientes de la parte de abajo.
- 3) El material retenido en uno de los recipientes se elimina o se regresa al material de muestreo y el material del otro recipiente es el que se utiliza para realizar las pruebas.
- 4) Cuando se desea una muestra más pequeña, se vierte en una charola la porción de la muestra retenida en uno de los recipientes, y después se coloca dentro del divisor, realizando este procedimiento de reducción tantas veces como sea necesario para reducir la muestra al tamaño deseado.

4.1.2.1.2. Cuarteo.

- 1) Se coloca la muestra original sobre un nivel de superficie limpio y duro, donde no pueda existir ninguna pérdida de material o adición accidental de material foráneo.
- 2) Se mezcla la muestra desde abajo y se gira tres veces cambiándola cada vez al extremo opuesto.



- 3) En el último cambio se traslapa la muestra entera dentro de una pila cónica depositando cada palada sobre la punta superior de la pila.
- 4) Se aplanar la parte superior de la pila con la parte posterior de la pala.
- 5) Se divide la masa aplanada en cuatro cuartos iguales con la pala, trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie del material, removiendo y eliminando dos cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino recogido al barrer los espacios y dejando limpia la zona (*Figura 4.2*).
- 6) Los dos cuartos restantes se utilizan para efectuar las pruebas necesarias.
- 7) Cuando se desea una muestra más pequeña, se repite el procedimiento desde el paso 2 para reducir la muestra al tamaño deseado.



Muestra cónica en una superficie limpia y dura (Arena volcánica)



Remezclado para formar nuevamente el cono (Grava Triturada)



Cuarteo después de aplanar el cono (Arena Volcánica)



Muestra dividida en cuatro cuartos iguales (Grava redondeada)



Se retienen cuartos opuestos y se desecha el resto (Grava Triturada)

Figura 4.2. Cuarteo en superficie dura, limpia y nivelada [Procedimiento ASTM-C-70-03].



4.1.3. Método de Prueba Estándar para el Contenido total de Humedad Evaporado por Secado

Este método de prueba es lo suficientemente preciso para los propósitos habituales, tales como el ajuste en las cantidades de agregados utilizados para elaborar concreto.

4.1.3.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Se toma el agregado y se cuartea para obtener una muestra representativa.
- 2) Se determina la masa de la muestra con aproximación al 0.1%.
- 3) Se coloca la muestra en una charola y seca en la parilla. La muestra está completamente seca, cuando el calor le causa menos del 0.1% de pérdida adicional en masa (*Figura 4.3*)
- 4) Se determinan la masa de la muestra seca con una precisión de 0.1% después de que se haya enfriado lo suficiente.



Figura 4.3. Secado de las muestras (Grava triturada)

4.1.3.1. Cálculo

$$\% H = \frac{W_i - W_f}{W_f} \times 100$$

Donde:

% H = contenido total de humedad, en %.

W_i = masa del material en su estado original, en gr.

W_f = masa del material seco, en gr.



4.1.4. Método de Prueba Estándar para la Masa Unitaria (Masa Volumétrica Suelta y Compacta) en agregados

Este método de prueba se utiliza generalmente para determinar los valores de masa volumétrica (o masa unitaria) que son necesarios para el uso de muchos métodos de selección en las proporciones de las mezclas de concreto. Este método también se puede utilizar para determinar las relaciones masa/volumen al momento de hacer las compras de los agregados.

4.1.4.1. Procedimiento de la Masa Volumétrica Seca y Suelta

- 1) Se toma el agregado y se cuartea para obtener una muestra representativa.
- 2) Se vacía el agregado dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir del borde del recipiente de aproximadamente 5 centímetros (*Figura 4.4*).
- 3) Se sigue llenando el recipiente hasta colmarlo formando un cono.
- 4) Se nivela la superficie con los dedos o con la varilla de modo que no quede ningún pedazo sobresaliente (*Figura 4.5*).
- 5) Se determina la masa de la muestra con una precisión de 0.1%.



Figura 4.4. Vertido del agregado en el molde (Arena de río)



Figura 4.5. Nivelado del recipiente (Grava de río)

4.1.4.2. Procedimiento de la Masa Volumétrica Seca y Varillada

- 1) Se toma el agregado y se cuartea para obtener una muestra representativa.
- 2) Se llena el recipiente a un tercio de su capacidad y se nivela la superficie con los dedos.
- 3) Se varilla la capa de agregados dando 25 golpes, distribuidos ampliamente sobre la superficie, con la varilla punta de bala (*Figura 4.6*).
- 4) Se llena el recipiente a dos tercios y se vuelve a nivelar y varillar como se hizo en el paso 2.



- 5) Se llena el recipiente hasta rebasar el borde, se varilla nuevamente y se enrasa con la varilla (Figura 4.7)
- 6) Se determina la masa de la muestra con una precisión de 0.1%



Figura 4.6. Se llena el recipiente en tres capas dando 25 golpes a cada capa (Grava de río)



Figura 4.7. Al terminar el llenado, se enrasa el recipiente con la misma varilla utilizada (Grava de río)

4.1.4.3. Cálculo

La masa volumétrica seca suelta y varillada se determina con la siguiente fórmula:

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

Donde:

M_V = masa volumétrica de los agregados, en Kg/cm³.

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

T = masa del recipiente, en Kg.

V = volumen del recipiente, en m³.



4.1.5. Método de Prueba Estándar para la Densidad relativa y Absorción del agregado fino

La Densidad relativa (gravedad específica) es la característica que generalmente se utiliza para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en las mezclas de concreto que son proporcionadas o analizadas sobre la base del volumen absoluto.

Los valores de absorción se utilizan para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios de poro dentro de las partículas constituyentes, en comparación con la condición seca, cuando se considera que el conjunto ha estado en contacto con el agua el tiempo suficiente para satisfacer la mayor parte del potencial de absorción.

4.1.5.1. Procedimiento de la Densidad Relativa

- 1) Se toma el agregado fino y se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 1 Kg y se cubre con agua manteniéndola en esa condición durante 24 ± 4 horas.
- 2) Se seca superficialmente la muestra por medio del molde troncocónico de la siguiente manera:
 - a) Se coloca la arena en una charola para ponerla a sacar en una parrilla hasta eliminar el agua que tiene en exceso.
 - b) Para saber cuando está seca superficialmente se coloca el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena en tres capas distribuyendo 25 golpes dados con el pizón, dando 12 a la primera, 8 a la segunda y 5 a la tercera.
 - c) Se retira el cono y si la arena trata de disgregarse quiere decir, que ya está seca superficialmente y si mantiene la forma del cono significa que todavía tiene agua en exceso, por lo que se requiere seguir secando la muestra (*Figura 4.8*).
- 3) Se introduce agua en el matraz Chapman hasta aproximadamente la mitad de su capacidad.
- 4) Se pesan 500 ± 10 gramos de la muestra superficialmente seca registrando este valor como “S”.
- 5) Con la ayuda de un embudo, se introduce la muestra en el matraz y se le adiciona agua hasta aproximadamente el 90% de su capacidad.
- 6) Después de introducir el material, se agita el matraz a fin de expulsar el aire atrapado (*Figura 4.9*).



- 7) Generalmente se requieren de 15 a 20 minutos para eliminar las burbujas de aire y se puede sumergir la punta de una toalla de papel en el matraz para eliminar las burbujas de aire acumuladas en la superficie.
- 8) Después de eliminar las burbujas, se llena el matraz hasta que alcance su máxima capacidad (*Figura 4.10*) y se determina la masa total del matraz más la muestra y el agua del interior registrando este valor como “C” (*Figura 4.11*).
- 9) Se remueve el agregado fino del frasco y se seca a temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, se deja enfriar en un cuarto a temperatura ambiente por $1 \pm 1/2$ hora y se determina su masa registrando este valor como “A” (*Figura 4.12*).
- 10) Por último se determina la masa del matraz lleno de agua hasta su máxima capacidad y se registra este valor como B.

4.1.5.1.1. Cálculo

$$Dr = \frac{A}{B + S - C}$$

Donde:

Dr = densidad relativa o gravedad específica, adimensional

A = masa del material seco en el horno o parilla, en gr.

B = masa del matraz lleno de agua, en gr.

S = masa del material superficialmente seco, en gr.

C = masa total del matraz más la muestra y el agua, en gr.

4.1.5.2. Procedimiento del Porcentaje de Absorción

- 1) Del mismo material que quedó superficialmente seco del procedimiento anterior, se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 1 Kg se toman 300 gr. registrando esta masa como masa saturada y superficialmente seca.
- 2) La muestra se coloca en una charola para secarla hasta masa constante, es decir, hasta eliminar completamente el agua (*Figura 4.12*).
- 3) Para saber cuando el material está seco se coloca un cristal sobre el material, si no lo empaña se retira el material.
- 4) Se deja enfriar un poco la muestra y se determina la masa, registrando este dato como masa seca del material (*Figura 4.13*).



4.1.5.2.1. Cálculo

$$\% \text{ Absorción} = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

Donde:

% Absorción = porcentaje de absorción, en %.

Ph = masa del material superficialmente seco, en gr.

Ps = masa del material seco, en gr.



Figura 4.8. Secado superficial de la arena por medio del molde troncocónico (Arena volcánica)



Figura 4.9. Agitado del matraz Chapman para expulsar el aire atrapado (Arena de río)



Figura 4.10. Llenado del matraz hasta la marca de aforo (Arena de río)



Figura 4.11. Determinación de la masa del matraz lleno (Arena volcánica)



Figura 4.12. Secado de la muestra para eliminar por completo el agua absorbida (Arena volcánica)



Figura 4.13. Determinación de la masa final después del secado (Arena de río)



4.1.6. Densidad Relativa y Absorción del agregado grueso

La Densidad relativa (gravedad específica) es la característica que generalmente se utiliza para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en las mezclas de concreto que son proporcionadas o analizadas sobre la base del volumen absoluto.

Los valores de absorción se utilizan para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios de poro dentro de las partículas constituyentes, en comparación con la condición seca, cuando se considera que el conjunto ha estado en contacto con el agua el tiempo suficiente para satisfacer la mayor parte del potencial de absorción.

4.1.6.1. Procedimiento de la Densidad Relativa

- 1) Se toma el agregado fino y se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 1 Kg.
- 2) De la fracción de material que se retiene en la malla de 3/8" se toma una cantidad tal que permita obtener una muestra de aproximadamente 500 g.
- 3) Se colocan los 500 g de material en una charola con agua, donde se somete a saturación por un período de 24 h.
- 4) Después del período de saturación, se retira el material del agua y se seca superficialmente con un lienzo, procurando eliminar únicamente el agua adherida en la superficie sin remover mediante presión el agua absorbida. Esta operación se realiza lo más rápido posible a fin de evitar cualquier pérdida de agua por evaporación (*Figura 4.14*).
- 5) Se coloca el picnómetro sobre una superficie horizontal libre de vibraciones y se llena con agua destilada hasta el nivel de derrame. Junto a él, en su extremo de desalojo se coloca una probeta graduada vacía.
- 6) El material saturado y superficialmente seco se sumerge en el picnómetro y se recolecta en la probeta graduada el agua desalojada. Al concluir la inmersión del material, se mide sobre la escala de la probeta graduada el volumen correspondiente y se registra como V_t , en cm^3 (*Figura 4.15* y *Figura 4.16*).
- 7) Se extrae el material del picnómetro y se coloca en una charola para secarlo en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 20 h. Transcurrido este tiempo, el material se saca del horno y se deja enfriar hasta temperatura ambiente.
- 8) Una vez enfriado, se determina la masa del material seco y se registra como P_i , en gr.



4.1.6.1.1. Cálculo

$$Dr = \frac{P_i}{V_t(D_w)}$$

Donde:

Dr = densidad relativa o gravedad específica, adimensional

Pi = masa del material retenido en la malla de 3/8” completamente seco, en gr.

Vt = volumen del material retenido en la malla de 3/8”, en cm³.

Dw = densidad del agua, que se considera igual a 1 gr/cm³.

4.1.6.2. Procedimiento del Porcentaje de Absorción

- 1) Del mismo material que quedó superficialmente seco del procedimiento anterior, se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 500 gr. registrando esta masa como masa saturada y superficialmente seca (*Figura 4.17*).
- 2) La muestra se coloca en una charola para secarla hasta masa constante, es decir, hasta eliminar completamente el agua (*Figura 4.18*).
- 3) Para saber cuando el material está seco se coloca un cristal sobre el material, si no lo empaña se retira el material.
- 4) Se deja enfriar un poco la muestra y se determina la masa, registrando este dato como masa seca del material.

4.1.6.2.1. Cálculo

$$\% \text{ Absorción} = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

Donde:

% Absorción = porcentaje de absorción, en %.

Ph = masa del material superficialmente seco, en gr.

Ps = masa del material seco, en gr.



Figura 4.14. Secado superficial de la grava (Grava volcánica)



Figura 4.15. Introducción de la muestra al picnómetro (Grava volcánica)



Figura 4.16. Recolección del líquido desalojado por la muestra (Grava volcánica)



Figura 4.17. Determinación de la masa de la muestra superficialmente seca (Grava volcánica)



Figura 4.18. Secado de la muestra para eliminar por completo el agua absorbida (Grava volcánica)



4.1.7. Método de Prueba Estándar para Materiales que pasan la malla No. 200 en agregados por lavado

Con este método de prueba, el material fino que pasa la malla no. 200 puede ser separado de partículas de mayor tamaño mucho más eficiente y completamente por tamizado en húmedo que a través de la utilización de tamizado en seco. Por lo tanto, cuando las determinaciones de material más fino que 75 micras de agregado fino o grueso se desean, este método de prueba se utiliza en la muestra antes de ser tamizada en seco de acuerdo a la norma ASTM-C-136-04.

4.1.7.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Se toma el agregado fino y se cuartea para obtener una muestra representativa de 300 gr como mínimo y se seca a una temperatura constante de 110 ± 5 °C.
- 2) Después del secado se determina su masa registrándola como W_i .
- 3) Se coloca el material en un contenedor y se le agrega agua suficiente hasta cubrir todo el recipiente (*Figura 4.19*).
- 4) Hecho lo anterior, se lava el material decantando el vaso, para lo cual se agita su contenido en forma de “ochos” utilizando una varilla metálica, a la vez que se vierte sobre la malla N°200 (0,075 mm) (*Figura 4.20*).
- 5) Para facilitar el paso y eliminación de los finos, se aplica un chorro de agua con baja presión sobre el contenido de la malla, repitiendo esta operación hasta que el agua salga limpia.
- 6) Finalmente se regresa el material retenido en la malla N°200 al vaso metálico y se seca en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta masa constante, la cual se pesa y se registra como W_f (*Figura 4.21*).



Figura 4.19. Se vierte agua para hacer el lavado (Arena volcánica)



Figura 4.20. Agitado del vaso en forma de “ochos” (Arena volcánica)



Figura 4.21. Secado del material (Arena volcánica)



4.1.7.2. Cálculo

$$\% A = \frac{W_i - W_f}{W_f} \times 100$$

Donde:

% A = porcentaje de material que pasa la malla No. 200, en %.

W_i = masa inicial del material seco, en gr.

W_f = masa del material seco después del lavado, en gr.

4.1.7.3. Especificaciones

Cuadro 4.2. Materiales finos que pasan por la criba 0.075mm (No. 200)

Concepto	Material Máximo permisible en Masa de la muestra total en %	
	NMX-111-ONNCCE-2004	ASTM-C-33-03
En concreto sujeto a abrasión	5.00 ⁽¹⁾	3.00 ^(A)
En concretos presforzados	8.00 ⁽¹⁾	-
En otros concretos	15.00	5.00 ^(A)

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

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



4.1.8.Método de Prueba Estándar para Terrones de arcilla en agregados

Este método de ensayo es de importancia primordial para determinar la aceptabilidad de los agregados con respecto a los requisitos de la norma ASTM-C-33-03.

4.1.8.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Se toma el agregado fino y se cuartea para obtener una muestra representativa de aproximadamente 1 kilogramo y se seca a una temperatura constante de 110 ± 5 °C, teniendo cuidado de no romper los terrones de arcilla.
- 2) Se deja enfriar la muestra y se pasa por la malla No. 16, del retenido se toma una muestra de 100 gramos y se anota como Pi pesados al décimo de gramo.
- 3) Se coloca el material en una charola y se extiende en una fina capa en la parte inferior.
- 4) Se cubre la muestra con agua y se deja reposar durante un período de 24 ± 4 horas.
- 5) Se presionan las partículas individualmente entre el dedo pulgar y el índice para tratar de romper los terrones de arcilla que existan (*Figura 4.22*).
- 6) Después de que todo el material ha sido presionado, se tamiza la muestra por la malla No. 20.
- 7) El tamizado se realiza vertiendo agua sobre la muestra mientras se agita manualmente la criba, hasta que todo el material de menor tamaño ha sido eliminado.
- 8) Se remueven las partículas retenidas en el tamiz y se secan a temperatura constante de 110 ± 5 °C (*Figura 4.23*).
- 9) Se deja enfriar el material y se determina su masa.



Figura 4.22. Se rompen los terrones de arcilla que existen en la muestra (Arena volcánica)



Figura 4.23. Se seca el material a una temperatura constante (Arena volcánica)

4.1.8.2. Cálculo

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

Donde:

% Terrones = porcentaje de terrones de arcilla, en %.

M = masa inicial del material seco retenido en la malla No.16, en gr.

N = masa final del material seco retenido en la malla No.20, en gr.

4.1.8.3. Especificaciones

Cuadro 4.3. Límites máximos de partículas deleznales [NMX-C-111-ONNCCE-2004 y ASTM-C-33-03].

<i>Concepto</i>	<i>Material Máximo permisible en masa de la muestra total en %</i>
Grumos de arcilla y partículas deleznales	3.00



4.1.9. Método de Prueba Estándar para las Impurezas Orgánicas en Agregado Fino para Concreto

Este método de prueba se utiliza en hacer una preliminar determinación de la aceptabilidad de los agregados finos con respecto a los requisitos de la Norma ASTM-C-33-03 que se refieren a las impurezas orgánicas.

4.1.9.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Se toma el agregado fino y se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 450 gramos.
- 2) Se coloca la arena en una botella (frasco de biberón) hasta la marca de 130 ml.
- 3) Se le adiciona una solución de hidróxido de sodio hasta que el volumen del agregado fino con la solución después de agitarse vigorosamente indique 200 ml (Figura 4.24).
- 4) Se tapa la botella y se deja reposar durante 24 horas.
- 5) Al término del tiempo, se compara el color de la botella con la carta colorimétrica y se registra el número de la carta que más se parezca al color de la botella (Figura 4.25).



Figura 4.24. Agitado de la botella (Arena de río)



Figura 4.25. Comparación del color de la botella con la carta colorimétrica (Arena volcánica)

4.1.9.2. Especificaciones

Cuadro 4.4. Carta Colorimétrica para determinar impurezas orgánicas [ASTM-C-40-04].

Carta Colorimétrica				
1	2	3 (Color Límite)	4	5



4.1.10. Método de prueba Estándar para el Análisis Granulométrico de Agregados Finos y Gruesos

Este método cubre la determinación de la distribución de tamaño de las partículas de los agregados finos y gruesos mediante el tamizado. Se utiliza principalmente para determinar la clasificación de los materiales propuestos para su uso como áridos o para ser utilizados como agregados. Los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de las partículas con los requisitos de las especificaciones aplicables y proporcionar los datos necesarios para el control de la producción de diversos productos agregados y mezclas que contengan agregados. Los datos también pueden ser útiles en el desarrollo de las relaciones sobre la porosidad y el embalaje.

4.1.10.1. Procedimiento de Prueba para el Agregado Fino

- 1) Se toma el agregado fino y se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 600 gramos.
- 2) Se seca la muestra a una temperatura constante de 110 ± 5 °C y cuando el material este seco y frío, se toman 500 gramos.
- 3) Se colocan las mallas en orden decreciente (No.4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola), se vierte la muestra de 500 gramos en la malla superior y se tapa.
- 4) Se agitan las mallas ya sea en forma manual o con algún equipo mecánico por un periodo suficiente, que una vez terminado el cribado, no más del 1% en masa del material retenido en cualquier malla individual, pase por ella durante un minuto de cribado continuo a mano (*Figura 4.26*).
- 5) Finalmente se determina y registra la masa retenida en cada malla vertiendo su contenido en la balanza, considerando que las partículas que hayan quedado atoradas en cada retícula forman parte del material retenido de la malla correspondiente, por lo que se reintegrará este material cepillando las mallas por el revés (*Figura 4.27*).
- 6) La masa total del material después del cribado se debe checar con la masa original al inicio de la prueba. Si las cantidades difieren en más de un 0.3%, basado en la masa de la muestra seca inicial, los resultados no deben ser utilizados con fines de aceptación (*Figura 4.28 y Figura 4.29*).



Figura 4.26. Cribado de cada malla después del cribado general (Arena Volcánica)



Figura 4.27. Determinación de la masa que se retiene en cada malla (Arena de río)

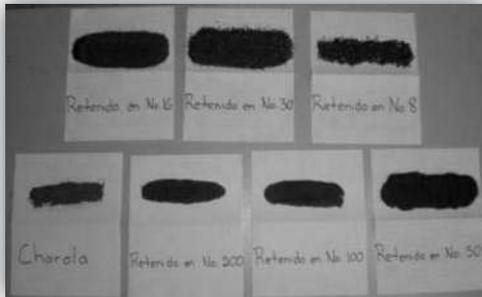


Figura 4.28. Resultado final del cribado (Arena volcánica)



Figura 4.29. Resultado final del cribado (Arena de río)

4.1.10.1.1. Cálculos

- a) Se hace realiza una tabla con cinco columnas.
- b) En la primera columna se escriben los números de las mallas en orden decreciente.
- c) En la segunda columna se anotan las masas retenidas en las respectivas mallas de la columna 1.
- d) En la tercera columna se anotan los porcentajes del material retenido en cada malla, respecto a la masa total de la muestra, mediante la siguiente expresión:

$$\% \text{Retenido} = \frac{W_N}{\sum W_T} \times 100$$

Donde:

% Retenido = porcentaje retenido en la malla N respecto a la masa original, en %.

W_N = masa del material retenido en la malla N, en gr.

$\sum W_T$ = suma de las masas retenidas de la columna 2, en gr.



e) En la cuarta columna se anotan los porcentajes retenidos acumulados de la siguiente manera:

$$\% \text{ Retenido Acumulado} = \% \text{ Retenido en la malla } N + \% \text{ Retenido Acumulado en la malla anterior}$$

f) En la columna cinco se anotan los porcentajes que pasa de la siguiente manera:

$$\% \text{ Que pasa} = 100 - \% \text{ Retenido Acumulado en la malla } N$$

g) El módulo de Finura se calcula de la siguiente manera:

$$M.F. = \frac{\Sigma \text{ del } \% \text{ Retenido Acumulado en las mallas } 100, 50, 30, 16, 8}{100} \times 100$$

4.1.10.1.2. Especificaciones

Cuadro 4.5. Límites del Módulo de Finura [NMX-C-111-ONNCCE-2004 y ASTM-C-33-03].

<i>Módulo de Finura de la Arena</i>
Entre 2.3 y 3.1

Cuadro 4.6. Límites de Granulometría para agregado Fino

<i>Malla</i>	<i>NMX-C-111-ONNCCE-2004</i>	<i>ASTM-C-33-03</i>
<i>mm (No.)</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>% Que pasa</i>
9.5 (3/8")	100	100
4.75 (No. 4)	95-100	95-100
2.36 (No. 8)	80-100	80-100
1.18 (No. 16)	50-85	50-85
0.60 (No. 30)	25-60	25-60
0.30 (No. 50)	10-30	5-30
0.15 (No. 100)	2-10	0-10



4.1.10.2. Procedimiento de Prueba para el Agregado Grueso

- 1) Se seca la muestra a una temperatura constante de 110 ± 5 °C y cuando el material este seco y frío, se hace el cuarteo para obtener una muestra de aproximadamente la capacidad del recipiente con el que se hizo la prueba de *Masas Volumétricas*.
- 2) Se trabaja individualmente cada malla (3/4", 1/2", 3/8" y No.4) usando tres charolas rectangulares, procediendo de la siguiente forma (*Figura 4.30*):
 - (a) Se coloca en la primera charola la muestra seca, a la que previamente se le ha determinado su masa. Dentro de la segunda charola se pone la malla de mayor tamaño y con el cucharón se colocan porciones de la muestra, en cantidad tal que no cubran la malla con más de una capa de partículas.
 - (b) Se agita la malla con ambas manos y se verifica que todas las partículas tengan movimiento sobre ésta. Cuando ya no pase material, el retenido en la malla se coloca en la tercera charola, continuando con la siguiente porción de la misma manera, haciéndolo consecutivamente hasta cribar toda la muestra.
 - (c) Se determina en la balanza y se registra, la masa retenida en la malla, con lo que se libera la tercera charola, que pasa a ser la segunda para el siguiente proceso, con la malla subsecuente.
- 3) Sucesivamente se aplica el mismo procedimiento con las mallas siguientes, depositando el material que pasa en la segunda charola y el retenido en la tercera, concluyendo al llegar a la malla N°4 donde se determina y registra la masa del material que pasó esta última malla.
- 4) La masa total del material después del cribado se debe checar con la masa original al inicio de la prueba. Si las cantidades difieren en más de un 0.3%, basado en la masa de la muestra seca inicial, los resultados no deben ser utilizados con fines de aceptación (*Figura 4.31, Figura 4.32 y Figura 4.33*).



Figura 4.30. Cribado de la muestra (Grava de río)



Figura 4.31. Resultado final del cribado (Grava de río)



Figura 4.32. Resultado final del cribado (Grava volcánica)



Figura 4.33. Resultado final del cribado (Grava triturada)

4.1.10.2.1. Cálculos

- Se hace realiza una tabla con cinco columnas.
- En la primera columna se escriben los números de las mallas en orden decreciente.
- En la segunda columna se anotan las masas retenidas en las respectivas mallas de la columna 1.
- En la tercera columna se anotan los porcentajes del material retenido en cada malla, respecto a la masa total de la muestra, mediante la siguiente expresión:

$$\% \text{Retenido} = \frac{W_N}{\Sigma W_T} \times 100$$

Donde:

% Retenido = porcentaje retenido en la malla N respecto a la masa original, en %.

W_N = masa del material retenido en la malla N, en gr.

ΣW_T = suma de las masas retenidas de la columna 2, en gr.

- En la cuarta columna se anotan los porcentajes retenidos acumulados de la siguiente manera:

$$\% \text{ Retenido Acumulado} = \% \text{ Retenido en la malla } N + \% \text{ Retenido Acumulado en la malla anterior}$$

- En la columna cinco se anotan los porcentajes que pasa de la siguiente manera:

$$\% \text{ Que pasa} = 100 - \% \text{ Retenido Acumulado en la malla } N$$

- El tamaño máximo del agregado es la dimensión de la criba de menor abertura por la que pasa la totalidad de un agregado.
- El tamaño máximo nominal del agregado es el que se nombra en las especificaciones como la criba de menor abertura por la que pasa la cantidad agregado permitido.



4.1.10.2.2. Especificaciones

Cuadro 4.7. Límites Granulométricos del agregado grueso, en porcentaje que pasa [ASTM-C-33-03].

No.	Tamaño Nominal mm (Pulg)	100 4"	90 3 1/2"	75 3"	63 2 1/2"	50 2"	37.5 1 1/2"	25 1"	19 3/4"	12.0 1/2"	9.5 3/8"	4.75 No. 4	2.36 No. 8	1.18 No. 16
1	90.0 a 37.5 (3 1/2"-1 1/2")	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
2	63.0 a 37.5 (2 1/2"-1 1/2")	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
3	50.0 a 25.0 (2" a 1")	-	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-
357	50.0 a 4.75 (2" a No. 4)	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	-	0 a 5	-	-
4	37.5 a 19.0 (1 1/2"-3/4")	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-
467	37.5 a 4.75 (1 1/2"-No. 4)	-	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-
5	25.0 a 12.5 (1" a 1/2")	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-	-
56	25.0 a 9.5 (1" a 3/8")	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	-	-
57	25.0 a 4.75 (1" a No. 4)	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
6	19.0 a 9.5 (3/4" a 3/8")	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	-	-
67	19.0 a 4.75 (3/4" a No. 4)	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-
7	12.5 a 4.75 (1/2" a No.4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-
8	9.5 a 2.36 (3/8" a No. 8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5
89	9.5 a 1.18 (3/8" a No.16)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 10	20 a 55	5 a 30	0 a 10
9	4.75 a 1.18 (No. 4-No. 16)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10



4.1.11. Método de Prueba Estándar para el valor de Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos

Este método de ensayo tiene por objeto servir como una prueba de campo correlación rápida. Su propósito es indicar, en condiciones normales, las proporciones relativas arcillosas y polvos en suelos granulares y agregados finos que pasan la malla No. 4. El término "equivalente de arena", expresa el concepto de que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezclas de partículas deseables gruesas como la arena y partículas no deseables como arcillas, limos y polvo.

Este método asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura, y el carácter de material arcilloso. El valor mínimo de equivalente de arena se puede especificar para limitar la cantidad admisible de material arcilloso en un agregado.

4.1.11.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Se divide o cuartea suficiente material de la porción que pasa la malla No.4 para llenar el recipiente metálico de 85 ml, de manera que quede levemente redondeada por encima del borde.
- 2) Se golpea el filo del fondo del recipiente en la mesa de trabajo o en cualquier otra superficie dura para causar la consolidación del material y permitir la colocación de la máxima cantidad en el recipiente y se enrasa el contenido del recipiente con una espátula o regla.
- 3) Se prepara la solución de reserva que consiste en la disolución de 454 g de cloruro de calcio en 1.9 litros de agua destilada que se enfría al aire libre, hasta alcanzar la temperatura ambiente para después pasarla a través de papel filtro y al final se le agregan 47 gramos de formaldehído y 2 047 gramos de glicerina, mezclándolos bien y diluyéndolos con agua destilada hasta completar los 3.2 litros de líquido.
- 4) Se prepara la solución de trabajo en la botella equipada con el equipo sifón diluyendo 90 mililitros de la solución de reserva en 3.8 litros de agua destilada.
- 5) Se coloca la botella equipada con el equipo sifón de tal manera que la salida del líquido quede a 92.cm de altura con relación a la superficie de la mesa de trabajo, uniendo la botella mediante la manguera de hule al tubo irrigador.
- 6) Por medio del sifón, se introduce la solución de trabajo al cilindro hasta una altura de 10 cm (4”).



- 7) Con la ayuda del embudo, se vacía al cilindro de prueba la muestra de material contenida en la cápsula, golpeando firmemente varias veces el fondo del cilindro contra la palma de la mano para eliminar las burbujas de aire atrapado dentro del material y acelerar la saturación de la muestra.
- 8) Se deja reposar la muestra durante 10 min, se cierra el cilindro de prueba con un tapón y se agita vigorosamente colocando el cilindro en posición horizontal de un lado a otro en sentido longitudinal durante 90 ciclos en un tiempo de 30 segundos, con una carrera aproximada de 20 cm, entendiendo que un ciclo comprende un movimiento completo de oscilación, es decir, de un lado a otro hasta concluir en la posición de partida.
- 9) Se coloca el cilindro sobre la mesa de trabajo y se le quita el tapón, inmediatamente se le inserta el tubo irrigador con el cual se lavan las paredes del cilindro de arriba a abajo hasta concluir en el fondo. Con el fin de hacer la irrigación uniforme en todo el recorrido, se gira el cilindro conforme avanza el tubo irrigador, propiciando la separación entre el material arcilloso y el arenoso.
- 10) Cuando el nivel del líquido llegue a 38,1 cm (15”), medido sobre la escala del cilindro de prueba, se extrae lentamente el tubo irrigador sin cortar el flujo de solución, de manera que el nivel del líquido se mantenga en los 38.1 cm después de retirar completamente el tubo.
- 11) Se deja reposar el cilindro durante 20 min, evitando cualquier movimiento o vibración durante este período, transcurrido el cual, la arena se ha sedimentado y los finos permanecen en suspensión.
- 12) Se mide y registra como Lectura de arcilla el nivel superior de los finos en suspensión, con aproximación de 2 mm (0,1” aprox.) (*Figura 4.34*).



Figura 4.34. Medición del nivel de finos (Arena volcánica)



- 13) A continuación se introduce lentamente la varilla con pisón dentro del cilindro, cuidando de no formar turbulencias, hasta que la base descansa sobre la arena, como se muestra en la *Figura 4.35*.
- 14) Se observa el nivel de la parte superior del indicador en la escala del cilindro, se le resta la altura h (254 mm aprox.) y se registra como Lectura de arena, con aproximación de 2 mm (0.1” aprox.).
- 15) Una vez concluida la prueba, se limpia el cilindro, tapándolo y agitándolo en posición vertical; se voltea y se destapa para vaciarlo inmediatamente. Para finalizar se lava dos veces con agua, hasta eliminar cualquier residuo de material en su interior.

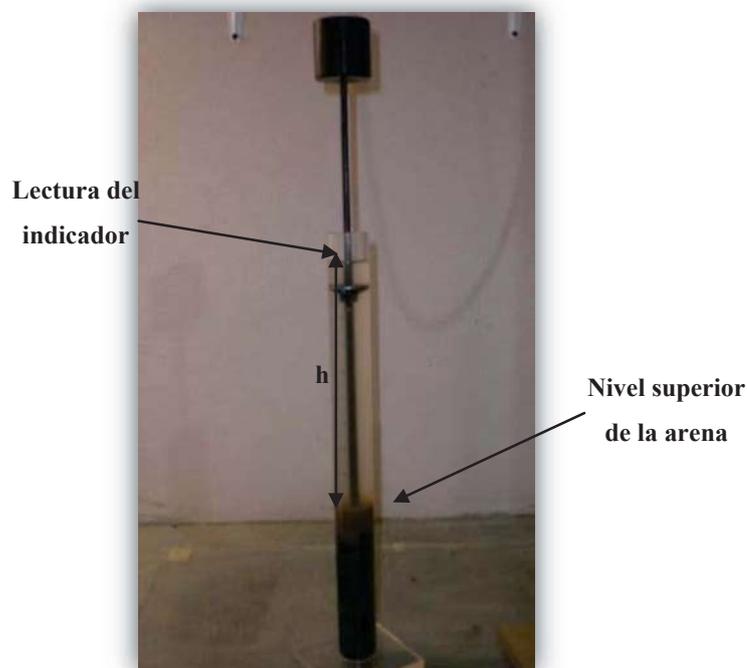


Figura 4.35. Medición del nivel de arena (Arena volcánica)

4.1.11.2. Cálculo

$$EA = \frac{L_{are}}{L_{arc}} \times 100$$

Donde:

EA = equivalente de arena, en %.

L_{are} = lectura de arena, en pulg.

L_{arc} = lectura de arcilla, en pulg.



4.2. Cemento

PRUEBA	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico.	NMX-C-057-1997-ONNCCE	ASTM-C-187-98
Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico por la aguja de Vicat.	NMX-C-059-ONNCCE-2006	ASTM-C-191-01a
Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico.	NMX-C-152-1997-ONNCCE	ASTM-C-188-95

4.2.1. Método de Prueba Estándar para la Consistencia Normal del Cemento Hidráulico

Este método de prueba está destinado a ser utilizado para determinar la cantidad de agua necesaria para preparar las pastas de cemento hidráulico para la realización de esta y otras pruebas.

4.2.1.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Se pesan 650 gr de cemento y se vierten sobre una mesa con superficie lisa e impermeable y se forma una especie de cráter con el cemento ayudados con una pequeña espátula.
- 2) Se fija una cantidad de agua expresada en por ciento. Respecto a la masa del cemento seco, se mide en la probeta graduada y se vierte en el centro del cráter (echando a andar un cronómetro al caer el agua sobre el cemento).
- 3) Con la espátula se lleva el material de las orillas del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca. (Esto debe de hacerse en un máximo de 30 segundos).
- 4) En otro ciclo de 30 segundos consecuentes a los anteriores se deja reposar la mezcla para que la humedad se homogenice. (Aprovechando el operador a colocarse guantes de hule ligeramente húmedos).



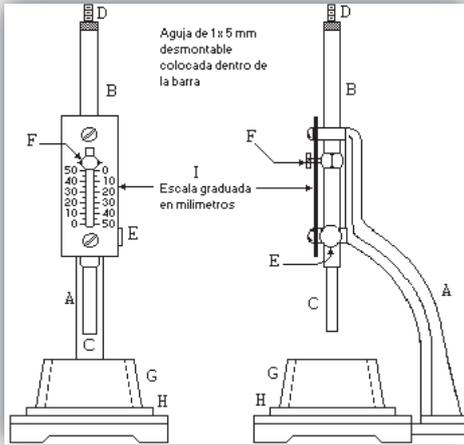
- 5) Se hace el amasado de la pasta en un tiempo global de 1.5 minutos contados a partir de los anteriores.
- a) En los primeros 30 segundos se mezcla perfectamente la masa con las manos, golpeando la mezcla, con la parte pesada de las manos hasta lograr una pasta uniforme y homogénea (*Figura 4.36*).
 - b) En otros 30 segundos se forma una esfera con la pasta y se completa la operación lanzándola de una mano a otra, seis veces, manteniendo las manos separadas por una distancia de 15 cm (*Figura 4.37*).
 - c) En los últimos 30 segundos de los 1.5 minutos, se descansa la esfera en la palma de una mano y se introduce a presión dentro del anillo cónico del aparato de Vicat por la base mayor, el cual se sostiene con la otra mano, llenando completamente el anillo con la pasta (la otra boca se descansa sobre un cristal).
 - d) El sobrante de la pasta sobre la base mayor se quita mediante un movimiento de la palma de la mano, a 90 ° de la dirección del movimiento con el que se introdujo la bola de pasta en el anillo, enseguida se coloca el anillo por su base mayor sobre la placa “H” (*Figura 4.38*).
 - e) El sobrante de la pasta se quita de la base menor mediante un corte oblicuo con el filo de la cuchara inclinada ligeramente sobre la base superior, si es necesario se alisa la superficie con el filo de la cuchara sin presionar la pasta.
 - f) Todo el conjunto constituido por la placa, pasta y anillo se lleva al aparato de Vicat procurando que quede centrado con respecto a la barra “B”. Se desliza la barra “B” hasta que toque con la parte “C” la superficie de la pasta confinada en el anillo, luego se ajusta el índice corredizo sobre la barra “B” al acero superior de la escala, o bien se hace una lectura inicial y se suelta la barra inmediatamente, esto no debe exceder los 30 segundos a partir del instante en que se terminó de hacer la pasta. El aparato debe permanecer libre de vibraciones durante la prueba (*Figura 4.39*).
- 6) Se considera que la pasta tiene una consistencia normal cuando la barra “B” con extremo “C” baje $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ a partir de la superficie original en un intervalo de 30 segundos contados desde el instante en que soltó dicha barra. Deben hacerse varias pruebas con distintos porcentajes de agua hasta que se obtenga la consistencia normal. Cada que se haga una prueba, se debe usar una porción nueva de la muestra de cemento que se prueba.



*Figura 4.36. Amasado de la pasta
(Cemento Tolteca CPC-30R)*



*Figura 4.37. Lanzado de la esfera formada con la pasta
(Cemento Tolteca CPC-30R)*



*Figura 4.38. Aparato de Vicat
[NMX-C-057-1997-ONNCCE]*



Figura 4.39. Lectura inicial después de los 30 segundos que se terminó de hacer la pasta

4.2.1.2. Cálculo

La cantidad de agua que se requiere para obtener la consistencia normal (CN) se expresa en por ciento de la masa del cemento seco, calculándose hasta décimos de por ciento y repórtese al 0.5 % más próximo.

$$CN = \frac{\text{Mililitros de agua}}{650 \text{ gr de cemento}} \times 100 = \text{_____} \%$$



4.2.2. Método de Prueba Estándar para el Tiempo de Fraguado del Cemento Hidráulico por la aguja de Vicat

Con este método se efectúa la determinación del tiempo de fraguado de las pastas de cementantes hidráulicos, midiendo su resistencia a la penetración de la aguja del aparato de Vicat. El tiempo de fraguado se ve afectado por el porcentaje y la temperatura del agua utilizada, la cantidad de amasado que la pasta recibe, por la temperatura y la humedad del aire del cuarto de mezclado y por la humedad del cuarto húmedo.

4.2.2.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Inmediatamente después de terminar el moldeado con la pasta de cemento realizada en la prueba de consistencia normal, se coloca el espécimen de prueba en el cuarto húmedo.
- 2) Después de permanecer 30 minutos en el cuarto húmedo, se determina la penetración de la aguja de 1 mm de diámetro del aparato de Vicat y posteriormente cada 15 minutos, hasta que se obtenga una penetración de 25 mm o menor.
- 3) Para la determinación de la penetración, se baja la barra “B” hasta que la aguja “D” quede en contacto con la superficie de la pasta, en este punto se fija la barra “B” con el tornillo “E”.
- 4) Se coloca el indicador “F” a una lectura cero en la escala, o se toma una lectura inicial.
- 5) Se afloja el tornillo “E”, con lo que la barra queda suelta y cae sobre la superficie de la pasta en la cual penetra. A los 30 segundos de haber caído se aprieta el tornillo “E” y se toma la lectura en la escala para determinar la penetración de la aguja.
- 6) La barra debe soltarse aflojando el tornillo “E” y caer libremente cuando se efectúen las determinaciones de tiempo de fraguado. Las penetraciones no deben efectuarse a una distancia menor de 5 mm una de otras y ninguna de ellas se hará a una distancia menor de 10 mm de la parte interior del molde (*Figura 4.40*).
- 7) Se registran todas las lecturas de las penetraciones y por interpolación se determina el tiempo correspondiente a la penetración de 25 mm; este es el tiempo de fraguado inicial. El tiempo de fraguado final es aquel en el que la misma aguja no penetra visiblemente en la pasta (*Figura 4.41*).



Figura 4.40. La aguja de 1mm penetra visiblemente en la pasta de cemento



Figura 4.41. Fraguado final en el que la guja de 1 mm no penetra en la pasta de cemento

4.2.2.2. Especificaciones

Cuadro 4.8. Especificaciones Físicas [NMX-C-414-ONNCCE-2004].

TIEMPO DE FRAGUADO (min)	
<i>Inicial</i>	<i>Final</i>
45 mínimo	600 máximo



4.2.3. Método de Prueba Estándar para la Determinación de la Densidad del Cemento Hidráulico

Este método de prueba cubre la determinación de la densidad del cemento hidráulico y su utilidad particular en la relación con el diseño y control de mezclas de concreto.

Para los efectos de esta norma, se entiende por densidad de los Cementantes Hidráulicos, la relación de la masa del cementante en gramos entre el volumen en mililitros que desplaza al introducirse en un líquido, con el cual no se efectúe reacción química alguna.

4.2.3.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Se llena el matraz Lechatelier con keroseno libre de agua o nafta a un nivel medido entre cero y un mililitro. La parte interior del matraz arriba del nivel del líquido, se debe secar en caso necesario. Se registra la primera lectura después de haber sumergido el matraz en un baño de agua a la temperatura del laboratorio (*Figura 4.42*).
- 2) Se debe tener la precaución de que la temperatura del baño sea constante durante la prueba de modo que la variación de la temperatura del líquido en el matraz al momento de tomar la lectura inicial y final, no tenga una variación mayor de 0.2 °C.
- 3) Se pesa aproximadamente 60 g de cementante con una aproximación de 0.05 g y se introduce en pequeñas porciones dentro del matraz (*Figura 4.43*).
- 4) Se debe tener cuidado de evitar salpicaduras y que el cementante se adhiera a las paredes interiores del cuello superior del matraz (*Figura 4.44*).
- 5) Se coloca el tapón al matraz y se desaloja el aire que haya sido atrapado al introducir el cementante en el líquido, para lograr esto, se gira el frasco tomándolo entre las manos, en posición inclinada, o se hace rodar en posición inclinada sobre una superficie plana que conviene cubrir con una material que proteja al matraz de una posible ruptura.
- 6) La segunda lectura se debe tomar estando el líquido en la parte graduada superior y después de sumergir el frasco en el baño de agua durante un tiempo suficiente para estabilizar la temperatura.



Figura 4.42. Matraz Lechatelier con keroseno sumergido en un baño de agua



Figura 4.43. 60 gramos de cemento Tolteca CPC-30R antes de ser introducido al matraz.



Figura 4.44. Introducción del cemento con embudo para evitar la adhesión del cemento con las paredes del matraz.

4.2.3.2. Cálculo

La diferencia entre las lecturas inicial y final representa el volumen del líquido desplazado por la masa de cementante empleado en la prueba.

$$D = \frac{M}{V}$$

Donde:

D = densidad el cementante hidráulico, en Mg/m³ o g/cm³

M = masa del cementante hidráulico, en gr

V = volumen del líquido desalojado, en cm³



4.3. Concreto Fresco

PRUEBA	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Método de prueba estándar para el revenimiento del concreto de cemento hidráulico.	NMX-C-156-1997-ONNCCE	ASTM-C-143M-03
Método de prueba estándar para la masa unitaria del concreto.	NMX-C-162-ONNCCE-2000	ASTM-C-138M-01a
Método de prueba estándar para la elaboración de especímenes de prueba en el laboratorio.	NMX-C-159-ONNCCE-2004	ASTM-C-192M-02

4.3.1. Método de Prueba Estándar para el Revenimiento del Concreto de Cemento Hidráulico

El Revenimiento es una medida de la consistencia del concreto fresco en término de la disminución de altura. Este método de prueba determina el revenimiento del concreto ya sea en el laboratorio o en campo.

4.3.1.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Después de haber obtenido una muestra representativa de la mezcla elaborada, se remezcla el concreto con una pala o cucharón lo necesario para garantizar uniformidad en la mezcla y se procede a hacer la prueba inmediatamente.
- 2) Se humedece el molde; se coloca sobre una superficie horizontal, plana, rígida, húmeda y no absorbente. El operador lo debe mantener firme en su lugar durante la operación de llenado, apoyando los pies en los estribos que tiene para ello el molde (*Figura 4.45*).
- 3) Se llena el molde con tres capas aproximadamente de igual volumen. La primera capa corresponde a una altura aproximada de 7 cm, la segunda capa debe llegar a una altura de aproximadamente 15 cm y la tercera, al extremo del molde.



Figura 4.45. Colocación del molde en superficie plana, rígida, húmeda y no absorbente.

- 4) Se compacta cada capa con 25 penetraciones de la varilla introduciéndola por el extremo redondeado, distribuidos uniformemente sobre la sección de cada capa, por lo que es necesario inclinar la varilla ligeramente en la zona perimetral; aproximadamente la mitad de las penetraciones se hacen cerca del perímetro, después, con la varilla vertical se avanza en espiral hacia el centro (*Figura 4.46*).
- 5) Se compacta la segunda capa y la superior a través de todo su espesor, de manera que la varilla penetre en la capa anterior aproximadamente 2 cm, para el llenado de la última capa se coloca un ligero excedente de concreto por encima del borde superior del molde, antes de empezar la compactación. Si a consecuencia de la compactación, el concreto se asienta a un nivel inferior del borde superior del molde, a la décima y/o vigésima penetración, se agrega concreto en exceso para mantener su nivel por encima del borde del molde, todo el tiempo (*Figura 4.47*).



Figura 4.46. Llenado del molde en tres capas dando 25 golpes con la varilla a cada capa.



Figura 4.47. Se mantiene el nivel del concreto por encima del borde del molde en la tercera capa

- 6) Después de terminar la compactación de la última capa, se enrasa el concreto mediante un movimiento de rodamiento de la varilla. Se limpia la superficie exterior de la base de asiento, e inmediatamente se levanta el molde con cuidado en dirección vertical (*Figura 4.48*).



- 7) La operación para levantar completamente el molde de los 30 cm de su altura, debe hacerse en $5 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$, alzándolo verticalmente sin movimiento lateral o torsional. La operación completa desde el comienzo del llenado hasta que se levante el molde, debe hacerse sin interrupción y en un tiempo no mayor de 2.5 min. Se mide inmediatamente el revenimiento, determinando el asentamiento del concreto a partir del nivel original de la base superior del molde, midiendo esta diferencia de alturas en el centro desplazado de la superficie superior del espécimen. Si alguna porción del concreto se desliza o cae hacia un lado, se desecha la prueba y se efectúa otra con una nueva porción de la misma muestra (Figura 4.49).



Figura 4.48. Enrasado del molde después del llenado de la última capa.



Figura 4.49. Forma correcta de colocar el molde para la medición del revenimiento

4.3.1.1. Especificaciones

Cuadro 4.9 Valor Nominal del Revenimiento y Tolerancias.

Revenimiento Nominal (cm)	Tolerancia (cm)	
	NMX-C-155-ONNCCE-2004	ASTM-C-94M-04
Menor de 5	±1.5	±1.5
De 5 a 10	±2.5	±2.5
Mayor de 10	±3.5	±4.0



4.3.2. Método de Prueba Estándar para de la Masa Unitaria del concreto

Este método de prueba se utiliza generalmente para determinar los valores de masa volumétrica (o masa unitaria) del concreto fresco. El nombre correcto de la masa unitaria es masa por unidad de volumen.

4.3.2.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Se coloca el concreto en tres capas de igual volumen aproximadamente. Cada capa se compacta con 25 penetraciones de la varilla si el volumen es de 14 litros o menos; y con 50 penetraciones si el volumen es mayor de 14 litros. La varilla debe penetrar en la capa inferior en todo su espesor, pero sin golpear el fondo del recipiente (*Figura 4.50*).
- 2) Se distribuyen las penetraciones de la varilla uniformemente en toda la superficie del concreto. Para las dos capas superiores, la varilla debe penetrar aproximadamente 20 mm en la capa inmediata inferior (*Figura 4.51*).



Figura 4.50. Llenado del recipiente en tres capas iguales dando 25 golpes a cada una.



Figura 4.51. En la segunda y tercera capa, la varilla debe penetrar 2 cm en la capa inferior.

- 3) Después de compactar cada capa, se deben dar de 10 a 15 ligeros golpes con el martillo o mazo apropiado a los lados del recipiente, hasta que se cierren los huecos dejados por la varilla de compactación y se liberen las burbujas o bolsas de aire que pudieran estar atrapadas. Al agregar la última capa se debe de evitar el rebosamiento.
- 4) Al terminar la compactación se enrasa la superficie del concreto con la placa enrasadora hasta dejar la superficie pulida y justo a nivel con el borde del recipiente.



- 5) Después de enrasar, se limpia todo el exceso de concreto adherido en el exterior del recipiente y se determina la masa del concreto con la precisión de 0.1% de la carga de prueba, cuidando que la báscula se encuentre nivelada, calibrada y fuera de corrientes de aire. (Figura 4.52).



Figura 4.52. Enrasado del recipiente y recipiente listo para ser pesado y determinar su masa unitaria.

4.3.2.2. Cálculo

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

Donde:

M_u = masa unitaria del concreto, en Kg/cm³.

G = masa del concreto más el recipiente, en Kg.

T = masa del recipiente, en Kg.

V = volumen del recipiente, en m³.

4.3.2.3. Especificaciones

Cuadro 4.10. Valores Permitidos de Masa Unitaria [NMX-C-155-ONNCCE-2004]

Concepto	Mínima	Máxima
Masa Unitaria (Kg/m ³)	1,800	2,400



4.3.3. Método de Prueba Estándar para la Elaboración de Especímenes de Prueba en el Laboratorio

Este método establece los requisitos estandarizados para la preparación de los materiales utilizados para las pruebas de resistencia a la compresión, a la flexión y a la tensión diametral; las mezclas de concreto y la toma de muestras en condiciones de laboratorio. Si la preparación de muestras se controla como se estipula en este documento, las muestras pueden ser usadas para revelar información con los siguientes fines: mezclas de dosificación para concreto de proyecto, evaluación de mezclas de diferentes materiales, correlación con pruebas no destructivas y proporcionar muestras con fines de investigación.

4.3.3.1. Procedimiento de Prueba

- 1) De la revoltura del concreto se obtiene la fracción representativa para elaborar los especímenes.
- 2) Se coloca el concreto dentro del molde, en el número de capas y espesor especificado según el
- 3) *Cuadro 4.11.*
- 4) Se varilla cada capa con el extremo redondeado empleando el número de penetraciones y tamaño de varilla especificado en el *Cuadro 4.12.*
- 5) Se distribuyen los golpes uniformemente en toda la sección transversal del molde y para cada capa superior, permitiendo que la varilla penetre aproximadamente 10 mm dentro de la capa inmediata inferior, cuando el espesor de esa capa sea menor a 100 mm, y aproximadamente 20 mm cuando su espesor sea de 100 mm o más (*Figura 4.53*).
- 6) Después de compactar cada capa se debe golpear ligeramente con el mazo de hule las paredes del molde para eliminar hasta donde sea posible las oquedades que deja la varilla (*Figura 4.54*).



Figura 4.53. Varillado del concreto en 3 capas.



Figura 4.54. Golpeado de los cilindros para eliminar vacíos.



- 7) Después de la compactación, se termina la superficie superior enrasándola con la varilla punta de bala, haciéndola rodar por la superficie (*Figura 4.55*).
- 8) Para evitar pérdidas de agua por evaporación, se recomienda cubrir los cilindros con bolsas de plástico (*Figura 4.56*).



Figura 4.55. Enrasado de los cilindros para dar el acabado final.



Figura 4.56. Cilindros cubiertos de plástico para evitar pérdidas de agua.

Cuadro 4.11. Número de Capas requeridas para los especímenes [NMX-C-159-ONNCCE-2004].

Tamaño del Especímen (mm)	Método de Compactación	Número de Capas	Espesor aproximado de la capa(mm)
Hasta 300	Varillado	3 iguales	---
Más de 300	Varillado	Según se requiera	100
Hasta 450	Vibrado	2 iguales	---
Más de 450	Vibrado	3 ó mas	150 o lo más cercano

Cuadro 4.12. Diámetro de Varilla y número de penetraciones empleados para moldear los especímenes de prueba [NMX-C-159-ONNCCE-2004 y ASTM-C-192].

Diámetro del Cilindro (cm)	Diámetro de la varilla (mm)	Número de penetraciones por capa
Entre 5 y menos de 15	10	25
15	16	25
20	16	50
25	16	75



4.4. Concreto Endurecido

PRUEBA	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Método de prueba estándar para el curado de especímenes de prueba en el laboratorio.	NMX-C-159-ONNCCE-2004	ASTM-C-192-81
Práctica estándar para el cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto.	NMX-C-109-ONNCCE-2004	ASTM-C-617-98
Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.	NMX-C-083-ONNCCE-2002	ASTM-C-39-86
Módulo de Elasticidad Estático.	[Romo, 2009 y ACI 318]	
Método de prueba estándar para la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto.	NMX-C-163-1997-ONNCCE	ASTM-C-496-79
Método de prueba estándar para la velocidad de pulso a través del concreto.	NMX-C-275-ONNCCE-2004	ASTM-C-597-02
Método de prueba estándar para las frecuencias de resonancia fundamentales longitudinales de especímenes de concreto.	NMX-C-089-1997-ONNCCE	ASTM-C-215-02
Resistividad Eléctrica.	[Red Durar, 2000]	

4.4.1. Método de Prueba Estándar para el Curado de Especímenes de Prueba en el Laboratorio

El curado es el procedimiento para mantener un contenido de humedad y temperatura conveniente, evitando la pérdida de agua por evaporación, durante la hidratación de los materiales cementantes en el concreto recién colado. El curado es uno de los pasos con mayor importancia después del colado y terminado del concreto, es la última y una de los pasos más fundamentales de las etapas de la construcción.



4.4.1.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Para evitar la evaporación del agua en los especímenes de concreto sin fraguar, se deben cubrir inmediatamente después de terminados, de preferencia, con una placa no absorbente y no reactiva, o con una tela de plástico durable impermeable, hasta que los especímenes sean extraídos de los moldes. (Figura 4.56).
- 2) Los especímenes deben ser descimbrados no antes de 20 h ni después de 48 h de su elaboración.
- 3) A menos que en otro método se especifique lo contrario, todos los especímenes deben ser curados en humedad a temperatura de $296\text{ K} \pm 3\text{ K}$ ($23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$) durante las primeras 24 h, después de ese tiempo deben mantenerse a una temperatura de $296\text{ K} \pm 2\text{ K}$ ($23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$), con una humedad relativa de 95 % mínima, hasta el momento de la prueba.
- 4) El almacenaje durante las primeras 48 h debe ser en un sitio libre de vibraciones. Con relación a los especímenes extraídos de los moldes, el curado húmedo significa que los especímenes de prueba pueden mantenerse con agua libre en su superficie en todo tiempo. Esta condición se logra por inmersión en agua saturada con cal, o por almacenamiento en un cuarto húmedo (Figura 4.57).
- 5) Los especímenes no deben ser expuestos a goteo directo o agua corriente.

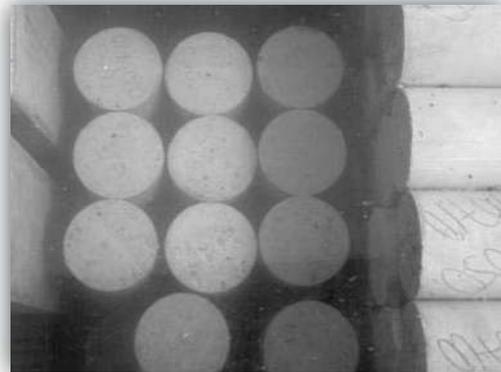


Figura 4.57. Pila de curado donde se almacenan los cilindros de concreto después de ser descimbrados.



4.4.2. Práctica Estándar para el Cabeceo de Especímenes Cilíndricos de Concreto

Esta práctica describe los procedimientos para proporcionar superficies planas en los extremos de los cilindros de concreto para cabecear con materiales adheribles o cemento puro a los especímenes cilíndricos de concreto recién elaborados, así como con mortero de azufre a los especímenes cilíndricos y corazones de concreto endurecido, cuando la superficie final no se ajusten a los requisitos de planicidad y perpendicularidad de las normas aplicables.

4.4.2.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Se prepara el mortero de azufre para su empleo calentándolo a $140\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Se recomienda colocar en los recipientes para el fundido la cantidad necesaria de mortero azufre para los especímenes por cabecear en esa etapa, y antes de volverse a llenar se elimina el material sobrante verificando que el material re-usado no tenga más de 10 usos, siempre y cuando se garantice que se cumple con lo indicado en el *Cuadro 4.13*.
- 2) Para el cabeceo de especímenes de concreto de resistencia mayor que 350 Kgf/cm^2 , antes del cabeceo de los especímenes, se debe comprobar que el mortero tiene una resistencia de por lo menos la resistencia del concreto (*Cuadro 4.13*).
- 3) El mortero de azufre debe estar seco en el momento que se coloque en el recipiente para el fundido ya que la humedad puede producir espuma. Por la misma razón el mortero de azufre fundido debe mantenerse alejado de cualquier humedad.
- 4) El plato y los dispositivos para el cabeceo, deben ser calentados ligeramente antes de ser empleados para disminuir la velocidad de endurecimiento y permitir la formación de capas delgadas. Inmediatamente antes de vaciar cada capa, se aceita ligeramente el plato de cabeceo y se agita el mortero de azufre fundido (*Figura 4.58*).
- 5) Las bases de los especímenes curados en forma húmeda deben estar suficientemente secas en el momento del cabeceo, para evitar que dentro de las capas se formen burbujas de vapor o bolsas de espuma de diámetro mayor de 6 mm.
- 6) Para asegurarse que la capa se ha adherido a la superficie del espécimen, la base de éste no debe ser aceitada antes de la aplicación de la capa.



Figura 4.58. Procedimiento de cabeceo: vertido del azufre, colocación del cilindro y secado del azufre.

- 7) Los especímenes curados por vía húmeda deben ser mantenidos en condiciones húmedas durante el tiempo transcurrido entre el terminado del cabeceo y el momento de la prueba, regresándolos al almacenamiento húmedo o protegiéndolos con una manta o material similar húmedos para evitar la evaporación.
- 8) Los especímenes cabeceados no se ensayaran hasta que el mortero de azufre haya desarrollado la resistencia requerida.

Cuadro 4.13. Resistencia a la compresión y espesor máximo del mortero de azufre [NMX-C-109-ONNCCE-2004].

Resistencia del concreto (Kgf/cm²)	Resistencia mínima del mortero de azufre (Kgf/cm²)	Espesor máximo de cada de cabeceo en cualquier punto (mm)
350 a 500	350 o la del concreto, cualquiera que sea mayor	8
Más de 500	No menor que la resistencia del concreto	5



4.4.3. Método de Prueba Estándar para la Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto

Se debe tener cuidado en la interpretación de la importancia de la determinación de resistencia a la compresión por este método de prueba ya que la resistencia no es una propiedad fundamental del concreto hecho a partir de determinados materiales. Los valores obtenidos dependerán de la forma y tamaño del espécimen, de la dosificación, de los procedimientos de mezclado, de los métodos de muestreo, de los moldes, de la fabricación, de la edad, de la temperatura y de las condiciones de humedad durante el curado. Los resultados de este método se utilizan como base para el control de calidad del concreto.

4.4.3.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Se limpian las superficies de las placas superior e inferior y las cabezas del espécimen de prueba, se coloca este último sobre la placa inferior alineando su eje cuidadosamente con el centro de la placa de carga con asiento esférico; mientras la placa superior se baja hacia el espécimen asegurándose que se tenga un contacto suave y uniforme.
- 2) Se debe aplicar la carga con una velocidad uniforme y continua sin producir impacto, ni pérdida de carga. La velocidad de carga debe estar dentro del intervalo de 84 Kgf/cm²/min a 210 Kgf/cm²/min, equivalente para un diámetro estándar de 15 cm a un rango de 14.8 Tonf/min a 37.1 Tonf/min (*Figura 4.59*).
- 3) Se permite una velocidad mayor durante la aplicación de la primera mitad de la carga máxima esperada siempre y cuando durante la segunda mitad se mantenga la velocidad especificada; pueden utilizarse máquinas operadas manualmente o motorizadas que permitan cumplir con lo anterior, teniendo en cuenta que sólo se harán los ajustes necesarios en los controles de la máquina de prueba para mantener uniforme la velocidad de aplicación de carga, hasta que ocurra la falla.
- 4) Se aplica la carga hasta que aparezca la falla de ruptura, registrándola en el informe (*Figura 4.60*).
- 5) Los especímenes para la aceptación o rechazo de concreto deben ensayar se a la edad de 14 días en el caso del concreto de resistencia rápida o 28 días en el caso de resistencia normal con las tolerancias que se indican en el *Cuadro 4.14*.



Figura 4.59. Prensa utilizada para la realización de la prueba, cilindros montados para la aplicación de la carga y espécimen fallado después de la prueba.

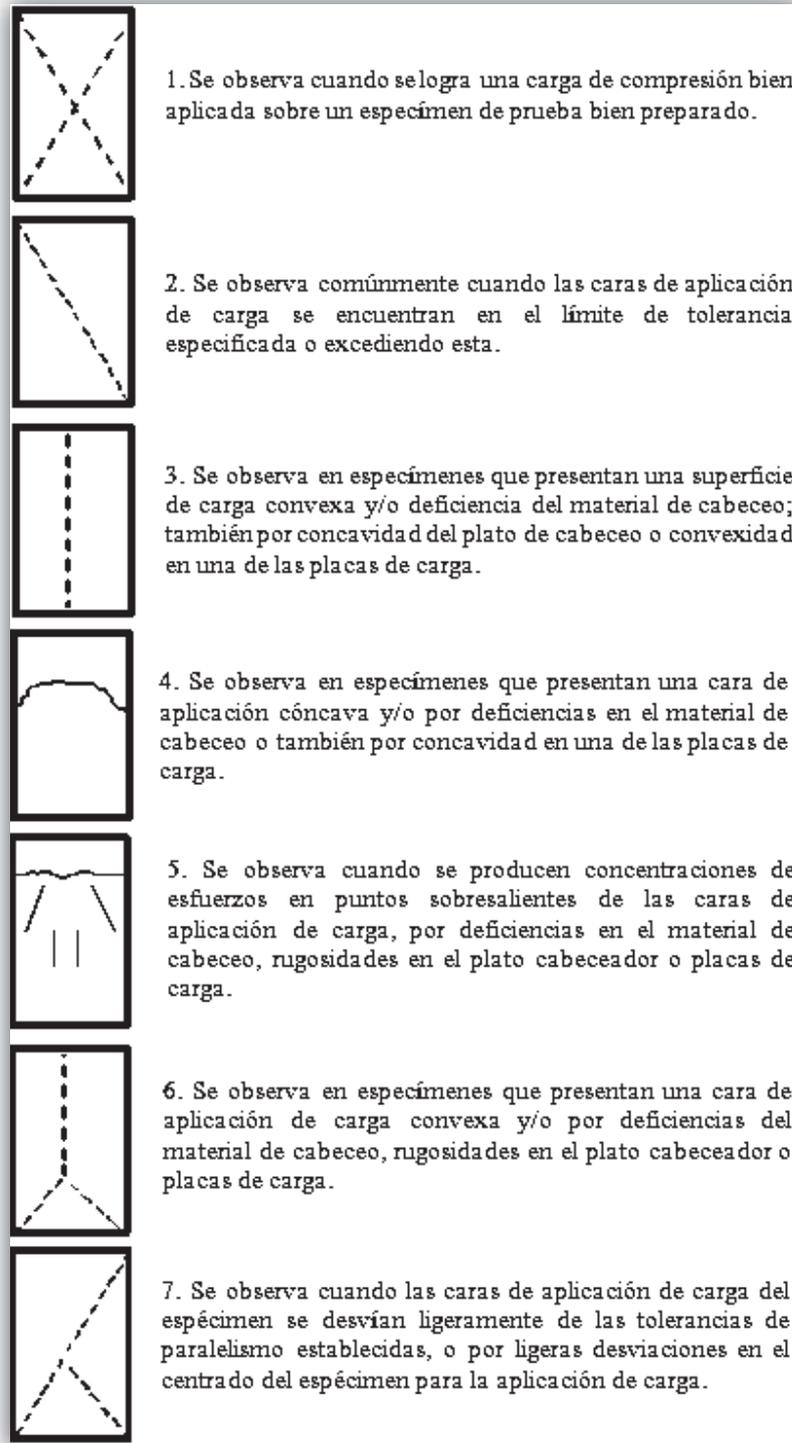


Figura 4.60. Diagrama de fallas de cilindros sometidos a compresión [NMX-C-083-ONNCCE-2002].



Cuadro 4.14. Tolerancias [NMX-C-083-ONNCCE-2002].

Edad de Prueba	Tolerancia Permisible
24 h	± 0:30 h
3 días	± 2 h
7 días	± 6 h
14 días	± 12 h
28 días	± 24 h

4.4.3.2. Cálculo

Para calcular la resistencia a la compresión real que resiste el concreto, se divide la carga resistente entre el área de la sección transversal:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde:

σ = resistencia a la compresión real que resiste el espécimen, en Kgf/cm²

P = carga de ruptura, en Kgf

A = área de la sección transversal del espécimen, en cm²

Conociendo y registrando su edad se determina su porcentaje de resistencia respecto a la resistencia de proyecto de la forma siguiente:

$$\% \text{ resistencia} = \frac{\sigma}{\sigma_p}$$

Donde:

% resistencia = porcentaje de la resistencia real del espécimen, en %

σ = resistencia real a cierta edad, en días y en Kgf/cm²

σ_p = resistencia de proyecto, Kgf/cm²

Este porcentaje de resistencia calculado se compara con la cura de resistencia del concreto respecto a la edad en días y se verifica si esta dentro de las especificaciones.



4.4.4. Módulo de Elasticidad Estático del Concreto.

El Módulo de Elasticidad del concreto es un aspecto fundamental a considerar en esta investigación. Depende directamente de la resistencia a la compresión del concreto, por lo que los concretos de alta resistencia poseen Módulos de Elasticidad mayores que aquellos concretos de baja resistencia.

Cuando los especímenes están sujetos a fuerzas de compresión, estas fuerzas producen deformaciones en el concreto y a partir de ellas se obtiene la gráfica esfuerzo-deformación unitaria, de donde el módulo de elasticidad estático es obtenido. Este tipo de gráficos dependen fundamentalmente de la resistencia a la compresión del material, como se muestra en la *Figura 4.61*.

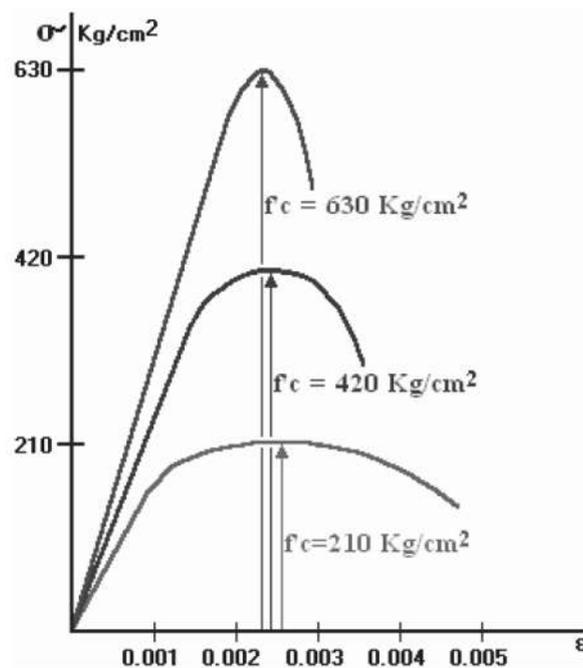


Figura 4.61. Gráfica Esfuerzo-Deformación Unitaria para diferentes resistencias del concreto [Romo, 2009]

Todos los concretos presentan un primer rango de comportamiento relativamente lineal (similar a una línea recta en la curva esfuerzo - deformación) y elástico (en la descarga recupera la geometría previa a la carga) ante la presencia incremental de esfuerzos de compresión, cuando las cargas son comparativamente bajas (menores al 70% de la carga de rotura), y un segundo rango de comportamiento no lineal e inelástico (con una geometría curva en la curva esfuerzo – deformación) cuando las cargas son altas [Romo, 2009].



La pendiente de la curva en el rango de comportamiento lineal recibe la denominación de Módulo de Elasticidad del material o Módulo de Young, que se simboliza “ E_c ”, que puede calcularse mediante la siguiente expresión a partir de la gráfica esfuerzo-deformación:

$$E_c = \frac{\sigma_{c,1}}{\epsilon_{c,1}}$$

Y cuando no es posible obtener deformaciones a falta del equipo necesario, el ACI (American Concrete Institute) como forma aproximada de calcular el módulo de elasticidad estático del concreto, en función de la resistencia a la compresión del mismo, propone la siguiente expresión, obtenida experimentalmente:

$$E_c = 15,000\sqrt{f'_c}$$

Donde:

E_c = Módulo de elasticidad estático del concreto, en Kgf/cm^2

f'_c = Resistencia a la compresión del concreto, en Kgf/cm^2

La expresión anterior es válida para concretos con agregados de masa normal y resistencias normales y medias. En el *Cuadro 4.15* se presenta una tabla que relaciona la resistencia de los concretos utilizados con más frecuencia con su módulo de elasticidad.

Cuadro 4.15. Módulos de Elasticidad dependiendo de la resistencia del concreto [Romo, 2009]

Resistencia (Kgf/cm^2)	Módulo de Elasticidad Estático (Kgf/cm^2)
210	217,000
280	251,000
350	281,000
420	307,000



4.4.5. Método de Prueba Estándar para la Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto

Este método de prueba proporciona una resistencia generalmente inferior a resistencia a la flexión (módulo de ruptura). La resistencia a la tensión se utiliza en el diseño de miembros estructurales de concreto ligero para evaluar la resistencia al corte proporcionada por el concreto y determinar la longitud de desarrollo de refuerzo.

4.4.5.1. Procedimiento de Prueba

- 1) En cada extremo del espécimen se deben dibujar líneas diametrales usando un dispositivo adecuado que asegure que las líneas se encuentren en el mismo plano diametral.
- 2) Se determina el diámetro del espécimen de prueba con una aproximación de 1 mm, se calcula con el promedio de tres diámetros, medidos cerca de los extremos, al centro del espécimen y contenidos dentro del plano, que incluye las líneas marcadas en los extremos.
- 3) Se determina la longitud del espécimen con aproximación de 1 mm, con el promedio de por lo menos dos medidas de longitud tomadas en el plano que contienen las líneas marcadas en los extremos.
- 4) Para cada prueba se debe contar con dos tiras de madera de triplay, neopreno o con dureza de 80 shore similar, libre de imperfecciones con un espesor de 3 mm, un ancho de 25 mm, aproximadamente y una longitud igual o ligeramente mayor que el espécimen. Las tiras de distribución de carga se colocan entre el espécimen y ambas platinas de carga, superior e inferior de la máquina de prueba, o entre el espécimen y las placas suplementarias cuando se utilicen. Después de cada prueba las tiras de triplay deben desecharse.
- 5) Se centra una de las tiras de carga sobre la platina inferior. Se coloca el espécimen sobre la tira y se alinea en tal forma, que las líneas marcadas en los extremos del cilindro estén verticales y centradas con relación a las tiras. Se coloca la segunda tira de carga longitudinalmente sobre el cilindro, centrándolo con relación a las líneas marcadas en los extremos del mismo (*Figura 4.62*). Se acomoda el conjunto para asegurar que se cumplan las condiciones anteriores.
- 6) Se debe aplicar la carga en forma continua sin impacto a una velocidad constante de tal manera, que se logren esfuerzos de tensión por compresión diametral de 5 Kgf/cm² a 15 Kgf/cm² por minuto hasta la falla del espécimen (*Figura 4.63*).



- 7) Para cilindros de 15 por 30 cm, el rango de esfuerzos de tensión corresponde a una carga aplicada aproximadamente entre 3467 Kgf y 10 605 Kgf por minuto.
- 8) Se registra la carga máxima aplicada, indicada por la máquina de prueba en el momento de la falla.
- 9) Se deben observar, el tipo de falla y la apariencia del concreto (*Figura 4.64*).

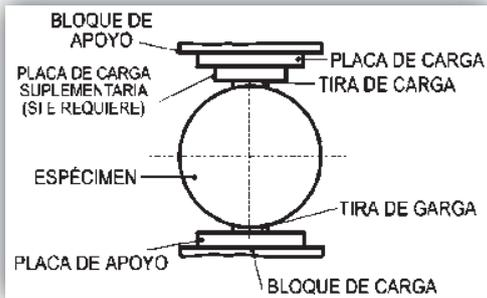


Figura 4.62. Forma correcta de colocar el espécimen en la máquina [NMX-C-163-1997-ONNCCE].



Figura 4.63. Colocación del cilindro en la máquina universal.



Figura 4.64. Cilindro fallado después de la aplicación de la carga.

4.4.5.2. Cálculo

Se calcula la resistencia a la tensión por compresión diametral del espécimen como sigue:

$$T = \frac{2P}{\pi Ld}$$

Donde:

T = resistencia a la tensión por compresión diametral, en Kgf/cm².

P = carga máxima aplicada, en Kgf.

L = longitud, en cm.

d = diámetro, en cm.



4.4.6. Método de Prueba Estándar para la Velocidad de Pulso a través del concreto

Este método determina la velocidad de propagación de pulsos de onda de esfuerzo longitudinal a través del concreto. Esta velocidad está relacionada con las propiedades elásticas del concreto y su densidad. Este método es aplicable para evaluar la calidad y homogeneidad (uniformidad relativa) del concreto, para indicar la presencia de vacíos o grietas y para evaluar la efectividad de las reparaciones a estas grietas. También es aplicable para indicar los cambios en las propiedades del concreto y en el estudio de las estructuras para estimar la severidad del deterioro o la formación de grietas.

4.4.6.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Los especímenes o zonas de concreto a ser ensayados deben tener la superficie plana, lisa, exenta de suciedad y no deben estar carbonatados.
- 2) Aquellas superficies que no sean suficientemente lisas, se deben regularizar a través de procesos mecánicos o con una capa de pasta de cemento, yeso o resina epóxica con un espesor mínimo, a fin de posibilitar un buen acoplamiento con los transductores o sondas, pero sin que puedan interferir en la medida.
- 3) Se calibra el equipo de velocidad de pulso con ultrasonido usando la barra de referencia (*Figura 4.65*).
- 4) El modo de prueba puede ser de tres formas:
 - a) Transmisión directa: con los transductores en las caras opuestas del material (*Figura 4.66*).
 - b) Transmisión indirecta: con los transductores en misma cara.
 - c) Transmisión semidirecta: con los transductores en las caras adyacentes.
- 5) Se aplica un adecuado agente de acoplamiento (como agua, vaselina, grasa, goma moldeable, u otros materiales viscosos) a las caras de los transductores o la superficie de ensayo o ambas.
- 6) Se presionan las caras de los transductores firmemente contra la superficie de concreto hasta que se muestre un tiempo estable o hasta obtener el valor estable más bajo que se considere adecuado (*Figura 4.66*).
- 7) Se registra ese valor y se determina la distancia en línea recta medida de centro a centro de las caras de los transductores.



Figura 4.65. Calibración del equipo de Velocidad de Pulso con Ultrasonido.



Figura 4.66. Realización de la prueba. Transductores colocados en el cilindro para transmisión directa.

4.4.6.2. Cálculo

Para transmisiones directas y semidirectas, la velocidad se determina con la fórmula siguiente:

$$V = \frac{L}{T}$$

Donde:

V = velocidad de pulso, en Km/s.

L = longitud de paso, en mm.

T = tiempo que toma el pulso para atravesar la longitud, en μ s.

De la medición de la velocidad de las ondas ultrasónicas es posible calcular el módulo elástico dinámico como sigue:

$$Ed = V^2 Q \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

Donde:

Ed = módulo de elasticidad dinámico, en MN/m².

V = velocidad de pulso, en Km/s.

Q = densidad del concreto, en Kg/m³ (Masa saturada entre volumen del concreto)

ν = proporción de Poisson (concreto de alta resistencia $\nu = 0.15$; concreto de baja resistencia $\nu = 0.30$)

4.4.6.3. Especificaciones

Cuadro 4.16. Criterios de Evaluación para la Calidad del Concreto [Red Durar, 2000]

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



4.4.7. Método de Prueba Estándar para las Frecuencias de Resonancia fundamentales longitudinales de especímenes de Concreto

Este método de prueba se utiliza para determinar el módulo de elasticidad dinámico, el módulo dinámico de rigidez y el valor dinámico de Poisson en prismas o cilindros de concreto, es decir, este método está destinado para la detección de cambios significativos en el módulo de elasticidad dinámico de las muestras de laboratorio o campo que han sido expuestas a la intemperie o a otro tipo de influencias de deterioro.

4.4.7.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Se determina la masa y el promedio de la longitud del espécimen.
- 2) Se determina el promedio de la sección transversal. Las relaciones esbeltez pequeñas o grandes son comúnmente difíciles de excitar en el modo de vibración fundamental, es por ello que se recomienda relaciones entre 3 y 5. Para la aplicación de este procedimiento la relación de esbeltez debe ser al menos de 2.
- 3) Se monta el espécimen en el equipo de manera que sea capaz de vibrar libremente en el modo longitudinal colocándose de manera que la fuerza que lo maneja sea perpendicular a él y aproximadamente al centro de las caras de la muestra (*Figura 4.67*).
- 4) Se coloca la unidad de recolección de frecuencia en el espécimen de manera que la recolección de sensibilidad coincida con la dirección de la vibración, esto es, el eje longitudinal del espécimen (*Figura 4.68*).



Figura 4.67. Colocación del cilindro en el aparato E-Meter para medir la resonancia.



Figura 4.68. Centrado del espécimen a fin de que coincida el transmisor con el receptor.



- 5) Se obliga al espécimen a vibrar a varias frecuencias y se registra la frecuencia más alta. (Figura 4.69 y Figura 4.70).



Figura 4.69. Vibración del cilindro a varias frecuencias.



Figura 4.70. Se registra la frecuencia más alta detectada para el espécimen ensayado.

4.4.7.2. Cálculo

$$Ed = (4n^2L^2P)x10^{-2}$$

Donde:

Ed = módulo de elasticidad dinámico, en MN/m².

P = densidad del concreto, en Kg/m³.

L = longitud del espécimen, en mm.

n = frecuencia fundamental longitudinal, en Hz.



4.4.8. Resistividad Eléctrica

La Resistividad Eléctrica es una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del hormigón y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa.

Es función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras.

4.4.8.1. Procedimiento de Prueba

- 1) Se toman las dimensiones de la muestra: diámetro y longitud).
- 2) Se garantiza la conexión del amperímetro y voltímetro (*Figura 4.71*).
- 3) Se monta la muestra en el equipo correspondiente (*Figura 4.72*).
- 4) Se corrobora el contacto de los pines con las placas metálicas que se colocan sobre el concreto.
- 5) Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete éste a una corriente dada, (I).
- 6) Se registra el voltaje (E) obtenido del aparato lo más preciso posible.



Figura 4.71. Equipo utilizado para medir la resistencia eléctrica.

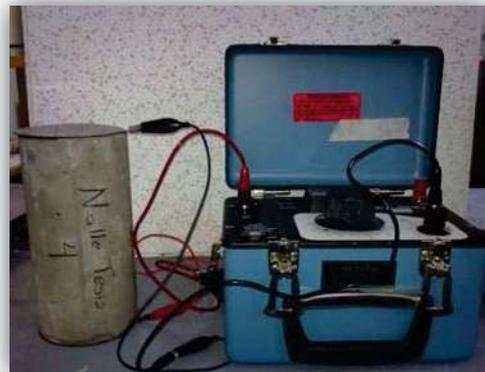


Figura 4.72. Montado de la muestra en el equipo



4.4.8.2. Cálculo

La Resistencia eléctrica, R_e , se calcula como E/I y se expresa en ohm. De esta manera la resistividad eléctrica está dada por:

$$\rho = R_e \frac{A}{L}$$

Donde:

ρ = resistividad eléctrica, en ohm-cm.

R_e = resistencia eléctrica, en Volts.

A = área transversal del espécimen, en cm^2 .

L = longitud del espécimen, en cm.

4.4.8.3. Especificaciones

Cuadro 4.17. Criterios de Evaluación [Red Durar, 2000]

Resistividad Eléctrica ($\text{k}\Omega\text{-cm}$)	Riesgo de Corrosión
< 10	Alto riesgo
10 a 200	Riesgo moderado
> 200	Poco riesgo



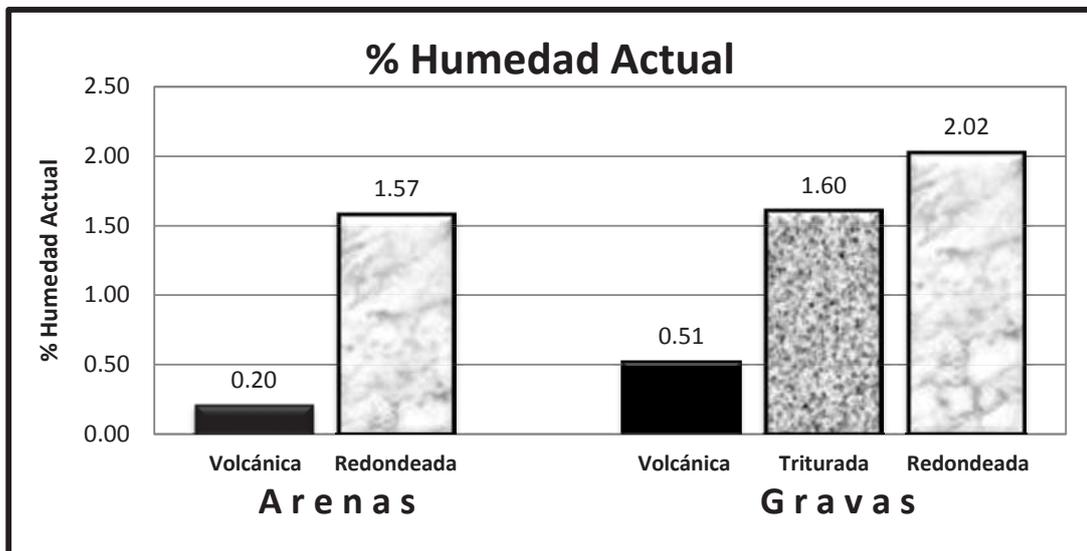
CAPÍTULO 5. RESULTADOS



5.1. Agregados Pétreos

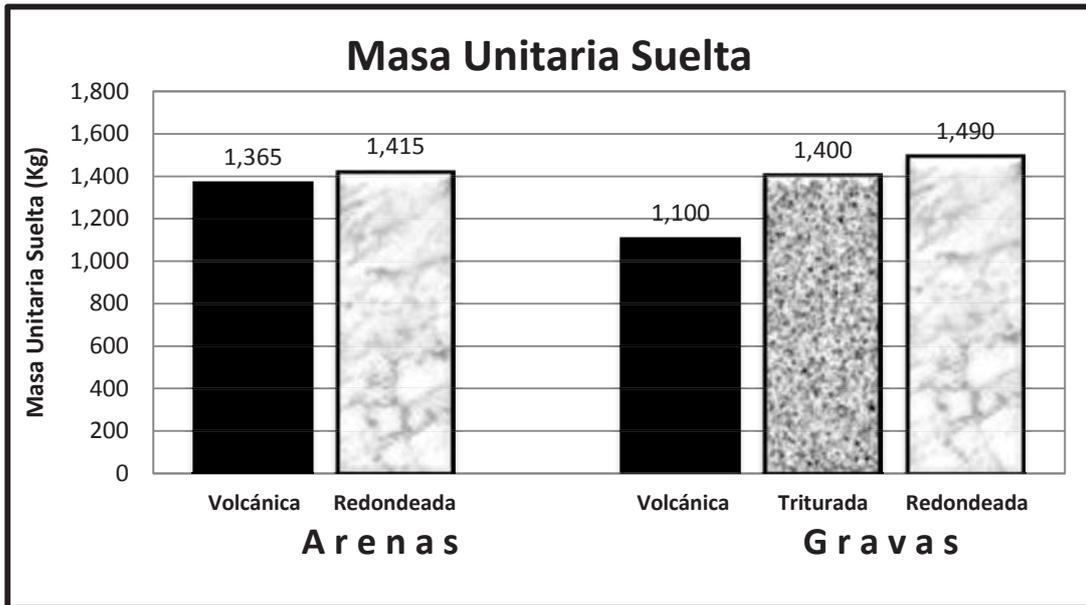
➤ Contenido total de Humedad Evaporado por Secado

% HUMEDAD ACTUAL											
Material	Arena Volcánica		Arena Redondeada		Grava Volcánica		Grava Triturada		Grava Redondeada		
	No.	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Masa Húmeda (gr)	200.0	205.4	200.00	200.00	1,000.0	1,000.0	1,000.0	1,000.0	1,000.0	1,000.0	1,000.0
Masa seca (gr)	199.7	204.9	196.80	197.00	994.0	995.8	984.0	984.5	980.4	980.0	980.0
% Humedad	0.15	0.24	1.63	1.52	0.60	0.42	1.63	1.57	2.00	2.04	2.04
% Humedad Promedio	0.20		1.57		0.51		1.60		2.02		

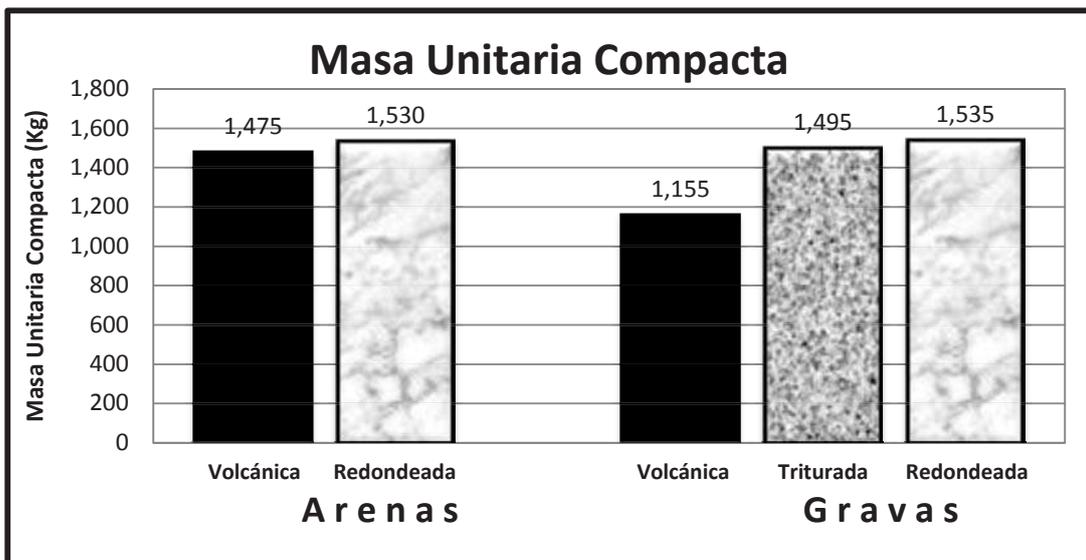


➤ Método de Prueba Estándar para la Masa Unitaria (Masa Unitaria Suelta y Compacta)

MASA UNITARIA SUELTA											
Material	Arena Volcánica		Arena Redondeada		Grava Volcánica		Grava Triturada		Grava Redondeada		
	No.	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Tara (gr)	5,750	5,750	5,750	5,750	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350
Tara más Material (gr)	12,650	12,500	12,800	12,850	19,300	19,400	22,300	22,400	23,200	23,300	23,300
Masa Material (gr)	6,900	6,750	7,050	7,100	10,950	11,050	13,950	14,050	14,850	14,950	14,950
Volumen (cm ³)	5,000	5,000	5,000	5,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Masa Unitaria (gr/cm ³)	1.38	1.35	1.41	1.42	1.10	1.11	1.40	1.41	1.49	1.50	1.50
Masa Unitaria (K/m ³)	1,380	1,350	1,410	1,420	1,095	1,105	1,395	1,405	1,485	1,495	1,495
M.U. (K/m ³) Promedio	1,365		1,415		1,100		1,400		1,490		



MASA UNITARIA COMPACTA										
Material	Arena Volcánica		Arena Redondeada		Grava Volcánica		Grava Triturada		Grava Redondeada	
No.	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Tara (gr)	5,750	5,750	5,750	5,750	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350	8,350
Tara más Material (gr)	13,100	13,150	13,400	13,400	19,850	19,950	23,300	23,300	23,750	23,650
Masa Material (gr)	7,350	7,400	7,650	7,650	11,500	11,600	14,950	14,950	15,400	15,300
Volumen (cm ³)	5,000	5,000	5,000	5,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Masa Unitaria (gr/cm ³)	1.47	1.48	1.53	1.53	1.15	1.16	1.50	1.50	1.54	1.53
Masa Unitaria (K/m ³)	1,470	1,480	1,530	1,530	1,150	1,160	1,495	1,495	1,540	1,530
M.U. (K/m ³) Promedio	1,475		1,530		1,155		1,495		1,535	

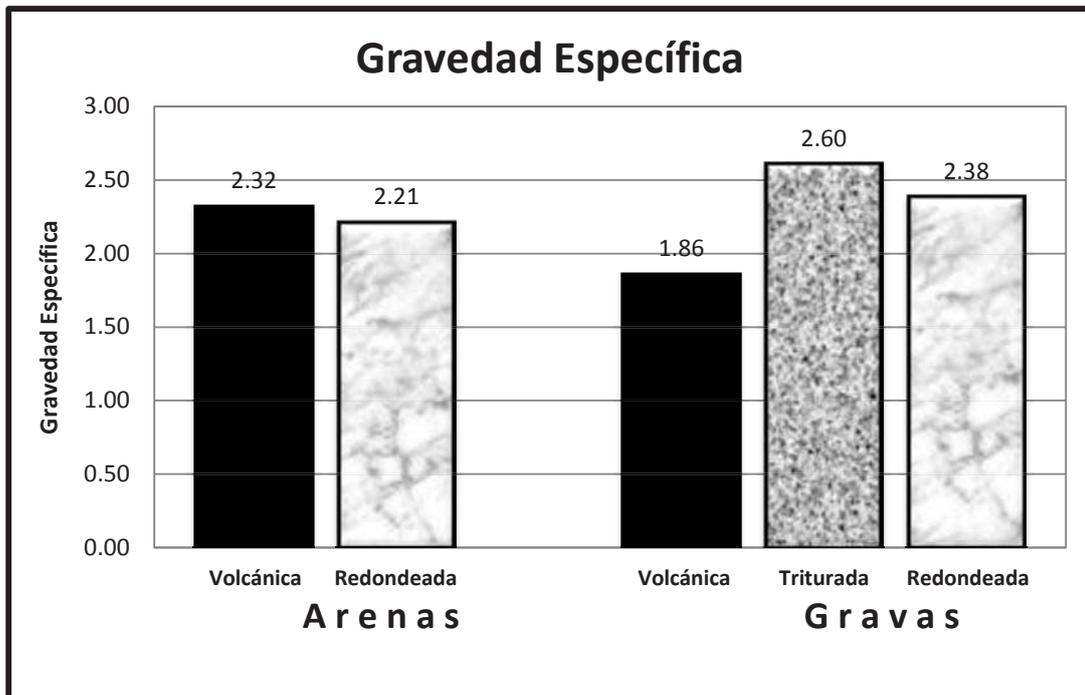




➤ Método de Prueba Estándar para la Densidad Relativa y Absorción

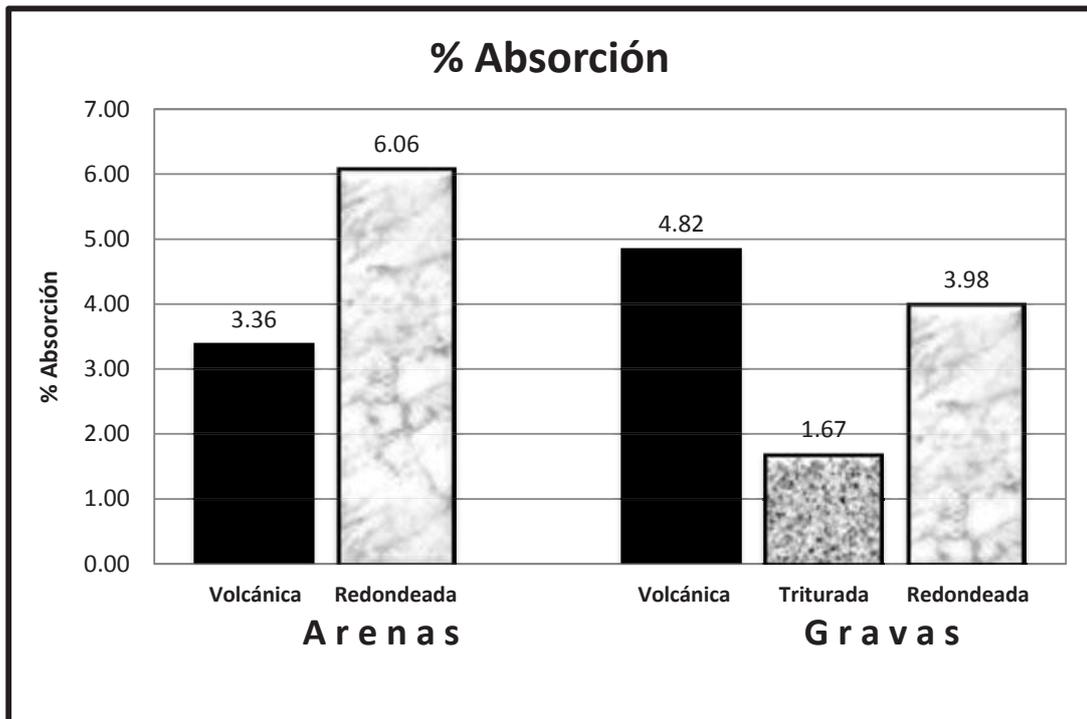
DENSIDAD RELATIVA O GRAVEDAD ESPECÍFICA				
Material	Arena Volcánica		Arena Redondeada	
No.	1	2	1	2
Masa Material Superficialmente Seco (gr)	200.00	200.00	200.00	200.00
Masa Material Seco (gr)	193.60	193.40	189.10	188.00
Masa matraz más agua (gr)	698.40	698.40	698.50	698.50
Masa Matraz más muestra más agua (gr)	814.50	815.30	813.50	812.70
Densidad Relativa	2.31	2.33	2.23	2.19
Promedio	2.32		2.21	

DENSIDAD RELATIVA O GRAVEDAD ESPECÍFICA						
Material	Grava Volcánica		Grava Triturada		Grava Redondeada	
No.	1	2	1	2	1	2
Masa Material (gr)	477.90	477.90	496.70	492.40	481.50	481.90
Volumen (cm ³)	255.00	260.00	190.00	190.00	205.00	200.00
Densidad Relativa	1.87	1.84	2.61	2.59	2.35	2.41
Promedio	1.86		2.60		2.38	



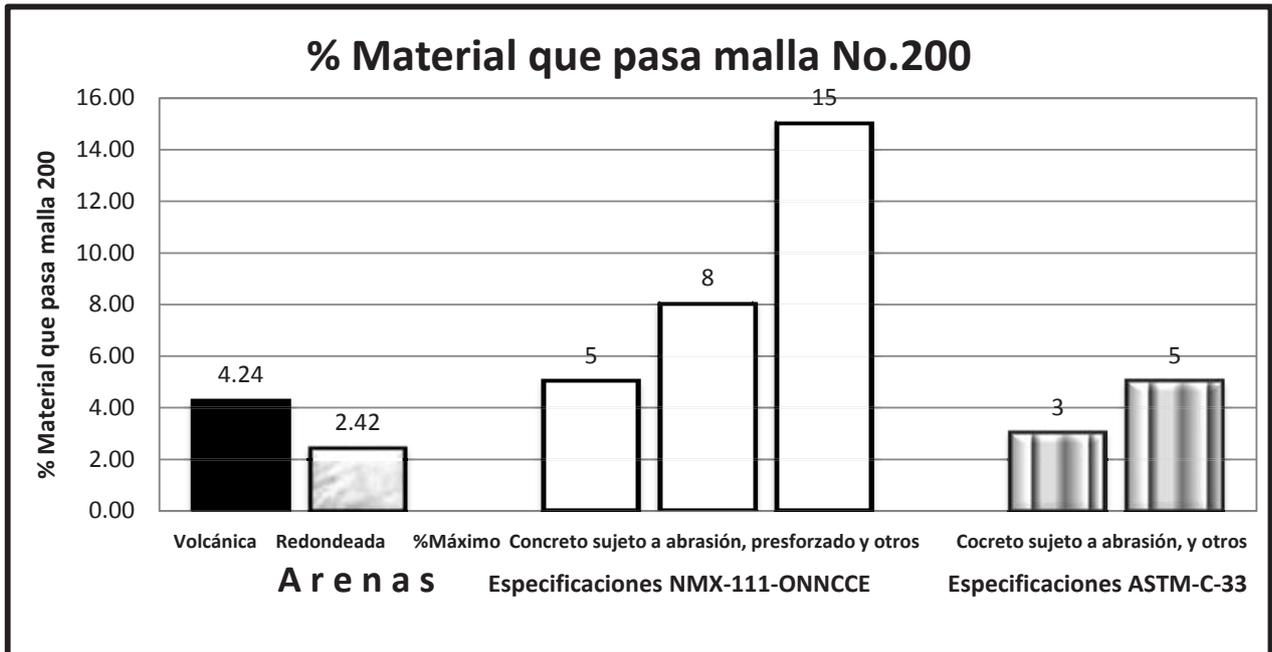


% ABSORCIÓN										
Material	Arena Volcánica		Arena Redondeada		Grava Volcánica		Grava Triturada		Grava Redondeada	
No.	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Masa Húmeda (gr)	300.00	300.00	300.00	300.00	501.10	500.80	504.50	501.10	501.10	500.60
Masa seca (gr)	290.40	290.10	283.70	282.00	477.90	477.90	496.70	492.40	481.50	481.90
Agua absorbida	9.60	9.90	16.30	18.00	23.20	22.90	7.80	8.70	19.60	18.70
% Absorción	3.31	3.41	5.75	6.38	4.85	4.79	1.57	1.77	4.07	3.88
Promedio	3.36		6.06		4.82		1.67		3.98	



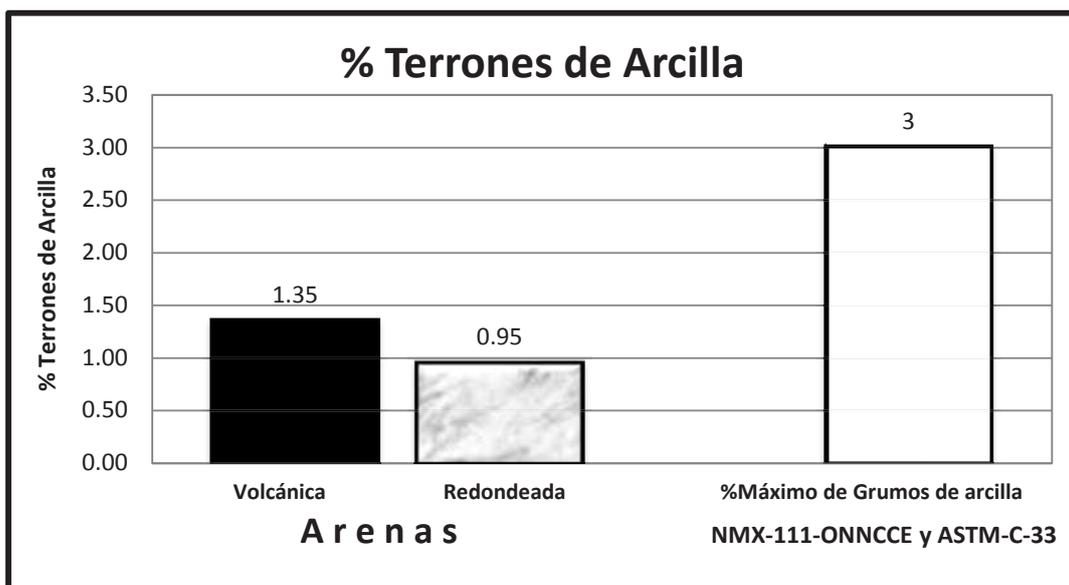
➤ Método de Prueba Estándar para Materiales que pasan la malla No. 200 por lavado

MATERIAL QUE PASA POR LA MALLA No. 200						
Material	Arena Volcánica		Arena Redondeada		Especificación	
No.	1	2	1	2	% Máximo permisible	
Masa inicial seca (gr)	257.20	190.10	200.10	196.90	Concepto	* +
Masa final seca después del lavado (gr)	246.20	182.10	195.50	191.90	En concreto sujeto a abrasión	5 3
% A	4.28	4.21	2.30	2.54	En concretos presforzados	8 -
Promedio	4.24		2.42		En otros concretos	15 5
* NMX-111-ONNCCE + ASTM-C-33						



➤ Método de Prueba Estándar para Terrones de arcilla en agregados

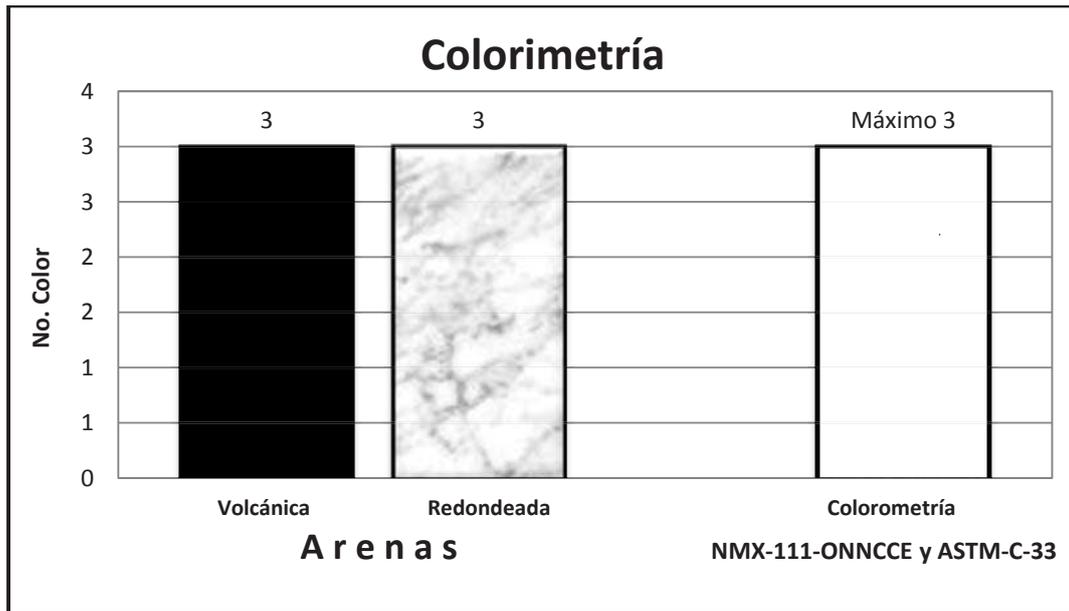
PRUEBA DE TERRONES DE ARCILLA					
Material	Arena Volcánica		Arena Redondeada		Especificación
No.	1	2	1	2	% Máximo permisible * +
Masa inicial seca (gr)	100.00	100.00	100.00	100.00	Grupos de arcilla y partículas deleznales 3
Masa final seca (gr)	98.60	98.70	99.10	99.00	
% Terrones	1.40	1.30	0.90	1.00	
Promedio	1.35		0.95		
* NMX-111-ONNCE + ASTM-C-33					





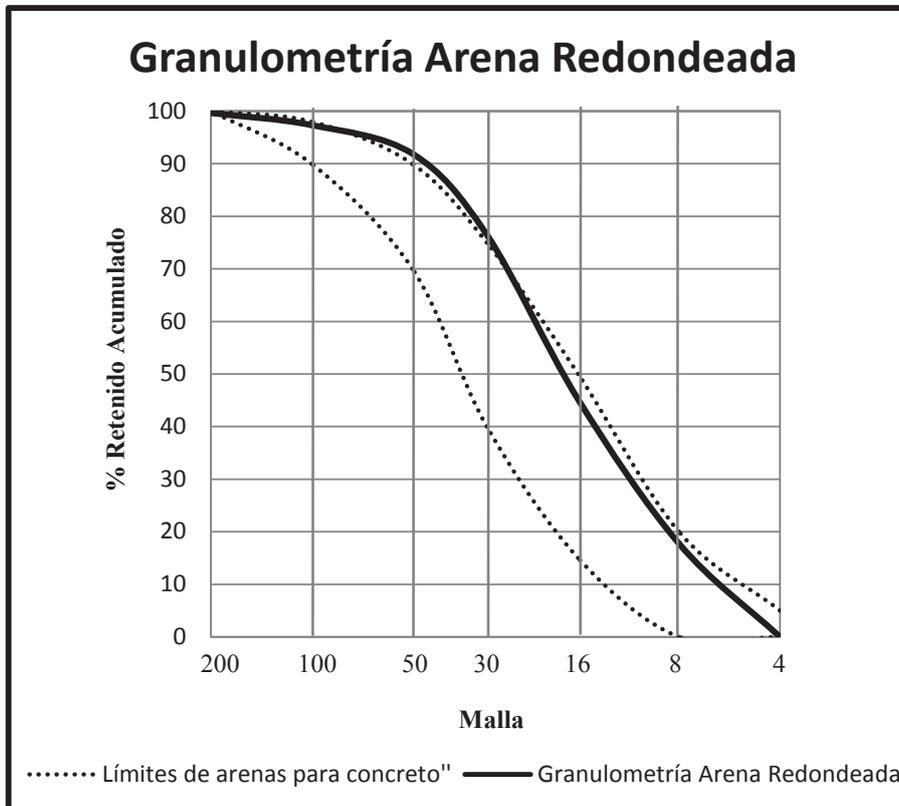
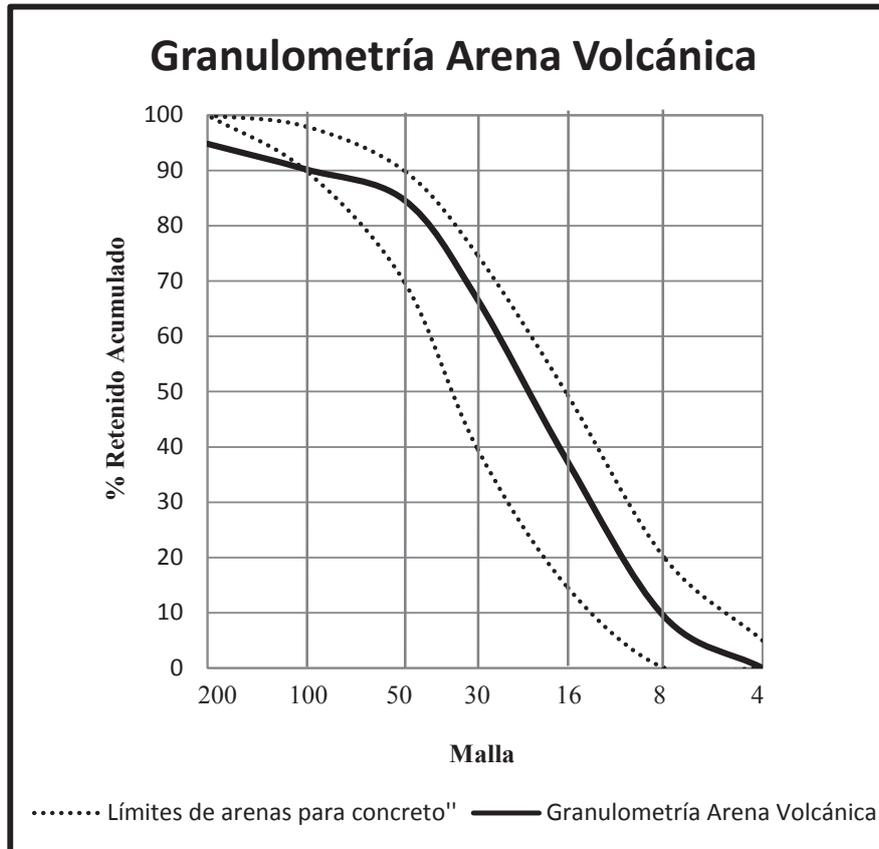
➤ Impurezas Orgánicas en Agregado Fino para Concreto

COLORIMETRÍA			
Material	Arena Volcánica	Arena Redondeada	Especificación * +
Materia Orgánica (No. Del Color)	3	3	Máximo 3
* NMX-111-ONNCCE		+ ASTM-C-33	



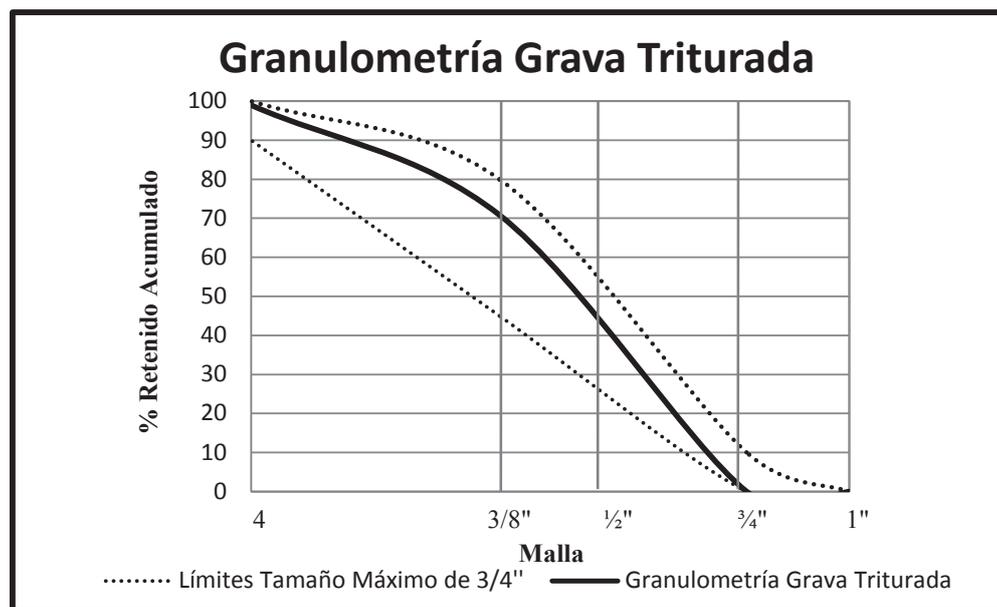
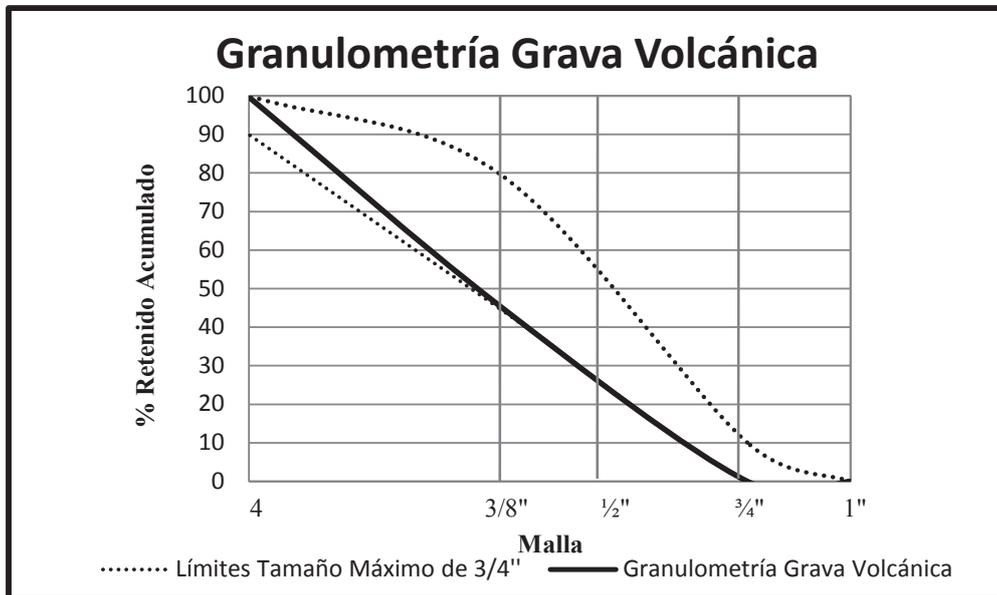
➤ Método de prueba Estándar para el Análisis Granulométrico

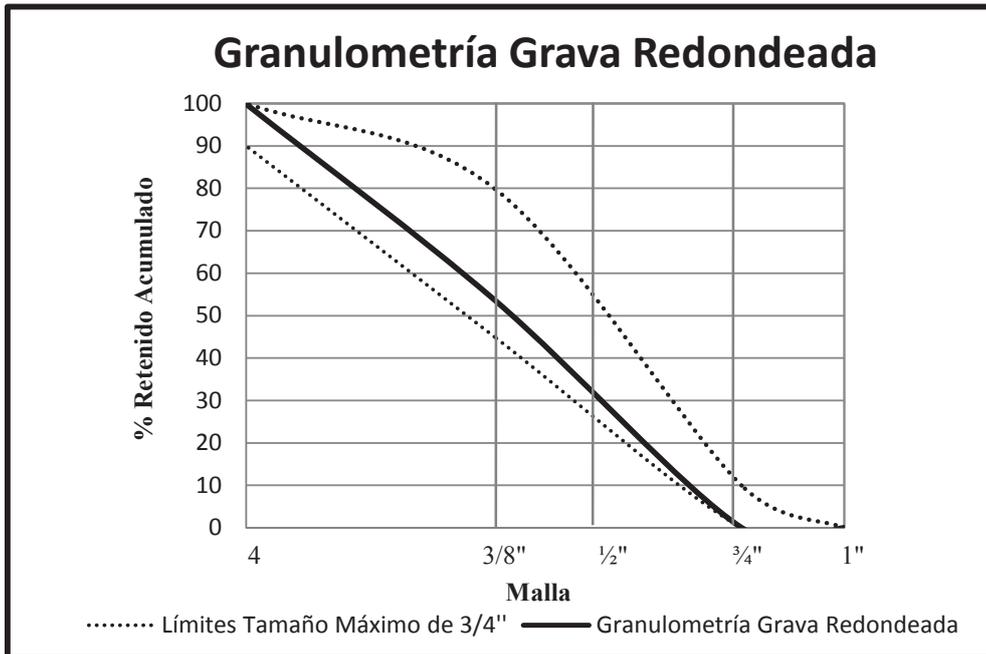
GRANULOMETRÍA EN AGREGADOS FINOS									
Material	Arena Volcánica					Arena Redondeada			
Malla No.	Masa Retenida (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Masa Retenida (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	
4	0.0	0.0	0.00	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	
8	46.6	9.3	9.3	90.7	88.8	17.8	17.7	82.2	
16	143.3	28.7	38.0	62.0	136.9	27.4	45.1	54.9	
30	145.2	29.0	67.0	33.0	156.9	31.4	76.5	23.5	
50	88.6	17.7	84.7	15.3	76.9	15.4	91.9	8.1	
100	27.6	5.5	90.3	9.7	27.3	5.5	97.4	2.6	
200	23.1	4.6	94.9	5.1	11.6	2.3	99.7	0.3	
charola	25.6	5.1	100.0	0.0	1.6	0.3	100	0.0	
TOTAL	500.0	100.0			500.0	100.0			
			M. F. = 2.89					M. F. = 3.29	





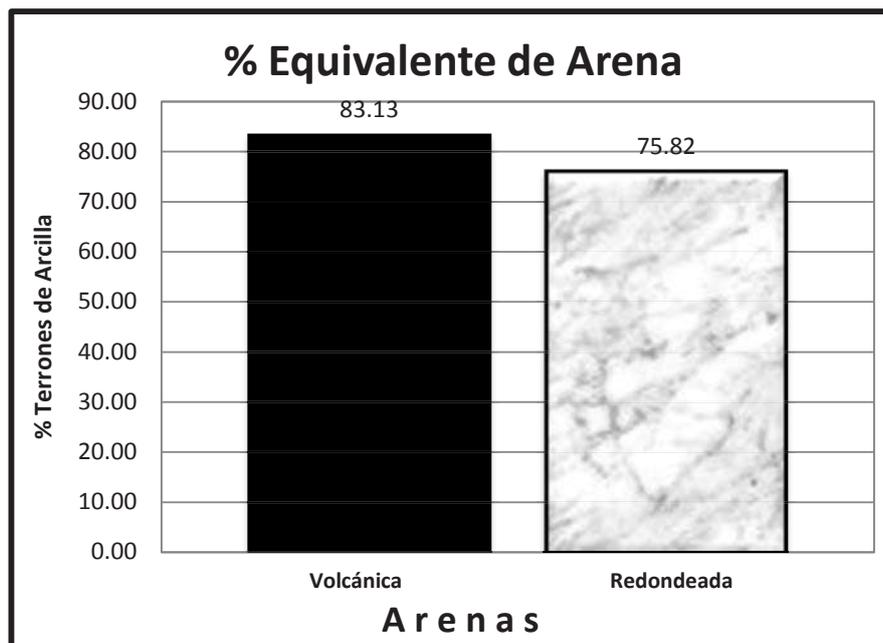
GRANULOMETRÍA EN AGREGADOS GRUESOS												
Malla No.	Grava Volcánica				Grava Triturada				Grava Redondeada			
	Masa Retenida (gr)	% Retenido	% Retenido Acumu.	% Que Pasa	Masa Retenida (gr)	% Retenido	% Retenido Acumu.	% Que Pasa	Masa Retenida (gr)	% Retenido	% Retenido Acumu.	% Que Pasa
3/4"	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100
1/2"	2,910.0	26.6	26.6	73.4	7,140.0	51.2	51.2	48.8	5,310.0	35.5	35.5	64.5
3/8"	2,100.0	19.2	45.8	54.2	2,740.0	19.6	70.8	29.2	2,720.0	18.2	53.7	46.3
No. 4	5,910.0	54.0	99.7	0.3	3,930.0	28.2	99.0	1.0	6,900.0	46.2	99.9	0.1
Pasa No. 4	30.0	0.3	100.0	0.0	140.0	1.0	100.0	0.0	20.0	0.1	100.0	0.0
Total	10,950.0	100.0			13,950.0	100.0			14,950.0	100.0		
T.M. = 3/4"					T.M. = 3/4"				T.M. = 3/4"			





➤ **Método de Prueba Estándar para el valor de Equivalente de Arena**

EQUIVALENTE DE ARENA						
Material	Arena Volcánica			Arena Redondeada		
No.	1	2	3	1	2	3
Lectura de arcilla	6.10	5.60	6.00	6.00	6.20	6.40
Lectura de arena	4.90	4.80	5.00	4.60	4.70	4.80
% E. de Arena	80.33	85.71	83.33	76.67	75.81	75.00
Promedio	83.13			75.82		





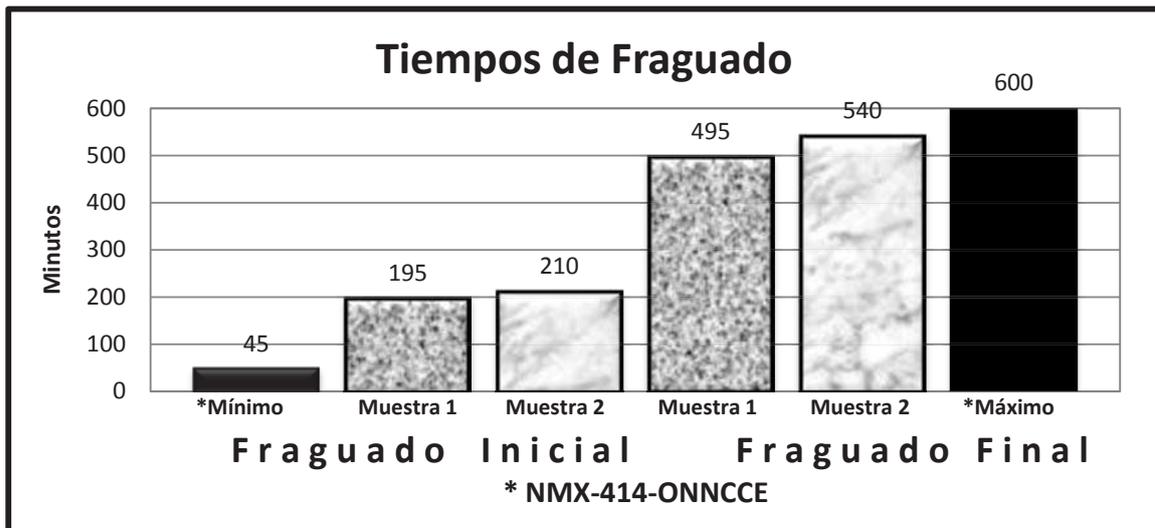
5.2. Cemento

- Método de Prueba Estándar para la Consistencia Normal del Cemento Hidráulico

CONSISTENCIA NORMAL	
Masa Material (gr)	650.00
Mililitros de agua	201.50
CN (%)	31.0

- Método de Prueba Estándar para el Tiempo de Fraguado del Cemento Hidráulico por la aguja de Vicat

TIEMPOS DE FRAGUADO			
Muestra	1	2	Especificación *
Fraguado Inicial (min)	195	210	45 min mínimo
Fraguado Final (min)	495	540	600 min máximo
*NMX-414-ONNCCE			



- Método de Prueba Estándar para la Determinación de la Densidad del Cemento Hidráulico

DENSIDAD		
No.	1	2
Masa Material (gr)	64.00	64.00
Lectura inicial	0.50	0.50
Lectura final	23.40	23.30
Volumen (cm ³)	22.90	22.80
Densidad (gr/cm ³)	2.79	2.81
Promedio	2.80	



5.3. Diseño de Mezclas

5.3.1. Mezcla 1: Arena Volcánica y Grava Volcánica (Método ACI 211)

Material	M.U.S. (Kg/m ³)	M.U.C. (Kg/m ³)	Gravedad Específica	ABSORCION %	HUMEDAD %	M.F.	T.M.
Arena	1,365	1,475	2.32	3.36	0.20	2.89	-
Grava	1,100	1,155	1.86	4.82	0.51	-	3/4
Cemento	1,490	-	2.80	-	-	-	-

Datos de Proyecto:

Resistencia de Proyecto $\rightarrow f'c = 250 \text{ Kg/cm}^2$

Revenimiento = 10 cm

Desviación Estándar = 35 Kg/cm² (Cuadro 3.10)

Sin aire incluido

Para 35 cilindros con 15% de desperdicio

*PASO 1: Elección del Revenimiento

Revenimiento = 10 cm

*PASO 2: Elección del Tamaño Máximo del Agregado

Tamaño Máximo (TM) = $\frac{3}{4}$ "

*PASO 3: Determinación del agua de mezclado y contenido de aire (Cuadro 3.4)

Agua = 205 Lt o Kg; % de aire atrapado = 2 %

*PASO 4: Selección de la relación Agua/Cemento

Primeramente se calculará el Esfuerzo Crítico de Diseño (F_{CR}) (Cuadro 3.7)

$$* F_{CR} = f'c + 1.28 \sigma = 250 + 1.28(35) = 295 \text{ Kg/cm}^2.$$

$$* F_{CR} = f'c + 2.52 \sigma - 35 = 250 + 2.52(35) - 35 = 303 \text{ Kg/cm}^2.$$

\therefore Se elige la mayor, $F_{CR} = 303 \text{ Kg/cm}^2$. Entrando al Cuadro 3.5 e interpolando, la relación A/C = 0.54

*PASO 5: Cálculo del Contenido de Cemento

$$\frac{A}{C} = 0.54 \rightarrow \text{Si } A = 205 \rightarrow C = \frac{205}{0.54} = 376.95 \therefore \text{Contenido de Cemento} = 376.95 \text{ Kg/m}^3$$



***PASO 6: Estimación del contenido de agregado grueso:**

Con el módulo de finura (MF) de la arena = 2.89 y el tamaño máximo (TM) de la grava = 3/4", se entra al *Cuadro 3.11*, se hace una interpolación y se obtiene el valor de volumen = 0.61.

Si $M.U.C. = \frac{W}{V}$ y $V = 0.61$ y $M.U.C. = 1,155 \text{ Kg/m}^3 \therefore w = 0.61 * 1155 = 705.34 \text{ Kg de grava}$

***PASO 7: Estimación del contenido de agregado fino:**

Materiales	Masa (kg)	G.E.	Volumen (m ³)
Cemento	376.95	2.80	0.1346
Agua	205.00	1.00	0.2050
Aire	0.00	0.00	0.0200
Arena		2.32	
Grava	705.34	1.86	0.3800
Total	1,287.28		0.7396

Como se observa falta la masa y el volumen de la arena, el cual se obtendrá por diferencia ya que la suma total del volumen debe ser igual a 1m³ ∴ Suma Total = 0.7396, para lo cual falta 0.2604 m³ para completar el metro cúbico total. De esta forma la tabla queda de la siguiente manera:

Materiales	Masa (kg)	G.E.	Volumen (m ³)
Cemento	376.95	2.80	0.1346
Agua	205.00	1.00	0.2050
Aire	0.00	0.00	0.0200
Arena	603.47	2.32	0.2604
Grava	705.34	1.86	0.3800
	1,890.76		1.0000

***PASO 8: Ajustes por humedad del agregado**

	Grava		Arena	
Absorción	4.82 %		3.36 %	
Humedad	0.51 %		0.20 %	∴El agregado necesita más agua
Dif 1	<u>4.31 %</u>	Dif 2	<u>3.16 %</u>	

Masa de grava sobresaturada = 705.34 (1 + humedad) = 705.34 (1+ 0.0051) = 708.95 Kg

Masa de arena sobresaturada = 603.47 (1 + humedad) = 603.47 (1+ 0.0020) = 604.66 Kg

Para no alterar la relación A/C, se modifica el contenido de agua

A = 205.00 + (Dif 1*Masa Grava) + (Dif 2*Masa Arena) = 205.00 + 30.4 + 19.08 =254.49 Kg



***PASO 9: Ajustes en la mezcla de prueba**

CANTIDADES PARA UN METRO CÚBICO DE CONCRETO				
Material	Masas corregidas (Kg)	G.E.	Vol. (lt)	Relación en Masas corregidas
Cemento	376.95	2.80	134.6	1.0
Agua	254.49	1.00	254.5	0.7
Arena	604.66	2.32	260.9	1.6
Grava	708.95	1.86	382.0	1.9
Aire	0	0	0.0	0.0
TOTAL	1,945.05		1,031.9	

En la tabla siguiente aparece la proporción práctica en volumen de los materiales referidos al cemento:

Materiales	Cemento	Arena	Grava	Agua
Proporción en masa (Kg)	1.0	1.6	1.9	0.7
Materiales en masa por saco de cemento	50.0	80.2	94.0	33.8
Material en volumen por saco de cemento (litros)	33.6	58.8	85.5	33.8
Materiales en relación al volumen unitario cemento	1.0	1.8	2.5	1.0

El orden del proporcionamiento es Cemento : Arena : Grava (Agua)	
Proporción por barrica o bote alcoholero (19 lt):	1:1 3/4: 2 5/9 (1)
También puede ser (siendo este el más práctico):	1: 2 : 2 1/2 (1)
Proporción por saco de cemento considerando que 1 saco de cemento son 2 botes o barricas:	1: 4 : 5 (2)

***PASO 10: Cantidades para cilindros de 10cm x 20 cm**

Volumen de un cilindro = 0.0016 m³

Número de cilindros = 35

Volumen Total para los cilindros = 0.06322 m³

Material	Masa (Kg)	Volumen(lt)	Volumen(m ³)
Cemento	23.8	8.5	0.0085
Arena	38.2	16.5	0.0165
Grava	44.8	24.1	0.0241
Agua	16.1	16.1	0.0161
TOTAL	123.0	65.2	0.0652



5.3.2. Mezcla 2: Arena Volcánica y Grava Triturada (Método ACI 211)

Material	M.U.S. (Kg/m ³)	M.U.C. (Kg/m ³)	Gravedad Específica	ABSORCION %	HUMEDAD %	M.F.	T.M.
Arena	1,365	1,475	2.32	3.36	0.96	2.89	-
Grava	1,400	1,495	2.60	1.67	1.60	-	3/4
Cemento	1,490	-	2.80	-	-	-	-

Datos de Proyecto:

Resistencia de Proyecto $\rightarrow f'c = 250 \text{ Kgf/cm}^2$

Revenimiento = 10 cm

Desviación Estándar = 35 Kgf/cm^2 (Cuadro 3.10)

Sin aire incluido

Para 35 cilindros con 15% de desperdicio

*PASO 1: Elección del Revenimiento

Revenimiento = 10 cm

*PASO 2: Elección del Tamaño Máximo del Agregado

Tamaño Máximo (TM) = $\frac{3}{4}$ "

*PASO 3: Determinación del agua de mezclado y contenido de aire (Cuadro 3.4)

Agua = 205 lt o Kg; % de aire atrapado = 2 %

*PASO 4: Selección de la relación Agua/Cemento

Primeramente se calculará el Esfuerzo Crítico de Diseño (F_{CR}) (Cuadro 3.7)

$$* F_{CR} = f'c + 1.28 \sigma = 250 + 1.28(35) = 295 \text{ Kgf/cm}^2.$$

$$* F_{CR} = f'c + 2.52 \sigma - 35 = 250 + 2.52(35) - 35 = 303 \text{ Kgf/cm}^2.$$

\therefore Se elige la mayor, $F_{CR} = 303 \text{ Kgf/cm}^2$. Entrando al Cuadro 3.5 e interpolando, la relación A/C = 0.54

*PASO 5: Cálculo del Contenido de Cemento

$$\frac{A}{C} = 0.54 \rightarrow \text{Si } A = 205 \rightarrow C = \frac{205}{0.54} = 376.95 \therefore \text{Contenido de Cemento} = 376.95 \text{ Kg/m}^3$$



***PASO 6: Estimación del contenido de agregado grueso:**

Con el módulo de finura (MF) de la arena = 2.89 y el tamaño máximo (TM) de la grava = 3/4", se entra al *Cuadro 3.11*, se hace una interpolación y se obtiene el valor de volumen = 0.61.

Si $M.U.C. = \frac{W}{V}$ y $V = 0.61$ y $M.U.C. = 1495 \text{ Kg/m}^3 \therefore w = 0.61 * 1495 = 912.97 \text{ Kg de grava}$

***PASO 7: Estimación del contenido de agregado fino:**

Materiales	Masa (kg)	G.E.	Volumen (m ³)
Cemento	376.95	2.80	0.1346
Agua	205.00	1.00	0.2050
Aire	0.00	0.00	0.0200
Arena		2.32	
Grava	912.97	2.60	0.3508
Total	1,494.91		0.7103

Como se observa falta la masa y el volumen de la arena, el cual se obtendrá por diferencia ya que la suma total del volumen debe ser igual a 1m³ ∴ Suma Total = 0.7103, para lo cual falta 0.2897 m³ para completar el metro cúbico total. De esta forma la tabla queda de la siguiente manera:

Materiales	Masa (kg)	G.E.	Volumen (m ³)
Cemento	376.95	2.80	0.1346
Agua	205.00	1.00	0.2050
Aire	0.00	0.00	0.0200
Arena	671.28	2.32	0.2897
Grava	912.97	2.60	0.3508
	2,166.19		1.0000

***PASO 8: Ajustes por humedad del agregado**

	Grava		Arena	
Absorción	1.67 %		3.36 %	
Humedad	1.60 %		0.96 %	∴El agregado necesita más agua
Dif 1	<u>0.07 %</u>	Dif 2	<u>2.40 %</u>	

Masa de grava sobresaturada = 912.97 (1 + humedad) = 912.97 (1+ 0.0160) = 927.58 Kg

Masa de arena sobresaturada = 671.28 (1 + humedad) = 671.28 (1+ 0.0096) = 677.72 Kg

Para no alterar la relación A/C, se modifica el contenido de agua

A = 205.00 + (Dif 1*Masa Grava) + (Dif 2*Masa Arena) = 205.00 + 0.62 + 16.11 =221.74 Kg



***PASO 9: Ajustes en la mezcla de prueba**

CANTIDADES PARA UN METRO CÚBICO DE CONCRETO				
Material	Masas corregidas (Kg)	G.E.	Vol. (lt)	Relación en Masas corregidas
Cemento	376.95	2.80	134.6	1.0
Agua	221.74	1.00	221.7	0.6
Arena	677.72	2.32	292.4	1.8
Grava	927.58	2.60	356.4	2.5
Aire	0	0	0.0	0.0
TOTAL	2,203.98		1,005.1	

En la tabla siguiente aparece la proporción práctica en volumen de los materiales referidos al cemento:

Materiales	Cemento	Arena	Grava	Agua
Proporción en masa (Kg)	1.0	1.8	2.5	0.6
Materiales en masa por saco de cemento	50.0	89.9	123.0	29.4
Material en volumen por saco de cemento (litros)	33.6	65.9	87.9	29.4
Materiales en relación al volumen unitario cemento	1.0	2.0	2.6	0.9

El orden del proporcionamiento es Cemento : Arena : Grava (Agua)	
Proporción por barrica o bote alcoholero (19 lt):	1:2: 2 5/8 (1)
También puede ser (siendo este el más práctico):	1: 2 : 2 ½ (1)
Proporción por saco de cemento considerando que 1 saco de cemento son 2 botes o barricas:	1: 4 : 5 (2)

***PASO 10: Cantidades para cilindros de 10cm x 20 cm**

Volumen de un cilindro = 0.0016 m³

Número de cilindros = 35

Volumen Total para los cilindros = 0.06322 m³

Material	Masa (Kg)	Volumen(lt)	Volumen(m ³)
Cemento	23.8	8.5	0.0085
Arena	42.8	18.5	0.0185
Grava	58.6	22.5	0.0225
Agua	14.0	14.0	0.0140
TOTAL	139.3	63.5	0.0635



5.3.3. Mezcla 3: Arena de Río y Grava de Río (Método ACI 211)

Material	M.U.S. (Kg/m ³)	M.U.C. (Kg/m ³)	Gravedad Específica	ABSORCION %	HUMEDAD %	M.F.	T.M.
Arena	1415	1530	2.21	6.06	1.57	3.29	-
Grava	1490	1535	2.38	3.98	2.02	-	3/4
Cemento	1490	-	2.80	-	-	-	-

Datos de Proyecto:

Resistencia de Proyecto $\rightarrow f'c = 250 \text{ Kgf/cm}^2$

Revenimiento = 10 cm

Desviación Estándar = 35 Kgf/cm^2 (Cuadro 3.10)

Sin aire incluido

Para 35 cilindros con 15% de desperdicio

*PASO 1: Elección del Revenimiento

Revenimiento = 10 cm

*PASO 2: Elección del Tamaño Máximo del Agregado

Tamaño Máximo (TM) = $\frac{3}{4}$ "

*PASO 3: Determinación del agua de mezclado y contenido de aire (Cuadro 3.4)

Agua = 205 lt o Kg; % de aire atrapado = 2 %

*PASO 4: Selección de la relación Agua/Cemento

Primeramente se calculará el Esfuerzo Crítico de Diseño (F_{CR}) (Cuadro 3.7)

$$* F_{CR} = f'c + 1.28 \sigma = 250 + 1.28(35) = 295 \text{ Kgf/cm}^2.$$

$$* F_{CR} = f'c + 2.52 \sigma - 35 = 250 + 2.52(35) - 35 = 303 \text{ Kgf/cm}^2.$$

\therefore Se elige la mayor, $F_{CR} = 303 \text{ Kgf/cm}^2$. Entrando al Cuadro 3.5 e interpolando, la relación A/C = 0.54

*PASO 5: Cálculo del Contenido de Cemento

$$\frac{A}{C} = 0.54 \rightarrow \text{Si } A = 205 \rightarrow C = \frac{205}{0.54} = 376.95 \therefore \text{Contenido de Cemento} = 376.95 \text{ Kg/m}^3$$



***PASO 6: Estimación del contenido de agregado grueso:**

Con el módulo de finura (MF) de la arena = 3.29 y el tamaño máximo (TM) de la grava = 3/4", se entra al *Cuadro 3.11*, se hace una extrapolación y se obtiene el valor de volumen = 0.57.

Si $M.U.C. = \frac{W}{V}$ y $V = 0.57$ y $M.U.C. = 1535 \text{ Kg/m}^3 \therefore w = 0.57 * 1535 = 876.98 \text{ Kg de grava}$

***PASO 7: Estimación del contenido de agregado fino:**

Materiales	Masa (kg)	G.E.	Volumen (m ³)
Cemento	376.95	2.80	0.1346
Agua	205.00	1.00	0.2050
Aire	0.00	0.00	0.0200
Arena		2.21	
Grava	876.98	2.38	0.3686
Total	1,458.92		0.7282

Como se observa falta la masa y el volumen de la arena, el cual se obtendrá por diferencia ya que la suma total del volumen debe ser igual a 1m³ ∴ Suma Total = 0.7282, para lo cual falta 0.2718 m³ para completar el metro cúbico total. De esta forma la tabla queda de la siguiente manera:

Materiales	Masa (kg)	G.E.	Volumen (m ³)
Cemento	376.95	2.80	0.1346
Agua	205.00	1.00	0.2050
Aire	0.00	0.00	0.0200
Arena	600.19	2.21	0.2718
Grava	876.98	2.38	0.3686
	2,059.11		1.0000

***PASO 8: Ajustes por humedad del agregado**

	Grava		Arena	
Absorción	3.98 %		6.06 %	
Humedad	2.02 %		1.57 %	∴El agregado necesita más agua
	Dif 1 <u>1.96 %</u>		Dif 2 <u>4.49 %</u>	

Masa de grava sobresaturada = 876.98 (1 + humedad) = 876.98 (1+ 0.0202) = 894.69 Kg

Masa de arena sobresaturada = 600.19 (1 + humedad) = 600.19 (1+ 0.0157) = 609.63 Kg

Para no alterar la relación A/C, se modifica el contenido de agua

A = 205.00 + (Dif 1*Masa Grava) + (Dif 2*Masa Arena) = 205.00 + 17.15 + 26.95 =249.10 Kg



***PASO 9: Ajustes en la mezcla de prueba**

CANTIDADES PARA UN METRO CÚBICO DE CONCRETO				
Material	Masas corregidas (Kg)	G.E.	Vol. (lt)	Relación en Masas corregidas
Cemento	376.95	2.80	134.6	1.0
Agua	249.10	1.00	249.1	0.7
Arena	609.63	2.21	276.1	1.6
Grava	894.69	2.38	376.1	2.4
Aire	0	0	0.0	0.0
TOTAL	2,130.37		1,026.9	

En la tabla siguiente aparece la proporción práctica en volumen de los materiales referidos al cemento:

Materiales	Cemento	Arena	Grava	Agua
Proporción en masa (Kg)	1.0	1.6	2.4	0.7
Materiales en masa por saco de cemento	50.0	80.9	118.7	33.0
Material en volumen por saco de cemento (litros)	33.6	57.1	79.6	33.0
Materiales en relación al volumen unitario cemento	1.0	1.7	2.4	1.0

El orden del proporcionamiento es Cemento : Arena : Grava (Agua)	
Proporción por barrica o bote alcoholero (19 lt):	1:1 5/7: 2 3/8 (1)
También puede ser (siendo este el más práctico):	1: 2 : 2 ½ (1)
Proporción por saco de cemento considerando que 1 saco de cemento son 2 botes o barricas:	1: 4 : 5 (2)

***PASO 10: Cantidades para cilindros de 10cm x 20 cm**

Volumen de un cilindro = 0.0016 m³

Número de cilindros = 35

Volumen Total para los cilindros = 0.06322 m³

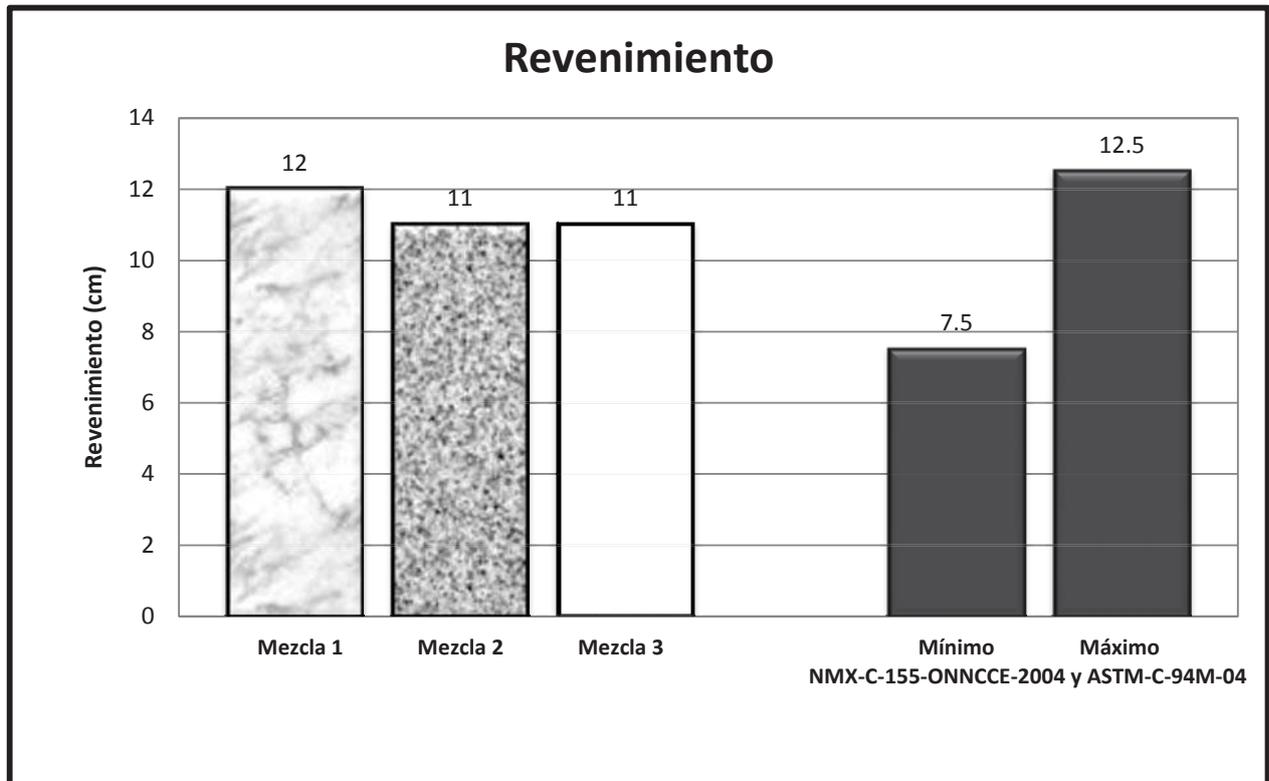
Material	Masa (Kg)	Volumen(lt)	Volumen(m ³)
Cemento	23.8	8.5	0.0085
Arena	38.5	17.5	0.0175
Grava	56.6	23.8	0.0238
Agua	15.7	15.7	0.0157
TOTAL	134.7	65.5	0.0655



5.4. Concreto Fresco

➤ Revenimiento del Concreto

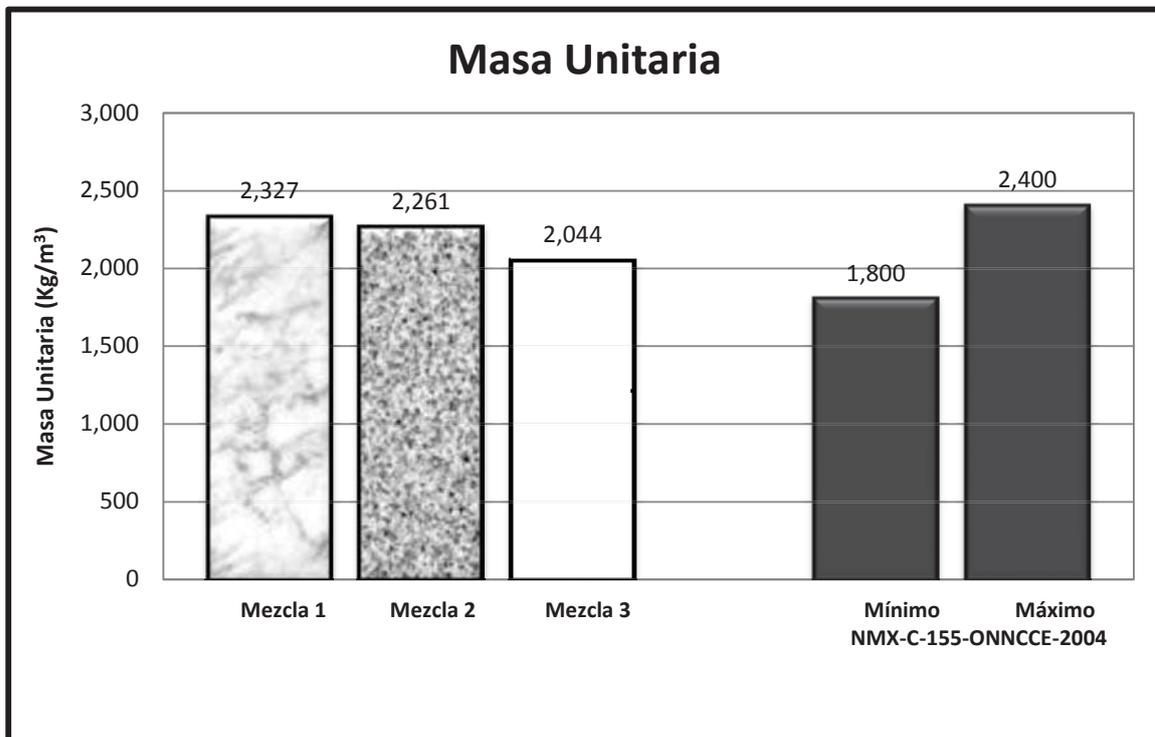
REVENIMIENTO					
Mezcla (No.)	Arena Volcánica y Grava Triturada (1)	Arena y Grava Redondeada (2)	Arena y Grava Volcánica (3)	Especificaciones	
				Revenimiento Nominal	Tolerancia* +
Revenimiento (cm)	12	11	11	De 5 a 10	±2.5
*NMX-C-155-ONNCCE-2004 + ASTM-C-94M-04					





➤ Masa Unitaria del Concreto

MASA UNITARIA					
Mezcla	Arena Volcánica y Grava Triturada	Arena y Grava Redondeada	Arena y Grava Volcánica	Especificaciones Masa Unitaria	
				Mínima	Máxima
Tara (gr)	2,930	2,930	2,930	1,800	2,400
Tara más Material (gr)	27,600	26,900	24,600		
Masa Material (gr)	24,670	23,970	21,670		
Volumen (cm ³)	10,600	10,600	10,600		
Masa Unitaria (gr/cm ³)	2.33	2.26	2.04		
Masa Unitaria (Kg/m ³)	2,327	2,261	2,044		
*NMX-C-155-ONNCCE-2004					

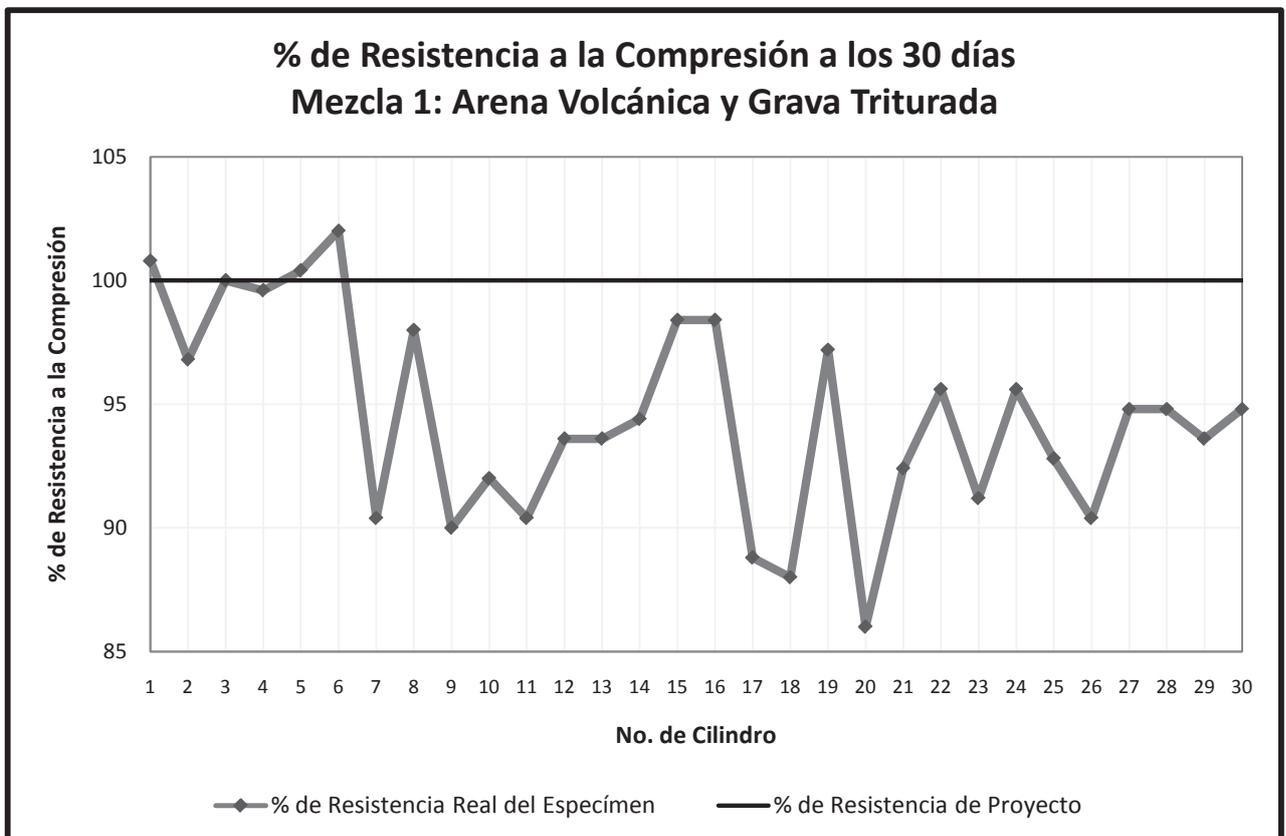
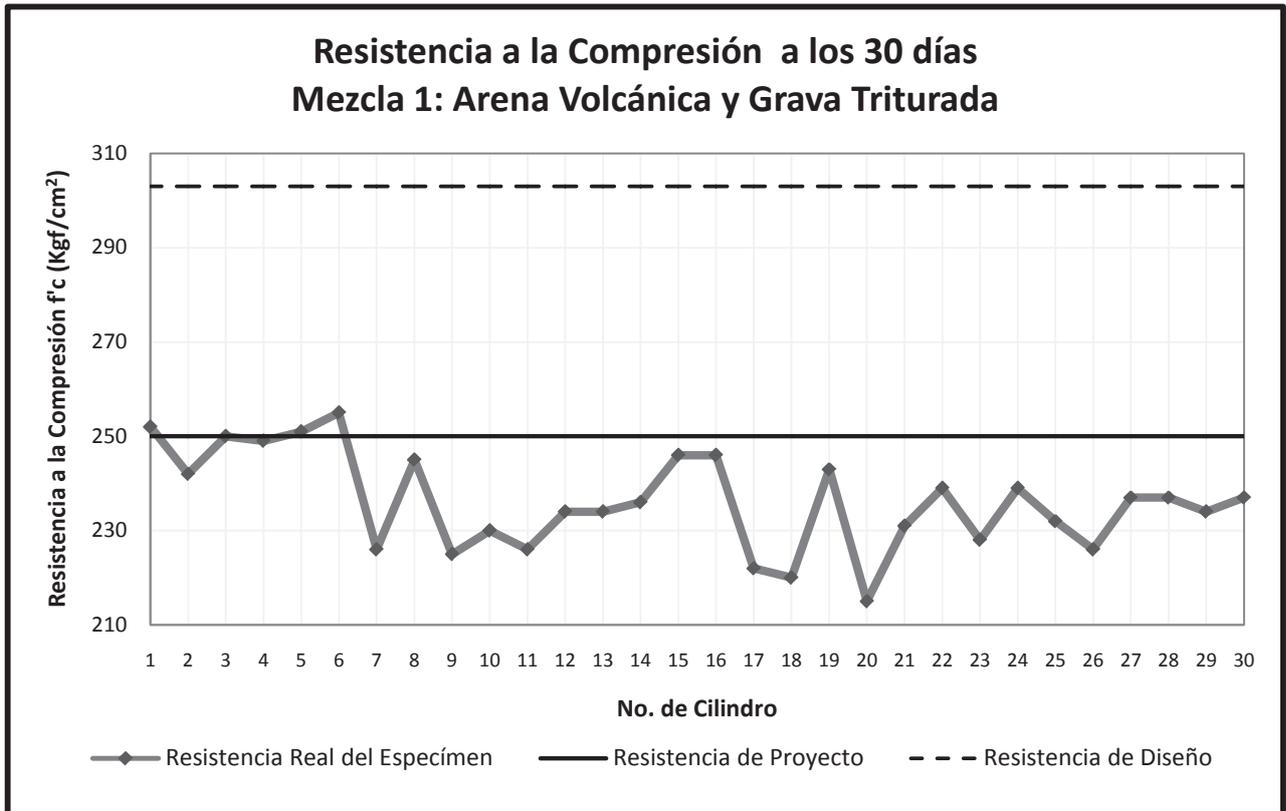




5.5. Concreto Endurecido

➤ Resistencia a la Compresión y Módulo de Elasticidad Estático

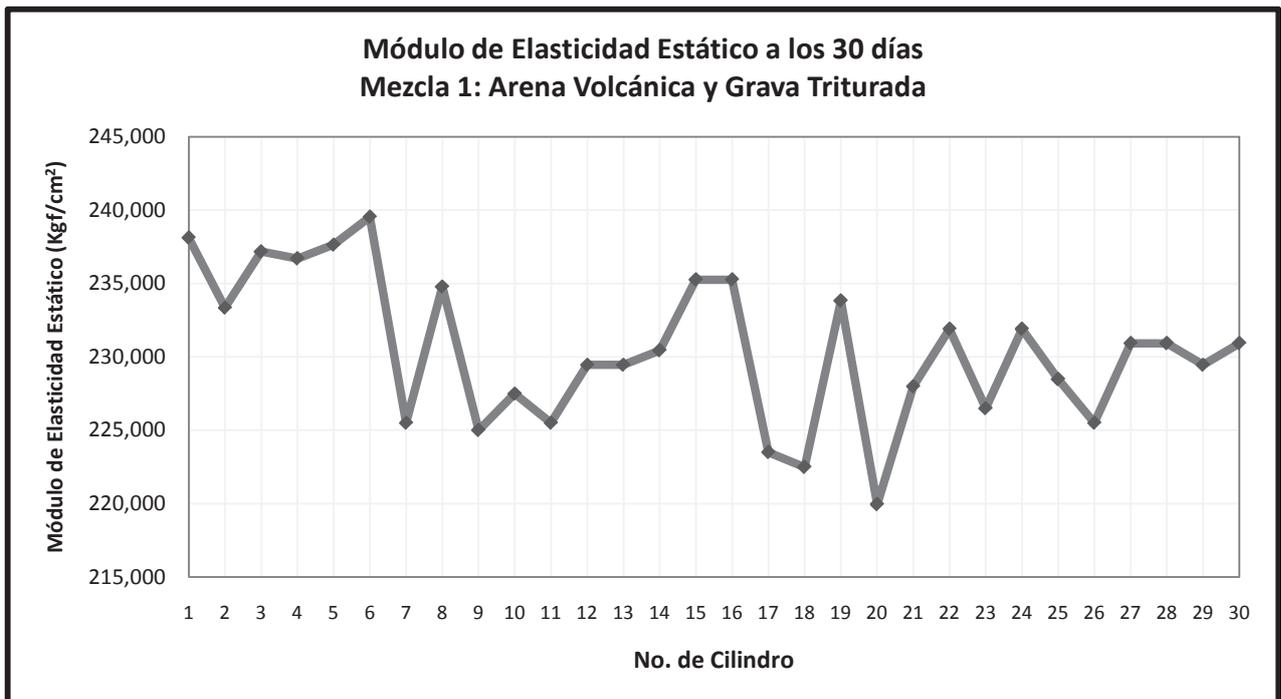
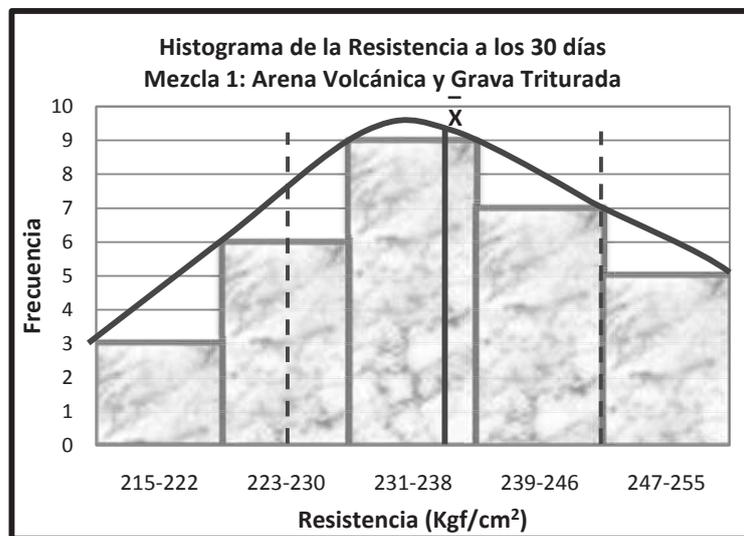
Mezcla 1: Arena Volcánica y Grava Triturada; Edad de Prueba: 30 días						
No	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (Kgf)	Resistencia (Kgf/cm ²)	% de Resistencia	Módulo de Elasticidad Estático (Kgf/cm ²)
1	10.02	78.91	19,905	252	101	239,705
2	10.03	79.06	19,189	242	97	234,901
3	10.02	78.85	19,773	250	100	238,752
4	10.02	78.80	19,666	249	100	238,274
5	10.05	79.27	19,931	251	100	239,229
6	10.04	79.17	20,193	255	102	241,128
7	10.04	79.17	17,969	226	90	227,003
8	10.06	79.49	19,547	245	98	236,352
9	10.02	78.85	17,756	225	90	226,500
10	10.01	78.75	18,134	230	92	229,003
11	10.05	79.38	18,007	226	90	227,003
12	10.03	79.06	18,565	234	94	230,986
13	10.08	79.75	18,686	234	94	230,986
14	10.04	79.17	18,686	236	94	231,971
15	10.04	79.22	19,496	246	98	236,834
16	10.08	79.75	19,677	246	98	236,834
17	10.08	79.85	17,800	222	89	224,985
18	10.07	79.64	17,545	220	88	223,969
19	10.03	79.01	19,215	243	97	235,386
20	10.02	78.80	16,950	215	86	221,409
21	10.02	78.85	18,286	231	92	229,500
22	10.05	79.33	18,995	239	96	233,440
23	10.03	79.01	18,066	228	91	228,005
24	10.03	79.01	18,896	239	96	233,440
25	10.04	79.17	18,382	232	93	229,996
26	10.02	78.91	17,842	226	90	227,003
27	10.02	78.91	18,727	237	95	232,462
28	10.06	79.43	18,837	237	95	232,462
29	10.04	79.12	18,552	234	94	230,986
30	10.04	79.22	18,817	237	95	232,462





Análisis Estadístico Mezcla 1	
Muestra (n) =	30
Resistencia Media (X) =	236 Kgf/cm ²
Mediana =	237 Kgf/cm ²
Moda =	226 Kgf/cm ²
Desviación Estándar =	10 Kgf/cm ²
Varianza =	105
C.V. =	0.04
Rango =	40 Kgf/cm ²
Mínimo =	215 Kgf/cm ²
Máximo =	255 Kgf/cm ²

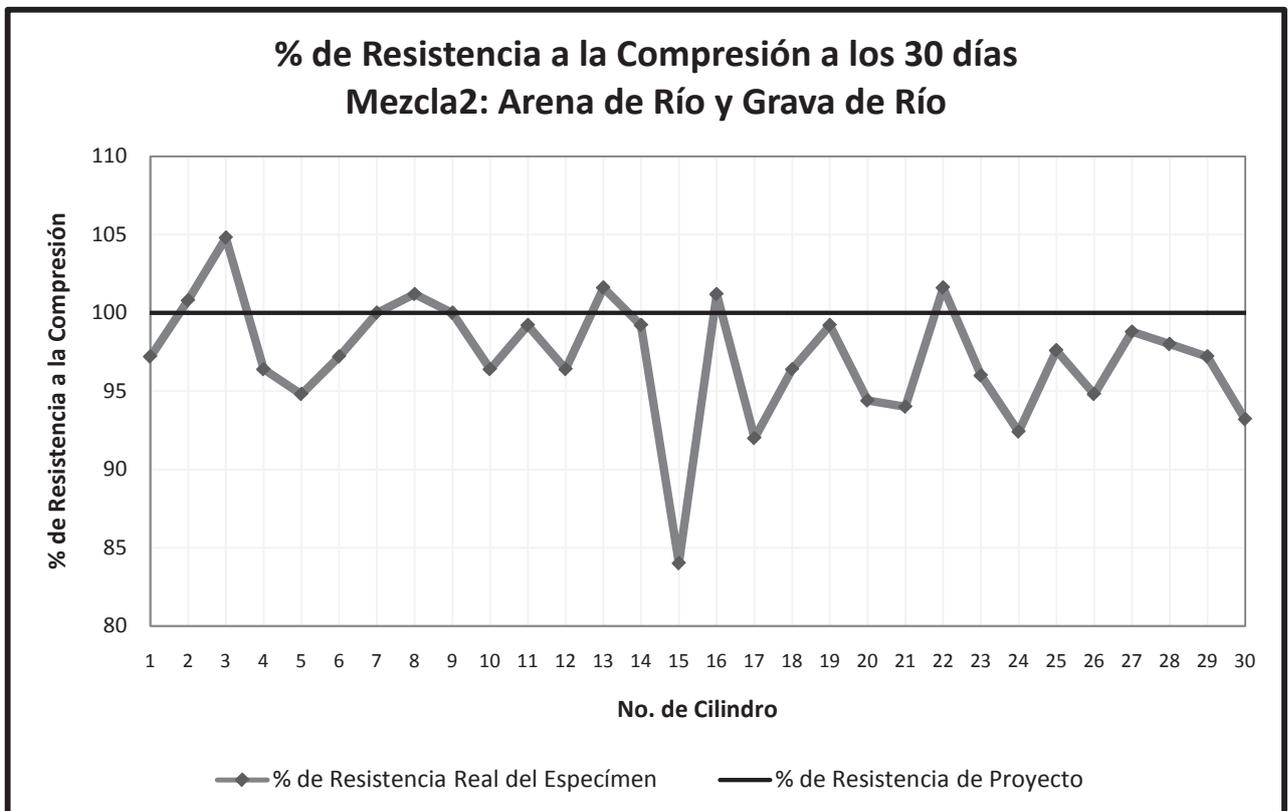
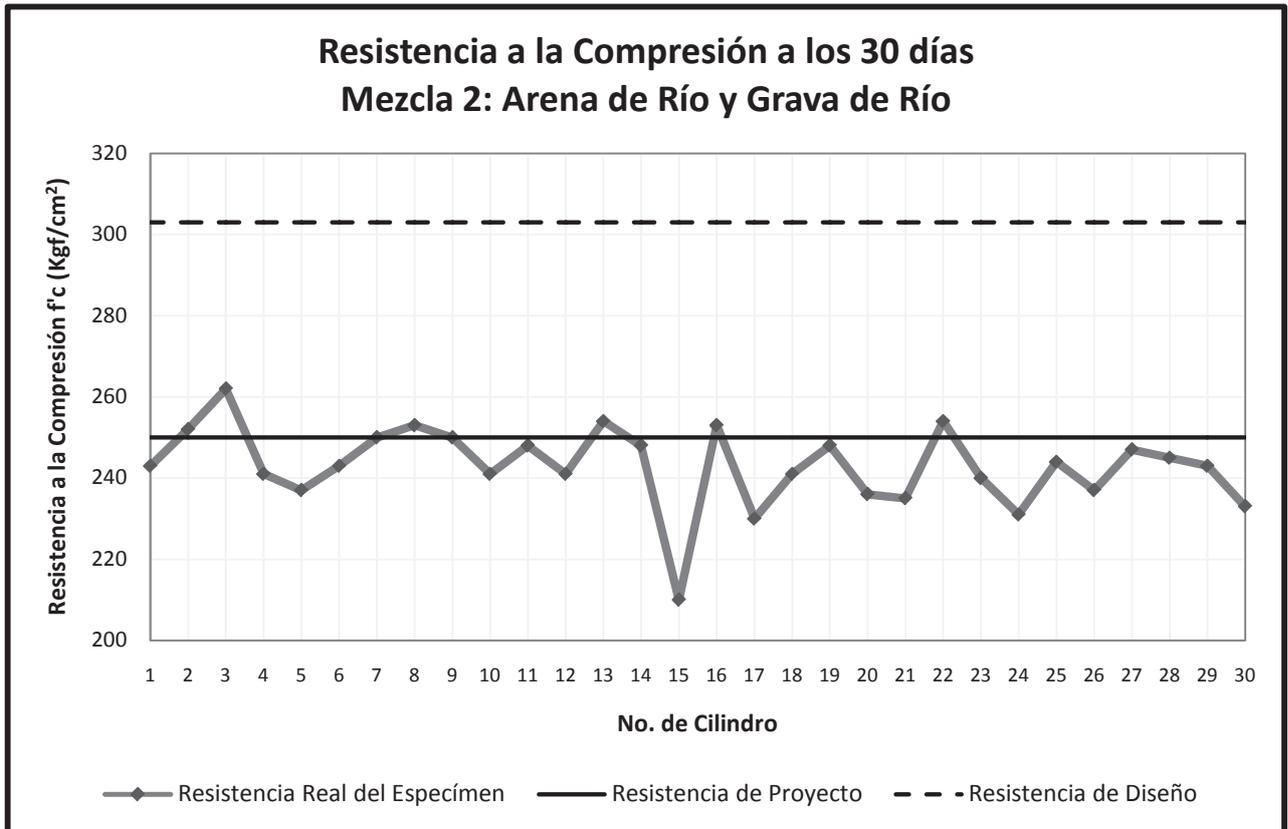
Intervalo de la Resistencia (Kgf/cm ²)	Frecuencia de Especímenes en el Intervalo
215-222	3
223-230	6
231-238	9
239-246	7
247-255	5
n =	30





Mezcla 2: Arena de Río y Grava de Río; Edad de Prueba: 30 días

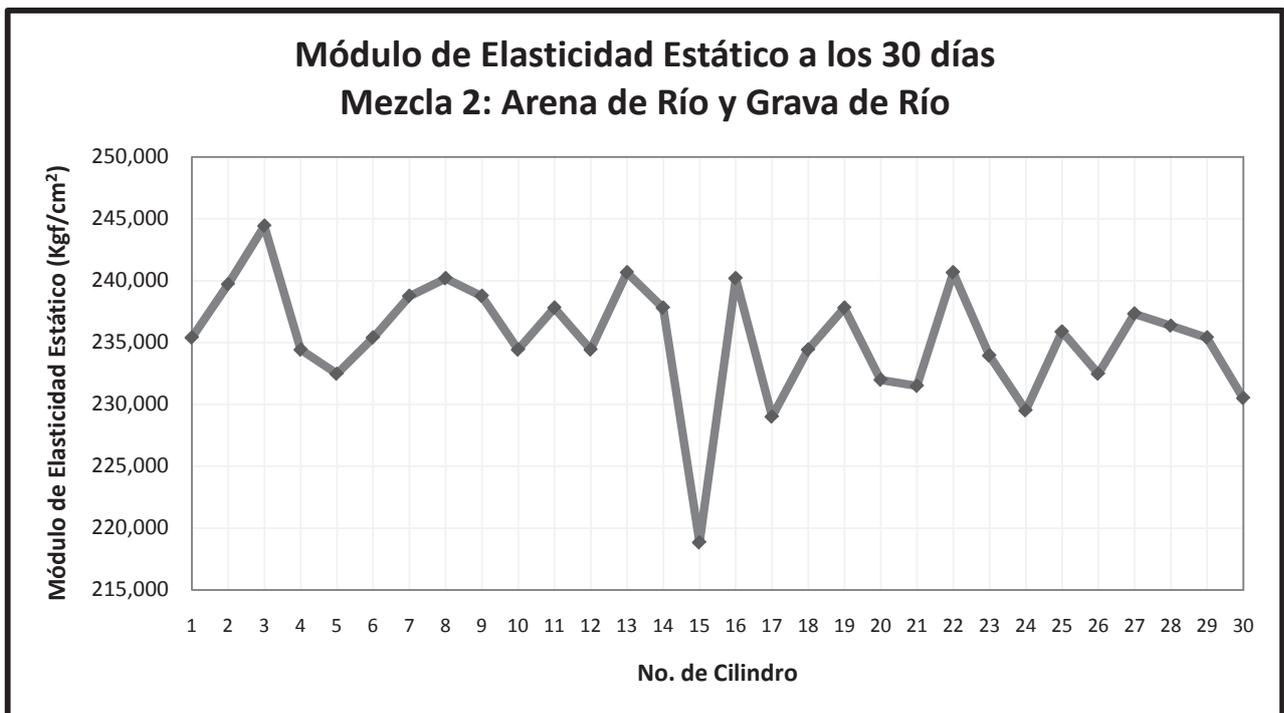
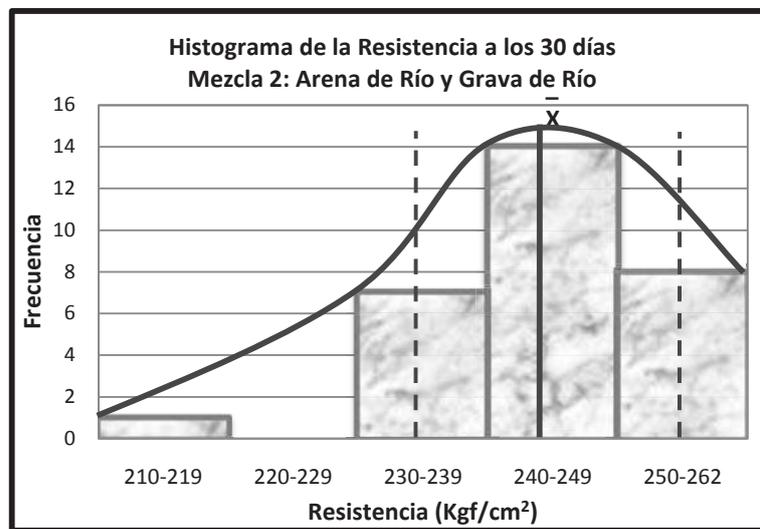
No	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (Kgf)	Resistencia (Kgf/cm ²)	% de Resistencia	Módulo de Elasticidad Estático (Kgf/cm ²)
1	10.09	79.91	19,424	243	97	235,386
2	10.03	78.96	19,967	252	101	239,705
3	10.01	78.70	20,661	262	105	244,415
4	10.04	79.12	19,129	241	96	234,415
5	10.06	79.54	18,890	237	95	232,462
6	10.02	78.85	19,233	243	97	235,386
7	10.09	79.96	20,030	250	100	238,752
8	10.05	79.27	20,105	253	101	240,180
9	10.02	78.85	19,738	250	100	238,752
10	10.00	78.54	18,982	241	96	234,415
11	10.01	78.70	19,536	248	99	237,795
12	10.04	79.12	19,077	241	96	234,415
13	10.01	78.75	20,015	254	102	240,654
14	10.02	78.80	19,593	248	99	237,795
15	9.96	77.91	16,363	210	84	218,820
16	10.03	79.01	19,995	253	101	240,180
17	10.05	79.38	18,259	230	92	229,003
18	9.99	78.38	18,938	241	96	234,415
19	10.00	78.54	19,516	248	99	237,795
20	10.02	78.85	18,666	236	94	231,971
21	10.06	79.49	18,723	235	94	231,479
22	9.98	78.23	19,931	254	102	240,654
23	10.07	79.59	19,176	240	96	233,928
24	10.00	78.59	18,233	231	92	229,500
25	10.04	79.22	19,369	244	98	235,870
26	9.98	78.23	18,582	237	95	232,462
27	10.04	79.17	19,619	247	99	237,315
28	10.04	79.12	19,424	245	98	236,352
29	10.01	78.64	19,184	243	97	235,386
30	10.03	79.01	18,483	233	93	230,491





Análisis Estadístico Mezcla 2	
Muestra (n) =	30
Resistencia Media (X) =	243 Kgf/cm ²
Mediana =	243 Kgf/cm ²
Moda =	241 Kgf/cm ²
Desviación Estándar =	10 Kgf/cm ²
Varianza =	96
C.V. =	0.04
Rango =	52 Kgf/cm ²
Mínimo =	210 Kgf/cm ²
Máximo =	262 Kgf/cm ²

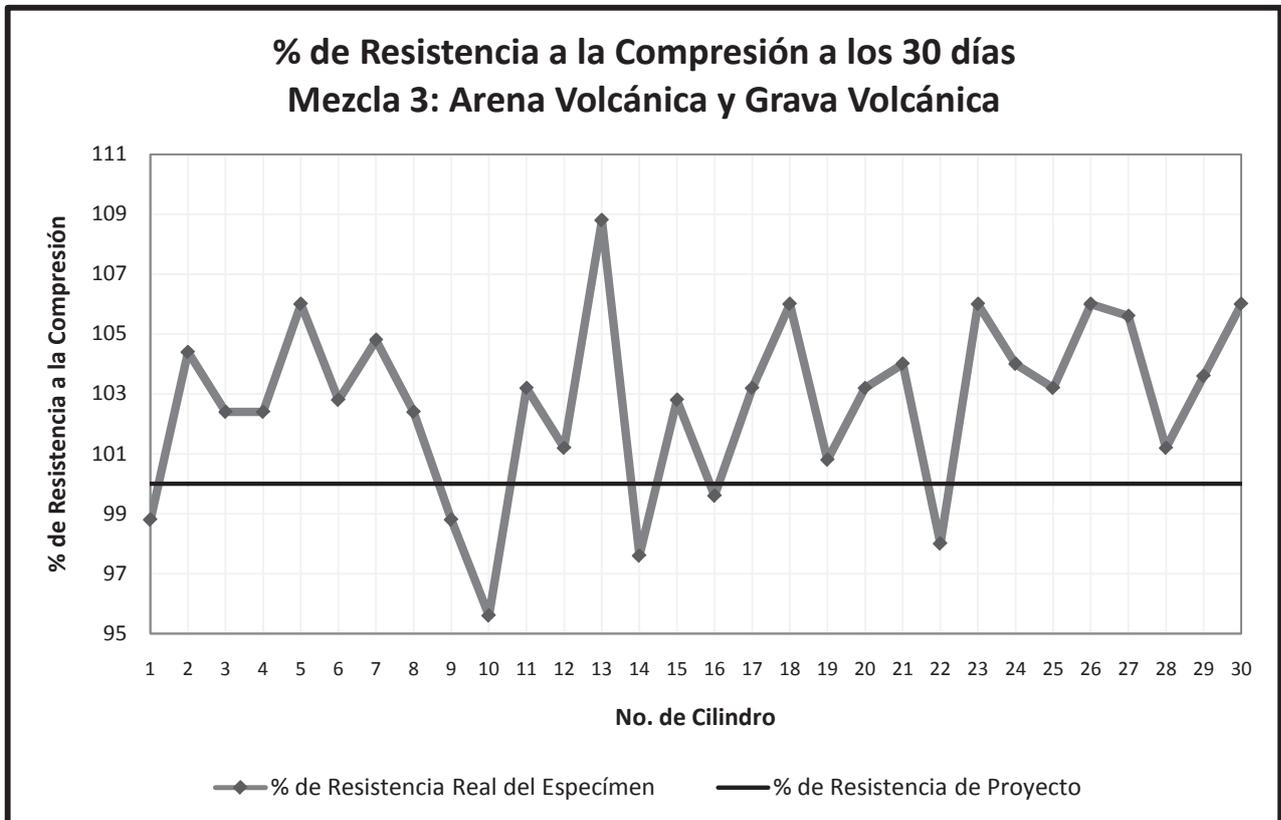
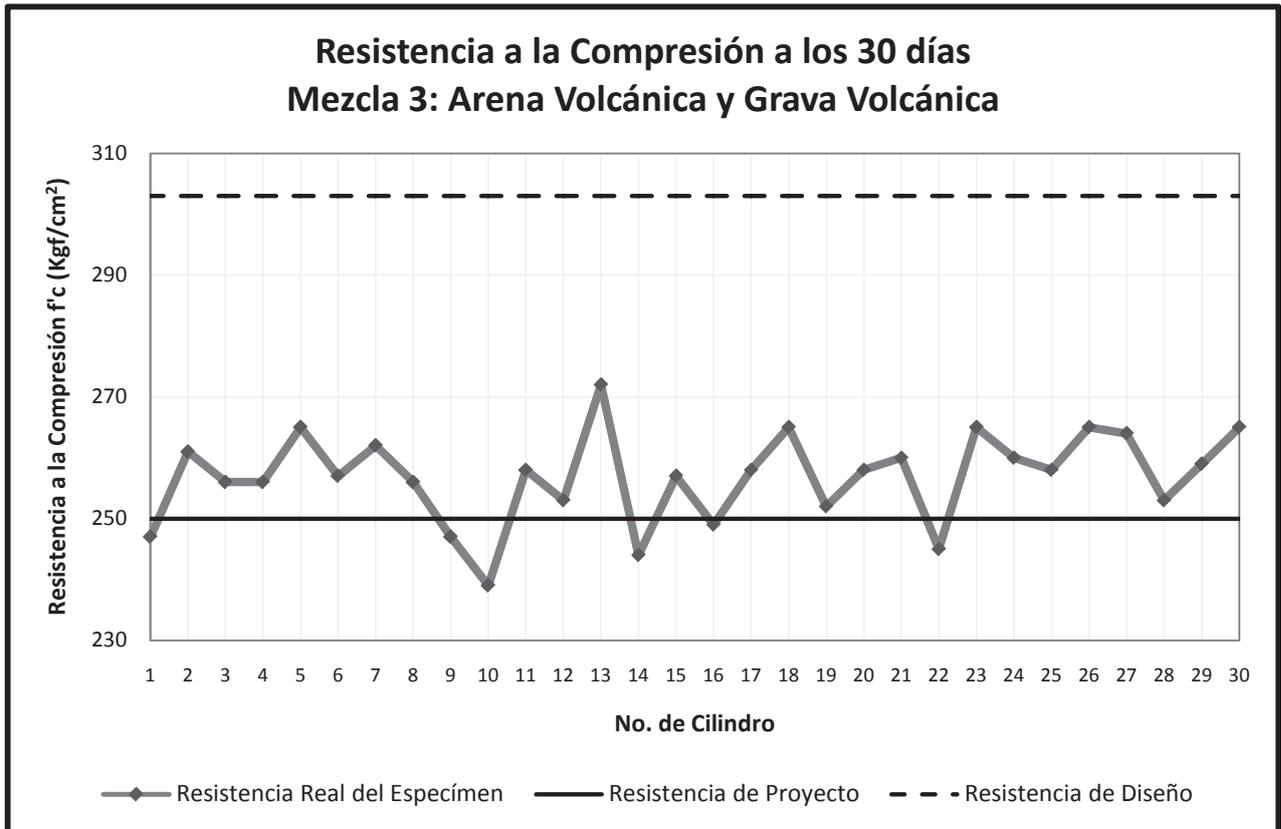
Intervalo de la Resistencia (Kgf/cm ²)	Frecuencia de Especímenes en el Intervalo
210-219	1
220-229	0
230-239	7
240-249	14
250-262	8
n =	30





Mezcla 3: Arena Volcánica y Grava Volcánica; Edad de Prueba: 30 días

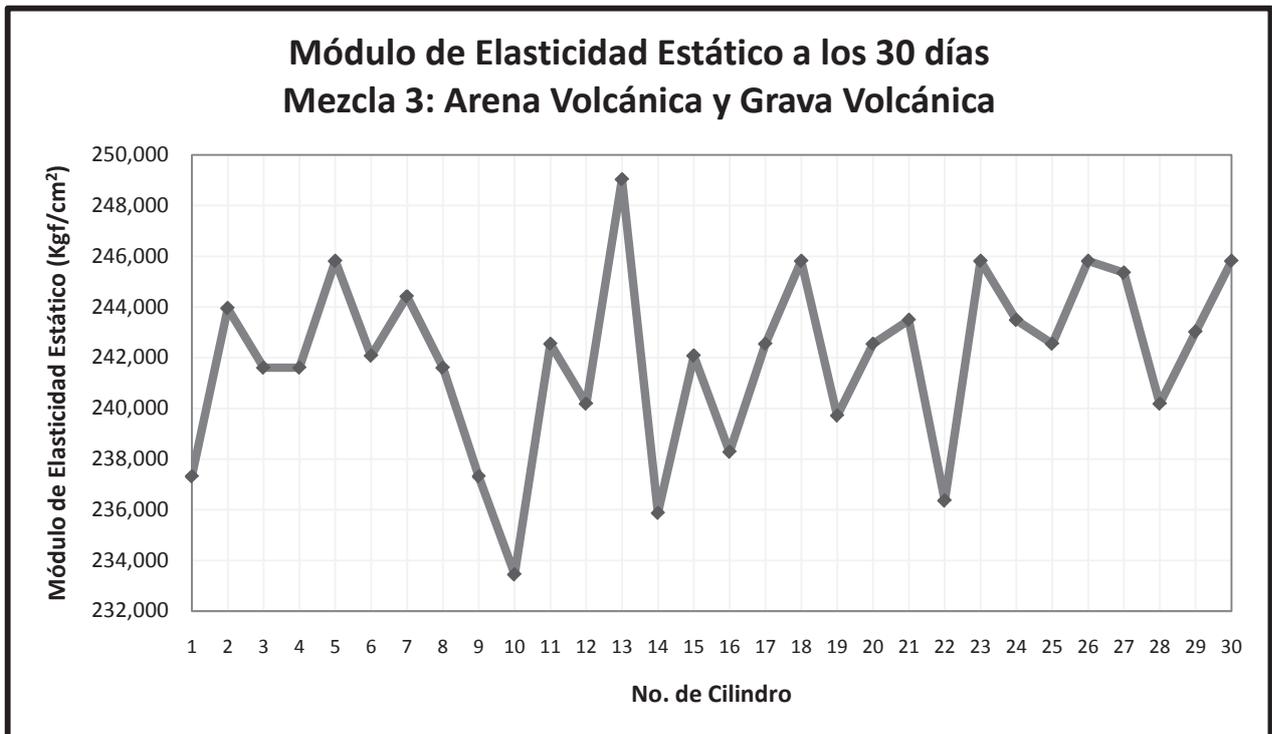
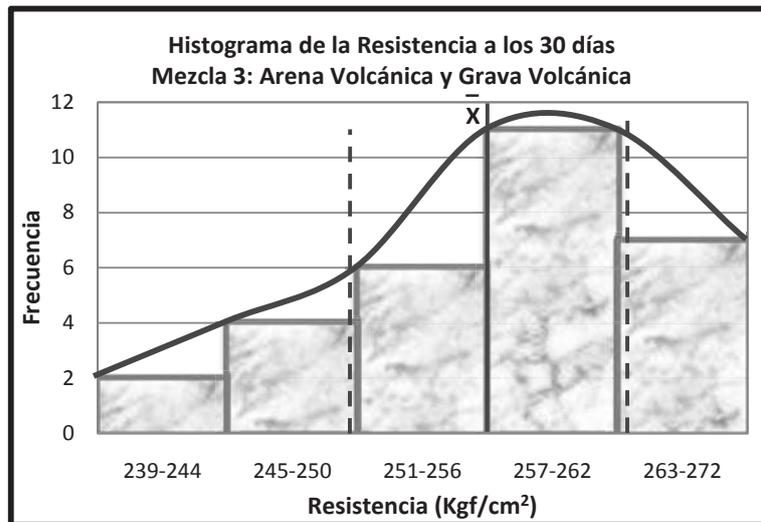
No	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (Kgf)	Resistencia (Kgf/cm ²)	% de Resistencia	Módulo de Elasticidad Estático (Kgf/cm ²)
1	10.03	79.06	19,531	247	99	237,315
2	10.04	79.12	20,703	261	104	243,948
3	10.02	78.80	20,217	256	102	241,600
4	10.06	79.49	20,364	256	102	241,600
5	10.02	78.91	20,969	265	106	245,810
6	10.01	78.70	20,263	257	103	242,071
7	10.05	79.38	20,826	262	105	244,415
8	10.02	78.80	20,250	256	102	241,600
9	10.02	78.91	19,560	247	99	237,315
10	10.02	78.91	18,903	239	96	233,440
11	10.04	79.22	20,500	258	103	242,542
12	10.03	79.06	20,024	253	101	240,180
13	10.02	78.91	21,485	272	109	249,036
14	10.03	79.01	19,316	244	98	235,870
15	10.06	79.49	20,468	257	103	242,071
16	10.02	78.80	19,690	249	100	238,274
17	10.05	79.38	20,529	258	103	242,542
18	10.04	79.12	20,969	265	106	245,810
19	10.01	78.64	19,865	252	101	239,705
20	10.05	79.33	20,525	258	103	242,542
21	10.04	79.17	20,648	260	104	243,480
22	10.05	79.33	19,501	245	98	236,352
23	10.02	78.91	20,955	265	106	245,810
24	10.04	79.17	20,610	260	104	243,480
25	10.04	79.17	20,452	258	103	242,542
26	10.02	78.80	20,960	265	106	245,810
27	10.02	78.91	20,878	264	106	245,346
28	10.01	78.64	19,909	253	101	240,180
29	10.04	79.12	20,536	259	104	243,012
30	10.02	78.85	20,953	265	106	245,810

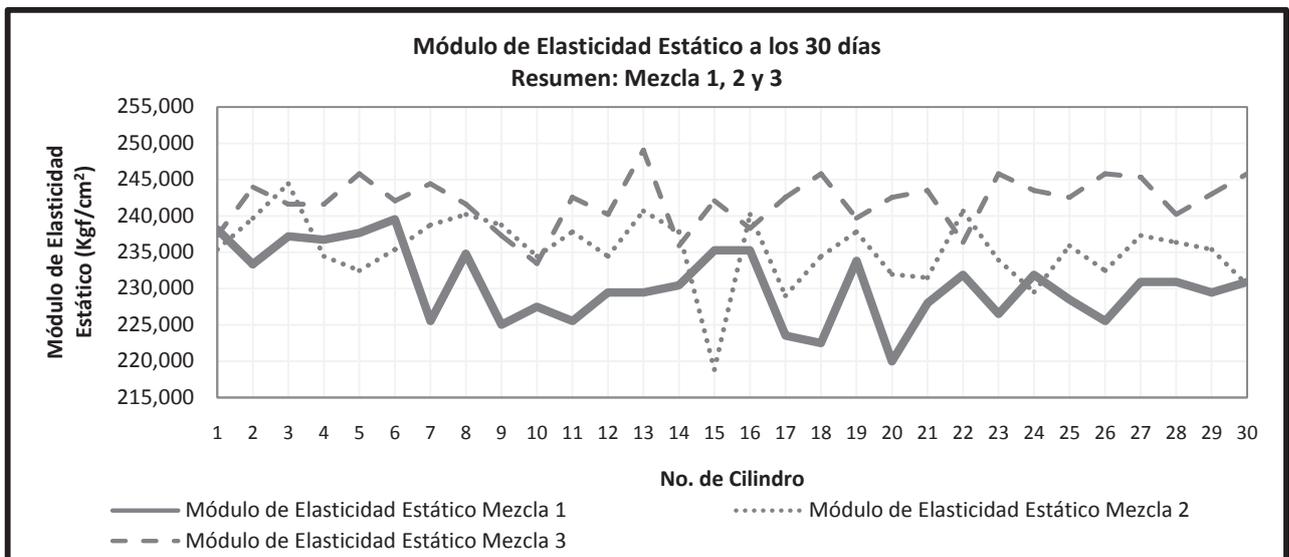
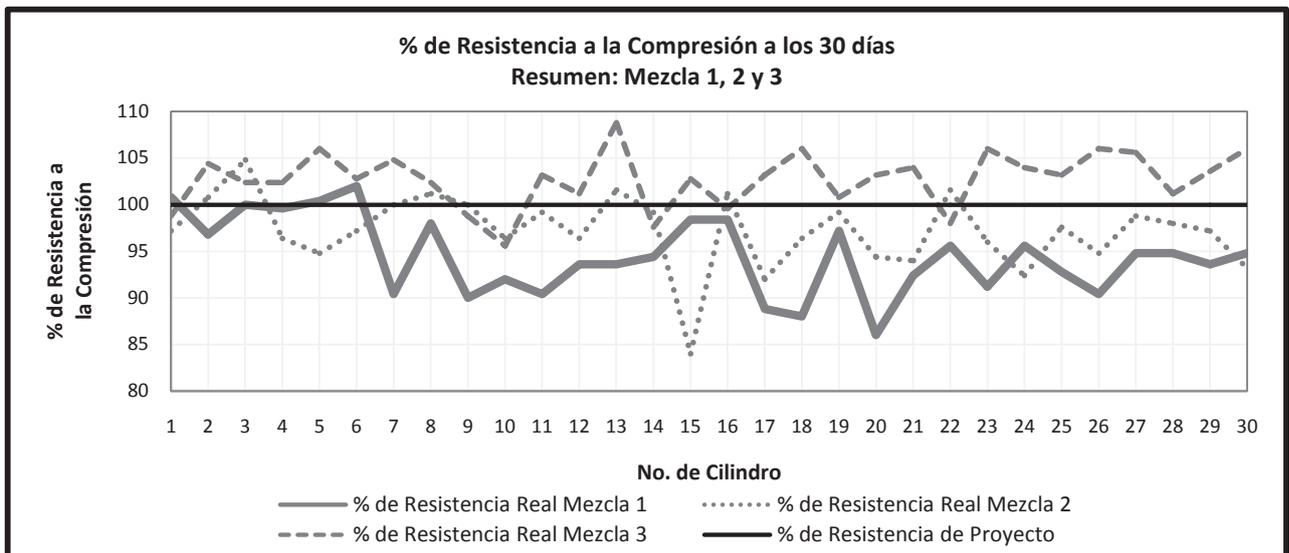
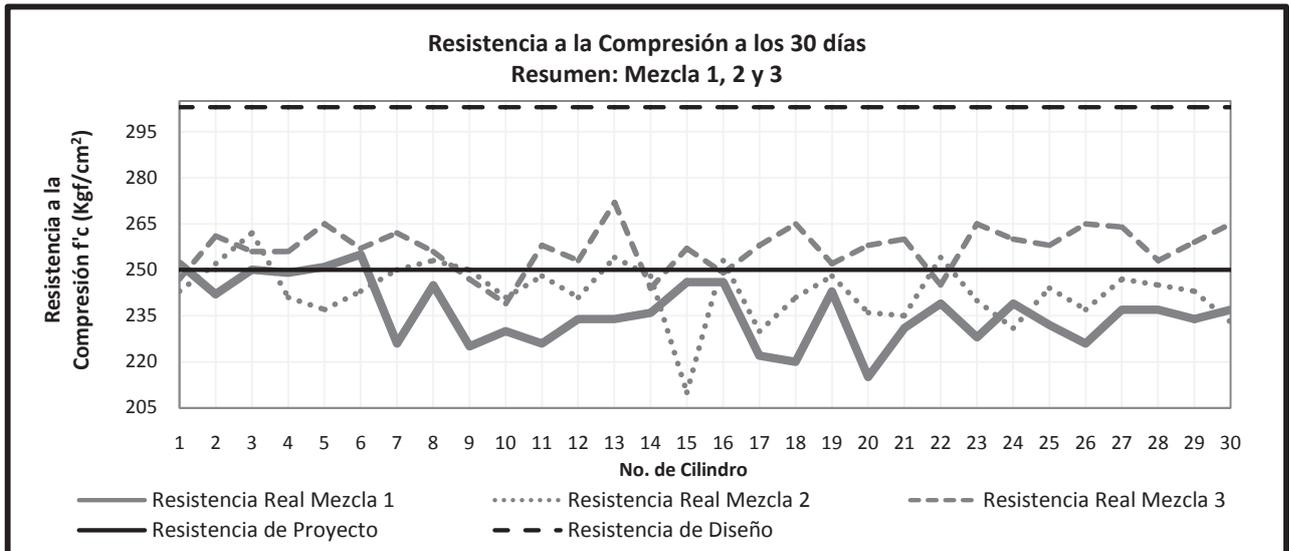




Análisis Estadístico Mezcla 3	
Muestra (n) =	30
Resistencia Media (X) =	257 Kgf/cm ²
Mediana =	258 Kgf/cm ²
Moda =	265 Kgf/cm ²
Desviación Estándar =	7 Kgf/cm ²
Varianza =	56
C.V. =	0.03
Rango =	33 Kgf/cm ²
Mínimo =	239 Kgf/cm ²
Máximo =	272 Kgf/cm ²

Intervalo de la Resistencia (Kgf/cm ²)	Frecuencia de Especímenes en el Intervalo
239-244	2
245-250	4
251-256	6
257-262	11
263-272	7
n =	30





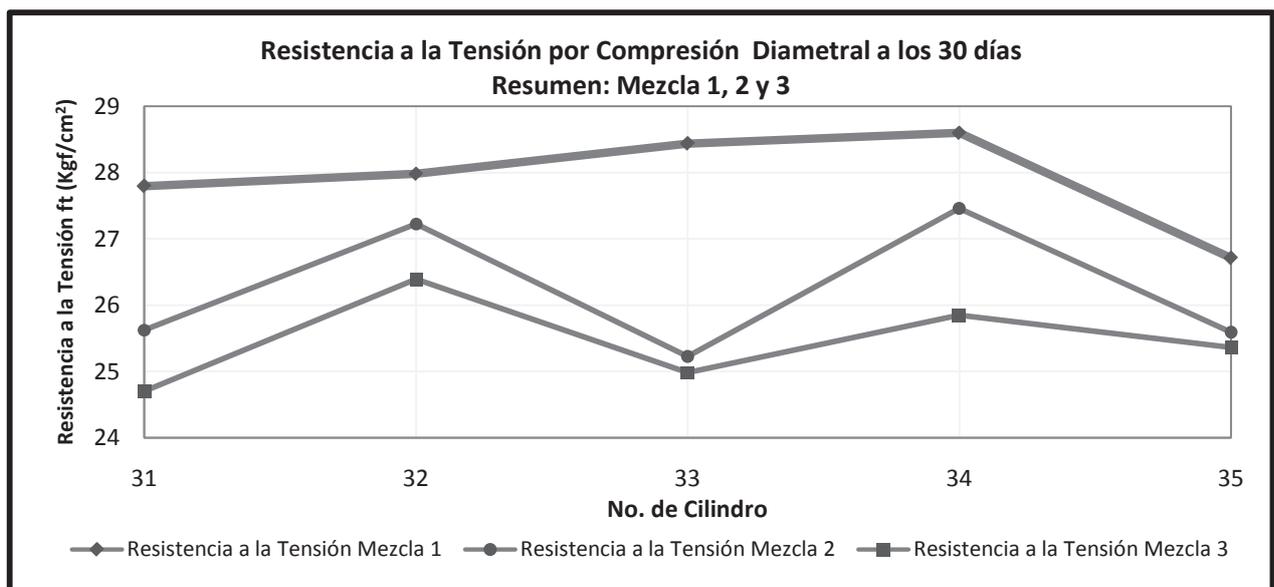


➤ Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto

Mezcla 1: Arena Volcánica y Grava Triturada; Edad de Prueba: 30 días					
NO	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Área (cm ²)	Carga (Kgf)	Resistencia a la Tensión (Kgf/cm ²)
31	10.10	20.13	80.12	8,875	28
32	10.08	20.15	79.75	8,925	28
33	10.07	20.00	79.70	9,000	28
34	10.09	20.08	79.96	9,100	29
35	10.05	20.15	79.38	8,500	27
PROMEDIO				8,880	28

Mezcla 2: Arena de Río y Grava de Río; Edad de Prueba: 30 días					
NO	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Área (cm ²)	Carga (Kgf)	Resistencia a la Tensión (Kgf/cm ²)
31	10.05	20.28	79.27	8,200	26
32	10.02	20.30	78.85	8,700	27
33	10.01	20.18	78.64	8,000	25
34	10.07	20.15	79.59	8,750	27
35	10.07	20.25	79.70	8,200	26
PROMEDIO				8,370	26

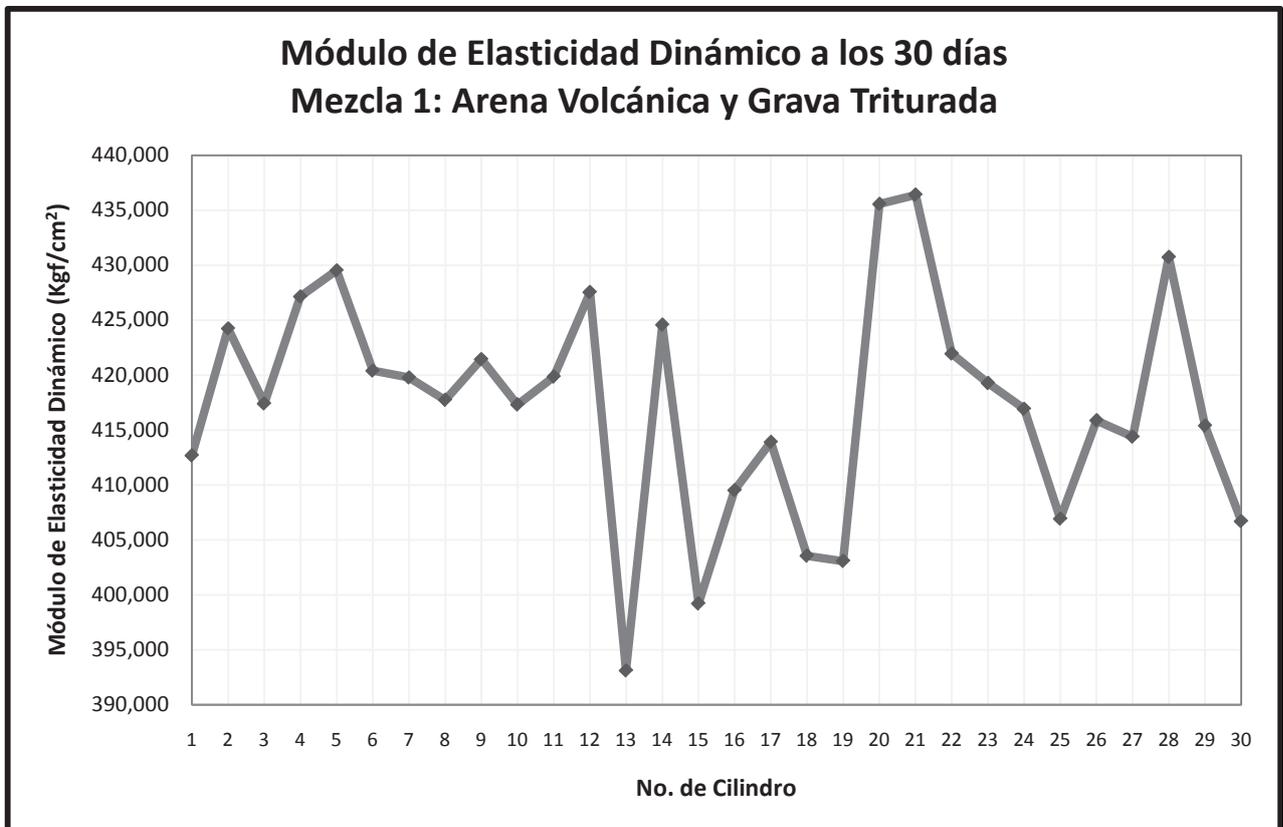
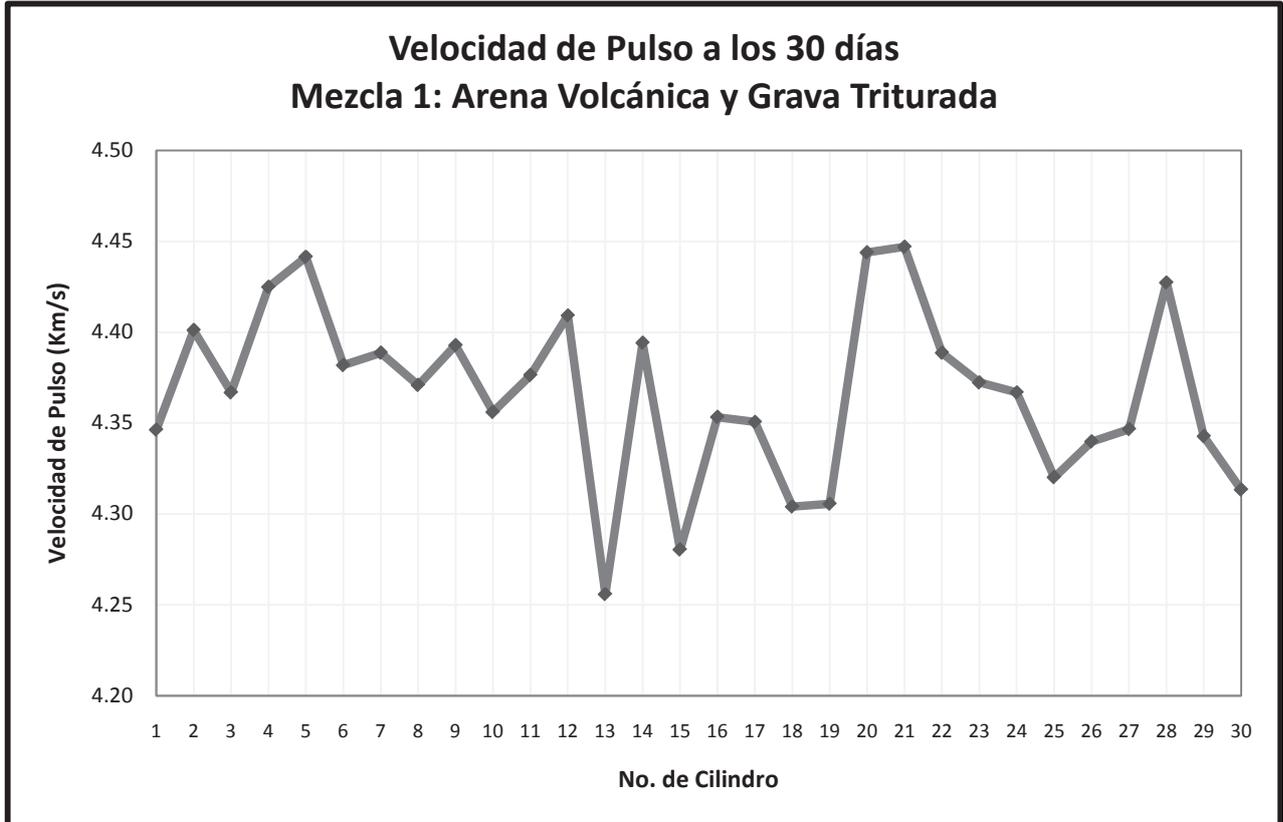
Mezcla 3: Arena Volcánica y Grava Volcánica; Edad de Prueba: 30 días					
NO	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Área (cm ²)	Carga (Kgf)	Resistencia a la Tensión (Kgf/cm ²)
31	10.01	20.08	78.75	7,800	25
32	10.01	20.00	78.70	8,300	26
33	10.03	20.08	78.96	7,900	25
34	10.02	20.03	78.91	8,150	26
35	10.04	20.00	79.17	8,000	25
PROMEDIO				8,030	25





➤ Velocidad de Pulso y Módulo de Elasticidad Dinámico

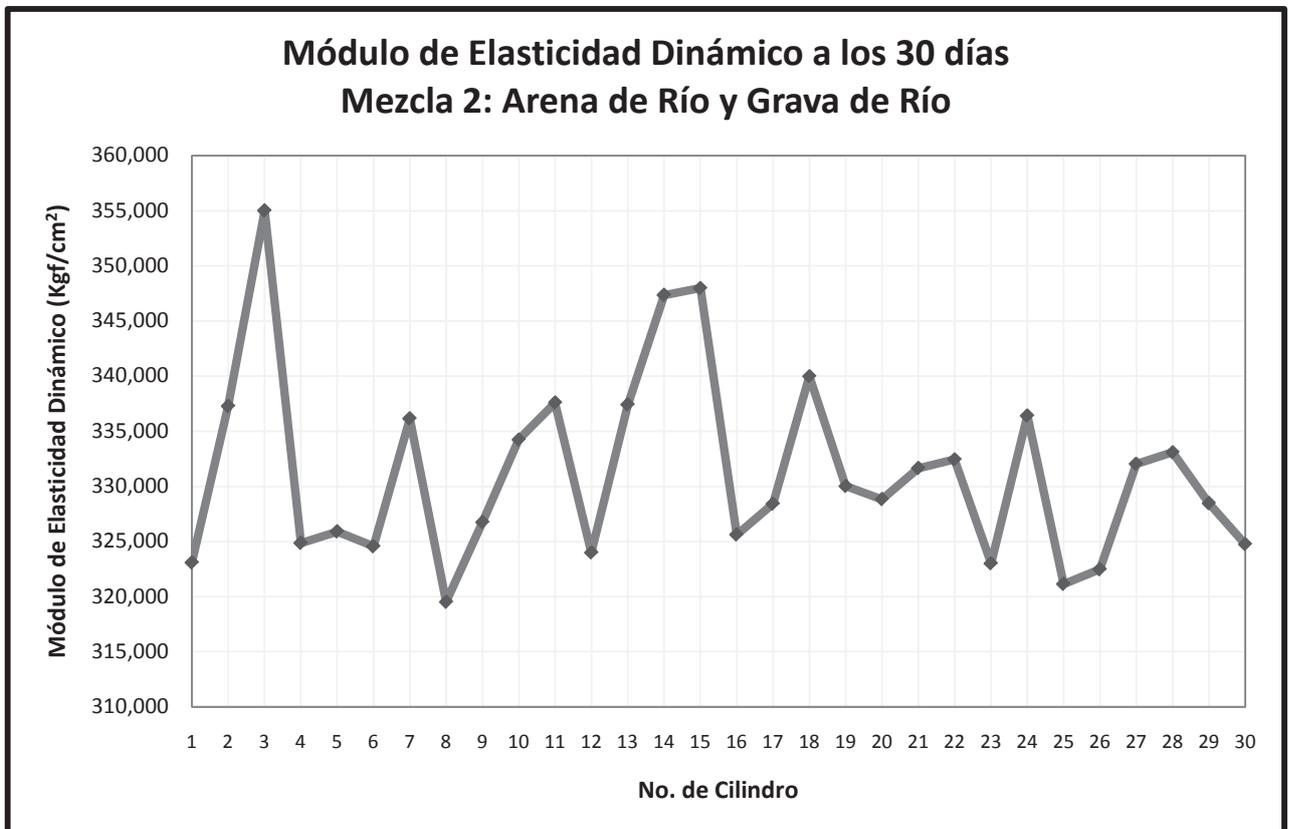
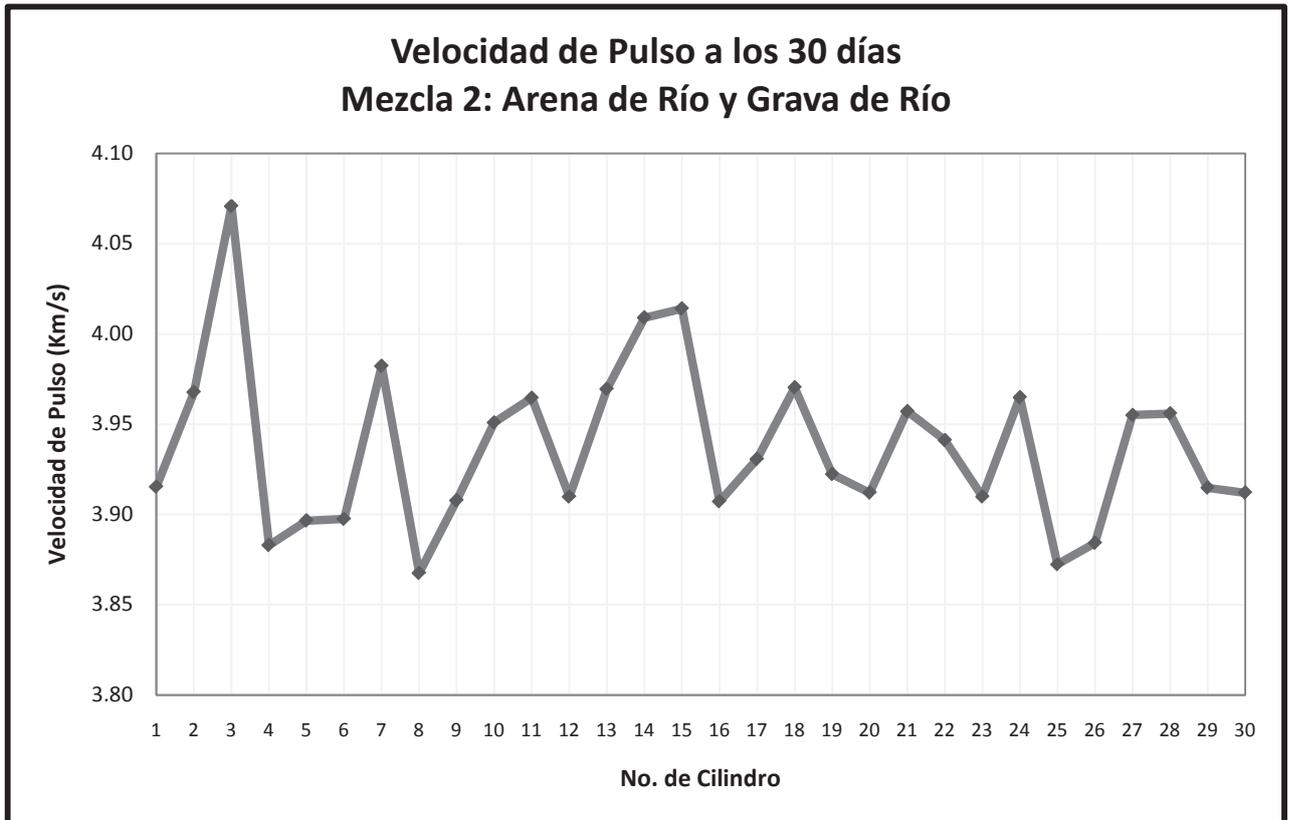
Mezcla 1: Arena Volcánica y Grava Triturada; Edad de Prueba: 30 días								
No	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Masa Saturada (gr)	Pulso (µs)	Densidad (Kg/m ³)	Velocidad (Km/s)	Valor de Poisson	Módulo de Elasticidad Dinámico (Kgf/cm ²)
1	10.02	19.95	3,562.00	45.90	2,262.75	4.35	0.15	412,672
2	10.03	20.03	3,592.01	45.50	2,268.74	4.40	0.15	424,243
3	10.02	20.00	3,575.77	45.80	2,267.33	4.37	0.15	417,399
4	10.02	20.00	3,561.68	45.20	2,259.90	4.42	0.15	427,149
5	10.05	20.08	3,589.48	45.20	2,255.50	4.44	0.15	429,521
6	10.04	20.03	3,595.58	45.70	2,267.98	4.38	0.15	420,397
7	10.04	20.10	3,592.58	45.80	2,257.63	4.39	0.15	419,780
8	10.06	19.98	3,595.93	45.70	2,264.85	4.37	0.15	417,722
9	10.02	20.08	3,581.26	45.70	2,262.32	4.39	0.15	421,446
10	10.01	20.13	3,610.25	46.20	2,278.00	4.36	0.15	417,301
11	10.05	20.00	3,604.91	45.70	2,270.67	4.38	0.15	419,846
12	10.03	20.15	3,629.08	45.70	2,277.93	4.41	0.15	427,530
13	10.08	19.88	3,563.29	46.70	2,248.12	4.26	0.15	393,105
14	10.04	20.13	3,629.00	45.80	2,277.69	4.39	0.15	424,563
15	10.04	20.08	3,589.38	46.90	2,256.93	4.28	0.15	399,201
16	10.08	20.03	3,574.67	46.00	2,238.41	4.35	0.15	409,522
17	10.08	20.10	3,635.50	46.20	2,265.01	4.35	0.15	413,891
18	10.07	20.10	3,612.22	46.70	2,256.47	4.30	0.15	403,548
19	10.03	20.15	3,585.74	46.80	2,252.23	4.31	0.15	403,068
20	10.02	20.18	3,632.25	45.40	2,284.68	4.44	0.15	435,561
21	10.02	20.10	3,623.16	45.20	2,285.95	4.45	0.15	436,405
22	10.05	20.10	3,618.37	45.80	2,269.32	4.39	0.15	421,953
23	10.03	20.20	3,625.76	46.20	2,271.73	4.37	0.15	419,259
24	10.03	20.18	3,610.04	46.20	2,264.68	4.37	0.15	416,925
25	10.04	20.18	3,607.32	46.70	2,258.47	4.32	0.15	406,926
26	10.02	20.05	3,618.45	46.20	2,287.15	4.34	0.15	415,860
27	10.02	20.13	3,607.67	46.30	2,271.83	4.35	0.15	414,376
28	10.06	20.10	3,634.23	45.40	2,276.24	4.43	0.15	430,732
29	10.04	20.15	3,637.20	46.40	2,281.51	4.34	0.15	415,380
30	10.04	20.10	3,605.62	46.60	2,264.32	4.31	0.15	406,693
31	10.10	20.13	3,632.52	46.20	2,252.89	4.36	0.15	412,701
32	10.08	20.15	3,657.52	45.70	2,276.08	4.41	0.15	427,183
33	10.07	20.00	3,596.93	45.00	2,256.66	4.44	0.15	430,337
34	10.09	20.08	3,646.45	46.70	2,271.66	4.30	0.15	405,254
35	10.05	20.15	3,656.63	45.70	2,286.10	4.41	0.15	429,063
PROMEDIO =						4.37		417,900
CALIDAD DEL CONCRETO =						Durable		-





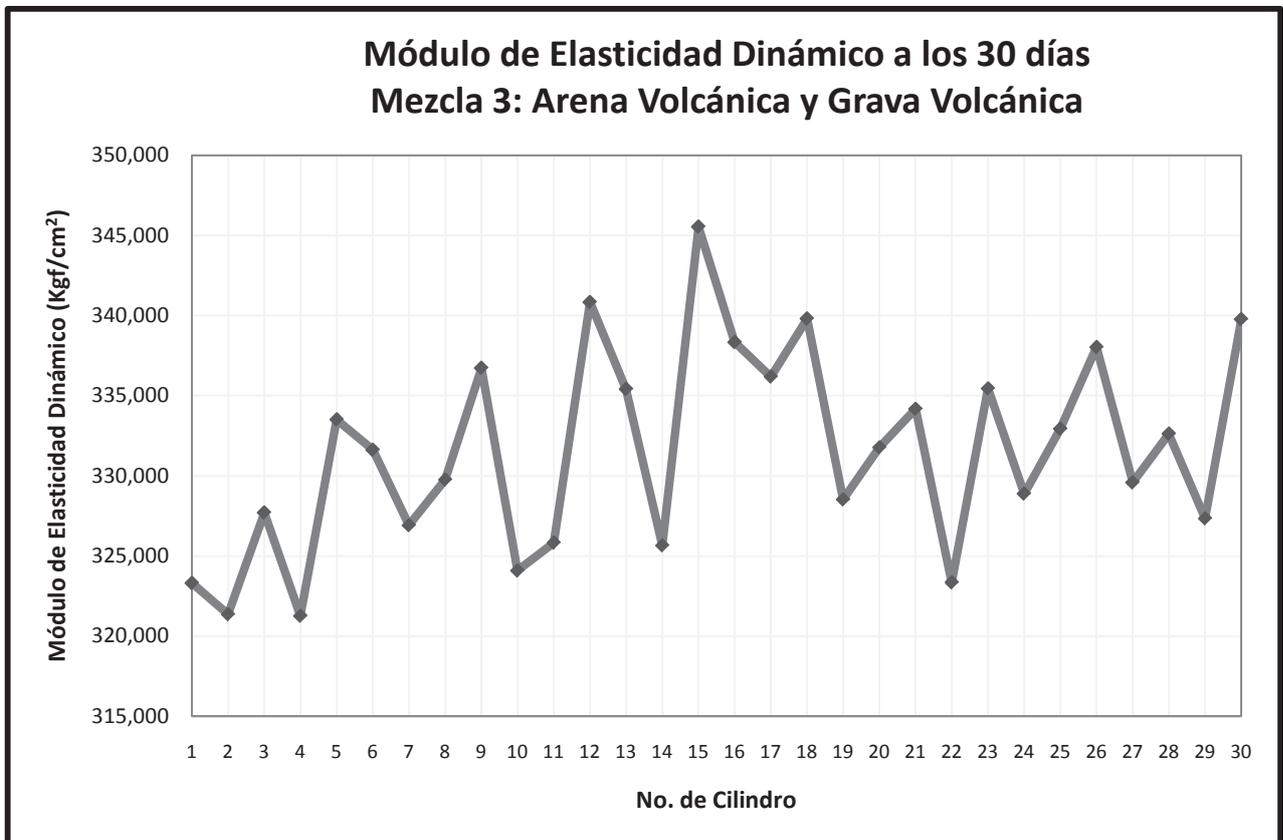
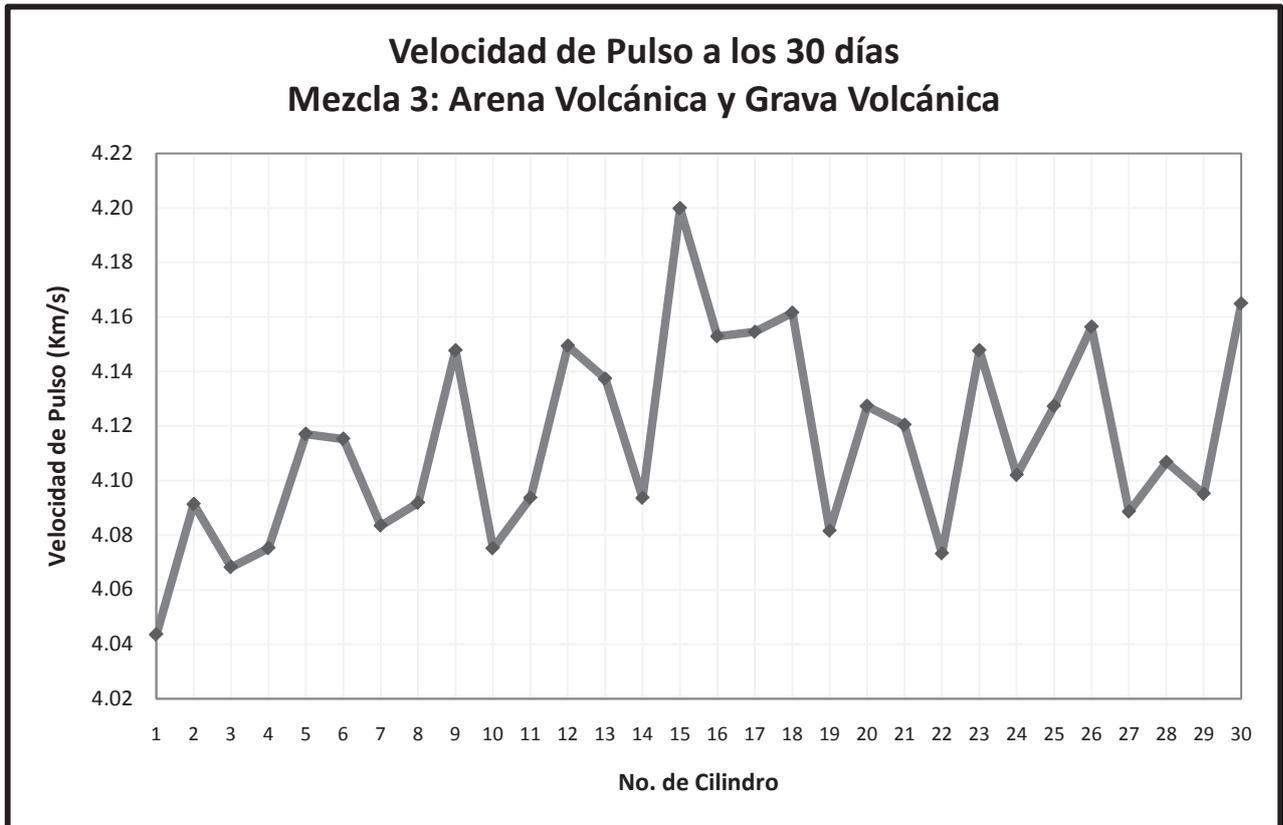
Mezcla 2: Arena de Río y Grava de Río; Edad de Prueba: 30 días

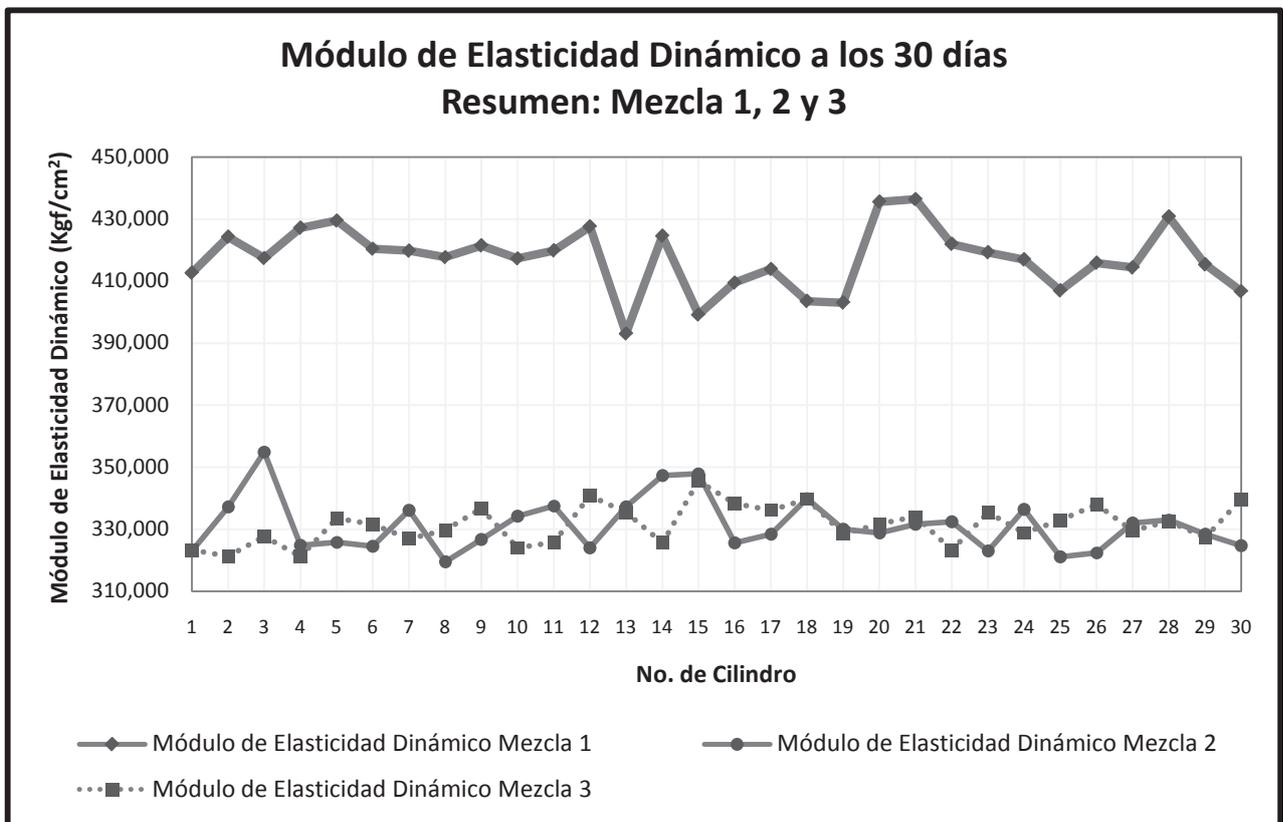
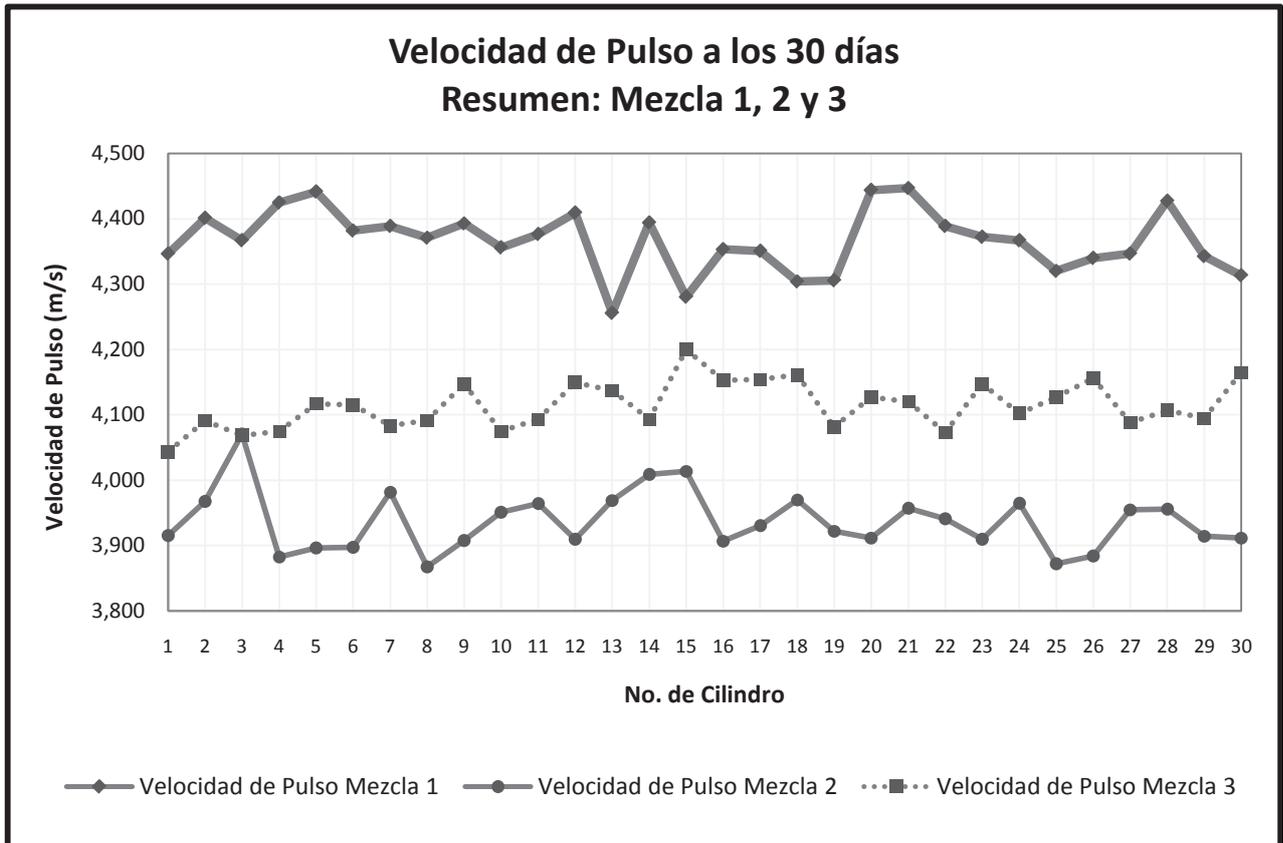
No	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Masa Saturada (gr)	Pulso (µs)	Densidad (Kg/m ³)	Velocidad (Km/s)	Valor de Poisson	Módulo de Elasticidad Dinámico (Kgf/cm ²)
1	10.09	20.13	3,510.57	51.40	2,183.01	3.92	0.15	323,080
2	10.03	20.28	3,552.58	51.10	2,219.12	3.97	0.15	337,262
3	10.01	20.15	3,518.94	49.50	2,219.11	4.07	0.15	354,998
4	10.04	20.08	3,544.63	51.70	2,231.75	3.88	0.15	324,851
5	10.06	19.95	3,528.07	51.20	2,223.42	3.90	0.15	325,893
6	10.02	20.15	3,516.49	51.70	2,213.14	3.90	0.15	324,553
7	10.09	20.15	3,537.67	50.60	2,195.69	3.98	0.15	336,145
8	10.05	20.15	3,534.39	52.10	2,212.61	3.87	0.15	319,513
9	10.02	20.13	3,517.25	51.50	2,216.37	3.91	0.15	326,744
10	10.00	20.15	3,510.02	51.00	2,217.91	3.95	0.15	334,243
11	10.01	20.10	3,519.18	50.70	2,224.78	3.96	0.15	337,576
12	10.04	20.18	3,504.24	51.60	2,195.39	3.91	0.15	324,002
13	10.01	20.13	3,515.35	50.70	2,218.12	3.97	0.15	337,403
14	10.02	20.13	3,550.24	50.20	2,238.65	4.01	0.15	347,342
15	9.96	20.15	3,512.31	50.20	2,237.22	4.01	0.15	347,984
16	10.03	20.20	3,526.24	51.70	2,209.37	3.91	0.15	325,610
17	10.05	20.40	3,565.56	51.90	2,201.85	3.93	0.15	328,414
18	9.99	20.05	3,511.13	50.50	2,234.15	3.97	0.15	339,990
19	10.00	20.20	3,525.25	51.50	2,222.02	3.92	0.15	330,024
20	10.02	20.23	3,549.48	51.70	2,225.62	3.91	0.15	328,817
21	10.06	20.30	3,539.81	51.30	2,193.81	3.96	0.15	331,637
22	9.98	20.10	3,485.84	51.00	2,216.97	3.94	0.15	332,445
23	10.07	20.18	3,514.40	51.60	2,188.65	3.91	0.15	323,007
24	10.00	20.30	3,536.55	51.20	2,216.69	3.96	0.15	336,407
25	10.04	20.18	3,545.67	52.10	2,218.40	3.87	0.15	321,143
26	9.98	20.28	3,511.68	52.20	2,214.13	3.88	0.15	322,472
27	10.04	20.25	3,524.81	51.20	2,198.64	3.96	0.15	332,026
28	10.04	20.18	3,519.23	51.00	2,204.78	3.96	0.15	333,089
29	10.01	20.20	3,526.93	51.60	2,220.12	3.91	0.15	328,464
30	10.03	20.23	3,512.65	51.70	2,198.14	3.91	0.15	324,757
31	10.05	20.28	3,520.42	51.40	2,190.28	3.94	0.15	329,006
32	10.02	20.30	3,506.08	51.50	2,190.28	3.94	0.15	328,538
33	10.01	20.18	3,518.58	50.60	2,217.61	3.99	0.15	340,345
34	10.07	20.15	3,531.28	52.20	2,201.89	3.86	0.15	316,747
35	10.07	20.25	3,556.81	51.70	2,203.94	3.92	0.15	326,420
PROMEDIO =						3.94		330,884
CALIDAD DEL CONCRETO =						Alta		-





Mezcla 3: Arena Volcánica y Grava Volcánica; Edad de Prueba: 30 días								
No	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Masa Saturada (gr)	Pulso (µs)	Densidad (Kg/m ³)	Velocidad (Km/s)	Valor de Poisson	Módulo de Elasticidad Dinámico (Kgf/cm ²)
1	10.03	19.98	3,234.90	49.40	2,048.30	4.04	0.15	323,312
2	10.04	19.93	3,134.81	48.70	1,988.58	4.09	0.15	321,359
3	10.02	19.98	3,228.37	49.10	2,050.97	4.07	0.15	327,702
4	10.06	20.05	3,193.41	49.20	2,003.80	4.08	0.15	321,263
5	10.02	20.05	3,224.46	48.70	2,038.11	4.12	0.15	333,509
6	10.01	20.00	3,192.52	48.60	2,028.36	4.12	0.15	331,620
7	10.05	20.05	3,232.13	49.10	2,030.79	4.08	0.15	326,917
8	10.02	20.05	3,223.39	49.00	2,040.15	4.09	0.15	329,767
9	10.02	20.08	3,211.58	48.40	2,027.44	4.15	0.15	336,726
10	10.02	20.05	3,198.03	49.20	2,021.41	4.08	0.15	324,086
11	10.04	20.10	3,206.88	49.10	2,013.91	4.09	0.15	325,820
12	10.03	20.00	3,242.53	48.20	2,050.57	4.15	0.15	340,838
13	10.02	20.03	3,207.03	48.40	2,029.63	4.14	0.15	335,412
14	10.03	20.10	3,196.81	49.10	2,012.93	4.09	0.15	325,661
15	10.06	20.08	3,238.00	47.80	2,029.25	4.20	0.15	345,540
16	10.02	20.10	3,218.67	48.40	2,032.10	4.15	0.15	338,340
17	10.05	20.03	3,207.00	48.20	2,017.51	4.15	0.15	336,183
18	10.04	20.10	3,232.11	48.30	2,032.46	4.16	0.15	339,803
19	10.01	20.00	3,212.87	49.00	2,042.65	4.08	0.15	328,526
20	10.05	20.10	3,216.82	48.70	2,017.48	4.13	0.15	331,780
21	10.04	20.03	3,232.47	48.60	2,038.94	4.12	0.15	334,184
22	10.05	20.00	3,202.63	49.10	2,018.62	4.07	0.15	323,340
23	10.02	20.08	3,199.50	48.40	2,019.82	4.15	0.15	335,460
24	10.04	20.10	3,221.69	49.00	2,024.56	4.10	0.15	328,881
25	10.04	20.10	3,221.51	48.70	2,024.45	4.13	0.15	332,926
26	10.02	20.08	3,206.44	48.30	2,026.89	4.16	0.15	338,031
27	10.02	20.08	3,235.05	49.10	2,042.26	4.09	0.15	329,585
28	10.01	20.00	3,213.21	48.70	2,042.87	4.11	0.15	332,622
29	10.04	20.03	3,203.41	48.90	2,021.95	4.10	0.15	327,346
30	10.02	19.95	3,191.70	47.90	2,028.87	4.16	0.15	339,763
31	10.01	20.08	3,209.37	48.70	2,030.10	4.12	0.15	333,026
32	10.01	20.00	3,182.24	48.20	2,021.83	4.15	0.15	336,061
33	10.03	20.08	3,158.37	49.20	1,992.53	4.08	0.15	320,253
34	10.02	20.03	3,211.00	48.70	2,032.14	4.11	0.15	331,702
35	10.04	20.00	3,228.37	49.00	2,038.90	4.08	0.15	327,923
PROMEDIO =						4.11		331,293
CALIDAD DEL CONCRETO =						Durable		-

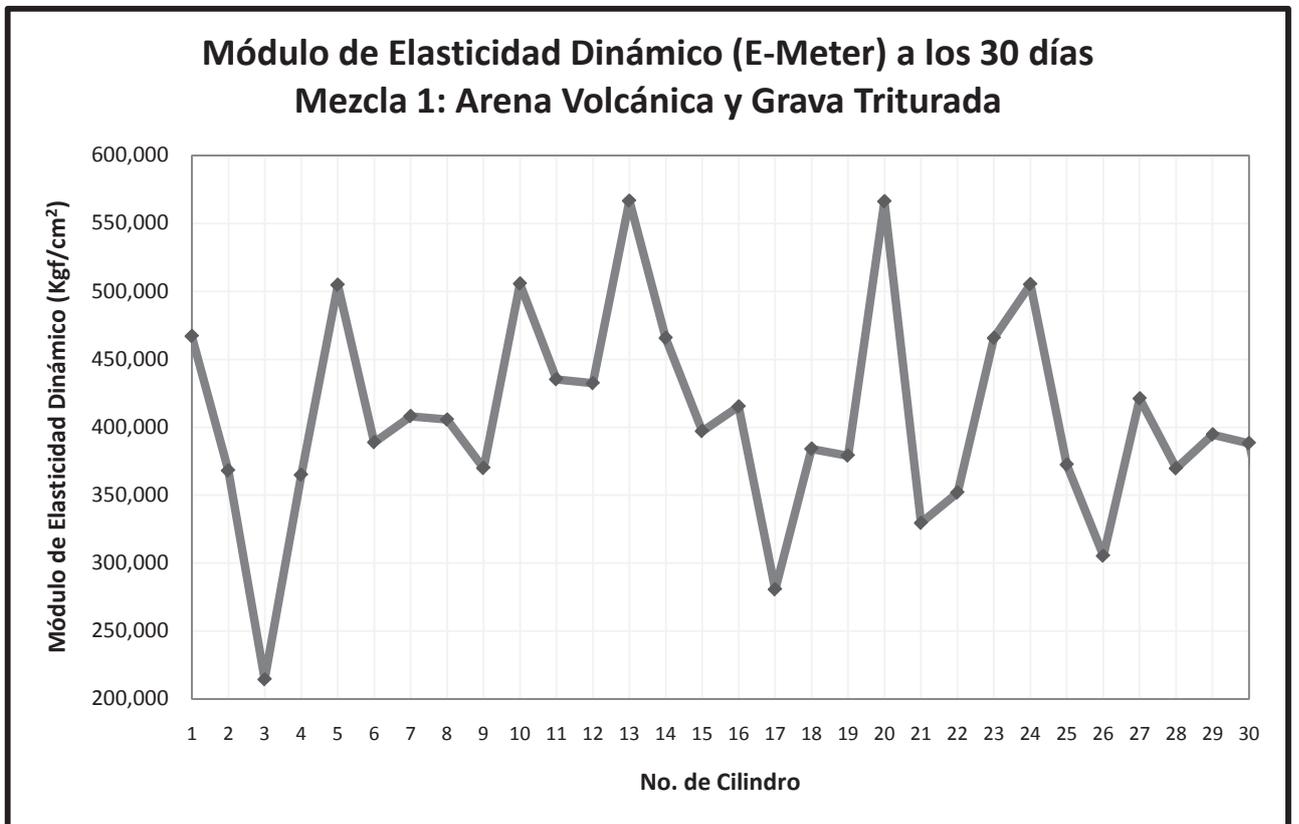
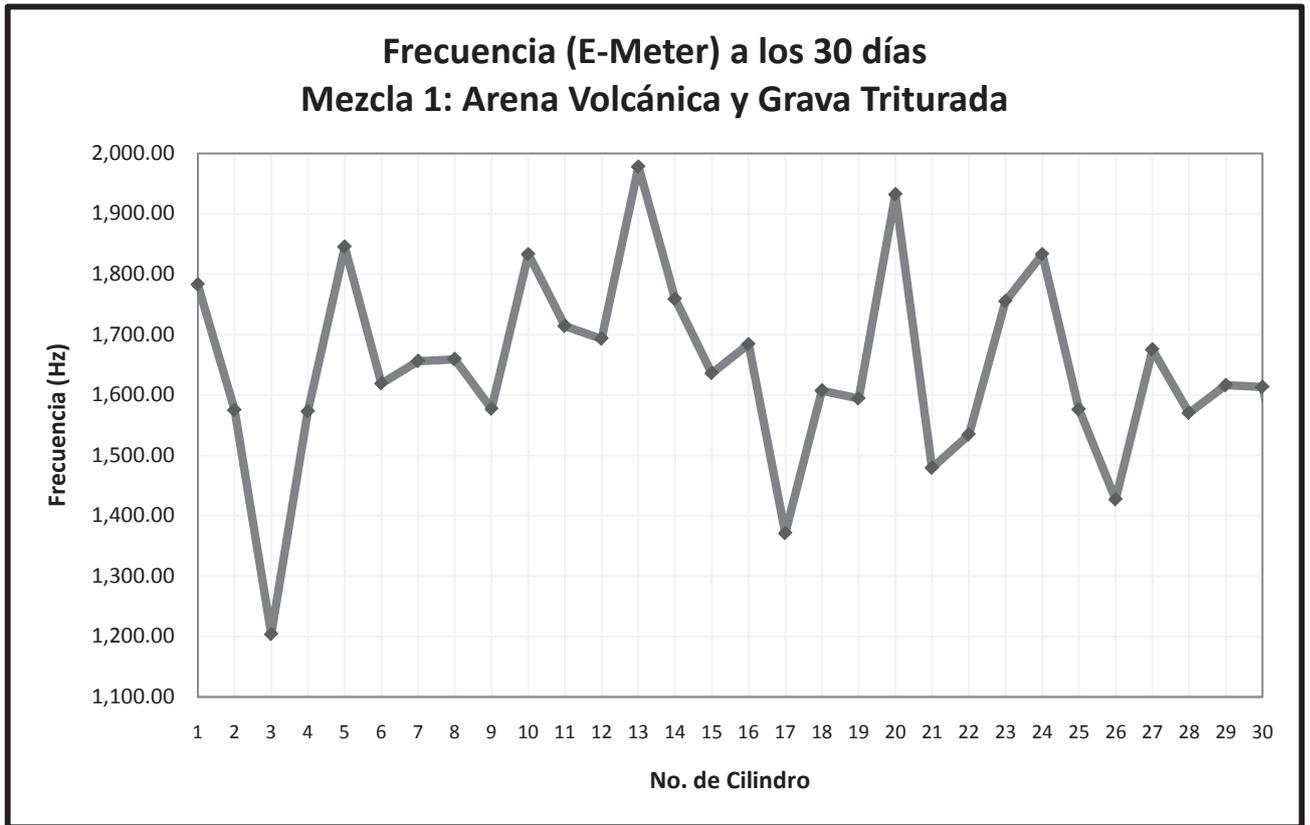






➤ Frecuencias de Resonancia Fundamentales Longitudinales de especímenes de Concreto

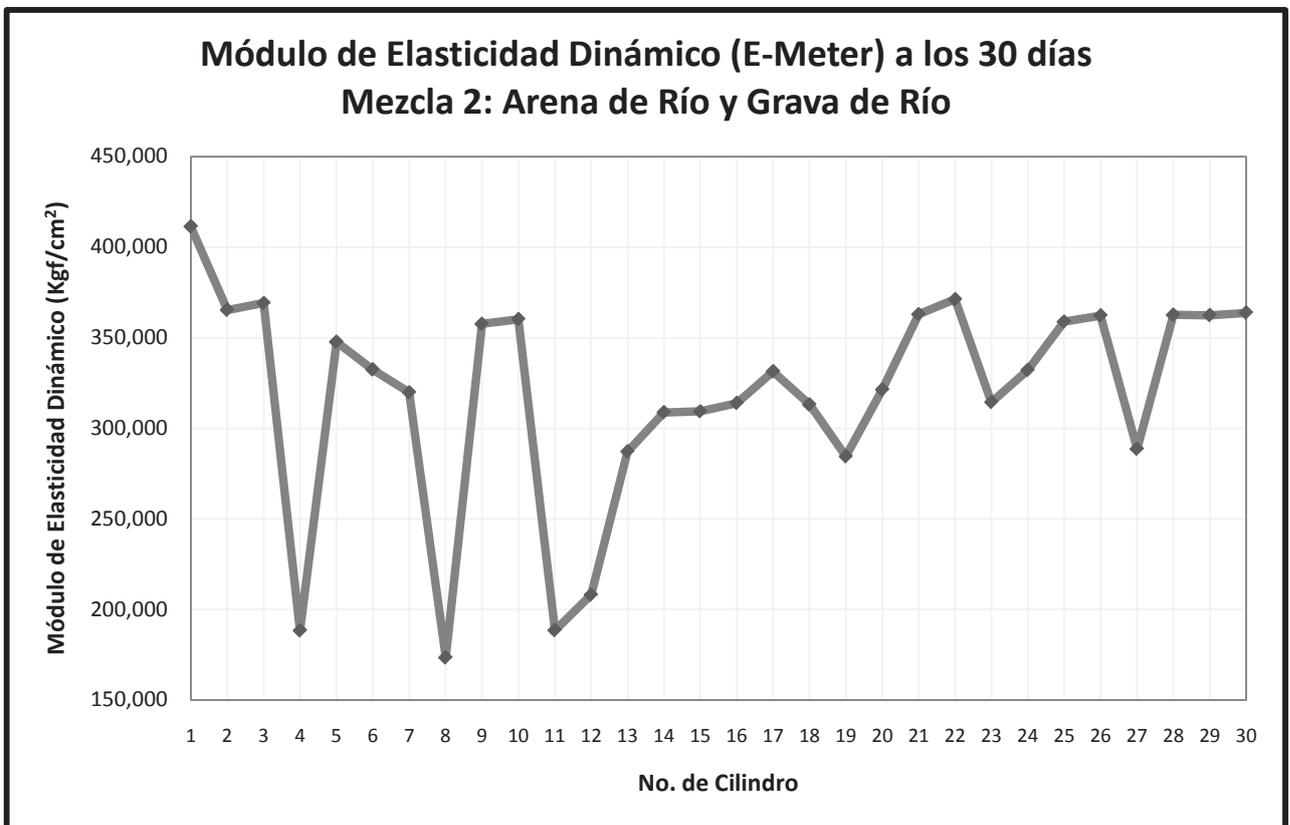
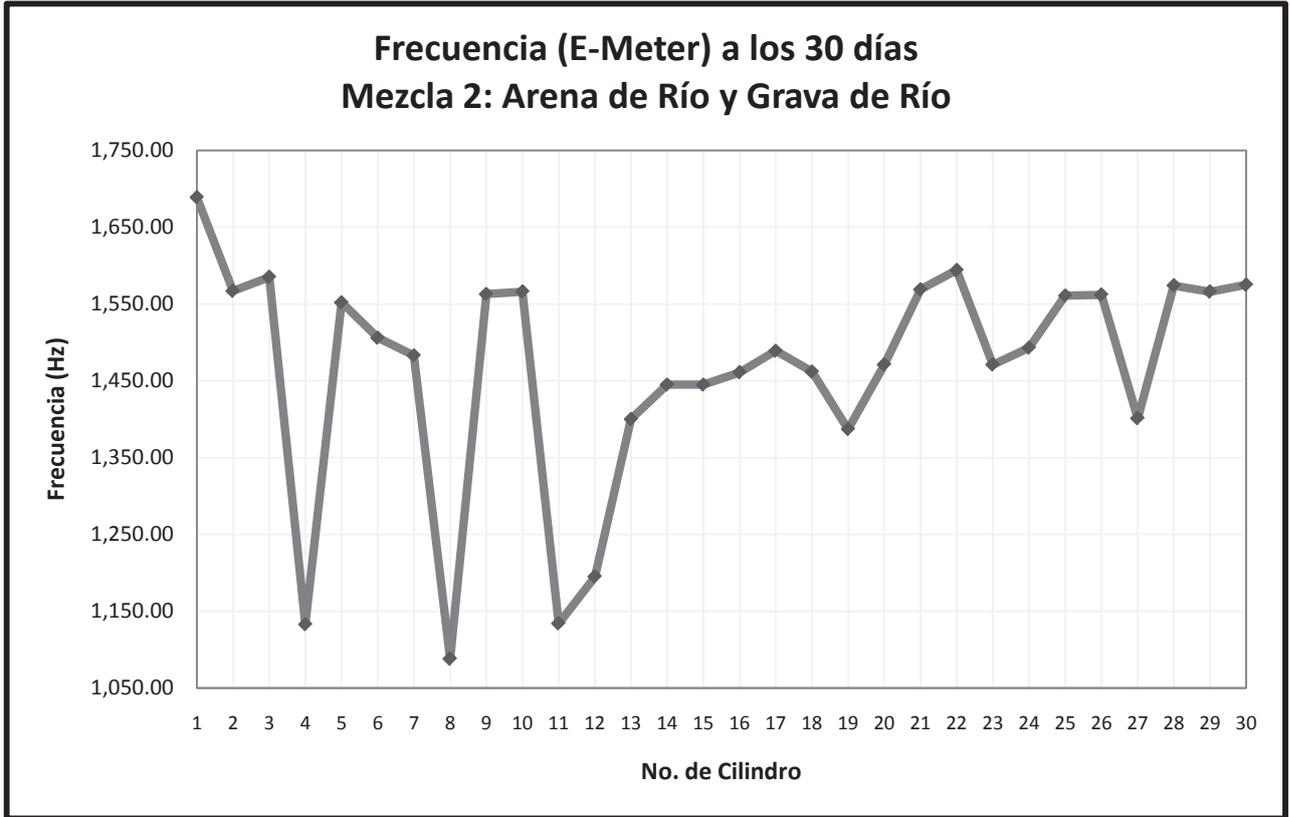
Mezcla 1: Arena Volcánica y Grava Triturada; Edad de Prueba: 30 días						
No	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Masa Saturada (gr)	Densidad (Kg/m ³)	Frecuencia (Hz)	Módulo de Elasticidad Dinámico (Kgf/cm ²)
1	10.02	19.95	3,562.00	2,262.75	1,783.00	466,956
2	10.03	20.03	3,592.01	2,268.74	1,575.00	368,080
3	10.02	20.00	3,575.77	2,267.33	1,204.00	214,426
4	10.02	20.00	3,561.68	2,259.90	1,573.00	364,802
5	10.05	20.08	3,589.48	2,255.50	1,845.00	504,658
6	10.04	20.03	3,595.58	2,267.98	1,619.00	388,802
7	10.04	20.10	3,592.58	2,257.63	1,656.00	407,959
8	10.06	19.98	3,595.93	2,264.85	1,659.00	405,654
9	10.02	20.08	3,581.26	2,262.32	1,577.00	369,812
10	10.01	20.13	3,610.25	2,278.00	1,833.00	505,594
11	10.05	20.00	3,604.91	2,270.67	1,714.00	435,198
12	10.03	20.15	3,629.08	2,277.93	1,693.00	432,371
13	10.08	19.88	3,563.29	2,248.12	1,978.00	566,680
14	10.04	20.13	3,629.00	2,277.69	1,759.00	465,531
15	10.04	20.08	3,589.38	2,256.93	1,636.00	397,052
16	10.08	20.03	3,574.67	2,238.41	1,684.00	415,164
17	10.08	20.10	3,635.50	2,265.01	1,371.00	280,536
18	10.07	20.10	3,612.22	2,256.47	1,607.00	383,976
19	10.03	20.15	3,585.74	2,252.23	1,594.00	378,957
20	10.02	20.18	3,632.25	2,284.68	1,932.00	566,133
21	10.02	20.10	3,623.16	2,285.95	1,479.00	329,493
22	10.05	20.10	3,618.37	2,269.32	1,534.00	351,875
23	10.03	20.20	3,625.76	2,271.73	1,755.00	465,655
24	10.03	20.18	3,610.04	2,264.68	1,833.00	505,138
25	10.04	20.18	3,607.32	2,258.47	1,576.00	372,395
26	10.02	20.05	3,618.45	2,287.15	1,427.00	305,367
27	10.02	20.13	3,607.67	2,271.83	1,675.00	421,046
28	10.06	20.10	3,634.23	2,276.24	1,570.00	369,710
29	10.04	20.15	3,637.20	2,281.51	1,616.00	394,555
30	10.04	20.10	3,605.62	2,264.32	1,613.00	388,195
31	10.10	20.13	3,632.52	2,252.89	1,344.00	268,820
32	10.08	20.15	3,657.52	2,276.08	1,620.00	395,566
33	10.07	20.00	3,596.93	2,256.66	1,140.00	191,331
34	10.09	20.08	3,646.45	2,271.66	1,342.00	268,912
35	10.05	20.15	3,656.63	2,286.10	1,468.00	326,249





Mezcla 2: Arena de Río y Grava de Río; Edad de Prueba: 30 días

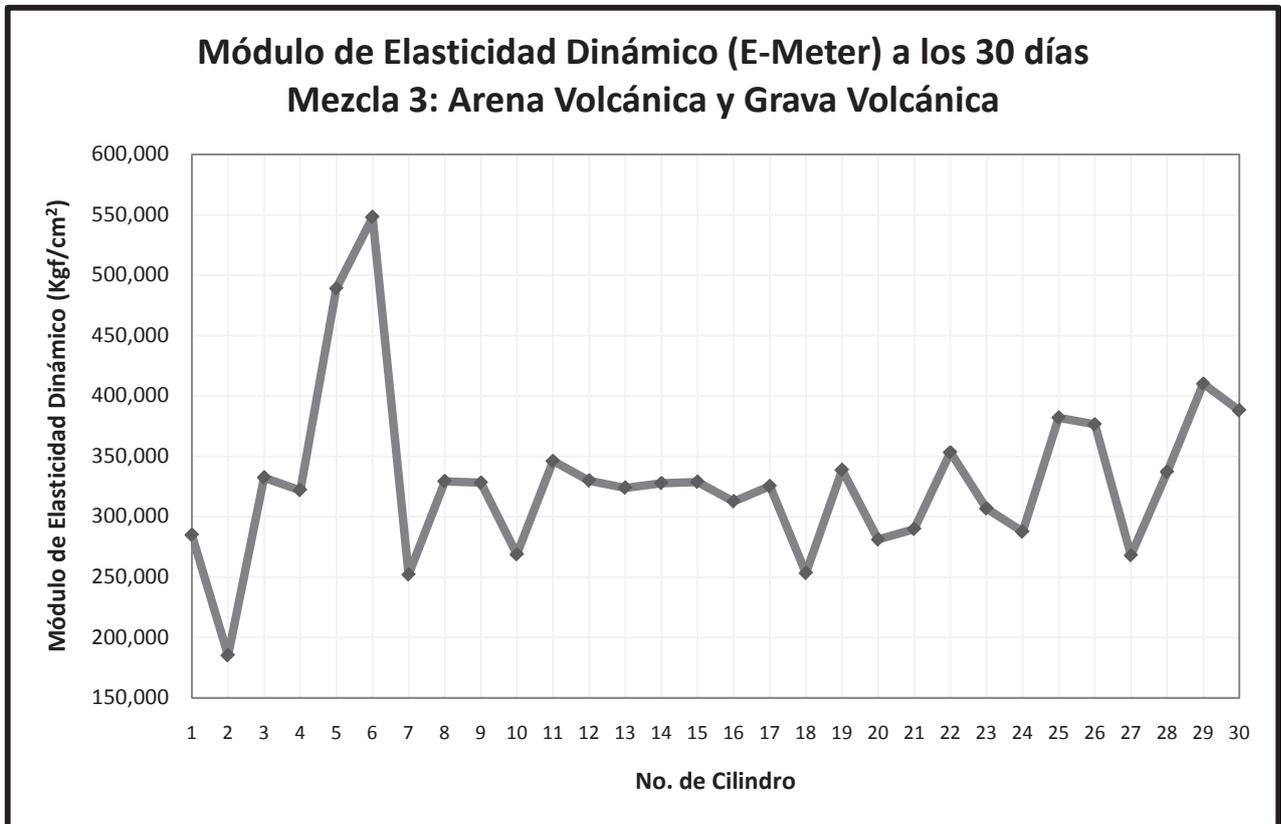
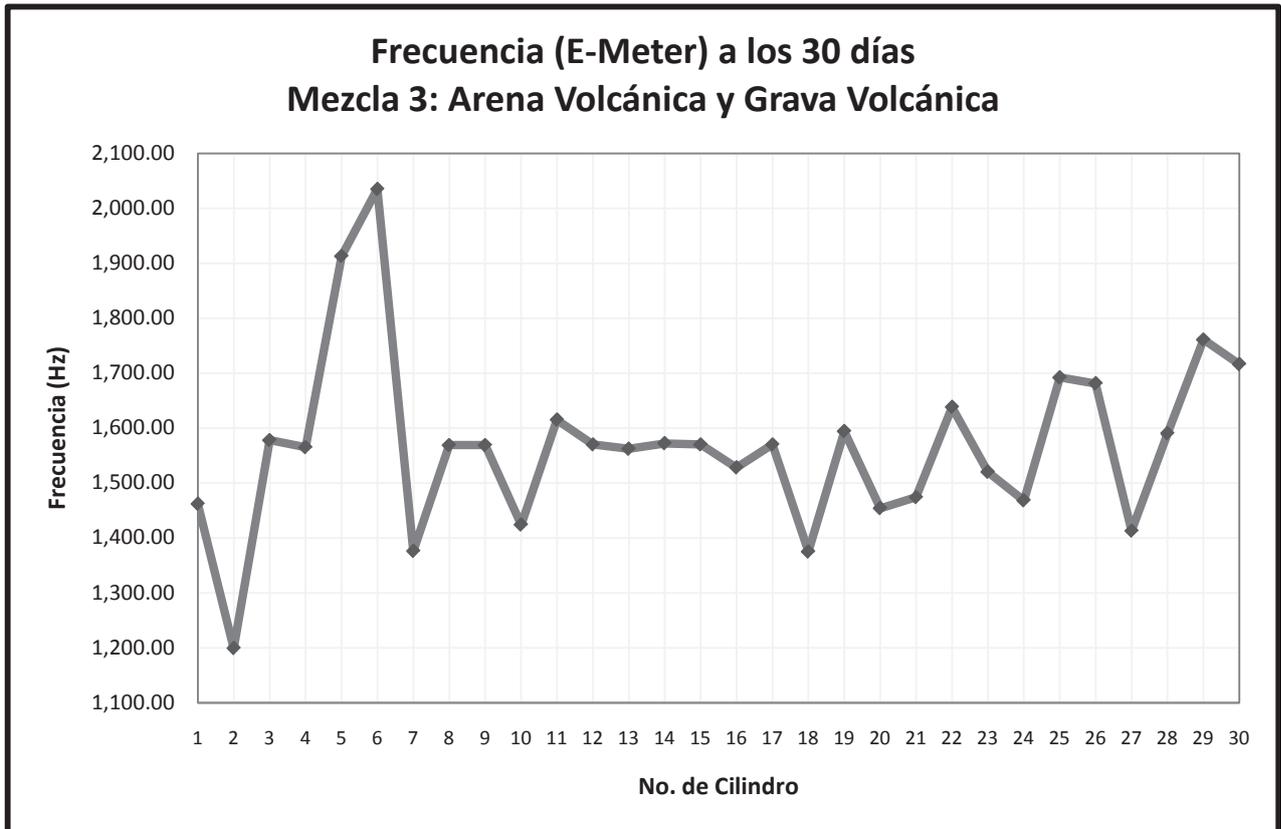
No	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Masa Saturada (gr)	Densidad (Kg/m ³)	Frecuencia (Hz)	Módulo de Elasticidad Dinámico (Kgf/cm ²)
1	10.09	20.13	3,510.57	2,183.01	1,689.00	411,376
2	10.03	20.28	3,552.58	2,219.12	1,567.00	365,334
3	10.01	20.15	3,518.94	2,219.11	1,585.00	369,180
4	10.04	20.08	3,544.63	2,231.75	1,133.00	188,308
5	10.06	19.95	3,528.07	2,223.42	1,552.00	347,649
6	10.02	20.15	3,516.49	2,213.14	1,506.00	332,399
7	10.09	20.15	3,537.67	2,195.69	1,483.00	319,782
8	10.05	20.15	3,534.39	2,212.61	1,088.00	173,446
9	10.02	20.13	3,517.25	2,216.37	1,563.00	357,670
10	10.00	20.15	3,510.02	2,217.91	1,566.00	360,188
11	10.01	20.10	3,519.18	2,224.78	1,134.00	188,520
12	10.04	20.18	3,504.24	2,195.39	1,195.00	208,125
13	10.01	20.13	3,515.35	2,218.12	1,400.00	287,187
14	10.02	20.13	3,550.24	2,238.65	1,445.00	308,776
15	9.96	20.15	3,512.31	2,237.22	1,445.00	309,347
16	10.03	20.20	3,526.24	2,209.37	1,461.00	313,851
17	10.05	20.40	3,565.56	2,201.85	1,489.00	331,351
18	9.99	20.05	3,511.13	2,234.15	1,462.00	313,102
19	10.00	20.20	3,525.25	2,222.02	1,387.00	284,482
20	10.02	20.23	3,549.48	2,225.62	1,471.00	321,295
21	10.06	20.30	3,539.81	2,193.81	1,569.00	362,984
22	9.98	20.10	3,485.84	2,216.97	1,594.00	371,176
23	10.07	20.18	3,514.40	2,188.65	1,471.00	314,398
24	10.00	20.30	3,536.55	2,216.69	1,493.00	332,099
25	10.04	20.18	3,545.67	2,218.40	1,561.00	358,858
26	9.98	20.28	3,511.68	2,214.13	1,562.00	362,191
27	10.04	20.25	3,524.81	2,198.64	1,401.00	288,623
28	10.04	20.18	3,519.23	2,204.78	1,574.00	362,621
29	10.01	20.20	3,526.93	2,220.12	1,566.00	362,338
30	10.03	20.23	3,512.65	2,198.14	1,575.00	363,784
31	10.05	20.28	3,520.42	2,190.28	1,568.00	361,048
32	10.02	20.30	3,506.08	2,190.28	1,695.00	422,944
33	10.01	20.18	3,518.58	2,217.61	1,866.00	512,609
34	10.07	20.15	3,531.28	2,201.89	1,563.00	356,217
35	10.07	20.25	3,556.81	2,203.94	1,287.00	244,150

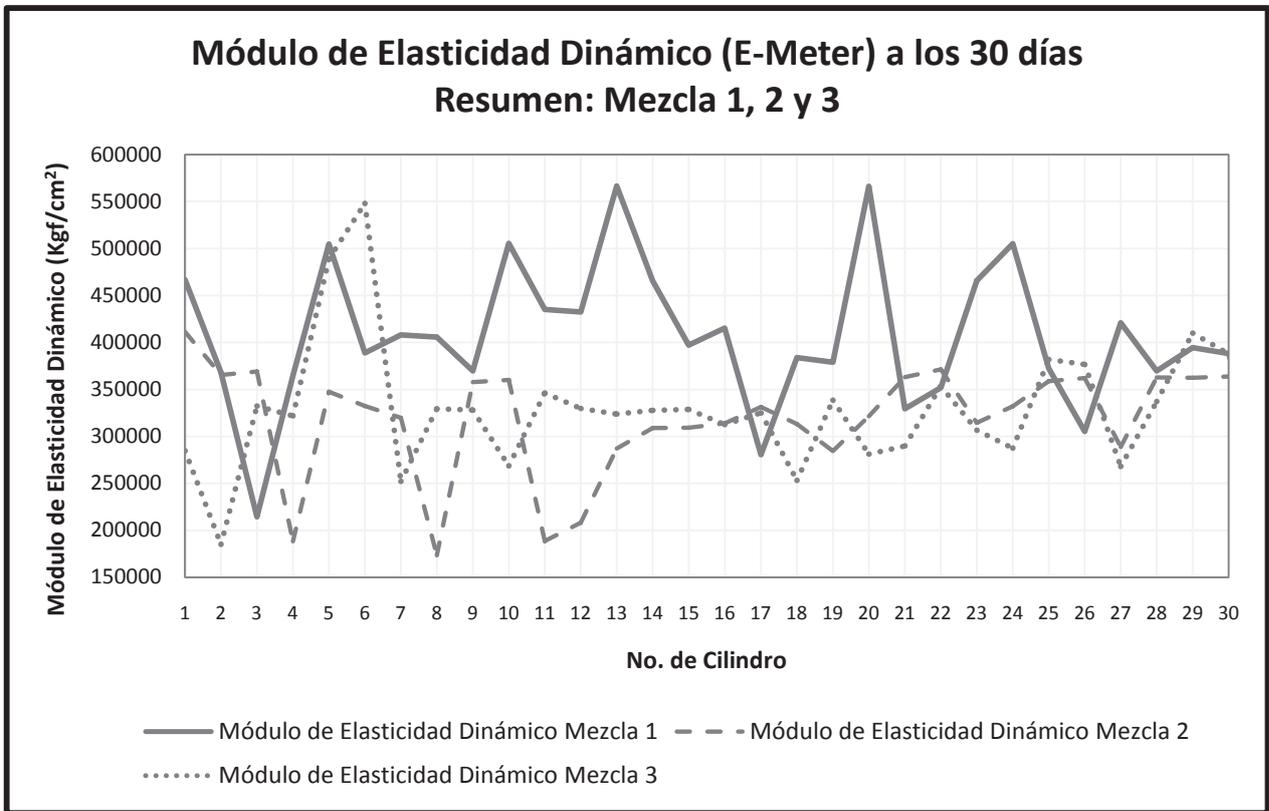
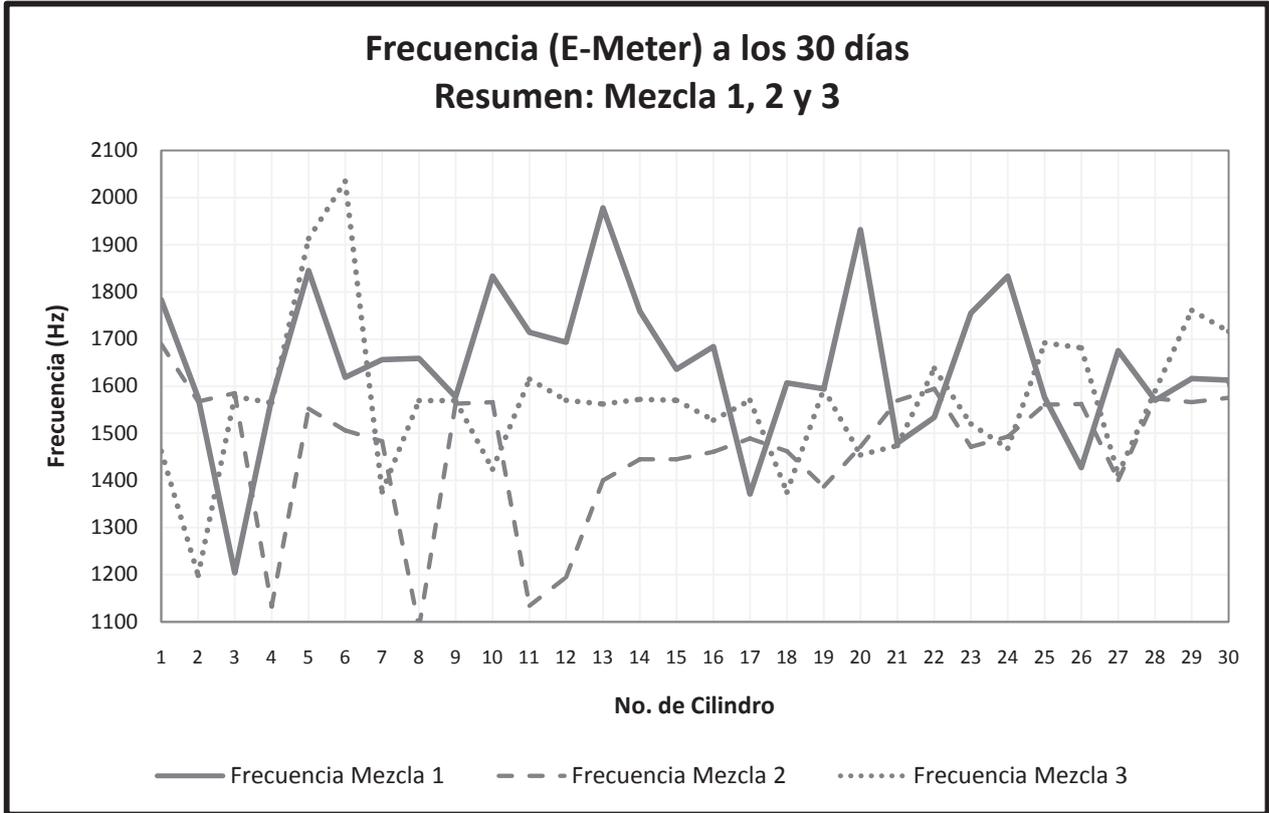




Mezcla 3: Arena Volcánica y Grava Volcánica; Edad de Prueba: 30 días

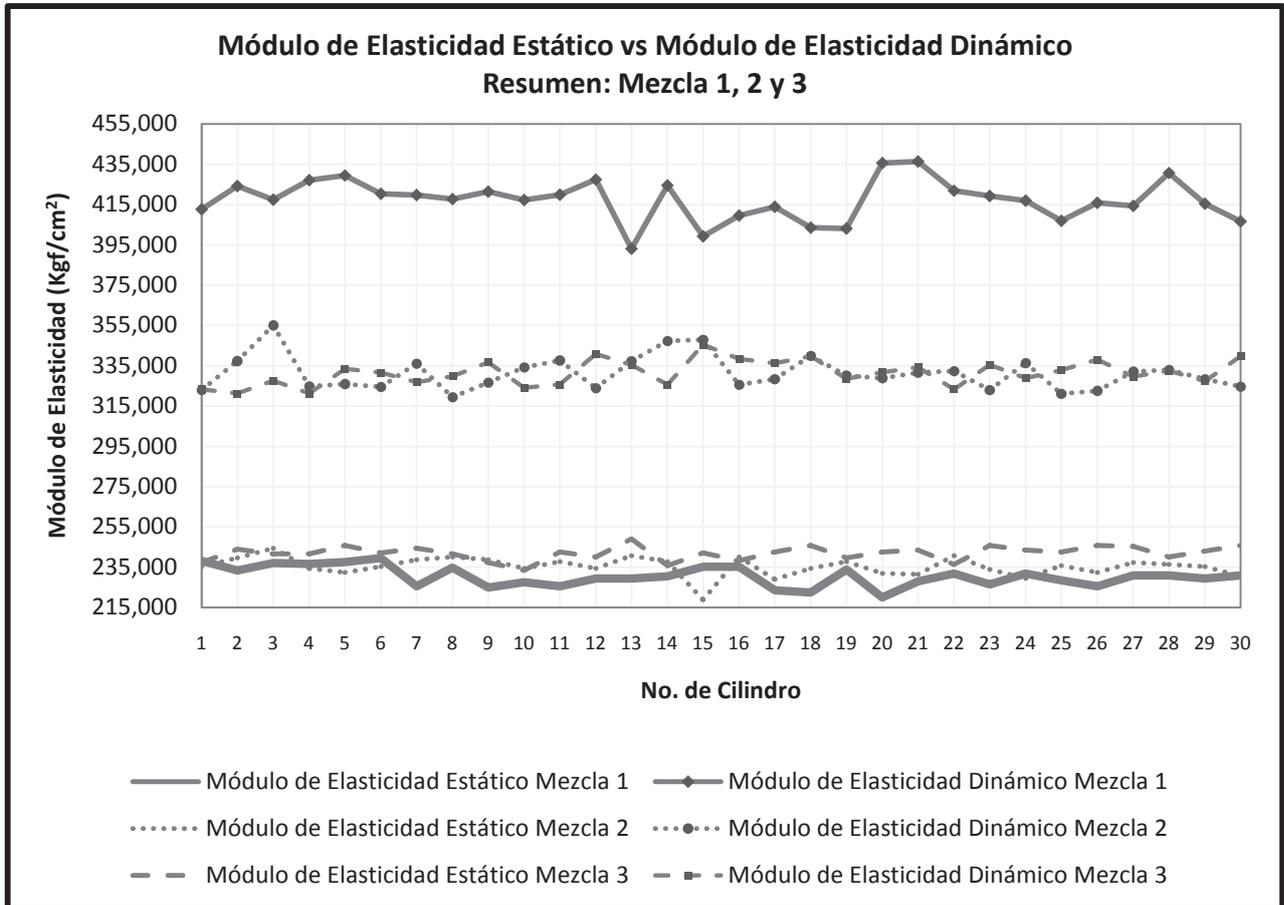
No	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Masa Saturada (gr)	Densidad (Kg/m ³)	Frecuencia (Hz)	Módulo de Elasticidad Dinámico (Kgf/cm ²)
1	10.03	19.98	3,234.90	2,048.30	1,462.00	284,913
2	10.04	19.93	3,134.81	1,988.58	1,199.00	185,110
3	10.02	19.98	3,228.37	2,050.97	1,578.00	332,352
4	10.06	20.05	3,193.41	2,003.80	1,565.00	321,783
5	10.02	20.05	3,224.46	2,038.11	1,913.00	489,033
6	10.01	20.00	3,192.52	2,028.36	2,035.00	548,006
7	10.05	20.05	3,232.13	2,030.79	1,376.00	252,105
8	10.02	20.05	3,223.39	2,040.15	1,569.00	329,297
9	10.02	20.08	3,211.58	2,027.44	1,569.00	328,063
10	10.02	20.05	3,198.03	2,021.41	1,424.00	268,753
11	10.04	20.10	3,206.88	2,013.91	1,615.00	346,122
12	10.03	20.00	3,242.53	2,050.57	1,570.00	329,749
13	10.02	20.03	3,207.03	2,029.63	1,562.00	323,873
14	10.03	20.10	3,196.81	2,012.93	1,572.00	327,776
15	10.06	20.08	3,238.00	2,029.25	1,570.00	328,774
16	10.02	20.10	3,218.67	2,032.10	1,528.00	312,632
17	10.05	20.03	3,207.00	2,017.51	1,570.00	325,246
18	10.04	20.10	3,232.11	2,032.46	1,375.00	253,203
19	10.01	20.00	3,212.87	2,042.65	1,594.00	338,596
20	10.05	20.10	3,216.82	2,017.48	1,454.00	281,048
21	10.04	20.03	3,232.47	2,038.94	1,474.00	289,731
22	10.05	20.00	3,202.63	2,018.62	1,638.00	353,341
23	10.02	20.08	3,199.50	2,019.82	1,520.00	306,734
24	10.04	20.10	3,221.69	2,024.56	1,468.00	287,492
25	10.04	20.10	3,221.51	2,024.45	1,692.00	381,900
26	10.02	20.08	3,206.44	2,026.89	1,681.00	376,469
27	10.02	20.08	3,235.05	2,042.26	1,413.00	268,014
28	10.01	20.00	3,213.21	2,042.87	1,590.00	336,935
29	10.04	20.03	3,203.41	2,021.95	1,761.00	410,096
30	10.02	19.95	3,191.70	2,028.87	1,716.00	387,816
31	10.01	20.08	3,209.37	2,030.10	1,820.00	442,000
32	10.01	20.00	3,182.24	2,021.83	1,570.00	325,129
33	10.03	20.08	3,158.37	1,992.53	2,077.00	564,988
34	10.02	20.03	3,211.00	2,032.14	1,586.00	334,315
35	10.04	20.00	3,228.37	2,038.90	1,579.00	331,643







➤ **Comparación del Módulo de Elasticidad Estático y Dinámico**

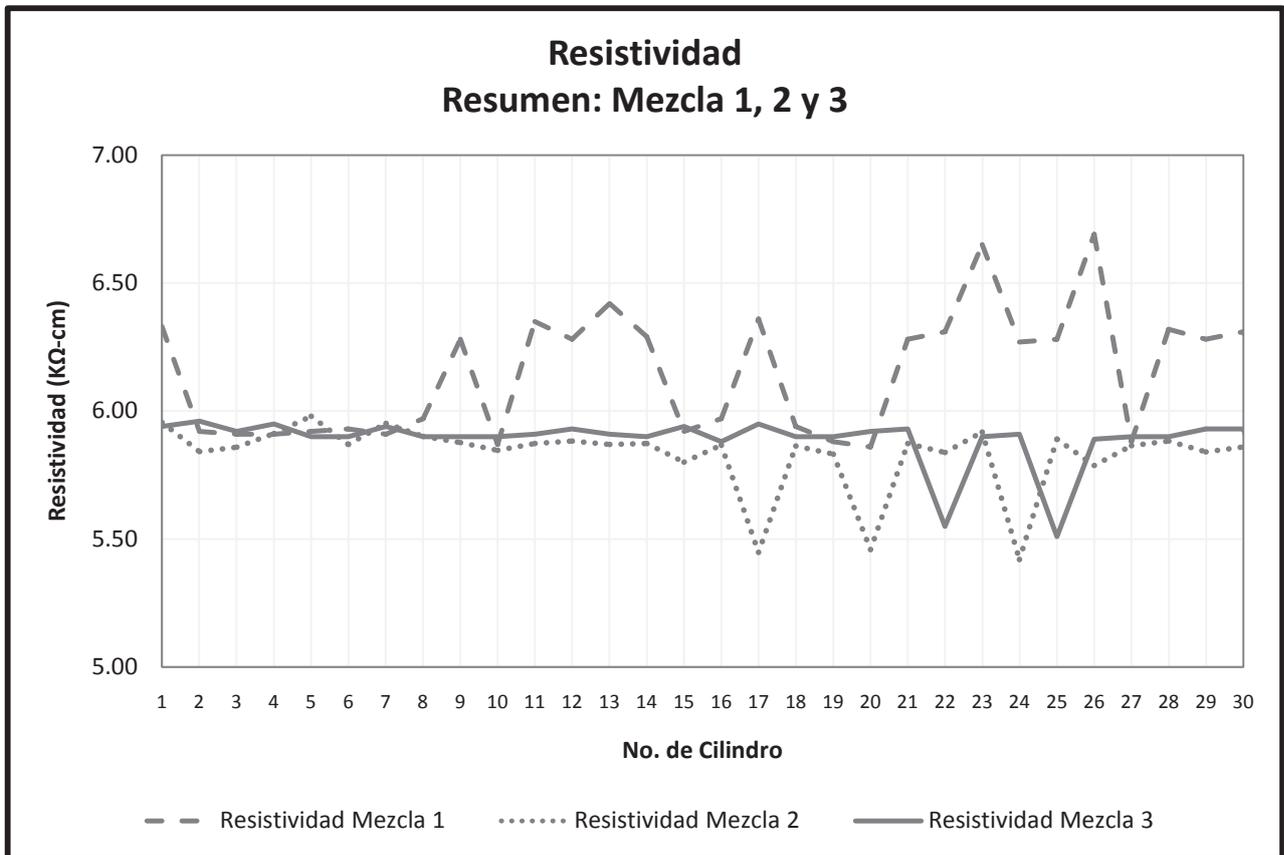


➤ **Resistividad Eléctrica**

Edad de Prueba: 30 días	Mezcla 1 Arena Volcánica y Grava Triturada	Mezcla 2 Arena y Grava de Río	Mezcla 3 Arena y Grava Volcánica
No.	Resistividad ρ (K Ω -cm)	Resistividad ρ (K Ω -cm)	Resistividad ρ (K Ω -cm)
1	6.33	5.96	5.94
2	5.92	5.84	5.96
3	5.91	5.86	5.92
4	5.91	5.91	5.95
5	5.92	5.98	5.90
6	5.93	5.87	5.90
7	5.91	5.95	5.94
8	5.97	5.90	5.90
9	6.28	5.88	5.90
10	5.87	5.85	5.90
11	6.35	5.87	5.91
12	6.28	5.88	5.93



13	6.42	5.87	5.91
14	6.29	5.87	5.90
15	5.92	5.80	5.94
16	5.97	5.87	5.88
17	6.36	5.45	5.95
18	5.94	5.86	5.90
19	5.88	5.83	5.90
20	5.86	5.46	5.92
21	6.28	5.87	5.93
22	6.31	5.84	5.55
23	6.65	5.92	5.90
24	6.27	5.42	5.91
25	6.28	5.89	5.51
26	6.69	5.79	5.89
27	5.88	5.86	5.90
28	6.32	5.88	5.90
29	6.28	5.84	5.93
30	6.31	5.86	5.93
31	5.97	5.86	5.49
32	5.94	5.44	5.90
33	5.98	5.85	5.90
34	6.37	5.53	5.91
35	5.91	5.51	5.94
PROMEDIO	6.13	5.80	5.88
Nivel de Corrosión	Alto Riesgo	Alto Riesgo	Alto Riesgo





5.6. Ecuaciones de Correlación

Mezcla	Arena Volcánica y Grava Triturada	Arena y Grava Redondeada	Arena y Grava Volcánica
Pruebas Destructivas			
$f'c$ (Kgf/cm ²) =	236	243	257
E_s (Kgf/cm ²) =	230,548	233,827	240,406
f_t (Kgf/cm ²) =	28	26	25
Pruebas No Destructivas			
E-Meter → Ed_1 (Kgf/cm ²) =	390,647	327,640	340,087
Pulso → Ed_2 (Kgf/cm ²) =	417,900	330,884	331,293
Pulso → V (m/s) =	4,369 Durable	3,936 Alta	4,114 Durable
ρ (k Ω -cm) =	6.13 Alto Riesgo	5.80 Alto Riesgo	5.88 Alto Riesgo
ECUACIONES DE CORRELACION	$E_s = 15,000 \sqrt{f'c}$	$E_s = 15,000 \sqrt{f'c}$	$E_s = 15,000 \sqrt{f'c}$
	$f_t = 12\% f'c$	$f_t = 11\% f'c$	$f_t = 10\% f'c$
	$E_s = 59\% Ed_1$	$E_s = 71\% Ed_1$	$E_s = 71\% Ed_1$
	$E_s = 55\% Ed_2$	$E_s = 71\% Ed_2$	$E_s = 71\% Ed_2$
	$Ed_1 = 25,416 \sqrt{f'c}$	$Ed_1 = 21,018 \sqrt{f'c}$	$Ed_1 = 21,220 \sqrt{f'c}$
	$Ed_2 = 27,190 \sqrt{f'c}$	$Ed_2 = 21,226 \sqrt{f'c}$	$Ed_2 = 20,671 \sqrt{f'c}$
	$V = 284 \sqrt{f'c}$	$V = 253 \sqrt{f'c}$	$V = 257 \sqrt{f'c}$
	$\rho = 2.60\% f'c$	$\rho = 2.39\% f'c$	$\rho = 2.29\% f'c$
	$Ed_1 = 73,949 \sqrt{f_t}$	$Ed_1 = 63,976 \sqrt{f_t}$	$Ed_1 = 67,402 \sqrt{f_t}$
	$Ed_2 = 79,108 \sqrt{f_t}$	$Ed_2 = 64,610 \sqrt{f_t}$	$Ed_2 = 65,659 \sqrt{f_t}$
	$V = 827 \sqrt{f_t}$	$V = 769 \sqrt{f_t}$	$V = 815 \sqrt{f_t}$
	$\rho = 21.98\% f_t$	$\rho = 22.13\% f_t$	$\rho = 23.10\% f_t$



CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN



En esta región del estado de Michoacán, existen numerosos bancos de materiales y aún así, el mismo banco presenta diversos frentes para la extracción de los materiales pétreos. Es por ello que no es válido generalizar los resultados de esta tesis para todos los materiales que existen en el estado de Michoacán.

Específicamente los agregados volcánicos se trajeron del banco más demandado en la ciudad de Morelia, el banco “Joyitas”; los agregados triturados fueron un poco más complicados de conseguir, ya que las dos primeras muestras tenían tamaños máximos más grandes que los solicitados, es por ello que el banco que se eligió fue SUPRA ya que la granulometría de la grava cumplía con las especificaciones; para los agregados redondeados sólo se tuvo que ir a la orilla del río Queréndaro y extraer el material.

Teóricamente mientras más denso y menos poroso es un material, debería presentar mayores masas unitarias, sin embargo, en esta investigación la morfología del material jugó un papel muy importante. De acuerdo al *Cuadro 6.1*, las gravas trituradas presentaron mayores densidades que las gravas de río, pero menores masas unitarias que las de éstas; esto se debe a la forma del material, ya que la grava redondeada presentó un mejor acomodo entre sus partículas dejando menos vacíos y la grava triturada al tener partículas más irregulares y angulares, presentó más vacíos generando menores masas unitarias.

En el caso de las arenas, las arenas volcánicas presentaron menores masas unitarias, mayores densidades y menor módulo de finura ($M.F. = 2.89$) que las arenas provenientes del río ya que sus valores fueron contrarios ($M.F. = 3.29$). Mayor módulo de finura significa arenas más gruesas y por lo tanto mayores vacíos al momento de realizar la prueba de masas unitarias. Se podría suponer que las masas unitarias compactas darían mayor en la grava triturada, al eliminar con la varilla los vacíos y compactar el material, pero no fue así; debido nuevamente a la forma de sus partículas, existió una mayor trabazón entre ellas, imposibilitando a la varilla cerrar estos vacíos, mientras que en la grava redondeada, al tener formas esféricas, la trabazón fue menor y fue más fácil introducir la varilla para compactar el material.



Cuadro 6.1. Resumen Calidades de los Agregados Pétreos

	Arena Volcánica	Arena de Río	Grava Volcánica	Grava Triturada	Grava de Río
Masa Unitaria Suelta Kg/m³	1,365	1,415	1,100	1,400	1,490
Masa Unitaria Compacta Kg/m³	1,475	1,530	1,155	1,495	1,535
% Absorción	3.36	6.06	4.82	1.67	3.98
Densidad Relativa o Gravedad Específica	2.32	2.21	1.86	2.60	2.38
% Humedad	0.20	1.57	0.51	1.60	2.02
Material que pasa malla No. 200	4.24	2.42	-	-	-
Prueba de Terrones de arcilla	1.35	0.95	-	-	-
Equivalente de arena	83.13	75.82	-	-	-
Materia orgánica (No del color)	3	3	-	-	-

De la mano a estos resultados de masas unitarias, se encuentran relacionados los valores del porcentaje de absorción y la densidad. Tanto en las arenas como en las gravas, mientras mayores fueron los porcentajes de absorción, presentaron menores densidades.

Para complementar el estudio de calidad de los agregados, se realizaron más pruebas a las arenas: material que pasa malla No. 200, terrones de arcilla, equivalente de arena y contenido de materia orgánica, dando como resultado que tanto la arena volcánica como la proveniente del río, dieron resultados óptimos quedando dentro de las especificaciones de las normas.

Analizando el cemento, la bibliografía marca que la densidad de un cemento Pórtland normal Tipo I), suele estar muy cercano a 3.15 g/cm³. Para este caso, el cemento utilizado arrojó una densidad de 2.8 gr/cm³, producto de ser cemento tipo V, ya que el contenido de clínker por tonelada de cemento es inferior. En el caso de la consistencia normal, el cemento utilizado, al tener más componentes, aparte del clínker y del yeso, el contenido de agua sube dando como resultado un 31%. Los tiempos de fraguado estuvieron dentro de los tiempos indicados por la norma.

En el caso del diseño de las mezclas, los resultados vuelven a ser consecuencia de los valores de los agregados; a mayores masas unitarias compactas del agregado grueso y menor módulo de finura del agregado fino, se obtienen mayores porcentajes de agregados en el total de la masa de la mezcla, y a mayor densidad del cemento se aumenta el contenido de agregado fino (Cuadro 6.2).



Cuadro 6.2. Resumen de Proporcionamientos [ACI 211].

	Arena y Grava Volcánica		Arena Volcánica y Grava Triturada		Arena y Grava de Río	
	Masa (Kg)	Porcentajes %	Masa (Kg)	Porcentajes %	Masa (Kg)	Porcentajes %
Cemento	23.8	19.4	23.8	17.1	23.8	17.7
Arena	38.2	31.1	42.8	30.7	38.5	28.6
Grava	44.8	36.4	58.6	42.1	56.6	42.0
Agua	16.1	13.1	14.0	10.1	15.7	11.7
Sumas	123.0	100.0	139.3	100.0	134.7	100.0

Siendo para la mezcla de arena y grava volcánica el 67.5% de agregados de la masa total; para la mezcla de arena volcánica y grava triturada los agregados ocuparon el 72.8%; y para la mezcla de arena y grava de río, los agregados ocuparon el 70.6%. Es importante resaltar que a mayores porcentajes de agregados, se reducen los porcentajes del cemento.

En cuanto a precios, lo más caro al realizar una mezcla de concreto es el cemento, seguido del agregado fino, después el agregado grueso y por último el costo del agua. De esta manera, comparando los resultados, el contenido de agregado grueso es mayor que el contenido de agregado fino y el contenido del cemento, dando como resultado un concreto más económico que si se diseñara por otros métodos.

Hablando del concreto en estado fresco, los resultados muestran que los revenimientos obtenidos en las mezclas, fueron aceptables ya que se encontraron dentro de las tolerancias marcadas.

Respecto a las masas unitarias del concreto fresco, se observa que la mezcla de arena volcánica y grava triturada fue la que obtuvo mayor masa unitaria (M.U. = 2,327 Kg/m³), seguida de la mezcla de arena y grava redondeada (M.U.= 2,261 Kg/m³) y de la mezcla de la arena y grava volcánica (M.U.S = 2,044 Kg/m³). Esto se debe a que la pasta de cemento, logró penetrar las oquedades que se producían en la masa unitaria, en estado seco, de la grava triturada.

Los resultados del concreto en estado endurecido proporcionan nueva información sobre las diferencias entre las mezclas de concreto pero siguen siendo efecto de las calidades de los agregados pétreos y de la morfología de los mismos.



Los valores obtenidos de la resistencia a la compresión, arrojan que las resistencias más altas se obtuvieron de la mezcla de arena y grava volcánica. La ruptura de la masa del concreto fue por medio del agregado grueso como se muestra en la *Figura 6.1*, esta falla del agregado fue debido a la porosidad, forma y textura del agregado, ya que al tener mayor área superficial en contacto con la pasta de cemento, aumentó la adherencia y por lo tanto la resistencia fue mayor. Todos los especímenes de esta mezcla, fallaron súbitamente. La desviación estándar de los cilindros fue de 7 Kgf/cm² dando una clase de operación excelente según el *Cuadro 3.1*, esto significa que la fabricación de los cilindros fue de excelente calidad resultando una mezcla homogénea. El coeficiente de variación fue de 0.03, entrando también dentro de la calidad según el *Cuadro 3.2*.

La mezcla de arena volcánica y grava triturada, presenta los valores más bajos de resistencia. La grava triturada presentaba gran cantidad de polvo, producto de la trituración, y menor porosidad, dando como resultado menor área superficial en contacto con la pasta de cemento, provocando menor adherencia. La ruptura de la masa del concreto se produjo en la interface de contacto entre la pasta y agregado, es decir, el agregado se separó de la pasta de cemento debido a la pobre adherencia que había entre ellos como se muestra en la *Figura 6.2*. A diferencia de la mezcla anterior, los especímenes no colapsaron ya que no alcanzaron las mismas resistencias. La desviación estándar de los cilindros fue de 10 Kgf/cm² dando una clase de operación excelente según el *Cuadro 3.1*, esto significa que la fabricación de los cilindros fue de excelente calidad resultando una mezcla homogénea. El coeficiente de variación fue de 0.04, entrando también dentro de la calidad según el *Cuadro 3.2*.

Para el caso de la arena y grava redondeada, su comportamiento fue intermedio. El agregado grueso de esta mezcla presenta mayor porosidad que el agregado triturado, provocando esto mayor área superficial en contacto con la pasta de cemento y mejor adherencia, sin embargo, sus valores quedaron por debajo de la mezcla con agregado grueso volcánico. La ruptura de la masa del concreto fue mixta, en ciertas zonas falló el agregado grueso y en otras lo que falló fue la interface de contacto entre la pasta y agregado, como se muestra en la *Figura 6.3*. Al igual que en mezcla de arena y grava volcánica, los especímenes presentaron ruptura súbita. La desviación estándar de los cilindros fue de 10 Kgf/cm² dando una clase de operación excelente según el *Cuadro 3.1*, esto significa que la fabricación de los cilindros fue de excelente calidad resultando una mezcla homogénea. El coeficiente de variación fue de 0.04, entrando también dentro de la calidad según el *Cuadro 3.2*.

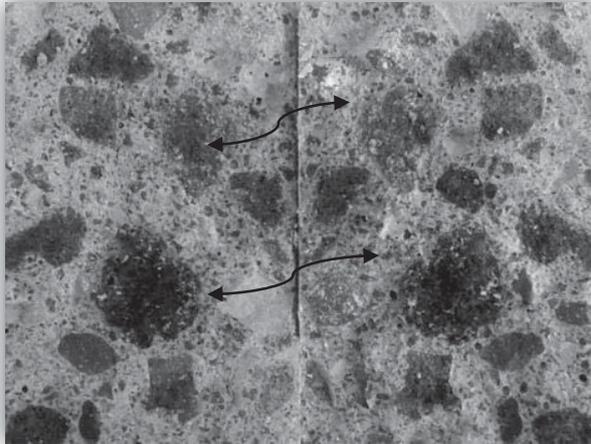


Figura 6.1. Falla por medio del agregado (Arena y grava volcánica)



Figura 6.2. Falla en la interface de contacto entre la pasta y el agregado (Arena volcánica y Grava Triturada)



Figura 6.3. Falla Mixta, por medio del agregado y en la interface de contacto (Arena y grava de río)

Todos los resultados de resistencia a la compresión, dieron menores valores que la resistencia de diseño (f^c) y la resistencia de proyecto (fcr). Según el reglamento del ACI 318 5.6.3.3., el nivel de resistencia de una clase determinada de concreto se considera satisfactorio, si ningún resultado del ensayo de resistencia es menor que f^c por más de 35 Kgf/cm^2 cuando f^c de proyecto es menor o igual a 350 Kgf/cm^2 . De esta manera las mezclas son aceptables, ya que ningún resultado individual dio por debajo de 215 Kgf/cm^2 .

El módulo de elasticidad estático del concreto, es un parámetro importante usado en el diseño y análisis del concreto reforzado. Su valor no está bien definido como el del acero debido a que en el concreto intervienen más factores, principalmente la resistencia del agregado grueso.



A mayor resistencia a la compresión (f^c), mayor módulo de elasticidad estático. El cálculo utilizado en esta tesis fue aproximado, ya que como se había mencionado anteriormente, no fue posible obtener las deformaciones del concreto, para trazar la gráfica esfuerzo-deformación unitaria.

Los resultados de resistencia por compresión diametral, arrojaron datos diferentes a los obtenidos en la resistencia a la compresión, ya que el procedimiento de prueba es completamente diferente e intervienen otros factores. Las mayores resistencias las obtuvieron los especímenes de la mezcla de grava triturada, debido a que sus partículas irregulares angulares presentaron mayor trabazón entre ellas. Los cantos rodados, al tener su forma parecida a una esfera, dieron resultados intermedios nuevamente; se puede pensar que al tener esta forma no había agarre entre sus partículas, pero debido a que presentan mejor granulometría, tanto en la arena como en la grava, que la mezcla de arena y grava volcánica, quedaron mejor confinados provocando mejores resistencias. El modo en que fallaron los especímenes fue el mismo que en la resistencia compresión.

A partir de pruebas no destructivas, se obtuvieron los módulos de elasticidad dinámicos y la resistividad eléctrica. Los módulos de elasticidad dinámicos siguieron dos métodos de prueba. El primer método consistió en determinar la velocidad de pulso ultrasónico (el ultrasonido es imperceptible al oído humano). Esta velocidad es mayor, cuando el concreto presenta menos vacíos y mejor homogeneidad.

La mezcla de arena volcánica y grava triturada presentó las mayores velocidades de pulso ($V = 4,369$ m/s), como consecuencia del alto porcentaje de agregado pétreo que contiene y el menor contenido de vacíos. Esta velocidad está en función del tiempo que tardó el pulso en recorrer el cilindro y como el tiempo fue menor que en las otras dos mezclas, la homogeneidad fue también mayor, dando una calidad de concreto durable según el *Cuadro 4.16*.

La mezcla de arena y grava de río presentó las menores velocidades de pulso ($V = 3,936$ m/s), debido a que el pulso ultrasónico tardó más tiempo en recorrer el cilindro, dando una homogeneidad baja comparada con las otras dos mezclas y una calidad de concreto alta según el *Cuadro 4.16*. La mezcla de arena y grava volcánica presentó velocidades intermedias ($V = 4,114$ m/s) dando homogeneidad intermedia y calidad de concreto durable según el *Cuadro 4.16*,



Partiendo de estas velocidades se determinó el módulo de elasticidad dinámico, dando similares los valores en cada mezcla y siendo mayor, cuando las velocidades de pulso fueron mayores.

El segundo método consistió en determinar las frecuencias de resonancia (ondas elásticas), que son ondas de sonido o ruido que viaja a través del concreto. Este método fue impreciso, ya que los valores de las frecuencias presentaron valores desiguales (rangos grandes), provocando módulos de elasticidad dinámicos entre 191,331 a 566,680 Kgf/cm² para la mezcla de arena volcánica y grava triturada, 173,446 a 512,609 Kgf/cm² para la mezcla de arena y grava redondeada y 185,110 a 564,988 Kgf/cm² para la mezcla de arena y grava volcánica. Esto sólo lleva a suponer que utilizando este aparato se presenta una irregularidad en la toma de frecuencias siendo poco confiable.

La prueba de resistividad es un instrumento para hacer previsiones en el concreto. De los resultados mostrados, las tres mezclas presentan alto riesgo de nivel de corrosión, según el *Cuadro 4.17*. Cuando mayor sea la resistencia eléctrica, mayor será la resistividad, menor será la porosidad y se evitará la corrosión del acero contenido en el concreto.

Las ecuaciones de correlación reflejan la parte matemática de la experimentación y a partir de ellas se pueden realizar tanto diseños estáticos como diseños por sismo, en estructuras de concreto.



CAPÍTULO 7. CONCLUSIÓN



El concreto es sin duda, una de las creaciones más sobresalientes que ha realizado el hombre. Su uso se ha extendido, tanto en zonas urbanas como rurales, debido a su bajo costo. Lo económico del material, radica en que la mayor parte de sus componentes (agregados pétreos) son abundantes en la naturaleza, de manera que las características de estos, son decisivas para la calidad del concreto. La calidad de un concreto, por lo tanto, está en función de la calidad de sus componentes, de la calidad en el diseño de la mezcla, de su transporte, colocación, y mantenimiento.

La diferencia entre un concreto de buena calidad y un concreto que no lleva control de calidad, se manifiesta eventualmente en la obra, en su seguridad, durabilidad y en el prestigio del Ingeniero quien la construye.

De esta forma, sería un error generalizar que en el concreto, los agregados volcánicos del estado de Michoacán, siempre van a dar las resistencias más altas a la compresión. La composición mineralógica, forma y textura de de los agregados, varían de una zona a otra e incluso en el mismo lugar de donde se extraen. Es por ello que los datos de esta investigación deben tomarse con cautela y no dar por hecho que todos los materiales que presentan estas formas se comportarán igual.

Particularmente en esta tesis, los agregados volcánicos, que son los más baratos y con mayor disponibilidad en la región, obtuvieron mejores resistencias. Esto no significa que los otros agregados sean de baja calidad, ya que en otras pruebas tuvieron mejores resultados.

La decisión al escoger un tipo de agregado, debe estar basada en su disponibilidad, el tipo de obra, el capital con que cuenta el constructor y la premura para entregar una edificación.

Los objetivos de esta tesis se cumplieron por completo, resultando en el camino nuevos retos, que provocaron mayor indagación en la bibliografía existente, e información básica para futuras investigaciones.

Se deben seguir realizando estudios sobre los agregados del concreto, para tener una mejor preparación académica y en base a ello, el Ingeniero Civil pueda tomar mejor decisiones que lo lleven a construir obras civiles con la mejor calidad, al menor costo y al menor tiempo.



CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA



1. Abrams D. A., 1919, “Design of Concrete Mixtures”, Bulletin No 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago.
2. Aïtcin, P., Miao B., Cook, W. , and Mitchell D., 1994 “Effects of Size and Curing on Cylinder Compressive Strength of Normal and High- Strength Concretes”, ACI Materials Journal 91(4): 349-354.
3. American Concrete Institute, ACI 211, 1991, “ACI Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete”, reapproved 2002, ACI Committee 211 Report.
4. American Concrete Institute, ACI 214, 1977, “ACI Standard Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete”, reapproved 983, ACI Committee 214 Report.
5. American Concrete Institute, ACI 318S, 2008, “Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario, (Versión en español y en sistema métrico)”, Comité ACI 318.
6. American Society for Testing and Materials, 2003, “ASTM-C-33-03, Standard Specification for Concrete Aggregates”, United States.
7. American Society for Testing and Materials, 2003, “ASTM-C-94M-04, Standard Specification for Ready-Mixed Concrete”, United States
8. American Society for Testing and Materials, 2003, “ASTM-C-125-03, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates”, United States.
9. Arnal L. y Betancourt M., 1997, “Nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, Editorial Trillas, México.
10. Carrasquillo, P. and Carrasquillo R., 1998, “Evaluation of the Use of Current Concrete Practice in the Production of High-Strength Concrete”, ACI Materials Journal 85(1): 49-54.
11. Carrasquillo, R., Nilson A., and Slate F., 1981, “Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads”, ACI Journal 78(3): 171-178.
12. Colegio de Ingenieros Civiles de Michoacán A.C., 1999, “Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán”, talleres de Linotipográfica Omega, Quinta edición, Morelia, Michoacán, México.
13. Dennis Jr., and Schindler, A., 2006 “The Effect of Test Cylinder Size on the Compressive Strength of Sulfur Capped Concrete Specimens”, Auburn University, Alabama, United States
14. French, C., and Mokhtarzadeh A., 1993, “High Strength Concrete: Effects of Material, Curing and Test Procedures on Short-Term Compressive Strength”, PCI Journal 38(3): 76-87.
15. Instituto del Concreto, 1997, “Manual Tecnología y Propiedades”, Asociación colombiana de productores de concreto -ASOCRETO-, Tercera reimpresión, Colombia.
16. Jones R., 1948, “The Application of Ultrasonic to the testing of concrete” London, England.



17. Kosmatha S.H. y Panarese W.C., 1992, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC), primera edición, México.
18. Leslie J. and Cheesman W., 1949, “An ultrasonic method of studying deterioration and craking in concrete structures”, United States.
19. Malaikah A., 2003, “Effect of Specimen Size and Shape on the Compressive Strength of High Strength Concrete”, King Saud University, Saudi Arabia.
20. Malhotra V. and Carino N., 2004, “Hanbook on Nondestructive Testing of Concrete”, Second Edition.
21. Martínez W., 2007, “Apuntes de la materia Tecnología del Concreto: Criterios de Evaluación de Resultados de Resistencia en el Concreto”, Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
22. Neville A.M., 1998, “Tecnología del Concreto”, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC), primera edición, editorial Trillas, México.
23. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2004, “Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2004, Industria de la construcción -Agregados para concreto hidráulico- Especificaciones y métodos de prueba”, México.
24. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 1997, “Norma Mexicana NMX-C-251-1997-ONNCCE, Industria de la construcción -concreto-terminología”, México.
25. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2004, “Norma Mexicana NMX-C-155-ONNCCE-2004, Industria de la construcción–Concreto – Concreto Hidráulico Industrializado – Especificaciones”, México.
26. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2004, “Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004, Industria de la construcción -cementos hidráulicos- Especificaciones y métodos de prueba”, México.
27. Powers T., 1938, “Measuring Young’s modules of elasticity by means of sonic vibrations”, United States.
28. Red Durar (Durabilidad de la Armadura), 2000, “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”, CYTED, 3ra. edición, México.
29. Romo M., 2009, “Fundamentos del Hormigón Simple”, Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador.
30. Shetty M.S., 2005, “Concrete Technology Theory and Practice”, Editorial S. Chand and Companu LTD., Ram Nagar, New Dheli, India.