



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PROFESIONAL**



**“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA  
USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE  
POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

**P R E S E N T A:**

**JANETTE DUARTE MONTES DE OCA**

**A S E S O R:**

**M. I. NOEL DÍAZ GONZALEZ**

**CO-ASESORES:**

**M.I. CIPRIANO BERNABE REYES**

**ING. LUIS COLÍN VELÁZQUEZ**

Morelia, Michoacán. Octubre del 2019.

## INDICE DE CONTENIDO

### Contenido

INDICE DE CONTENIDO.....	2
RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6
INDICE TABLAS.....	7
INDICE ILUSTRACIONES.....	9
DEDICATORIAS.....	11
AGRADECIMIENTOS.....	12
JUSTIFICACION.....	13
HIPÓTESIS.....	17
OBJETIVO.....	17
OBJETIVOS PARTICULARES.....	17
1.    INTRODUCCIÓN.....	18
2.    MARCO TEÓRICO.....	19
2.1    Antecedentes del concreto.....	19
2.1.1    Datos históricos.....	19
2.1.2    Composición.....	21
2.1.3    Tipos de concreto.....	22
2.1.4    Usos del concreto.....	24
2.1.5    Durabilidad y agrietamiento del concreto.....	27
2.2    Cemento.....	28
2.2.1    Materiales que conforman el cemento.....	28
2.2.2    Proceso de fabricación del cemento.....	29
2.2.3    Propiedades del cemento.....	35
2.2.4    Clasificación del cemento.....	37
2.2.5    Cemento empleado en la investigación.....	40
2.3    Agregados pétreos.....	40
2.3.1    Propiedades.....	42
2.3.2    Propiedades químicas.....	43
2.3.3    Propiedades físicas.....	43

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN,  
CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

2.3.4	Propiedades mecánicas.....	45
2.3.5	AGREGADO EMPLEADO EN LA INVESTIGACIÓN.....	45
2.4	Agua.....	46
2.4.1	Características del agua.....	47
2.4.2	Especificaciones.....	48
2.4.3	Agua utilizada en la investigación.....	49
2.5	Fibras Adicionadas al concreto.....	50
2.5.1	Ventajas y desventajas del uso de fibras.....	51
2.5.2	Propiedades.....	52
2.5.3	Especificaciones.....	53
2.5.4	Fibras Sintéticas.....	54
2.5.5	Fibra sintética utilizada en la investigación.....	57
2.5.6	Usos da la microfibra de polipropileno en concreto.....	59
2.6	Fibras de cabello humano.....	59
2.6.1	Partes del cabello humano.....	59
2.6.2	Propiedades.....	61
2.6.3	Fibras de cabello humano utilizadas en la investigación.....	64
3	DISEÑO DE MEZCLAS.....	64
3.1	Introducción.....	64
3.2	Objetivo.....	65
3.3	Método por el método del American Concrete Institute (ACI).....	65
4.	METODOLOGÍA.....	71
4.1	Pruebas físico-mecánicas de los materiales.....	71
4.1.1	Material cementante.....	71
4.1.2	Materiales pétreos.....	80
4.1.3	ARENA.....	85
4.1.4	GRAVA.....	96
4.1.5	Granulometría de los agregados.....	101
4.2	Fabricación de especímenes y pruebas al concreto fresco.....	105
4.2.2	Elaboración de concreto para especímenes.....	106
4.2.3	Revenimiento.....	107

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN,  
CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

4.2.4	Fabricación de cilindros y vigas.....	109
4.3	Pruebas al concreto endurecido .....	111
4.3.1	Curado del concreto .....	112
4.3.2	Cabeceado de cilindros.....	113
4.3.3	Resistencia a la compresión simple.....	114
4.3.4	Resistencia a la flexión en Vigas.....	116
4.4	Pruebas no destructivas al concreto endurecido .....	118
4.4.2	Resistividad eléctrica.....	118
4.4.3	Velocidad de pulso ultrasónico .....	121
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	124
5.1.	Propiedades de los materiales utilizados.....	124
5.1.1.	Cemento. ....	124
5.1.2.	Agregado pétreo fino (arena). ....	125
5.1.3.	Agregado pétreo grueso (grava).....	128
5.1.4.	Agua para concreto.....	130
5.1.5.	Diseño del concreto. ....	131
5.1.6.	Pruebas no destructivas al concreto endurecido.....	133
5.1.7.	Pruebas destructivas al concreto endurecido.....	137
6.	CONCLUSIÓN .....	140
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	142

## RESUMEN

Actualmente en el ámbito de la construcción se han implementado aditivos de fibras de 100% polipropileno en forma de multifilamentos, que actúan como refuerzo secundario en el concreto, con la finalidad principal de reducir los agrietamientos producidos por contracción plástica en concretos en estado fresco y por temperatura en estado endurecido, mejorar la resistencia al impacto, incrementar la resistencia a la fatiga, todo esto contribuye a la durabilidad del mismo. Siguiendo con este mismo principio se planteó la alternativa de sustituirlo por fibras de cabello humano, que al ser un elemento que al cortarlo se convierte en desecho que generalmente termina en los depósitos de destino final sin darle ningún uso, y al ser en cierta parte parecido a estas microfibras de polipropileno, se estudió su comportamiento en conjunto con el concreto. Utilizando el método de diseño ACI, se elaboraron 10 especímenes cilíndricos de 10cm de diámetro por 30cm de alto, 8 vigas de 15cm alto 15cm ancho y 60cm de largo, los cuales se elaboraron en un porcentaje de adición respecto de la masa del cemento a utilizar del 0.8% de microfibra de polipropileno y otra mezcla con el mismo porcentaje de fibra de cabello humano, para cumplir edades de 7, 14, 28, 70 y 120 días. Junto con ello se realizaron especímenes testigo (sin adición) de las mismas dimensiones para poder comparar resultados. El cemento utilizado fue un portland CPC 30R-RS para una relación A/C de 0.54. Los agregados pétreos como arena y grava fueron obtenidos de banco de material de origen volcánico y basáltico triturado respectivamente, a los cuales se les realizó el cuarteo, así como su composición granulométrica, porcentaje de absorción, densidad y pesos volumétricos. Una vez elaborados los especímenes se procedió a su curado por inmersión en agua hasta cumplir la edad correspondiente. Las pruebas realizadas fueron tanto destructivas como no destructivas. Las directas o destructivas son las de compresión en cilindros y núcleos, la de flexión en vigas. Las indirectas o no destructivas comprenden la medición de velocidad de pulso ultrasónico y la de resistividad eléctrica realizada a todos los especímenes. Analizados los datos obtenidos de estas pruebas pudimos identificar que el concreto con fibras de cabello humano, así como el de microfibras de polipropileno resultaron ser concretos durables según la prueba de velocidad de pulso ultrasónico, ya que los valores son altos y esto significar que tiene pocos poros internos y agrietamientos. Sin embargo, los resultados de resistividad eléctrica indican que es susceptible a la corrosión del acero de refuerzo en condiciones salinas. La flexión no aumentó; sin embargo, se observó una muy buena cohesión entre las fibras y la matriz cementante.

**PALABRAS CLAVE:** concreto, cabello humano, microfibras de polipropileno, agrietamiento.

## ABSTRACT

Currently in the field of construction, 100% polypropylene fiber additives have been implemented in the form of multifilaments, which act as secondary reinforcement in concrete, with the main purpose of reducing cracks produced by plastic shrinkage in concrete in the fresh state and by hardened temperature, improve impact resistance, increase fatigue resistance, all this contributes to its durability. Following this same principle, the alternative of replacing it with human hair fibers was proposed, which, being an element that, when cut, becomes waste that generally ends up in the deposits of final destination without giving it any use, and being somewhat similar To these polypropylene microfibers, their behavior was studied in conjunction with the concrete. Using the ACI design method, 10 cylindrical specimens 10cm in diameter by 30cm high, 8 beams 15cm high 15cm wide and 60cm long were made, which were made in a percentage of addition to the mass of the cement to be used 0.8% of polypropylene microfiber and another mixture with the same percentage of human hair fiber, to meet ages of 7, 14, 28, 70 and 120 days. Along with this, control specimens (without addition) of the same dimensions were made to compare results The cement used was a CPC 30R-RS Portland for an A / C ratio of 0.54. Stone aggregates such as sand and gravel were obtained from a material bank of crushed volcanic and basaltic origin, respectively, to which the cracking was done, as well as its granulometric composition, percentage of absorption, density and volumetric weights. Once the specimens were prepared, they were cured by immersion in water until they reached the corresponding age. The tests performed were both destructive and non-destructive. Direct or destructive are those of compression in cylinders and cores, bending in beams. The indirect or non-destructive include the measurement of ultrasonic pulse velocity and the electrical resistivity measurement performed on all specimens. Analyzed the data obtained from these tests we could identify that the concrete with human hair fibers, as well as that of polypropylene microfibers turned out to be durable concrete according to the ultrasonic pulse velocity test, since the values are high and this means that it has few internal pores and cracks. However, electrical resistivity results indicate that it is susceptible to corrosion of reinforcing steel in saline conditions. Flexion did not increase; however, a very good cohesion was observed between the fibers and the cementitious matrix.

**KEY WORDS:** concrete, human hair, polypropylene microfibers, cracking.

## INDICE TABLAS

Tabla 1. Número de refinerías por país 2006. ....	15
Tabla 2. Las refinerías más grandes a nivel mundial 2007. ....	15
Tabla 3. CLASIFICACIÓN DE CONCRETOS POR SU RESISTENCIA:.....	24
Tabla 4. CLASIFICACIÓN DE CONCRETOS POR SU PESO VOLUMÉTRICO: .....	25
Tabla 5. CLASIFICACIÓN DE CONCRETOS POR SU CONSISTENCIA: .....	25
Tabla 6. COMPUESTOS PRINCIPALES DEL CEMENTO.....	28
Tabla 7. Fuentes de las Materias Primas Usadas y la Fabricación del Cemento Portland.....	29
Tabla 8. Principales reacciones de Hidratación de los Compuestos del Cemento Portland (Expresados en óxidos).....	35
Tabla 9. CALOR DE HIDRATACIÓN.....	36
Tabla 10. Tipos de Cementos.....	39
Tabla 11. Clase resistente mecánica a la compresión, que establece los valores mínimos y máximos.....	39
Tabla 12. Características especiales .....	40
Tabla 13. Impurezas sobre las propiedades del concreto. ....	46
Tabla 14. Requisitos que tiene que cumplir el agua para utilizarla en construcción. ....	48
Tabla 15. Resultados del análisis del agua del Laboratorio de materiales "Ing. Luis Silva Ruelas".....	50
Tabla 16. Propiedades de tipos de fibras.....	52
Tabla 17. Datos Técnicos de la Micro-fibra de polipropileno .....	57
Tabla 18. Elementos químicos que conforman el cabello humano.....	61
Tabla 19. Revenimientos recomendados.....	66
Tabla 20. Relaciones entre la relación Agua/Cemento y la resistencia a la compresión del concreto.....	67
Tabla 21. Relaciones entre la relación Agua/Cemento y la resistencia a la compresión del concreto.....	69
Tabla 22. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen del concreto .....	70
Tabla 23. Normativas mexicanas y ASTM. ....	71
Tabla 24. Normas correspondientes a los agregados pétreos.....	80
Tabla 25. Especificaciones del agregado pétreo. ....	82
Tabla 26. Número, frecuencia y tamaño del muestreo.....	82
Tabla 27. Especificaciones para material que pasa la malla N°200 en arenas. ....	94
Tabla 28. Especificaciones de porcentaje de humedad de absorción.....	98
Tabla 29. Especificaciones granulométricas en arena.....	103
Tabla 30. Valor nominal del revenimiento y tolerancias .....	108
Tabla 31. Número de capas requeridas para los especímenes. (NMX-C-159-ONNCCE, 2016). .....	109
Tabla 32. Número de penetraciones por capa .....	110

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN,  
CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

Tabla 33. Pruebas al concreto endurecido.....	111
Tabla 34. Pruebas no destructivas al concreto endurecido .....	118
Tabla 35. Criterios de evaluación. (DURAR., 2000).....	120
Tabla 36. Criterios de evaluacion (NMX-C-514-ONNCCE., 2016).....	121
Tabla 37. Criterios de Evaluación para la Calidad del Concreto. (DURAR., 2000).....	123
Tabla 38. Criterios de evaluación del concreto. (NMX-C-275-ONNCCE., 2004).....	123
Tabla 39. Densidad del cemento. ....	124
Tabla 40. Consistencia normal del cemento. ....	124
Tabla 41. Tiempos de fraguado del cemento. ....	125
Tabla 42. Porcentaje de absorción de la arena. ....	125
Tabla 43. Densidad de la arena. ....	126
Tabla 44. MVSS de la arena. ....	126
Tabla 45. MVSV de la arena.....	126
Tabla 46. Colorimetría de la arena. ....	127
Tabla 47. Porcentaje de partículas finas.....	128
Tabla 48. Porcentaje de absorción de la grava.....	128
Tabla 49. Densidad de la grava. ....	129
Tabla 50. MVSS de la grava. ....	129
Tabla 51. MVSV de la grava.....	130
Tabla 52. Granulometría de la grava.....	130
Tabla 53. Calidad del agua del laboratorio .....	131
Tabla 54. Características de los pétreos y cementante.....	132
Tabla 55. Cantidades dosificadas por 1m3. ....	132
Tabla 56. Cantidades dosificadas para cada mezcla. ....	133

## INDICE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema general del sistema de refinación .....	13
Ilustración 2. Residuos Sólidos Urbanos Por Entidad Federativa.....	16
Ilustración 3. Composición del cemento.....	21
Ilustración 4. Etapas en la producción tradicional del cemento portland.....	31
Ilustración 5. Etapas en la producción moderna del cemento portland, a través del proceso seco .....	33
Ilustración 6. Arena como agregado fino	Ilustración 7. Arena como agregado grueso
.....	41
Ilustración 8. Banco de agregados petreos .....	46
Ilustración 9. Tipos de fibras de polipropilemo. ....	54
Ilustración 10. Fibras de aramida. ....	55
Ilustración 11. Fibras de carbon .....	56
Ilustración 12. Fibras de nylon. ....	56
Ilustración 13. Micro-fibras de Polipropileno .....	57
Ilustración 14. Partes del Cabello Humano. ....	60
Ilustración 15. Capas circulares del tallo piloso.....	60
Ilustración 16. Morfología del cabello humano .....	62
Ilustración 17. Matraz Le Chatelier con Keroseno Li. ....	72
Ilustración 18. Peso del cemento.....	72
Ilustración 19. Keroseno con cementoLf. ....	73
Ilustración 20. Peso del cemento para densidad.....	74
Ilustración 21. Determinacion del agua optima. ....	75
Ilustración 22. Mezcaldo del cemento. ....	75
Ilustración 23. Moldeado de la esfera. ....	76
Ilustración 24. Se introduce a presión dentro del anillo cónico .....	76
Ilustración 25. Centrado con respecto a la barra .....	77
Ilustración 26. Consistencia normal .....	77
Ilustración 27. Agujas de Gillmore y pasta cementante.....	79
Ilustración 28. Procedimiento tiempo de fraguado con agujas Gillmore.....	79
Ilustración 29. Gava.	Ilustración 30. Arena. ....
Ilustración 31. Muestreo de los agregados petreos .....	81
Ilustración 32. Cuarteo Nanual de arena.	Ilustración 33. Cuarteo Manual de grava.
.....	83
Ilustración 34. Equipo para cuarteo mecanico .....	84
Ilustración 35. Cuarteo Mecánico de arena.	Ilustración 36. Cuarteo Mecánico de grava.....
.....	85
Ilustración 37. Secado y pesado de la arena para % de humedad actual.....	86
Ilustración 38. Molde tronconico. ....	86

Ilustración 39. Secado superficial de la arena. superficial.....	Ilustración 40. Verificación de humedad .....	87
Ilustración 41. Masa seca totalmente de arena. ....		88
Ilustración 42. Masa volumétrica seca y suelta.....		89
Ilustración 43. Masa Volumétrica Seca Varillada.....		90
Ilustración 44. Colorimetría en arena. ....		91
Ilustración 45. Sedimentación en arenas.....		92
Ilustración 46. Material que pasa la malla N° 200. ....		93
Ilustración 47. Densidad de la arena. ....		95
Ilustración 48. Humedad actual en grava.....		97
Ilustración 49. Densidad de la grava.....		99
Ilustración 50: Masa Volumétrica seca suelta de la grava.....		100
Ilustración 51. Masa volumétrica seca y varillada en grava.....		101
Ilustración 52. Análisis granulométrico en arena.....		102
Ilustración 53. análisis granulométrico de grava.....		104
Ilustración 54. Elaboración del concreto.....		106
Ilustración 55. Proporciónamiento de micro-fibra de polipropileno y de cabello humano....		107
Ilustración 56. adición de micro.fibras de polipropileno y cabello humano.....		107
Ilustración 57. Revenimiento.....		108
Ilustración 58. Revenimientos obtenidos de las micro-fibras.....		109
Ilustración 59. Moldes para especímenes.....		109
Ilustración 60. Elaboración de especímenes prismáticos y cilíndricos.....		110
Ilustración 61. Curado del concreto.....		112
Ilustración 62. Cabeceado de especímenes cilíndricos.....		114
Ilustración 63. Resistencia a la compresión simple.....		115
Ilustración 64. Resistencia a la flexión en Vigas.....		117
Ilustración 65. Resistividad eléctrica.....		120
Ilustración 66. Velocidad de pulso ultrasónico.....		123

## DEDICATORIAS

A mi Padre Herón Duarte Soto, quiero agradecerle por enseñarme la importancia de una formación académica la cual me llevaría a una tener una vida plena, la lucha constante por conquistar los retos con gran ímpetu y por supuesto con su gran ejemplo y hoy que ya no lo tengo a mi lado donde quiera que este quiero dedicarle este gran esfuerzo y decirle por fin lo logre Papi.

A mi Madre Flavia Montes de Oca Soto, quien desde que decidí estudiar esta carrera me dio su completo y total apoyo, sus palabras de motivación y confianza siempre han sido fundamentales a lo largo de mi vida, su gran ejemplo de fortaleza me da la esperanza de que todo se puede, gracias Mami.

A mi esposo Billy Kid Sandoval Martínez, su apoyo incondicional asido mi motor, las palabras de aliento y échale ganas siempre me motivaron a seguir adelante por ti por nuestro hijo y por mí, hoy todos nuestros esfuerzos se ven reflejados, gracias por ayudarme a que mis sueños se cumplan en tu compañía Te Amo.

A mi hijo Mauricio Sandoval Duarte, perdón por el tiempo ausente, pero siempre estaba pensando en ti a cada momento y el tiempo se pasaba largo para ver tu hermosa sonrisa que me reconfortaba cada día, hoy te dedico todo mi esfuerzo y espero que sea un ejemplo para ti de que todo se puede lograr con constancia. Eres mi razón de ser hijo.

A mis hermanos Jorge, Gabriela y Estefany, como mi papá siempre lo decía tu eres la mayor ponles el ejemplo a tus hermanos, hoy les dedico este trabajo y la culminación de una etapa más, tarde pero seguro, para que si de alguna manera les sirve tomen lo bueno que les puedo ofrecer, su animo a séguí adelante y su tiempo para escucharme en tiempos difíciles fueron fundamentales gracias hermanitos.

A todos mis familiares y amigos que de alguna manera siempre formaron parte importante de mis experiencias en la vida con su apoyo, palabras de aliento y consejo, con respeto y cariño gracias.

“NUNCA ES TARDE PARA EMPRENDER UN NUEVO RUMBO, VIVIR UNA NUEVA  
HISTORIA O CONSTRUIR UN NUEVO SUEÑO”

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por darme la vida, por llenarla de bendiciones, que me permiten llegar a concluir con mis metas y sueños, gracias por siempre darme esperanza y poner los medios para lograrlo, gracias por permitirme estar con los que más amo, y por rodearme de personas hermosas que me han ayudado a mi vida.

Gracias a mi Mami por siempre estar al pendiente de mis necesidades y ayudarme en todo, por tus consejos y esas largas charlas en las que siempre me reconfortas por todos los sacrificios que has tenido que hacer por mi superación, por tu cariño y amor que son fundamentales para mi corazón, gracias por todo.

Gracias esposo mío, no tengo palabras para poder agradecerte todo tu apoyo incondicional que me brindas a cada momento de mi vida, todos los sacrificios que has hecho para que yo estudie y siempre con buena actitud y ánimos para que no me desanimara, en verdad muchas gracias.

Gracias hijo por tu gran sonrisa, por tus hermosas palabras y tu mirada bella, en pocas palabras gracias por existir, eres lo mejor de mi vida.

Gracias hermanos por todos esos momentos de diversión y felicidad que compartimos alimentan mi alma y me llenan de amor, gracias por su palabras de aliento en los momentos difíciles y por qué siempre nos mantenemos unido a pesar de las diferencias.

Gracias a familiares y amigos por darme siempre una esperanza para seguir adelante.

Gracias a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por permitirme ser parte de ella. A la Facultad de Ingeniería Civil, por formarme como Ingeniero Civil y darme las bases necesarias para serlo. Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, departamento de Resistencia de Materiales, Corrosión y a toda persona que lo constituye, por brindarme las instalaciones, material y equipo necesario para desarrollar con éxito la presente investigación.

Gracias a mi asesor de tesis M. I. Noel Díaz González, por su gran apoyo para la realización de la presente investigación, gracias ingeniero por la disponibilidad que siempre mostró ante nuestro trabajo, por compartir su experiencia y conocimientos, por sus palabras de aliento, porque es un ejemplo a seguir como maestro y como ser humano, con respeto y cariño muchas gracias.

Gracias a mis compañeros de tesis Diana Ivonne López Gómez y Víctor Alfonso Carranza por los momentos intensos de trabajo que compartimos por los conocimientos compartidos, por sus palabras de apoyo y aliento y sobre todo las risas que no hicieron falta.

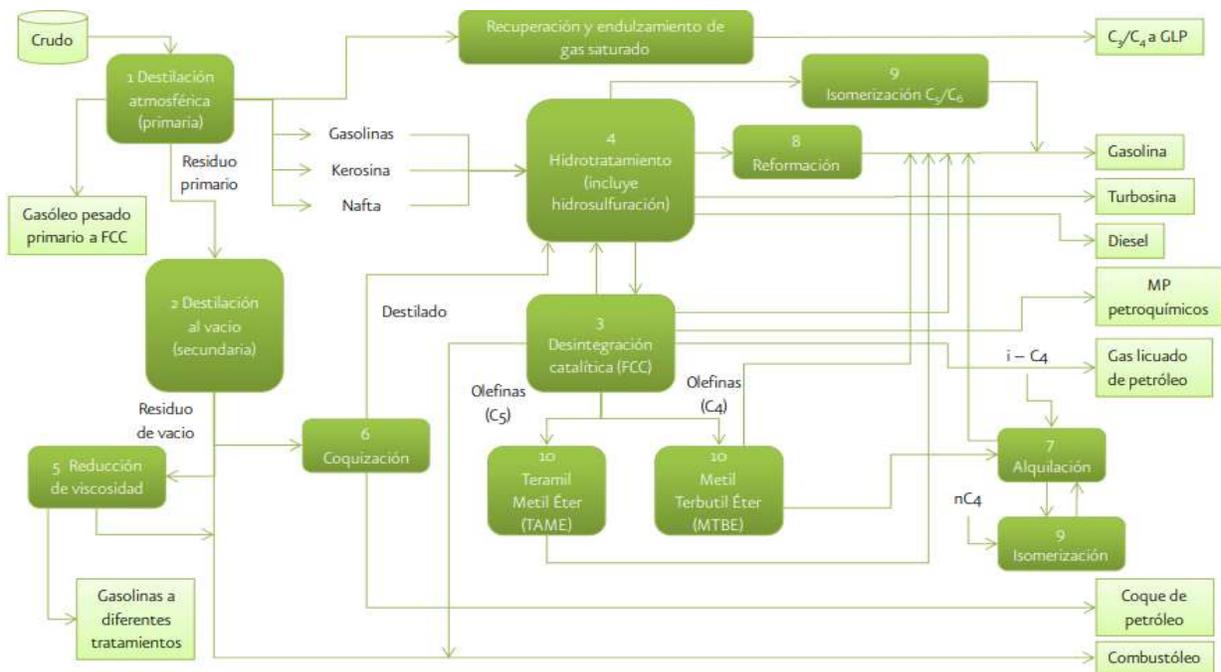
## JUSTIFICACION

El petróleo es un líquido oleoso bituminoso de color oscuro de origen natural que se formó hace miles de años, está compuesto por diferentes sustancias orgánicas que conforman una mezcla de hidrocarburos insolubles en agua en conjunto con azufre y oxígeno, se considera un combustible fósil no renovable y actualmente también es la principal fuente de energía y materia prima para la generación de una gran variedad de derivados entre los que se incluyen la mayoría de los plásticos.

El petróleo crudo no tiene uso; es por eso que se somete a un proceso de conversión de energía primaria a secundaria denominado refinación; procesos que se aplican al petróleo crudo con la finalidad de separar sus componentes útiles y, además adecuar sus características a las necesidades de la sociedad, en cuanto a productos terminados. Esta transformación se logra mediante los procesos físicos y químicos de: destilación atmosférica, destilación al vacío, hidrodesulfuración, desintegración térmica, desintegración catalítica, alquilación y reformación catalítica entre otros.

El Polipropileno es un termoplástico que es obtenido por la polimerización del propileno, subproducto gaseoso de la refinación del petróleo. Todo esto desarrollado en presencia de un catalizador, bajo un cuidadoso control de temperatura y presión.

Ilustración 1. Esquema general del sistema de refinación

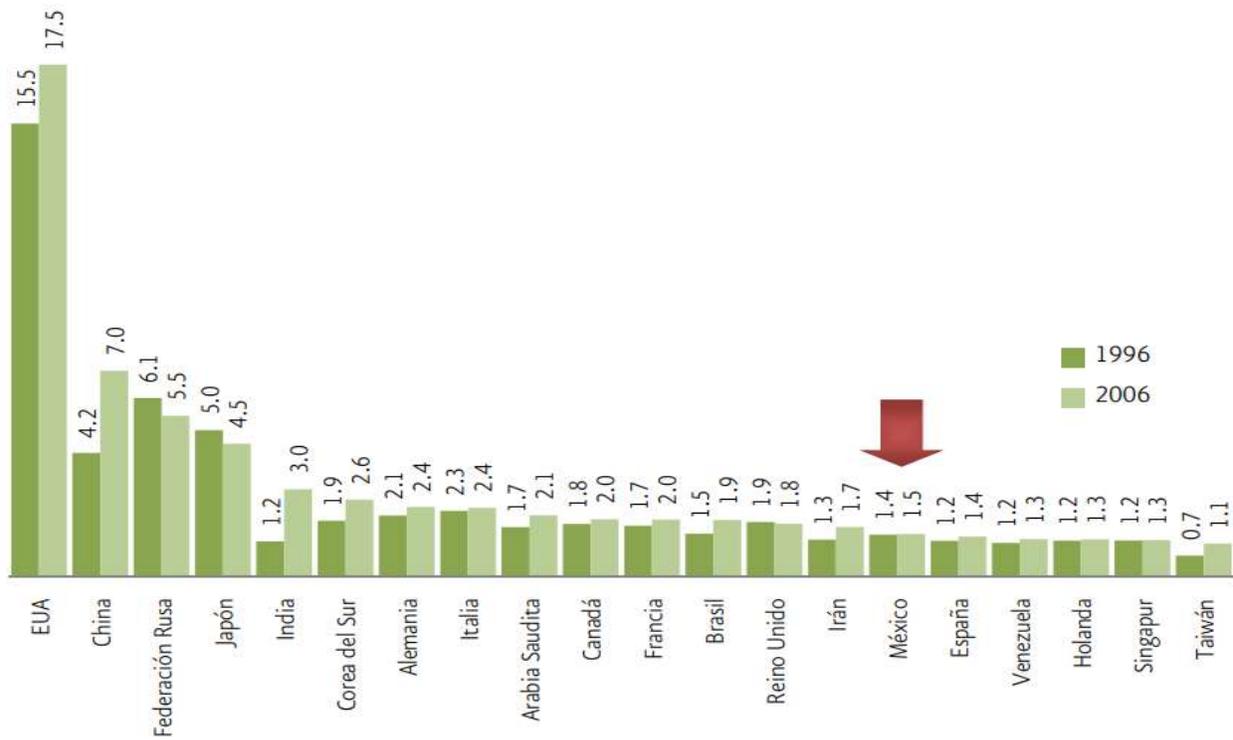


*Prospectiva de petrolíferos (SENER, 2011)*

Los procesos de alquilación comprenden la combinación de una olefina con un hidrocarburo parafínico o aromático, en presencia de un catalizador. El proceso involucra la unión de propileno o butilenos con isobutano, en presencia de ácido fluorhídrico o sulfúrico como catalizador, para formar una isoparafina denominada alquilado ligero.

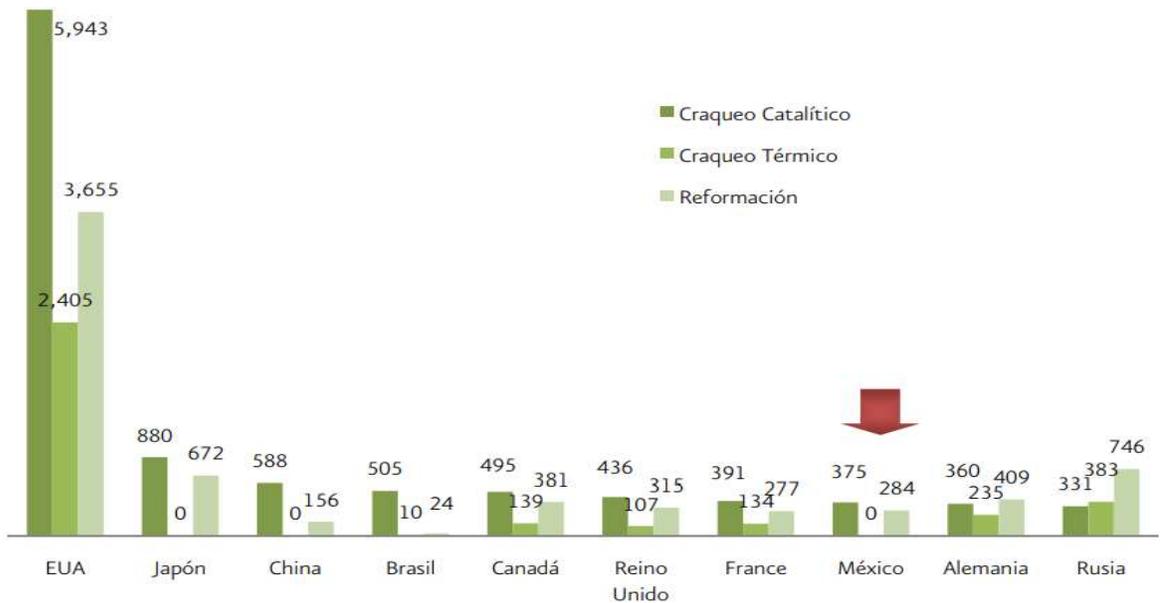
“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

Grafica 1. 1Capacidad de destilación primaria por país 1996 vs. 2006.



Energy Information Administration. (EIA, 2007)

Grafica 2. Capacidad de refinación por proceso 2006 (Miles de barriles diarios).



Energy Information Administration. (EIA, 2007)

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

Tabla 1. Número de refinerías por país 2006.

No.	País	Número de Refinerías*	No.	País	Número de Refinerías*
1	Estados Unidos	149	7	India	17
2	China	51	8	Alemania	15
3	Rusia	41	9	Brasil	13
4	Japón	31	10	Francia	13
5	Canadá	21	21	México	6
6	Italia	17		MUNDIAL	681

*Energy Information Administration. (EIA, 2007)*

Tabla 2. Las refinerías más grandes a nivel mundial 2007.

No.	Refinería	País	Miles de barriles diarios
1	Reliance Industries I	India	991
2	Paraguana Refining Complex	Venezuela	940
3	SK Energy Co., Ltd.	Corea del Sur	817
4	GS Caltex	Corea del Sur	650
5	ExxonMobil	Singapur	605
6	Reliance Industries II	India (en construcción)	580
7	ExxonMobil	Baytown, USA	557
8	S-Oil	Corea del Sur	520
9	Hovensa LLC	Islas Vírgenes	495
10	ExxonMobil	Baton Rouge, USA	493.5
	Salina Cruz, PEMEX	México	330

*(Gas., 2007.)*

Pemex tiene el 1.8% de la capacidad mundial, debido a estas estadísticas podemos observar que en México se obtiene y se refina una muy pequeña cantidad de petróleo y en el proceso se llevan a cabo factores que contaminan el aire, suelo y agua, causando daños irreversibles al ecosistema.

Por ello se vuelve muy significativo cualquier ahorro de este hidrocarburo que se pudiera utilizar en aspectos de primera necesidad para el ser humano.

Por tal motivo se planteó la alternativa de sustituir las microfibras de polipropileno por fibras de cabello humano, formado generalmente por queratina que le aporta resistencia, flexibilidad ,

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

elasticidad, durabilidad, al ser un elemento que al cortarlo se convierte en residuo sólido urbano según la SEMARNAT que generalmente termina en los depósitos de destino final sin darle ningún uso secundario, y al ser en cierta parte parecido a estas microfibras de polipropileno, se estudió su comportamiento en conjunto con el concreto.

De todos los residuos sólidos urbanos que resultan en el país, Michoacán se encuentra en el 5° lugar de los estados que más generan estos residuos con un 4.42%.

Ilustración 2. Residuos Sólidos Urbanos Por Entidad Federativa



([https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/323492/CTEIERSP\\_Sesio\\_n\\_abril\\_5\\_2018\\_RESIDUOS\\_SOLIDOS.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/323492/CTEIERSP_Sesio_n_abril_5_2018_RESIDUOS_SOLIDOS.pdf), s.f.)

## **HIPÓTESIS**

La utilización de fibras de cabello humano como adición en el concreto hidráulico, puede mejorar su comportamiento físico-mecánico, debido a sus propiedades morfológicas y así poder sustituir la utilización de aditivos de multifilamentos de polipropileno industrial para evitar los agrietamientos contribuyendo en la resistencia y durabilidad del mismo.

## **OBJETIVO**

Diseñar y Analizar el comportamiento físico y mecánico de un concreto adicionado con microfibras de polipropileno así como de fibras de cabello humano en comparación con un concreto convencional bajo condiciones controladas de laboratorio y evaluar su desempeño por resistencia mecánica y durabilidad.

Así mismo reducir la utilización de productos provenientes del petróleo sustancia no renovable, con la reutilización de un residuo como lo es el cabello humano y así conseguir un material ecológico y amigable con el medio ambiente para ser utilizado en obras civiles de alto desempeño.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

Diseñar las proporciones óptimas de un concreto de alta resistencia convencional, así como para las adiciones por separado de microfibras de polipropileno y fibras de cabello humano.

Elaborar especímenes necesarios para su ensaye de pruebas destructivas y no destructivas para analizar y comparar su comportamiento en referencia al concreto convencional.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las microfibras de polipropileno, se han implementado actualmente en el ámbito de la construcción como aditivos en concretos para pavimentos, cimentaciones, plataformas, losetas, cisternas, albercas, concreto lanzado, como reemplazo de mallas electro-soldadas y más. Estas actúan como refuerzo secundario en el concreto, con la finalidad principal de reducir los agrietamientos producidos por contracción plástica en concretos en estado fresco y por temperatura en estado endurecido, mejorar la resistencia al impacto, incrementar la resistencia a la fatiga, todo esto contribuye a la durabilidad del mismo. Sin embargo al ser un material producto de la destilación del petróleo fuente agotable en nuestro planeta se busca obtener nuevos materiales que lo sustituyan para reducir el impacto ambiental.

Se planteó la alternativa de sustituirlo por fibras de cabello humano, que están compuesto en su mayoría por queratina y posee propiedades muy interesantes para el tema de investigación como lo son la resistencia es decir un solo cabello puede aguantar 100 gr. de peso antes de romperse, su elasticidad la cual le permite alargarse hasta 25% de su tamaño, es permeable y tiene buena plasticidad así como ser muy durable, entre otras. Al cortarlo se convierte en desecho que generalmente termina en los depósitos de destino final sin darle ningún uso, por ello se pretende analizar su comportamiento en conjunto con el concreto, sus ventajas y desventajas.

Para llevar a cabo el estudio de esta investigación se han estructurado temas como “marco teórico” en el cual se efectúan algunas precisiones teórico-conceptuales que permitan comprender los componentes de nuestro concreto, así como antecedentes históricos. “Diseño de mezclas” estudio del método para la correcta dosificación de los materiales. “Metodología” procedimientos y pruebas a realizar durante las diferentes etapas de la investigación basadas en técnicas y normas mexicanas. En los “resultados y discusiones” se especifican los datos obtenidos así como un análisis de su comportamiento físico- mecánico. Y por último “Conclusión” se detallan los resultados principales, observaciones, ventajas y desventajas, así como las posibles futuras investigaciones.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes del concreto

El concreto, es un compuesto particulado en el cual tanto las partículas como la matriz son materiales cerámicos. En el concreto, la arena y un agregado grueso se unen en una matriz de cemento portland. Una reacción de cementación ente el agua y los minerales del cemento, genera una gel solido resistente que fija los agregados en su sitio, proporcionando al concreto una buena resistencia a la compresión.

Hoy en día, el uso del concreto, es uno de los materiales compuestos más utilizados en el mundo entero, para la construcción de una diversidad de edificaciones estructurales y no estructurales, que han abierto un enorme campo en la investigación, para su innovación y múltiples usos.

#### 2.1.1 Datos históricos

La historia del concreto, es la historia misma del hombre en la búsqueda de un espacio para vivir con la mayor comodidad, seguridad y protección posible. Desde que el ser humano supero la época de las cavernas, ha aplicado sus mayores esfuerzos a delimitar su espacio vital, satisfaciendo primero sus necesidades de vivienda y después levantando construcciones con requerimientos específicos. Templos, palacios, museos son el resultado del esfuerzo que constituye las bases para el progreso de la humanidad.

El pueblo egipcio en el año 2600 a.C. ya utilizaba un mortero, yeso impuro calcinado, mezcla de arena con materia cementosa para unir bloques y losas de piedra para sus asombrosas construcciones.

Los constructores griegos y romanos utilizaban caliza calcinada y, posteriormente, aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo y tejas quebradas. Este fue el primer concreto de la historia. Descubrieron que ciertos depósitos de ceniza volcánica, mezclados con caliza y arena producían un mortero de gran fuerza, capaz de resistir la acción del agua, dulce o salada. Un material volcánico muy apropiado para estas aplicaciones lo encontraron los romanos en un lugar llamado Pozzuoli, cerca de Vesubio con el que aun actualmente lo conocemos como pozzolona. El nombre de cemento puzolánico se utiliza hasta nuestros días para describir cementos obtenidos simplemente de moler materiales naturales a temperatura normal. Algunas de las estructuras romanas en las cuales la mampostería se unió con morteros, tales como el Coliseo en Roma y el Pont du Gard, cerca de Nimes, y estructuras de concreto tal como el Phanteon en Roma han sobrevivido hasta esta época, con su material cementante aún duro y firme. En las ruinas de Pompeya, a menudo el mortero se encuentra menos dañado por la intemperie que la piedra blanda.

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN,  
CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

Vitruvius señala que para fabricar el mortero se necesitan dos partes de puzolana por una parte de cal, grasa de animales, leche y sangre.

Investigaciones y descubrimientos a lo largo de miles de años, nos conducen a la Edad Media donde hubo una disminución general en la calidad y el uso del concreto. A la caída del imperio romano (Occidente 476 dC y Oriente 1453 dC) se perdió el arte de construir con concreto, que volvió a renacer hasta el siglo XVIII donde se observó un progreso en el conocimiento de los concretos. En 1756, John Smeaton fue comisionado para reconstruir el faro de Eddystone, en la costa de Cornish, Inglaterra, y descubrió que el mejor mortero se obtenía cuando se mezclaba puzolana con caliza que contenía una alta cantidad de material arcilloso. Al darse cuenta del importante papel de la arcilla, que hasta entonces no se consideraba conveniente, Smeaton fue el primero en conocer las propiedades químicas de la cal hidráulica, un material que se obtiene al quemar una mezcla de cal y arcilla. Con este conocimiento se desarrollaron otros tipos de cementos hidráulicos, en 1779 Bry Higgins registra una patente llamándolo “estuco”, para uso en acabados exteriores, en 1796 el "cemento romano" que obtuvo James Parker por calcinación de nódulos de caliza arcillosa que vinieron a culminar en la patente del "cemento portland" que obtuvo Joseph Aspdin en 1824, un ladrillero, albañil y constructor de Leeds. Este cemento fue preparado calentando una mezcla de arcilla finamente triturada y caliza dura en un horno, hasta eliminar el CO<sub>2</sub>; esta temperatura era mucho más baja que la necesaria para la formación de clinker. En 1936 se realiza la primera prueba sistemática de tensión y compresión en Alemania al concreto. El prototipo del cemento moderno lo obtuvo Isaac Johnson en 1845, quien quemó una mezcla de arcilla y caliza hasta formar clinker, con lo cual se produjo la reacción necesaria para la formación de un compuesto cementante.

En 1849 Petternkofer y Fuches llevan a cabo el primer análisis químico del cemento portland.

Tras la producción del nuevo cemento en 1868, se realiza el primer embarque de cemento Portland de Inglaterra a los Estados Unidos, debido a su gran incorporación en la industria de la construcción y su versatilidad en 1871, La compañía Coplay Cement produce el primer cemento Portland en los Estados Unidos. En 1904 La American Standard For Testing Materials (ASTM), publica por primera vez estándares de calidad para el cemento Portland.

En Mexico alrededor del año 1906 en C.D. Hidalgo Nuevo León se instala la primera fábrica para la producción de cemento en México, con una capacidad de 20,000 toneladas por año.

Actualmente y desde 1992 CEMEX se considera como el cuarto productor de cemento a nivel mundial con una producción de 93 millones de toneladas por año.

### 2.1.2 Composición

El concreto está conformado por cemento como aglutinante, agregados pétreos conformados por arena la cual ayuda a llenar los huecos lo que consigue un alto factor de compactación reduciendo la porosidad, la grava añade resistencia debido al entrelazamiento mecánico, agua como agente reactivo y aire arrastrado durante la elaboración y colocación del mismo.

Ilustración 3. Composición del cemento.

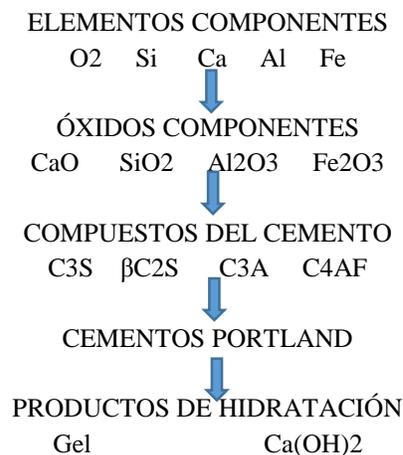


(Duarte, 2019)

La hidratación del cemento produce un gel solido que une las partículas del agregado, por tanto debe añadirse suficiente cemento para recubrir todas las partículas. El cemento típicamente abarca alrededor del 15% del volumen de los sólidos dentro del concreto.

La reacción química exotérmica mediante la cual el cemento portland se transforma en un agente de enlace, se produce en una pasta de cemento y agua en que los silicatos y aluminatos forman productos de hidratación como la Termorita, que con el paso del tiempo, producen una masa firme y dura durable y con resistencias mecánicas.

Dentro de esta pasta cementante se presentan 2 reacciones distintas. En la primera, se produce una adición directa de algunas moléculas de agua, lo cual constituye una reacción de hidratación real. El segundo tipo de reacción con agua es la hidrólisis.



Poco tiempo después de la hidratación de la matriz cementante se genera una rigidez en ella, es decir un cambio del estado plástico al sólido paulatinamente y generando calor dentro del concreto el cual conocemos como proceso de fraguado que se divide en fraguado inicial y fraguado final.

El fraguado inicial es causado por una hidratación selectiva de algunos componentes del cemento: los dos primeros en reaccionar son Aluminato tricálcico C3A y Silicato tricálcico C3S, pero la adición de yeso retrasa la formación del hidrato de aluminato de calcio y, por lo tanto, el C3S fragua primero. Formando cristales y el desarrollo de películas alrededor de los granos y la coagulación de los componentes.

A llegar a la etapa de fraguado final hay una disminución en la conductividad eléctrica y por lo tanto baja la temperatura dando paso al endurecimiento del concreto que es la progresiva y lenta adquisición de resistencia a lo largo del tiempo, generalmente a los 28 días después del fraguado se llega a la resistencia deseada de diseño pero si las condiciones son óptimas puede seguir durante años.

Muchos factores tienen influencia sobre las propiedades del concreto, algunos de los de mayor importancia son:

La proporción de agua-cemento ya que si se incrementa la proporción más allá del mínimo requerido para la trabajabilidad, se reduce la resistencia a la compresión del concreto y genera riesgo de agrietamiento.

La cantidad de aire que contenga es otro de los factores a cuidar en la elaboración y colocación del concreto ya que un exceso de este tiene menor resistencia.

Por último el tipo y cantidad de agregados son fundamentales y se determina en base a la densidad volumétrica de la arena y la grava para su óptima dosificación. (NEVILLE, 1999)

### 2.1.3 Tipos de concreto

Cada edificación es diferente y depende mucho del uso que se le vaya a dar a la estructura y el medio ambiente del lugar, es por ello que surge la necesidad de crear y diseñar diferentes tipos de concretos que sean factibles económicamente y que cumplan con las especificaciones requeridas para su funcionamiento.

Algunos ejemplos de las tecnologías de concreto premezclado con propiedades y funcionamiento especiales que maneja la empresa CEMEX de México son:

**Concreto Premezclado Estándar.-** El concreto premezclado estándar es la forma más común de concreto. Se prepara para su entrega en una planta de concreto en lugar de mezclarse en el sitio de la obra, lo que garantiza la calidad del concreto.

**Concreto Arquitectónico y Decorativo.-** Este tipo de concreto puede desempeñar una función estructural además de un acabado estético o decorativo. Puede ofrecer superficies o texturas lisas o ásperas además de una diversidad de colores.

**Concreto de Fraguado Rápido.-** Diseñado para elevar el desarrollo temprano de resistencia, este concreto permite retirar las cimbras más rápido, secuenciar la construcción aceleradamente, y una rápida reparación en proyectos como carreteras o pistas de aterrizaje. Típicamente se usa en el invierno para construir a bajas temperaturas (5-10°C). Este concreto también se puede utilizar en edificios, vías de ferrocarril y aplicaciones preformadas. Además, para ahorrar tiempo, esta tecnología de concreto ofrece una durabilidad mejorada y resistencia a los ácidos.

**Concreto Reforzado con Fibras.-** El concreto diseñado con fibras micro o macro puede usarse ya sea para aplicaciones estructurales, donde las fibras pueden potencialmente sustituir el reforzamiento con varilla de acero, o para reducir el encogimiento – especialmente el que sucede en etapa temprana. Las macro fibras pueden incrementar significativamente la ductilidad del concreto, haciendo que sea altamente resistente a la formación y propagación de grietas.

**Relleno Fluido.-** El mortero o concreto líquido simplifica el proceso de colocación de tuberías y cables al rodear al tubo o cable con una cubierta compacta que la protege, previene el asentamiento y permite a las cuadrillas trabajar rápido.

**Concreto Compactado con Rodillo.-** Compactado y curado en sitio, el concreto compactado con rodillo es un concreto de cero revenimiento con resistencia a la abrasión para soportar agua a alta velocidad, lo que lo hace el material de elección para sistemas de drenajes y otras estructuras sujetas a condiciones de alto flujo. Representa una solución competitiva en términos de costo y durabilidad al compararse con el asfalto.

**Concreto Autocompactante.-** El concreto autocompactante tiene un flujo muy alto; por lo tanto, es autonivelante, lo que elimina la necesidad de vibración. Debido a los plastificantes utilizados –mezclas químicas que le imparten un alto flujo– el concreto autocompactante exhibe muy alta compactación como resultado de su bajo contenido de aire. En consecuencia, el concreto autocompactante puede tener resistencias muy elevadas, llegando a rebasar 50 MPa.

**Concreto Poroso.-** Por su especial diseño de mezcla, el concreto poroso es un material sumamente permeable que permite que el agua, particularmente las aguas pluviales, se filtren por él, lo que reduce las inundaciones y la concentración calorífico por hasta 4° C, y ayuda a evitar los derrapes en los caminos mojados. Este concreto idealmente se usa en estacionamientos, andadores y orillas de alberca.

**Concreto Antibacteriano.-** Este concreto controla el crecimiento de las bacterias, ayudando a mantener ambientes limpios en estructuras tales como laboratorios, restaurantes y hospitales.

((<http://www2.cemex.com/ES/ProductosServicios/TiposConcreto.aspx>), s.f.)

### 2.1.4 Usos del concreto

El concreto en una estructura juega un papel muy importante debido a su versatilidad y manejabilidad ya que se puede utilizar desde los cimientos, el sistema estructural como columnas y vigas, las losas, los pavimentos y demás elementos.

Según el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. clasifica el concreto de la siguiente forma respecto a sus propiedades los usos, beneficios y especificaciones técnicas:

Tabla 3. CLASIFICACIÓN DE CONCRETOS POR SU RESISTENCIA:

TIPO	USOS	BENEFICIOS	INFORMACIÓN TÉCNICA
BAJA RESISTENCIA	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Losas aligeradas</li> <li>▪ Elementos de concreto sin requisitos estructurales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bajo costo</li> <li>▪ Propiedades elementales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Propiedades en estado fresco similares a las obtenidas en concretos convencionales</li> <li>▪ Resistencia a la compresión &lt; 150 Kg/cm<sup>2</sup></li> </ul>
RESISTENCIA MODERADA	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Edificaciones de tipo habitacional de pequeña altura</li> <li>▪ Edificaciones sencillas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bajo costo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Propiedades en estado fresco similares a las obtenidas en concretos convencionales</li> <li>▪ Resistencia a la compresión entre 150 y 250 Kg/cm<sup>2</sup></li> </ul>
NORMAL	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Todo tipo de estructuras de concreto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Funcionalidad</li> <li>▪ Disponibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Propiedades en estado fresco similares a las obtenidas en concretos convencionales</li> <li>▪ Resistencia a la compresión entre 250 y 420 Kg/cm<sup>2</sup></li> </ul>
MUY ALTA RESISTENCIA	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Columnas de edificios muy altos</li> <li>▪ Secciones de puentes con claros muy largos</li> <li>▪ Elementos presforzados</li> <li>▪ Disminución en los espesores de los elementos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mayor área aprovechable en plantas bajas de edificios altos</li> <li>▪ Elementos presforzados más ligeros</li> <li>▪ Elementos más esbeltos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alta cohesividad en estado fresco</li> <li>▪ Tiempos de fraguado similares a los concretos normales</li> <li>▪ Altos revenimientos</li> <li>▪ Resistencia a la compresión entre 400 y 800 Kg/cm<sup>2</sup></li> <li>▪ Baja permeabilidad</li> <li>▪ Mayor protección al acero de refuerzo</li> </ul>
ALTA RESISTENCIA TEMPRANA	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pisos</li> <li>▪ Pavimentos</li> <li>▪ Elementos presforzados</li> <li>▪ Elementos prefabricados</li> <li>▪ Construcción en clima frío</li> <li>▪ Minimizar tiempo de construcción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Elevada resistencia temprana</li> <li>▪ Mayor avance de obra</li> <li>▪ Optimización del uso de cimbra</li> <li>▪ Disminución de costos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Se garantiza lograr el 80% de la resistencia solicitada a 1 o 3 días</li> <li>▪ Para resistencias superiores a los 300 Kg/cm<sup>2</sup> se requiere analizar el diseño del elemento</li> </ul>

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN,  
CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

Tabla 4. CLASIFICACIÓN DE CONCRETOS POR SU PESO VOLUMÉTRICO:

TIPO	USOS	BENEFICIOS	INFORMACIÓN TÉCNICA
Ligero Celular (Alta trabajabilidad)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Capas de nivelación en pisos y losas</li> <li>▪ Para construcción de vivienda tipo monolítica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mejora al aislamiento termo-acústico</li> <li>▪ Alta trabajabilidad</li> <li>▪ Disminución de carga muerta</li> <li>▪ Proporciona mayor confort al usuario</li> <li>▪ Facil de aserrar y clavar</li> <li>▪ Mayor resistencia al fuego</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ P.V. de 1,500 a 1,920 kg/m<sup>3</sup></li> <li>▪ Resistencia a la compresión de hasta 175 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días</li> <li>▪ Conductividad térmica de 0.5 a 0.8 kcal/m<sup>2</sup>hoC</li> </ul>
Normal	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Todo tipo de estructuras en general</li> <li>▪ Elementos prefabricados</li> <li>▪ Estructuras voluminosas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mantiene una densidad en atención al funcionamiento de la estructura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Propiedades en estado fresco y endurecido similares a las obtenidas en los concretos convencionales</li> <li>▪ P.V. entre 2,200 y 2,400 kg/m<sup>3</sup></li> <li>▪ Resistencia a la compresión entre 100 y 350 kg/cm<sup>2</sup></li> </ul>
Pesado (Mejor relación resistencia/peso)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estructura de protección contra radiaciones</li> <li>▪ Elementos que sirven como lastre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Elevado peso volumétrico</li> <li>▪ Mejor relación resistencia/peso</li> <li>▪ Disminución de espesor en los elementos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ P.V. entre 2,400 y 3,800 kg/m<sup>3</sup></li> <li>▪ Resistencia a la compresión igual a la obtenida en los concretos normales</li> </ul>

Tabla 5. CLASIFICACIÓN DE CONCRETOS POR SU CONSISTENCIA:

TIPO	USOS	BENEFICIOS	INFORMACIÓN TÉCNICA
Fluido	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rellenos</li> <li>▪ Estructuras con abundante acero de resuerzo</li> <li>▪ Bombeo a grandes alturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Facilita las operaciones de colocación y acabado</li> <li>▪ Facilita las operaciones de bombeo</li> <li>▪ Propicia el ahorro en mano de obra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Revenimiento superior a 19 cm, es decir tiene una consistencia fluida</li> <li>▪ Resistencia a la compresión igual a las logradas por los concretos convencionales</li> </ul>

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN,  
CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

TIPO	USOS	BENEFICIOS	INFORMACIÓN TÉCNICA
Normal o Convencional	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Todo tipo de estructuras de concreto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tener una consistencia de mezcla adecuada para cada tipo de estructura, en atención a su diseño</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Revenimiento entre 2.5 y 19 cm, lo cual considera las zonas de consistencia semi-fluida /12.5 a 19 cm, plástica / 7.5 a 12.5 cm, semi-plástica 2.5 a 7.5 cm</li> <li>▪ Resistencia a la compresión igual a las logradas por los concretos convencionales</li> </ul>
Masivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Colados en elementos de gran dimensión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ahorro en materia prima y mano de obra</li> <li>▪ Bajo desarrollo en el calor de hidratación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Revenimiento entre 2.5 y 5 cm</li> <li>▪ Resistencia a la compresión igual a las logradas por los concretos convencionales</li> </ul>
Sin revenimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Concretos que no se colocan bajo los métodos convencionales empleados en la industria de concreto premezclado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bajo consumo de cemento</li> <li>▪ Facilita las operaciones de colocación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Revenimiento de 2.5 cm</li> <li>▪ Resistencia a la compresión máxima de 150 kg/cm<sup>2</sup></li> </ul>

*(<http://www.imcyc.com/concreto/>, s.f.)*

### 2.1.5 Durabilidad y agrietamiento del concreto

La durabilidad del concreto se puede definir como la habilidad del concreto en resistir a la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades. Los diferentes tipos de concreto necesitan de diferentes durabilidades, dependiendo de la exposición del ambiente y de las propiedades deseables. Los componentes del concreto, la proporción de éstos, la interacción entre los mismos y los métodos de colocación y curado determinan la durabilidad final y la vida útil del concreto. (Steven H. Kosmatka, 2004)

#### 2.1.5.1 Micro-agrietamiento

Se ha demostrado que existen grietas muy finas en la interface entre el agregado grueso y la pasta de cemento, de hecho, aun antes de la aplicación de la carga sobre el concreto. Es probable que ellas se deban a las inevitables diferencias en propiedades mecánicas entre el agregado grueso y la pasta de cemento hidratado, asociadas con la contracción o el movimiento térmico. El microagrietamiento no sólo se ha observado en concreto de resistencia normal, sino también en concreto de curado húmedo, con una relación agua/cemento tan baja como 0.25, que nunca había estado sujeto a carga. Los microagrietamientos antes de la carga son ampliamente responsables de la baja resistencia a la tensión del concreto.

Los micro-agrietamientos no se han definido universalmente desde el punto de vista del tamaño, pero se ha sugerido un límite máximo de 0.1 mm este es el tamaño más pequeño que puede identificarse comúnmente a simple vista.

Para propósitos de ingeniería, un límite menor puede tomarse como la grieta más pequeña que puede observarse utilizando un microscopio óptico. A medida que se aplica una carga creciente, estos microagrietamientos permanecen estables hasta aproximadamente 30% o más de la carga final, y entonces comienzan a aumentar en longitud, ancho y número. El esfuerzo al cual se desarrollan es sensible a la relación agua/cemento de la pasta. Esta es la etapa de propagación lenta del agrietamiento.

Una vez que se aplica un mayor incremento de carga, de 70 a 90% de la resistencia final, se propagan grietas a través del mortero (pasta de cemento y agregado fino); ellas se enlazan con las grietas de adherencia, así que se forma un patrón continuo de agrietamiento. Esta es la etapa de rápida propagación del agrietamiento. El nivel de esfuerzo en esta etapa es mayor en concreto de alta resistencia que en concreto normal. El incremento en la longitud acumulada de los microagrietamientos es grande; esto fue medido utilizando radiografía de neutrones. Sin embargo, el concreto de alta resistencia muestra una menor longitud acumulada.

El comienzo de la etapa de rápida propagación de grietas corresponde al punto de discontinuidad en la deformación volumétrica. Si se sostiene la carga, puede producirse la falla con el tiempo. Esto sucede en concretos tanto de resistencia normal como en el de alta resistencia.

El análisis precedente ha mostrado que el microagrietamiento es una característica general del concreto. Mientras las grietas permanecen estables, su presencia no causadaño. Paradójicamente, mientras que la interface entre el agregado grueso y la pasta de cemento hidratada es el lugar de los primeros microagrietamientos, la presencia de partículas de agregado grueso es la que previene la apertura de una sola grieta amplia; estas partículas actúan como supresoras de microagrietamientos. Así, la heterogeneidad del concreto es benéfica. Las superficies de adherencia agregado-pasta forman todos los posibles ángulos con la dirección de la fuerza externa. Como resultado, el esfuerzo local varía considerablemente arriba y abajo del esfuerzo nominal aplicado. (NEVILLE, 1999)

## 2.2 Cemento

El cemento portland es un polvo fino, material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas que cuando se mezcla con el agua se convierte en un pegamento que mantiene los agregados unidos en el concreto, el cual le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto, el material de construcción más versátil y más usado en el mundo.

### 2.2.1 Materiales que conforman el cemento.

El cemento portland se produce por la pulverización del clínker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos. El clínker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroatuminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se adiciona una pequeña cantidad para controlar el tiempo de fraguado, todo esto se muele conjuntamente con el clínker para la fabricación del producto final.

Tabla 6. COMPUESTOS PRINCIPALES DEL CEMENTO.

COMPUESTOS PRINCIPALES DEL CEMENTO PORTLAND		
NOMBRE DEL COMPUESTO	COMPOSICION DE ÓXIDO	ABREVIATURA
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Aluminoferrita tetracálcica	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF

(NEVILLE, 1999)

Los materiales usados para la producción del cemento portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina e hierro. Muchos productos y subproductos industriales tienen potencial como materia prima para la producción del cemento portland como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7. Fuentes de las Materias Primas Usadas y la Fabricación del Cemento Portland.

Cal, CaO	Hierro Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sílice SiO <sub>2</sub>	Alúmina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yeso o Sulfato CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O
Desechos industriales Aragonita* Calcita* Polvo del horno de cemento Roca calcárea Creta Arcilla Greda Caliza* Mármol Marga* Coquilla Esquisto* Escoria	Polvo de humo de horno de fundición Mineral de hierro* Costras de lamido* Lavaduras de mineral Cenizas de pinta Esquisto	Silicato de calcio Roca calcárea Arcilla* Ceniza volante Greda Caliza Loes Marga* Lavaduras de mineral Cuarcita Ceniza de arroz Arena* Arenisca Esquisto* Escoria Basalto	Mineral de aluminio* Bauxita Roca calcárea Arcilla* Escoria de cobre Ceniza volante* Greda Granodiorita Caliza Loes Lavaduras de mineral Esquisto* Escoria Estaurolita	Anhidrita Sulfato de calcio Yeso*

\* Las fuentes más comunes (Steven H. Kosmatka, 2004)

### 2.2.2 Proceso de fabricación del cemento

El nombre de cemento portland, concebido originalmente debido a la semejanza de color y calidad entre el cemento endurecido y la piedra de portland una caliza obtenida en una cantera de Dorset, se ha conservado en todo de mundo hasta nuestros días para describir un cemento que se obtiene al mezclar minuciosamente en ciertas proporciones materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen calcio (CaO), sílice (SiO<sub>2</sub>), alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxidos de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), que se consideran como la materia prima, quemándolos a altas temperaturas para la formación de clinker y posteriormente la molienda de este.

Dentro de las diferentes etapas del proceso de la fabricación del cemento y de haber obtenido la materia prima, se hacen análisis químico frecuente de todos los materiales para garantizar una calidad alta y uniforme del cemento.

La trituration y la mezcla de las materias primas pueden efectuarse tanto en condiciones húmedas como secas; de aquí provienen los nombres de proceso "húmedo" o "seco". En la actualidad, el método de fabricación depende también de la dureza de la materia prima empleada y de su contenido de humedad.

En el proceso húmedo. Cuando se emplea marga, se la tritura finamente y se la dispersa en agua en un molino de lavado, el cual es un pozo circular con brazos revolventes radiales con rastrillos, que rompen los aglomerados de materias sólidas. La arcilla también se tritura y se mezcla con agua, generalmente en un molino de lavado semejante al anterior. En seguida se bombean las dos

mezclas, de forma tal que se mezclan en proporciones determinadas y pasan a través de una serie de cribas. La lechada que resulta de este proceso fluye a estanques de almacenamiento.

Si se emplea caliza, ésta debe barrenar se, triturarse generalmente en dos trituradoras, una más pequeña que la otra, y luego depositarse en un molino de bolas, con la arcilla dispersa en agua. Allí se continúa el molido de la caliza hasta lograr la finura de harina, y la lechada resultante se bombea a estanques de almacenamiento. De aquí en adelante, el proceso es el mismo, sin tomar en cuenta la naturaleza original de las materias primas.

La lechada es un líquido de consistencia cremosa, con un contenido de agua entre 35 y 50 %, y solo una pequeña fracción del material, alrededor del 2%, es mayor que la abertura que pasa el tamiz de 90 $\mu$ m (ASTM-170). Para su almacenamiento generalmente se guarda la lechada en varios tanques de almacenamiento; la sedimentación de los sólidos suspendidos se impide mediante agitación mecánica o por burbujeo de aire comprimido. El contenido de cal de la lechada lo determina la proporción de materiales calcáreos y arcillosos originales. Para obtener la composición química requerida, puede efectuarse un ajuste final mezclando lechadas de diferentes tanques de almacenamiento, utilizando en la mayoría de las veces un sistema de tanques de mezclado. De manera contraria y ocasional, existe la planta más nórdica del mundo, en Noruega, la materia prima es una roca de composición tal que solo se tritura y no requiere ninguna combinación.

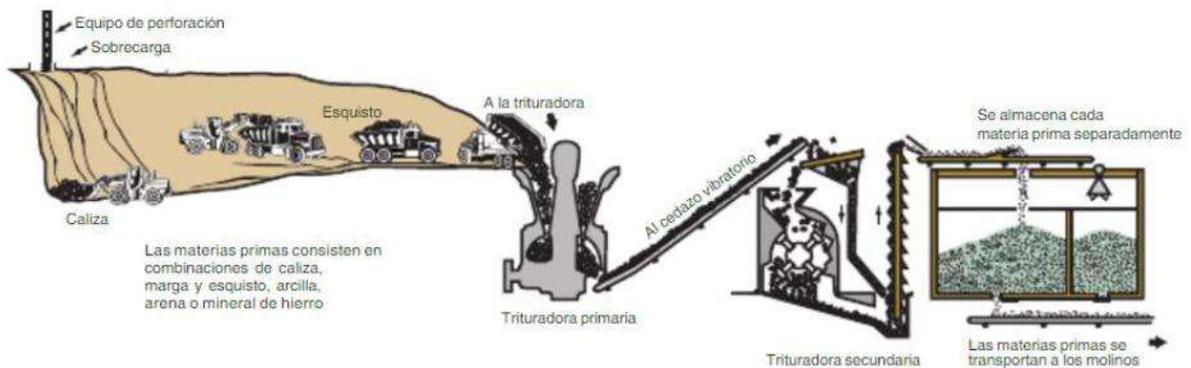
La lechada con el contenido de cal deseado pasa a un horno rotatorio, que consta de un cilindro de acero de gran tamaño, recubierto de material refractario, con diámetro interior hasta de 8m y una longitud que a veces alcanza 230m, el cual gira lentamente alrededor de su eje, levemente inclinado hacia la horizontal. La lechada se deposita en el extremo superior del horno, mientras se añade carbón pulverizado mediante la inyección de aire en el extremo inferior, donde la temperatura alcanza de 1,450 a 1,500°C. El carbón, que no debe contener demasiada ceniza, merece especial mención, puesto que se consumen habitualmente 220kg de carbón para la fabricación de una tonelada de cemento.

Cuando la lechada desciende dentro del horno, encuentra progresivamente mayores temperaturas, eliminando el agua y liberando el contenido de CO<sub>2</sub>; posteriormente, el material seco sufre una serie de reacciones químicas hasta que, finalmente, en la parte más caliente del horno, de 20 a 30% del material se vuelve líquido y la cal, la sílice y la alúmina vuelven a combinarse. La masa que resulta de esta combinación, se funde en esferas de diámetro que varían entre 3 y 25mm, conocidas como clínke, este cae dentro de enfriadores de diferentes tiempos que a menudo favorecen un intercambio de calor con el aire que luego se utiliza para la combustión del carbón pulverizado. El horno tiene que operar continuamente a una temperatura de 1,650 °C, asegurando un régimen constante, y con ello la uniformidad del clínker, y también para reducir el deterioro del forro refractario, se trituran las esferas, para después secarlas y reduciendo su tamaño

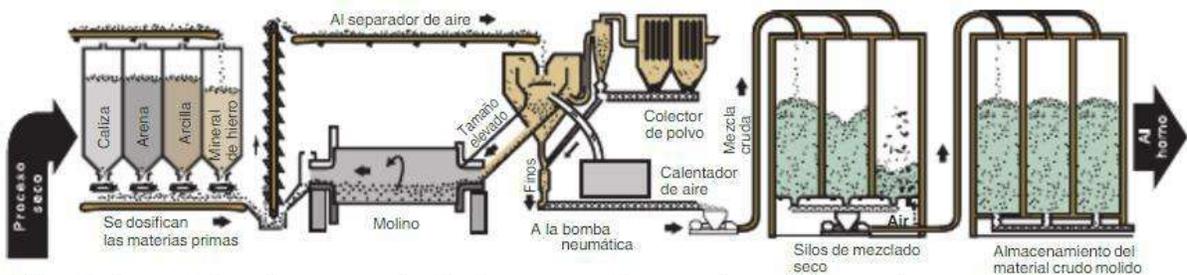
“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

a un polvo fino. El polvo seco o grano molino, se bombea al silo de mezclado y se ajusta en las proporciones de los materiales que se requieren para la manufactura del cemento. Para obtener una mezcla íntima y uniforme, se mezcla el grano, generalmente bombeando por turnos aire comprimido, induciendo un movimiento ascendente del polvo y reduciendo su densidad aparente. El material aireado en todos los cuadrantes del silo se comporta como un líquido, el cual mediante un periodo de alrededor de una hora, resultando una mezcla uniforme.

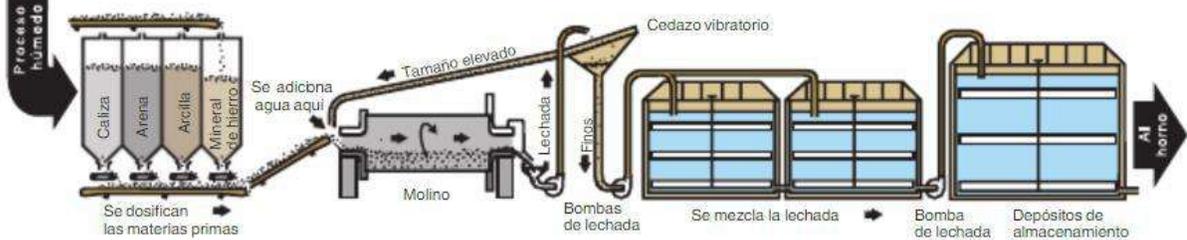
Ilustración 4. Etapas en la producción tradicional del cemento portland.



1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces se almacenar.

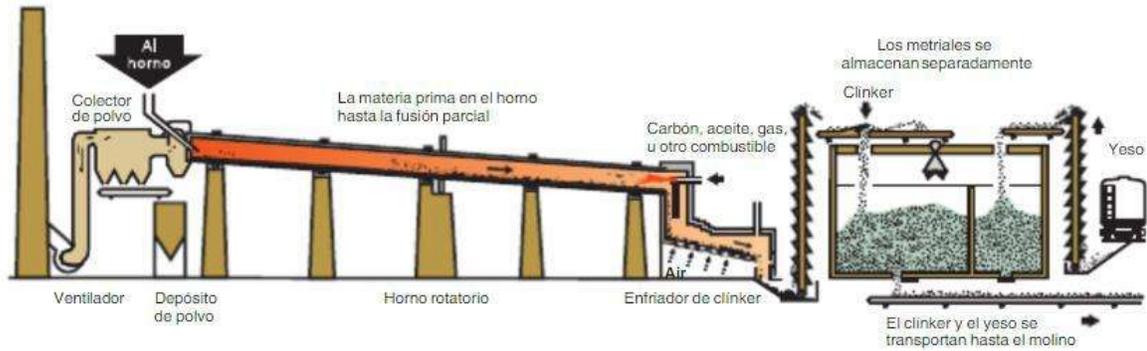


2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan en polvo y se las mezcla.

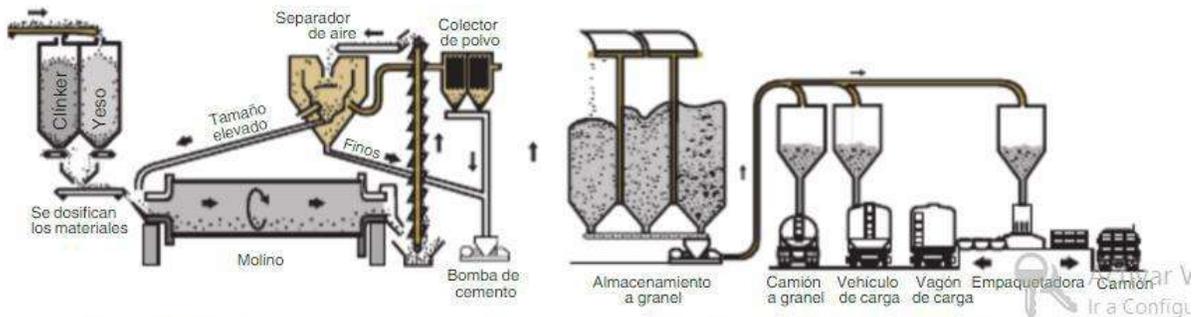


2. Las materias primas se muelen, se mezclan con el agua para formar una lechada y se mezclan

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”



3. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clínker de cemento.



4. Se muele el clínker junto con el yeso para convertirlos en cemento portland y se lo despacha.

(Steven H. Kosmatka, 2004)

El proceso seco el grano crudo con un contenido de humedad de cerca de 0.2 por ciento, se hace pasar, previo a introducirlo al horno, por un precalentador con una temperatura cerca de 800 °C, generalmente de tipo de suspensión. El horno puede tener un tamaño mucho menor al que se encuentra en el proceso por vía húmeda, debido a que el grano crudo ya ha sido precalentado y no tiene que eliminarse su humedad. La mayor parte del grano crudo puede pasarse a través de un calcinador fluidizado con temperatura de alrededor de 820 °C (que usa una fuente de calor separada) introducido entre el precalentador y el horno. El precalentamiento utiliza el gas caliente que sale del horno, debido a que contiene una porción importante de álcalis volátiles y cloruros.

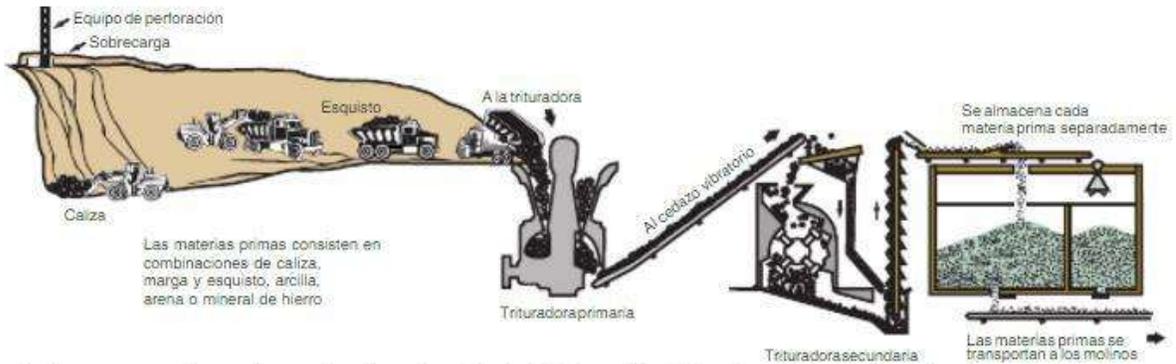
El efecto del calcinador fluidizado es aumentar la descarbonatación (disociación de  $\text{CaCO}_3$ ) del grano crudo antes de entrar al horno y así aumentar en forma importante la rapidez de producción del horno.

A diferencia del proceso seco y en semejanza con el húmedo, en el proceso semiseco, el grano molido crudo y mezclado se pasa por un tamiz y se deposita en una cuba giratoria llamada granulador, agregándole agua en un 12% del peso del grano molido adicionado y formándose con esto pastillas duras con un diámetro interior de 15mm aproximadamente. Las pastillas se hornean en una rejilla de precalentamiento, mediante gases calientes del horno, hasta endurecer. Después de esta etapa las pastillas se meten al horno y sus operaciones posteriores son las mismas que en el proceso de fabricación en húmedo. El horno utilizado en este proceso es de dimensiones

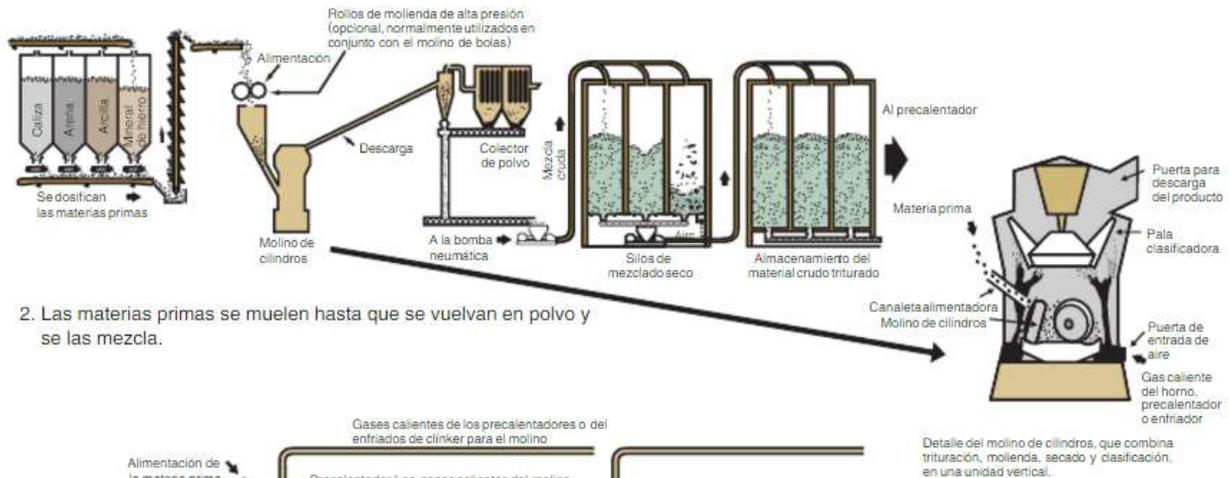
“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

considerablemente menores, así como la cantidad de calor, comparado con el empleado en el proceso húmedo, debido a que el contenido de humedad de las pastillas es de sólo 12%. Este proceso es bastante económico (si las materias primas se encuentran relativamente secas) y el consumo total de carbón es pequeño como 100 kg por tonelada de cemento.

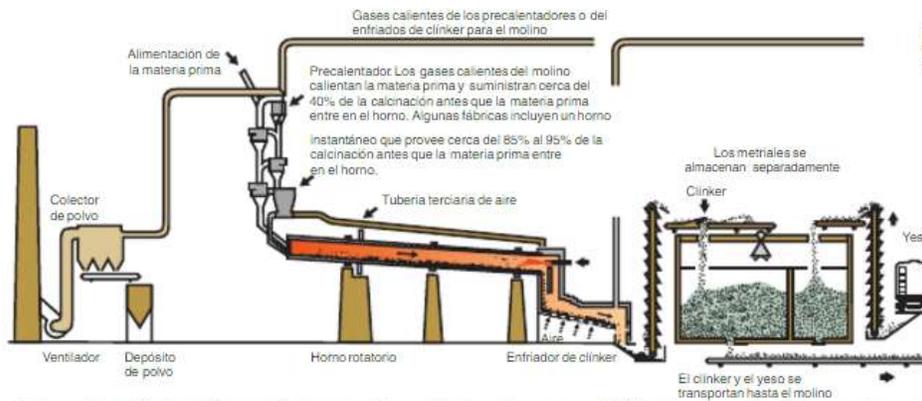
Ilustración 5. Etapas en la producción moderna del cemento portland, a través del proceso seco



1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces se almacenan.

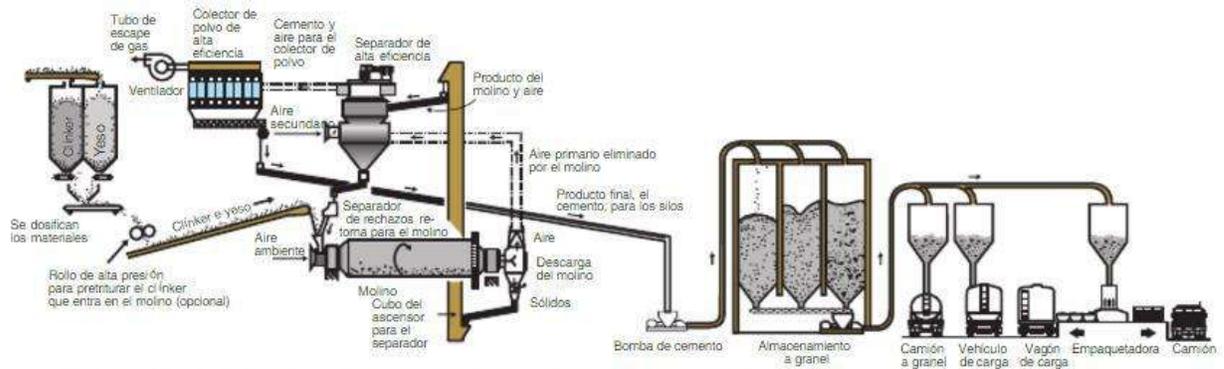


2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan en polvo y se las mezcla.



3. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clinker de cemento. Observe el precalentador de cuatro etapas, el horno instantáneo y el horno con menor longitud.

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”



4. Se muele el clinker junto con el yeso para convertirlos en cemento portland y se lo despacha.

(Steven H. Kosmatka, 2004)

Sea cual sea el proceso de producción, se requerirá una mezcla íntima y uniforme de las materias primas, ya que una parte de las reacciones dentro del horno ocurren por difusión en materiales sólidos. Ahora bien a la salida del horno, siendo de igual manera cualquier tipo de proceso, el clinker se enfría obteniendo características particulares de un color negro, brillante y duro, para posteriormente mezclarlo con yeso para evitar un fraguado relámpago del cemento.

El sistema de molienda de circuito cerrado es empleado en casi todas las fábricas. La molienda se hace en un molino de varios compartimentos con bolas que progresivamente reducen su tamaño, precedido esto en algunas veces por el paso a través de una prensa de rodillo. El cemento que descarga el molino pasa por un separador, removiendo las partículas finas para el silo de almacenaje con una corriente de aire, mientras que las partículas gruesas se pasan una vez más a través del molino. La molienda de circuito cerrado evita la producción de una cantidad grande de material excesivamente fino o de una cantidad pequeña de material demasiado grueso. El rendimiento de un molino de bolas se puede mejorar con la molienda previa del clinker en una trituradora de impacto horizontal.

Cuando el cemento se haya molido satisfactoriamente, teniendo como  $1.1 \times 10^{12}$  partículas por kg, entonces se encontrará listo para el transporte a granel. Existen otros tipos de cemento que siempre se empaican en sacos o tambores, los cuales son el cemento blanco, hidrofóbico, expansivo, de fraguado controlado, para pozo de petróleo y de alta alúmina. En el mundo los sacos de 25 kg se están volviendo populares.

La producción de cemento no es siempre en cantidades grandes, cuando se requiere producir pequeñas cantidades, se emplea un horno vertical tipo Gottlieb, el cual arroja nódulos de grano crudo y polvo fino de carbón combinados y produce clinker aglomerado, triturándolo posteriormente. China utiliza miles de estos hornos, teniendo una altura y produciendo hasta 300 toneladas de cemento al día.

Existen también otros procesos de fabricación de cemento, como lo es uno que emplea yeso en vez de cal, utilizando un horno rotatorio en donde se quema yeso, arcilla y coque con arena y óxido de hierro, teniendo como productos finales el cemento portland y dióxido de azufre, el cual es posteriormente convertido en ácido sulfúrico.

### 2.2.3 Propiedades del cemento

#### 2.2.3.1 Propiedades químicas

En los temas anteriores ya se ha mencionado sobre los elementos que conforman el cemento y sus reacciones químicas en presencia de su agente rector el agua, por lo que estos compuestos se hidratan (se combinan químicamente con el agua) para formar nuevos compuestos, los cuales son la infraestructura de la pasta de cemento endurecida en el concreto. Los silicatos de calcio, C3S y C2S, se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado (arcaicamente llamado gel de tobermorita). El cemento portland hidratado contiene del 15% al 25% de hidróxido de calcio y aproximadamente 50% de silicato de calcio hidratado, en masa. La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente al silicato de calcio hidratado. El C3A reacciona con el agua y el hidróxido de calcio para formar aluminato tetracálcico hidratado. El C4AF reacciona con el agua para formar ferroaluminato de calcio hidratado. El C3A, sulfato (yeso, anhidrita u otra fuente de sulfato) y el agua se combinan para formar etringita (trisulfoaluminato de calcio hidratado), monosulfato de calcio y otros compuestos afines. Estas transformaciones básicas de los compuestos se presentan en la Tabla.

Tabla 8. Principales reacciones de Hidratación de los Compuestos del Cemento Portland  
(Expresados en óxidos)

2 (3CaO·SiO <sub>2</sub> ) Silicato tricálcico	+ 11 H <sub>2</sub> O agua	= 3CaO·2SiO <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ 3 (CaO·H <sub>2</sub> O) Hidróxido de calcio
2 (2CaO·SiO <sub>2</sub> ) Silicato dicálcico	+ 9 H <sub>2</sub> O agua	= 3CaO·2SiO <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ CaO·H <sub>2</sub> O Hidróxido de calcio
3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Aluminato tricálcico	+ 3 (CaO·SO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O) Yeso	+ 26 H <sub>2</sub> O agua	= 6CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3SO <sub>3</sub> ·32H <sub>2</sub> O Etringita
2 (3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Aluminato tricálcico	+ 6CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3SO <sub>3</sub> ·32H <sub>2</sub> O Etringita	+ 4 H <sub>2</sub> O agua	= 3 (4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SO <sub>3</sub> ·12H <sub>2</sub> O) Monosulfoaluminato de calcio
3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Aluminato tricálcico	+ CaO·H <sub>2</sub> O Hidróxido de calcio	+ 12 H <sub>2</sub> O agua	= 4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·13H <sub>2</sub> O Aluminato tetracálcico hidratado
4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Ferroaluminato tetracálcico	+ 10 H <sub>2</sub> O agua	+ 2 (CaO·H <sub>2</sub> O) Hidróxido de calcio	= 6CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·12H <sub>2</sub> O Ferroaluminato de calcio hidratado

(Steven H. Kosmatka, 2004)

La hidratación ocurre a una temperatura que afecta enormemente el índice de desarrollo de calor, lo cual, el mismo calor total producido a lo largo de un periodo más prolongado puede disiparse en grado mayor, con el consiguiente aumento menor en la temperatura. El calor de la hidratación depende de la composición química del cemento, y es aproximadamente igual a la suma de los calores de hidratación de los componentes individuales puros, cuando sus proporciones respectivas en la masa se hidratan por separado, al disminuir las proporciones de C3A y C3S, el calor de hidratación del cemento, así como, su índice de incremento se reducirá. (Knudsen, 1976)

Tabla 9. CALOR DE HIDRATACIÓN.

CALOR DE HIDRATACIÓN DE LOS COMPUESTOS PUROS		
COMPUESTO	CALOR DE HIDRATACIÓN	
	J/g	Cal/g
C3S	502	120
C2S	260	62
C3A	867	207
C4AF	419	100

(NEVILLE, 1999)

La fisura del cemento afecta el índice de incremento de calor, pero no la cantidad total de calor liberada, que puede ser controlada por la cantidad de cemento (riqueza) en la mezcla del concreto. En contraste con la posibilidad de predecir el calor de hidratación del cemento a partir de sus componentes constitutivos, no ha sido posible predecir la resistencia del cemento hidratado con base en su composición.

### 2.2.3.2 Propiedades físicas

Las propiedades físicas le dan la esencia a cada tipo de cemento; dentro de ellas se encuentran como las más importantes: densidad, finura, consistencia normal, tiempos de fraguado y expansión.

**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 Portland normal, suele estar muy cercano a 3.15 g/cm<sup>3</sup>. 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 g/cm<sup>3</sup>, 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%.

#### **Tiempos de fraguado:**

a. **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que la pasta plástica formada por la hidratación del cemento pierde su fluidez, llegando a disminuir su viscosidad y por tanto su plasticidad.

b. **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 endurece.

c. **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.

d. **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 desprende calor en forma apreciable y si la pasta se remezcla sin adicionar agua, se restablece su plasticidad sin afectar el fraguado y la resistencia (CONCRETO., 1997).

#### **2.2.3.3 Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas son: resistencia a la compresión, tensión y flexión.

#### **2.2.4 Clasificación del cemento**

En la industria cementera se fabrican diferentes tipos de cemento Portland para satisfacer varios requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas de los concretos. Los cementos Portland se producen mundialmente de acuerdo con las especificaciones ASTM C 150-16, AASHTO M 85 o ASTM C 1157.

Detallando de manera general la función de cada uno de los 5 tipos de cemento tenemos las siguientes especificaciones:

**Tipo I.** Es un cemento para uso general, apropiado para todos los usos donde las propiedades especiales de otros cementos no sean necesarias. Sus empleos en concreto incluyen pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tanques, embalses, tubería, unidades de mampostería y productos de concreto prefabricado y precolado.

**Tipo II.** El cemento tipo II se usa donde sean necesarias precauciones contra el ataque por sulfatos. Se lo puede utilizar en estructuras normales o en miembros expuestos a suelos o agua subterránea, donde la concentración de sulfatos sea más alta que la normal pero no severa. El cemento tipo II tiene propiedades de moderada resistencia a los sulfatos porque contiene no más del 8% de aluminato tricálcico (C3A).

**Tipo III.** El cemento tipo III ofrece resistencia a edades tempranas, normalmente una semana o menos. Este cemento es química y físicamente similar al cemento tipo I, a excepción de que sus partículas se muelen más finamente. Es usado cuando se necesita remover las cimbras (encofrados) lo más temprano posible o cuando la estructura será puesta en servicio rápidamente. En clima frío, su empleo permite una reducción en el tiempo de curado. A pesar de que se puede usar un alto contenido de cemento tipo I para el desarrollo temprano de la resistencia, el cemento tipo III puede ofrecer esta propiedad más fácilmente y más económicamente.

**Tipo IV.** El cemento tipo IV se usa donde se deban minimizar la tasa y la cantidad de calor generado por la hidratación. Por lo tanto, este cemento desarrolla la resistencia en una tasa más lenta que otros tipos de cemento. Se puede usar el cemento tipo IV en estructuras de concreto masivo (hormigón masa), tales como grandes presas por gravedad, donde la subida de temperatura derivada del calor generado durante el endurecimiento deba ser minimizada. El cemento tipo IV raramente está disponible en el mercado.

**Tipo V.** El cemento tipo V se utiliza en concretos expuestos a la acción severa de sulfatos – principalmente donde el suelo y el agua subterránea tienen alta concentración de sulfatos. Su desarrollo de resistencia es más lento que en el cemento tipo I. La alta resistencia a los sulfatos del cemento tipo V se atribuye al bajo contenido de aluminato tricálcico, no excediendo a 5%.

De los cuales se manejan 10 tipos de cementos:

**Tipo I.**-Para usar cuando no se requieran las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo.

**Tipo IA.**- Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo I, donde se desea incorporación de aire.

**Tipo II.**- Para uso general, más específicamente cuando se desea resistencia moderada a los sulfatos.

**Tipo IIA.**- Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II, donde se desea incorporación de aire.

**Tipo II (MH).**- Para uso general, más específicamente cuando se desea un calor de hidratación moderado y resistencia moderada a los sulfatos.

**Tipo II (MH) A.**- Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II (MH), donde se desea incorporación de aire.

**Tipo III.**- Para usar cuando se desea alta resistencia temprana.

**Tipo IIIA.**- Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II (MH), donde se desea incorporación de aire.

**Tipo IV.**- Para usar cuando se desea un bajo calor de hidratación.

**Tipo V.**- Para usar cuando se desea alta resistencia a los sulfatos.

(Steven H. Kosmatka, 2004)

De acuerdo a la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2010: “Industria de la construcción Cementos hidráulicos, Especificaciones y métodos de prueba” clasifica los cementos de fabricación nacional o extranjera que se comercializan en territorio nacional de acuerdo al tipo.

Tabla 10. Tipos de Cementos

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

(NMX-C-414-ONNCCE., 2010)

Con respecto a su clase resistente a la que pertenecen, si el cemento tiene especificada una resistencia a 3 días se añade una letra R (resistencia rápida).

Tabla 11. Clase resistente mecánica a la compresión, que establece los valores mínimos y máximos

20	Cementos de resistencia normal o resistencia mecánica a la compresión a 28 días	mínima de 204 kg/cm <sup>2</sup> , máxima de 408 kg/cm <sup>2</sup>
30	Cementos de resistencia normal o resistencia mecánica a la compresión a 28 días	mínimo de 306 kg/cm <sup>2</sup> , máximo de 510 kg/cm <sup>2</sup>
30R	Cementos de resistencia inicial o temprana o resistencia mecánica a la compresión desarrollada a 3 días	a 3 días mínimo de 204 kg/cm <sup>2</sup> , a 28 días mínimo de 306 kg/cm <sup>2</sup> , máximo de 510 kg/cm <sup>2</sup>
40	Cementos de resistencia normal o resistencia mecánica a la compresión a 28 días	mínimo de 408 kg/cm <sup>2</sup> , máximo de +550 kg/cm <sup>2</sup>
40R	Cementos de resistencia inicial o temprana o resistencia mecánica a la compresión desarrollada a 3 días	a 3 días mínimo de 306 kg/cm <sup>2</sup> , a 28 días mínimo de 408 kg/cm <sup>2</sup> , máximo de +510 kg/cm <sup>2</sup>

(NMX-C-414-ONNCCE., 2010)

En el caso de que algún tipo de cemento tenga las características especiales señaladas su designación se completa de acuerdo con la nomenclatura indicada que corresponda para representar dos o más características especiales.

Tabla 12. Características especiales

RS: Resistente a los Sulfatos
BRA: Baja Reactividad Álcali Agregado
BCH: Bajo Calor de Hidratación
B: Blanco

(*NMX-C-414-ONNCCE., 2010*)

Así mismo la norma NMX C 414 ONNCCE 2010 hace algunas definiciones de las cuales se destacan los conceptos siguientes:

**Cemento Portland compuesto:** Es el cemento que resulta de la integración de clínker Portland, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de la caliza, éste puede ser componente único.

**Cenizas volantes:** Las cenizas volantes se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas con carbones pulverizados. Se consideran como materiales puzolánicos.

**Escoria Granulada de Alto Horno:** Es el subproducto no metálico constituido esencialmente por silicatos y aluminosilicatos cálcicos, que se obtienen por el enfriamiento brusco con agua o vapor y aire, del residuo que se produce simultáneamente con la fusión de minerales de hierro en el alto horno.

**Humo de sílice:** El humo de sílice es un material puzolánico muy fino, compuesto principalmente de sílice amorfa, que es un subproducto de la fabricación de silicio o aleaciones de ferro-silicio con arco eléctrico (también conocido como humo de sílice condensado o micro sílice).

### 2.2.5 Cemento empleado en la investigación

Para la elaboración de todos los especímenes a analizar en la investigación se empleó cemento Tolteca CPC 30R RS. Esto significa que es un Cemento Portland Compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a 28 días de 30 MPa y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

## 2.3 Agregados pétreos

Los agregados pétreos son una parte fundamental en el concreto ya que ocupan por lo menos tres cuartas partes su volumen por ello es de suma importancia que su tipo y calidad sea correcta, ya que no solo pueden limitar la resistencia del concreto, sino que también sus propiedades afectan la durabilidad y el comportamiento estructural.

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN,  
CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

Los agregados fino y grueso ocupan cerca del 60% al 75% del volumen del concreto (70% a 85% de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del concreto.

Los agregados finos generalmente consisten en arena natural o piedra triturada con la mayoría de sus partículas menores que 5 mm (0.2 pulg.).

Ilustración 6. Arena como agregado fino



Ilustración 7. Arena como agregado grueso



(Duarte, 2019)

Los agregados gruesos consisten en una o en la combinación de gravas o piedras trituradas con partículas predominantemente mayores que 5 mm (0.2 pulg.) y generalmente entre 9.5 mm y 37.5 mm (3/8 y 1 1/2 pulg.).

La grava y la arena naturales normalmente se excavan o dragan de la mina, del río, del lago o del lecho marino. La piedra triturada se produce triturando la roca de cantera, roca redondeada, guijarros o gravas grandes. La escoria de alto horno enfriada al aire y triturada también se usa como agregados fino y grueso.

Los agregados frecuentemente se lavan y se gradúan en la mina o en la planta. Se puede esperar alguna variación en el tipo, calidad, limpieza, granulometría (gradación), contenido de humedad y otras propiedades.

Si bien es preciso reconocer que los agregados de una buena calidad producen un concreto resistente y durable, puede ser erróneo concluir que un buen concreto no se pueda hacer de los agregados con propiedades ligeramente inferiores. 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. La selección de los agregados

debe hacerse con prudencia teniendo en cuenta el factor económico, la abundancia del lugar en el que no encontramos.

### 2.3.1 Propiedades

Los materiales pétreos naturales provienen de rocas madre, existen tres tipos de rocas: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Estas clasificaciones se basan en el modo de formación de las rocas y le proporciona sus principales propiedades.

**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).

**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.

Las rocas sedimentarias de la estructura estratificada se extraen y algunos 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).

**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 (Shetty, 2005).

### 2.3.2 Propiedades químicas

Generalmente se considera que los agregados pétreos no reaccionan químicamente con la matriz cementante, es decir son inherentes, pero se han observado reacciones como:

**Epitaxia:** Es la única reacción química favorable de los agregados conocida hasta el momento, el cual maneja la adherencia entre ciertos agregados calizos y la pasta de cemento, a medida que transcurre el tiempo.

**Reacción álcali – carbonato (RAC):** Esta se produce entre los álcalis y piedras calizas dolomíticas. Son susceptible de reaccionar las piedras calizas arcillosas dolomíticas y las calizas magnesianas.

**Reacción álcali – sílice (RAS):** Se produce cuando la disolución alcalina de los poros del concreto y los materiales silíceos de algunos áridos reaccionan para formar un gel, que, al embeber con el agua, aumenta de volumen y consiguiente aumento de presión en el concreto lo que ocasiona fisuras y el deterioro del concreto. (Instituto del Concreto, 1997).

### 2.3.3 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los agregados nos indican las características visibles y propias de los agregados pétreos que resultan ser de suma importancia ya que estas se requieren para la clasificación y selección del material requerido para la elaboración de un buen concreto de acuerdo a las especificaciones requeridas.

**Forma:** Las formas básicas de éstos se pueden simplificar en 4 tipos, que son equidimensional o esférica, prismática, tabular o elíptica e irregular, esta forma influye sobre la trabajabilidad, acomodo y compactación del concreto fresco.

De estas, la que mayor problema puede ocasionar para la trabajabilidad es aquella de tipo tabular, conocidas como piezas planas y alargadas, ya que muy fácilmente pueden orientarse de manera preferencial en un solo plano, de manera que el agua y el espacio poroso pueden acumularse debajo de ellas. Además, gravas con esta forma ocasionan mayores requerimientos de arena, y eso hace

necesario un incremento en el volumen de agua para la mezcla, siendo deseable, entonces, que los agregados particularmente los gruesos tengan una forma angular y cúbica, para asegurar una buena trabazón entre estos y la masa cementante (Uribe, 1991).

**Granulometría:** Nos indica la distribución de tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados. Los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados, pues afectan las proporciones relativas de los agregados, bien como la demanda de agua y de cemento, trabajabilidad, bombeabilidad, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto. La tendencia observada en gravas indica que mientras que el tamaño disminuye, la resistencia decrece.

**Textura superficial:** Las rocas trituradas son más rugosas que las de canto rodado, también se pueden clasificar como textura áspera, angulares o elongadas, esta condición es la responsable en gran medida de la adherencia entre las partículas del agregado y la pasta de cemento fraguado, y gobierna las condiciones de fluidez mientras la mezcla se encuentra en estado plástico. Se ha encontrado que concretos fabricados con agregados triturados resisten más que los de canto rodado.

**Peso volumétrico:** también conocido como masa unitaria, es la masa o el peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado cuando el acomodo es libre y natural, que se refiere aquí es aquél ocupado por los agregados y por los vacíos entre las partículas de agregado. 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.

**Densidad Relativa:** La densidad relativa, masa específica relativa o gravedad específica de un agregado es la relación entre su masa y la masa de agua con el mismo volumen absoluto. Se la usa en algunos cálculos de proporcionamiento y del control de la mezcla. Los agregados saturados con superficie seca son aquéllos cuyos poros de cada partícula de agregado están llenos de agua, pero no hay exceso de agua en la superficie de las partículas.

**Densidad:** La masa específica de las partículas que se usa en los cálculos de proporcionamiento, no incluyen los vacíos entre las partículas, se determina por la multiplicación de la masa específica relativa de los agregados por la densidad del agua.

**Porosidad y absorción:** una partícula porosa es mucho menos dura que una partícula maciza, La estructura interna de una partícula de agregado se constituye de materia sólida y vacíos que pueden o no contener agua. La cantidad de agua que se adiciona en la planta de concreto se debe ajustar para las condiciones de humedad de los agregados, a fin de que se atienda a la demanda de agua del diseño de la mezcla de manera precisa. Si el contenido de agua del concreto no se mantiene constante, la relación agua-cemento variará, resultando en la variación de otras

propiedades, tales como la resistencia a compresión y la trabajabilidad. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

### 2.3.4 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas están relacionadas con las fuerzas exteriores que se ejercen sobre ellos. En el concreto como material compuesto, presenta un comportamiento mecánico que depende en gran parte de la calidad de cada uno de los materiales de que se compone, es por esto, que las propiedades mecánicas de sus agregados pétreos son de gran importancia, (GUZMAN, 1986).

**Dureza:** Esta 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 de las partículas de agregado:** La falla de un concreto está regida por las resistencias relativas del agregado, la pasta y de lo que se conoce como la interface de adherencia. La resistencia depende de su composición, textura y estructura y la resistencia del concreto no puede ser mayor que el de los agregados.

**Tenacidad:** También llamada resistencia a la falla por impacto, la cual tiene que ver mucho con el manejo de los agregados, ya que si estos son débiles antes las cargas de impacto se puede alterar su granulometría, aparte de indicar una baja calidad para ser utilizados en concreto.

**Adherencia:** Dentro de los procesos de fraguado y endurecimiento del concreto, los agregados se encuentran aglutinados por la pasta de cemento (cuya resistencia y rigidez varia con el tiempo y las condiciones ambientales) se genera una interacción en la zona de contacto agregado – pasta, conocida con el nombre de adherencia.

### 2.3.5 AGREGADO EMPLEADO EN LA INVESTIGACIÓN

Los agregados pétreos utilizados en la investigación son procedentes de dos distintos bancos de materiales ubicados a los alrededores de la ciudad de Morelia, Michoacán:

El agregado fino utilizado fue una arena volcánica negra originaria del banco de arena de “Joyitas” ubicado en el kilómetro 28 de la carretera Morelia-Quiroga entrada a San Bernabé, Michoacán.

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

El agregado grueso es proveniente del banco de agregados “Roca” de México S.A de C.V de GRUPO DE ORO, el cual se encuentra localizado en la carretera Morelia - Salamanca Kilómetro 228, Tarímbaro, Michoacán.

Ilustración 8. Banco de agregados petreos



(Duarte, 2019)

## 2.4 Agua

El agua es el elemento fundamental para la reacción química del cemento, desempeña una función importante en estado fresco y endurecido.

Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto a la cantidad para proveer una relación agua/cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero el agua se usa para 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 física y química.

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se la puede usar como agua de mezcla para la preparación del concreto. Sin embargo, también se pueden emplear en concreto algunas aguas que no se consideran potables teniendo especial cuidado en el exceso de impurezas en el agua ya que puede afectar el tiempo de fraguado y las resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencias, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad.

Tabla 13. Impurezas sobre las propiedades del concreto.

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			

### 2.4.1 Características del agua

El agua es una sustancia cuyas moléculas están compuestas por un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno (H<sub>2</sub>O). Se trata de un líquido inodoro (sin olor), insípido (sin sabor) e incoloro (sin color), también puede hallarse en estado sólido (hielo) o en estado gaseoso (vapor).

**COLOR.** El agua potable no es incolora, tiene un tinte azul verdoso en grandes volúmenes. El color afecta estéticamente a la potabilidad de las aguas y afecta como colorante de ciertos productos cuando se utiliza.

**TURBIDEZ.** Es la dificultad del agua para transmitir la luz de los materiales en suspensión, coloidales o muy finos. Son materiales difíciles de decantar y filtrar.

**ACCIÓN DISOLVENTE.** El agua es el líquido que más sustancias disuelve y se considera como el disolvente universal, debido a su característica polar, su capacidad para formar puentes de hidrógeno con otras sustancias polares e iónicas, y por su alto valor de constante dieléctrica a temperatura ambiente.

**DENSIDAD DEL AGUA.** La densidad del agua es 1 (exactamente 0,9999 a 20° C). La congelación del agua es bastante distinta a la de otros líquidos. Los puentes de hidrógeno producen un reordenamiento cristalino que hace que el hielo se expanda más allá del volumen del líquido original, de forma que su densidad resulta menor y flota. Si no fuese así los cuerpos de agua se congelarían en el fondo y la vida, en la forma que conocemos no existiría.

**CONDUCCIÓN ELÉCTRICA.** El agua pura es un mal conductor de la electricidad, pero cuando contiene sales se convierte en un buen conductor porque hay presencia de iones con cargas eléctricas.

**FUERZA DE COHESIÓN ENTRE SUS MOLÉCULAS.** Los puentes de hidrógeno mantienen a las moléculas fuertemente unidas, formando una estructura compacta que la convierte en un líquido casi incompresible. Esto significa que no es fácil reducir su volumen mediante presión, pues las moléculas de agua están enlazadas entre sí manteniendo unas distancias intermoleculares fijas.

**VISCOSIDAD DEL AGUA.** Es la propiedad que tiene un líquido de oponer resistencia a todo movimiento, ya sea interno o global del flujo. Es un papel fundamental de las pérdidas de carga y por tanto juega un papel fundamental en el tratamiento del agua. Disminuye cuando aumenta la temperatura. Aumenta conforme aumenta el contenido en sales disueltas, por lo que es más viscosa el agua del mar que la de un río.

**CAPILARIDAD.** Fenómeno que depende de la capacidad de adhesión de las moléculas de agua a las paredes de los conductos capilares y de la cohesión de las moléculas de agua entre sí. Consiste en el ascenso de la columna de agua a través de tubos de diámetro capilar.

**TENSIÓN SUPERFICIAL.** Por la diferencia que existe entre las fuerzas de atracción debido a los puentes de hidrógeno en el en la superficie y el interior del líquido, provoca una acumulación de moléculas en la superficie, formando una delgada película que opone gran resistencia a romperse. La tensión superficial disminuye al aumentar la temperatura.

**GRAN CALOR ESPECÍFICO.** Se necesita mucha energía para elevar su temperatura, lo cual convierte al agua en un buen aislante térmico. Esta propiedad permite al citoplasma acuoso servir de protección frente a cambios bruscos de temperatura. Por esta característica actúa como termorregulador; amortigua y regula los cambios térmicos ambientales y corporales. Por sus altos valores de calor específico (1 cal/g °C) y calor de vaporización (539.6 cal/g a temperatura de ebullición) almacena y absorbe gran cantidad de calor, que tardar en perder. (BEGUERÍA, 2019)

## 2.4.2 Especificaciones

Se puede utilizar satisfactoriamente el agua para la preparación del concreto con menos de 2000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos. El agua que contiene más de 2000 ppm de sólidos disueltos se debe analizar para verificar su calidad.

Requisitos a cumplir para emplear el agua en construcción, refiere la norma (NMX-C-122-ONNCCE., 2014) para la elaboración y curado del concreto son:

Tabla 14. Requisitos que tiene que cumplir el agua para utilizarla en construcción.

SALES E IMPUREZAS	Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m.	Cementos sulfuresistentes Límites en p.p.m.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
Cloruros como el Cl (a)		
Para concreto con acero de pre-esfuerzo y piezas de puente	400 ©	600 ©
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 ©	1000©
Sulfato como SO <sub>4</sub> = (a)	3000	3500
Magnesio como Mg <sup>++</sup> (a)	100	150
Carbonatos como CO <sub>3</sub>	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO <sub>2</sub>	5	3

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN,  
CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

Álcalis totales como Na+	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 6.5

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

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

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

*(NMX-C-122-ONNCCE., 2014)*

El agua de mar no es apropiada para la preparación de concreto reforzado con acero y no se debe usar en concreto pretensado, debido al riesgo de la corrosión de la armadura, principalmente en ambientes cálidos y húmedos. Si se usa agua de mar para la preparación de concreto sin refuerzo en aplicaciones marítimas se deben emplear cementos de moderada resistencia a los sulfatos y baja relación agua-cemento.

### 2.4.3 Agua utilizada en la investigación

Proviene de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, para elaboración, curado, limpiezas, saturación de los materiales usados para el desarrollo de los especímenes de investigación.

El agua cumple con lo establecido en la norma (NMX-C-122-ONNCCE) de acuerdo al análisis realizado en los laboratorios de impacto ambiental de la facultad de ingeniería civil de esta universidad y se presentan a continuación:

Tabla 15. Resultados del análisis del agua del Laboratorio de materiales "Ing. Luis Silva Ruelas".

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

SITIO DE MUESTREO: Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”

FECHA DE MUESTREO: 18 de mayo de 2014

NORMATIVA DE REFERENCIA: NMX-C-122-ONNCCE-2004.

Parámetro	Resultado	Límite permisible (NMX-C-122- ONNCCE-2004)	Unidades	Método utilizado
pH	7.86	>6	U pH	NMX-AA-008-SCFI2000
Temperatura	29.8	-----	°C	NMX-AA-007-SCFI2000
Conductividad eléctrica	456	-----	µs/cm	NMX-AA-093- SCFI2000
Solidos disueltos totales	352	3500	mg/L	NMX-AA-034- SCFI2001
Oxígeno disuelto	337	-----	mg/L	NMX-AA-012- SCFI2001
Sulfatos	5	3000	mg/L	NMX-AA-074-1981
Cloruros	13.36	400	mg/L	NMX-AA-073- SCFI2001
Dureza cálcica	21	-----	(mg/L) CaCO <sub>3</sub>	Volumétrico
Sales de magnesio	5	100	mg/L	Volumétrico

(Reyes Bernabé, 2015)

## 2.5 Fibras Adicionadas al concreto.

La mayoría de los concretos reforzados con fibras consiguen una resistencia a la fatiga. Mejor rigidez, y una mejor relación resistencia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil, el material de la matriz transmite la fuerza a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. La resistencia del compuesto puede resultar alta a tempera ambiente y a temperaturas elevadas. Al diseñar un compuesto reforzado con fibras se deben tomar en consideración muchos factores como la longitud, el diámetro, la orientación la calidad y propiedades desde la matriz y la unión entre fibras y matriz.

Las fibras fueron usadas como material de construcción por muchos siglos. En las últimas tres décadas hubo un crecimiento por el interés en el uso de fibras en concreto premezclado, concreto prefabricado y concreto lanzado (hormigón proyectado, gunitado). Las fibras de acero, plástico, vidrio y materiales naturales (celulosa de madera) están disponibles en una amplia variedad de formas, tamaños y espesor; pueden ser cilíndricas, llanas, onduladas (rizadas) y deformadas con longitud típica de 60 mm a 150 mm (0.25 pulg. a 6 pulg.) y espesor variando de 0.005 mm a 0.75 mm (0.0002 pulg. a 0.03 pulg.).

Las fibras se añaden al concreto durante el mezclado.

Los factores principales que controlan el desempeño del material compuesto son:

1. Propiedades físicas de las fibras y de la matriz
2. Resistencia de adherencia entre la fibra y la matriz

A pesar de que los principios básicos gobernantes en los refuerzos convencionales y en los sistemas con fibras son los mismos, hay varias características que los diferencian:

1. Las fibras se distribuyen aleatoriamente por toda la sección transversal, mientras que las barras de refuerzo o armadura se ponen sólo donde son necesarias
2. La mayoría de las fibras son relativamente cortas y poco espaciadas si son comparadas a las barras continuas de refuerzo
3. Generalmente no es posible lograrse la misma relación de área de refuerzo- área de concreto con el uso de fibras si es comparado a la red de refuerzo con barras.

Las fibras se adicionan al concreto normalmente en bajos volúmenes (frecuentemente menos del 1%) y han mostrado eficiencia en el control de la fisuración por contracción (retracción).

En general, las fibras no alteran considerablemente la contracción libre del concreto, pero, si son empleadas en cantidades adecuadas, pueden aumentar la resistencia al agrietamiento (fisuración) y disminuir la abertura de las fisuras. (Steven H. Kosmatka, 2004)

### **2.5.1 Ventajas y desventajas del uso de fibras**

Las fibras se distribuyen aleatoriamente por la sección transversal del concreto. Por lo tanto, muchas fibras se localizan inadecuadamente con relación a la resistencia a los esfuerzos de tensión (tensión de tracción) resultantes de las cargas aplicadas. Dependiendo del método de fabricación, la orientación aleatoria puede ser bi-dimensional (2-D) o tri-dimensional (3-D).

Normalmente el método de rociado promueve una orientación 2-D de las fibras, mientras que los métodos de producción con mezcladoras promueven una orientación 3-D. Además, se pueden observar que muchas fibras cruzan las fisuras con ángulos diferentes de 90° o pueden tener una longitud embebida (anclaje) menor que la necesaria para el desarrollo de una unión fibra-matriz adecuada. Así, apenas un pequeño porcentaje del contenido de fibras puede resistir eficientemente a las tensiones de tracción (esfuerzo de tensión) o flexión.

Los “factores de eficiencia” pueden ser tan bajos cuanto 0.4 para la orientación 2-D y 0.25 para la orientación 3-D. El factor de eficiencia depende de la longitud de la fibra y de la longitud crítica

embebida. Del punto de vista conceptual, el refuerzo con fibras no es un método altamente eficiente para la obtención de la resistencia del compuesto.

Los concretos con fibras son más adecuados para el uso en secciones muy delgadas, donde la correcta colocación de la armadura (refuerzo) convencional sería extremadamente difícil. Además, el concreto con fibras rociado es ideal para la fabricación de productos con formas irregulares. Se puede disminuir considerablemente el peso con el uso de secciones relativamente delgadas de concreto con fibras, las cuales poseen resistencia equivalente a secciones mucho más gruesas de concreto reforzado (armado) convencional.

## 2.5.2 Propiedades

Tabla 16. Propiedades de tipos de fibras

Tipo de fibra	Masa específica relativa	Diámetro, $\mu\text{m}$ (0.001 pulg.)	Resistencia a tracción, MPa [kg/cm <sup>2</sup> ] (ksi)	Módulo de elasticidad, MPa [kg/cm <sup>2</sup> ] (ksi)	Deformación en la rotura, %
Acero	7.80	100-1000 (4-40)	500-2600 [5,100-27,000] (70-380)	210,000 [2100,000] (30,000)	0.5-3.5
Vidrio E	2.54	8-15 (0.3-0.6)	2000-4000 [20,000-41,000] (290-580)	72,000 [730,000] (10,400)	3.0-4.8
RA	2.70	12-20 (0.5-0.8)	1500-3700 [15,000-38,000] (220-540)	80,000 [820,000] (11,600)	2.5-3.6
Sintética Acrílica	1.18	5.17 (0.2-0.7)	200-1000 [2,000-10,000] (30-145)	17,000-19,000 [170,000-190,000] (2,500-2,800)	28-50
Aramida	1.44	10-12 (0.4-0.47)	2000-3100 [20,000-32,000] (300-450)	62,000-120,000 [630,000-1220,000] (9,000-17,000)	2-3.5
Carbón	1.90	8-9 (0.3-0.35)	1800-2600 [18,000-27,000] (260-380)	230,000-380,000 [2300,000-3900,000] (33,400-55,100)	0.5-1.5
Nylon	1.14	23 (0.9)	1000 [10,000] (140)	5,200 [53,000] (750)	20
Poliéster	1.38	10-80 (0.4-3.0)	280-1200 [2800-12,000] (40-170)	10,000-18,000 [100,000-180,000] (1,500-2,500)	10-50
Poliétileno	0.96	25-1000 (1-40)	80-600 [800-6100] (11-85)	5,000 [50,000] (725)	12-100
Polipropileno	0.90	20-200 (0.8-8)	450-700 [4600-7100] (65-100)	3,500-5,200 [36,000-53,000] (500-750)	6-15
Natural Celulosa de madera	1.50	25-125 (1-5)	350-2000 [3600-20,000] (51-290)	10,000-40,000 [100,000-400,000] (1,500-5,800)	
Sisal			280-800 [2900-8100] (40-95)	13,000-25,000 [130,000-250,000] (1,900-3,800)	3.5
Coco	1.12-1.15	100-400 (4-16)	120-200 [1200-2000] (17-29)	19,000-25,000 [190,000-250,000] (2,800-3,800)	10-25
Bambú	1.50	50-400 (2-16)	350-500 [3600-5100] (51-73)	33,000-40,000 [340,000-410,000] (4,800-5,800)	
Yute	1.02-1.04	100-200 (4-8)	250-350 [2500-3600] (36-51)	25,000-32,000 [250,000-330,000] (3,800-4,800)	1.5-1.9
Pasto elefante		425 (17)	180 [1800] (26)	4,900 [50,000] (710)	3.6

(Steven H. Kosmatka, 2004)

### 2.5.3 Especificaciones

La utilización de fibras en el concreto puede ayudar a disminuir fisuración, aumentando la durabilidad de las estructuras. Es conveniente que se determinen la dosificación y tipo de fibras a utilizar, dependiendo de las normas que las estipulan, para que de este modo se logre proporcionar la funcionalidad del material en los diferentes espacios y a su vez se garantice un adecuado desempeño de la estructura.

Para la comercialización de fibras para adicionar al concreto se deben cumplir con algunas normas que especifican dosificación y características para la utilización de fibras en el concreto como:

- ASTM C 1399 – Método de ensayo para determinar el esfuerzo residual promedio del concreto reforzado con fibra.
- ASTM C 1609 – Método de ensayo para determinar el desempeño del concreto reforzado con fibra (Usando una viga cargada en los tercios).
- EN 14488-3 – Ensayos sobre concreto lanzado – Parte 3: Resistencias a la flexión (Determinación de la resistencia al primer pico, del último y de la resistencia residual) de vigas de concreto reforzado con fibras.
- EN 14488-5 – Ensayos sobre concreto lanzado – Parte 5: Determinación de la capacidad de absorción de energía de una placa de concreto reforzado con fibras.
- ASTM C 1550 – Método de ensayo para determinar la tenacidad a flexión del concreto reforzado con fibras (usando una carga central sobre un panel redondo).
- EN 14889-1 – Fibras para concreto Parte 1 – Fibras de acero- Definición, especificaciones y conformidad.
- EN 14889-2 – Fibras para concreto Parte 2 – Fibras de polímeros o sintéticas – Definición, especificaciones y conformidad.
- EFNARC – European Specification for Sprayed Concrete [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org)
- NTC 5214 – Fibras de acero para refuerzo de concreto (ASTM A 820).
- NTC 5541 – Concretos reforzados con fibras (ASTM C 1116).
- NTC 5721 – Método de ensayo para determinar la capacidad de absorción de energía (Tenacidad) de concreto reforzado con fibras (EFNARC).
- IIS-SF4 – Método de ensayo para determinar la tenacidad de concreto reforzado con fibra. (<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/categoria/aditivos-adiciones-y-fibras/las-fibras-en-el-concreto>)

Recientemente se publico en el Diario Oficial de la Federación la norma mexicana que regulara este tipo de concreto adicionado con fibras poliméricas.

- NMX-C-537-ONNCCE-2018 – Industria de la Construcción – Fibras Poliméricas para Concreto – Especificaciones y Métodos de ensayo.

Fecha de publicación en el DOF: 2019-06-26

Fecha de entrada en vigor: 2019-08-25

#### 2.5.4 Fibras Sintéticas

Las fibras sintéticas son las fibras que se fabrican por el hombre y son resultado de la investigación y el desarrollo de las industrias petroquímicas y textiles. Los tipos de fibras usadas en concreto son: acrílicas, aramida, carbón, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno.

Las fibras sintéticas pueden reducir la contracción (retracción) plástica y consecuentemente la fisuración y pueden ayudar al concreto después que se fisura. La capa ultra delgada de concreto (whitetopping ultra delgado) normalmente usa fibras sintéticas para la contención potencial de las propiedades para retardar el desarrollo de baches. Los problemas asociados con fibras sintéticas incluyen:

- 1 baja adherencia fibra-matriz.
- pruebas de desempeño no concluyentes para volúmenes bajos de fibras de polipropileno, polietileno, poliéster y nylon.
- bajo módulo de elasticidad de las fibras de polipropileno y polietileno.
- el alto costo de las fibras de carbón y aramida.

Las fibras de polipropileno, las más populares de las fibras sintéticas, son químicamente inertes, hidrofóbicas y ligeras (livianas).

Se producen como monofilamentos cilíndricos continuos que se pueden cortar en longitudes específicas o como filmes y cintas. También se producen como finas fibrillas de sección transversal rectángula.

Ilustración 9. Tipos de fibras de polipropileno.



(Duarte, 2019)

Usadas en un volumen mínimo de 0.1% del volumen del concreto, las fibras de polipropileno reducen la fisuración (agrietamiento) por contracción (retracción) plástica y disminuyen el agrietamiento (fisuración) sobre la armadura de acero. La presencia de las fibras de polipropileno en el concreto puede reducir el revenimiento (asentamiento) o la sedimentación de las partículas de agregados, así, reduciendo los canales capilares de sangrado (exudación).

Las fibras de polipropileno pueden reducir el descascaramiento del concreto de alta resistencia y del concreto de baja permeabilidad expuesto al fuego en un ambiente con humedad.

Los nuevos desarrollos muestran que las fibras monofiladas (micro-fibras) son capaces de fibrillar durante el mezclado si son producidas con ambas resinas de polipropileno y polietileno. Los dos polímeros son incompatibles y tienden a separarse cuando son manipulados. Por lo tanto, durante el proceso de mezclado, cada fibra se convierte en una unidad con varias fibrillas en su

extremo. Las fibrillas proporcionan una adherencia mecánica mejor que los monofilamentos convencionales. El gran número de finas fibrillas también reduce la fisuración por contracción (retracción) plástica y puede aumentar la ductilidad y la tenacidad del concreto.

Las fibras acrílicas se han mostrado como el sustituto más prometedor para las fibras de asbestos. Se usan en tablonc de cemento y en la producción de tejas, donde el volumen de fibras de hasta 3% puede producir un compuesto con propiedades mecánicas similares a aquéllas de los compuestos de asbesto-cemento. Los compuestos de concreto con fibras acrílicas exhiben alta tenacidad posfisuración y alta ductilidad. Apesar de que la resistencia a flexión de los concretos reforzados con fibras acrílicas sea menor que la de los compuestos de cemento-asbesto, aún es más que suficiente para muchas aplicaciones en construcción.

Las fibras de aramida tienen alta resistencia a tensión (tracción) y alto módulo de tensión (tracción). La fibras de aramida son dos veces y media más resistentes que las fibras de vidrio E y cinco veces más resistentes que las fibras de acero. PCA (1991) presenta una comparación de las propiedades mecánicas de diferentes fibras de aramida. Además de las excelentes características de resistencia, las fibras de aramida también tienen excelente retención de resistencia hasta 160°C (320°F), estabilidad dimensional hasta 200°C (392°F), resistencia a fatiga estática y dinámica y resistencia a fluencia. La hebra de aramida está disponible con gran variedad de diámetros.

Ilustración 10. Fibras de aramida.



<https://spanish.alibaba.com/product-detail/chopped-aramid-fiber-short-cuts-aramid-fiber-material-reinforcement-special-used-aramid-fiber-material.>

Las fibras de carbón se desarrollaron principalmente por sus propiedades de alta resistencia y módulo de elasticidad y propiedades de rigidez para la aplicación en la industria aeroespacial. Comparadas con la mayoría de las otras fibras sintéticas, la producción de las fibras de carbón es costosa y tiene desarrollo comercial limitado.

Las fibras de carbón tienen alta resistencia a tensión (tracción) y alto módulo de elasticidad. También son inertes a la mayoría de los productos químicos. Las fibras de carbón se producen normalmente en hebras que deben contener hasta 12,000 filamentos individuales. Las hebras

comúnmente se dispersan antes de su incorporación en el concreto para facilitar la penetración de la matriz de cemento y maximizar la efectividad de la fibra.

Ilustración 11. Fibras de carbon



<https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-strength-a-grade-carbon-fiber>.

Hay sólo dos tipos de fibras de nylon para uso en concreto, el nylon 6 y el nylon 66. Las fibras de nylon se tejen de los polímeros de nylon y se transforman a través de extrusión, estiramiento y calentamiento para formar una estructura de fibras orientada y cristalina. En aplicaciones en concreto, se tejen hilos de alta tenacidad (alta resistencia a tensión) y estables a altas temperaturas y a la luz y, posteriormente, se cortan en pequeñas longitudes. Las fibras de nylon presentan tenacidad, ductilidad y recuperación de elasticidad buenas. El nylon es hidrófilo, con retención de humedad del 4.5%, que aumenta la demanda de agua en el concreto. Sin embargo, esto no afecta la hidratación y trabajabilidad del concreto con bajo contenido de fibras (del 0.1% al 0.2% en volumen), pero se lo debe considerar si se usan volúmenes más altos de fibras. Esta cantidad relativamente pequeña de fibras tiene potencialmente mayor capacidad de refuerzo que bajos volúmenes de fibras de polipropileno y poliéster. El nylon es relativamente inerte y resistente a una amplia variedad de materiales orgánicos e inorgánicos, incluyendo álcalis fuertes.

Ilustración 12. Fibras de nylon.



<https://portuguese.alibaba.com/product-detail/good-quality-white-bright-nylon-66-staple-fiber>.

Las fibras se las debe añadir a la mezcla de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

### 2.5.5 Fibra sintética utilizada en la investigación.

Para efectos de la investigación se utilizó microfibra de polipropileno adicionado al concreto en un porcentaje del 0.8% respecto de la masa del cemento, para analizar sus efectos físico-mecánicos ya que es la proporción que se utiliza en la industria concretera de la localidad la cual fue donada por una de ellas.

Son fibras de polipropileno en forma de multifilamentos, que actúan como refuerzo secundario en el concreto y morteros, con la finalidad principal de reducir los agrietamientos producidos por contracción plástica en concretos en estado fresco y por temperatura en estado endurecido del concreto, contribuyendo a la durabilidad.

Ilustración 13. Micro-fibras de Polipropileno



(Duarte, 2019)

Tabla 17. Datos Técnicos de la Micro-fibra de polipropileno

Presentación:	Bolsa de 60gr.
Dosificación:	Una bolsa por m <sup>3</sup> de concreto
Material:	Polipropileno 100% virgen
Longitud de la fibra:	19 mm (3/4")
Denier:	3
Numero de fibras:	9 millones/m <sup>3</sup>
Tipo de fibra:	Multifilamentos
Gravedad especifica:	0.9
Densidad:	48.5 kg.m <sup>3</sup>
Color:	Natural
Absorción:	Cero
Resistencia a la tensión:	5.626 kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad:	38.690 kg/cm <sup>2</sup>
Punto de ignición:	590 °C
Punto de fusión:	160-163 °C
Conductividad térmica:	Baja
Conductividad eléctrica:	Baja

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN,  
CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

Resistencia a la salinidad:	Alta
Resistencia al acido:	Alta
Almacenamiento:	3 años en su empaque original en un lugar fresco y seco, bajo techo.

*SLTK fiber. Cumple con las normas ASTM C-156, ASTM C-156, ASTM C-666, ASTM C-672, ASTM C-1018, ASTM C-1399.*

La preparación del producto no requiere de ningún tratamiento previo a su utilización, se suministra directo de su empaque original para su mezclado en olla revolovedora en el caso de concreto premezclado y revolviendo a velocidad máxima de 3 a 5 minutos para asegurar su dispersión total y homogeneidad. Si la revoltura es a mano a lo mucho se requiere una separación ligera de las microfibras directo a los agregados con el cemento.

#### *2.5.5.1 Ventajas de usar estas microfibras*

- Fácil de usar, se agrega a la mezcla en cualquier momento.
- Ofrece una matriz de refuerzo tridimensional en comparación con el bidimensional de la malla electrosoldada.
- Sustituye las mallas electrosoldadas, varillas y fibras de acero.
- Es anticorrosiva, antimagnética y 100% a prueba de álcalis.
- Facilita el manejo del concreto en obra.
- Incrementa la durabilidad del concreto, rsistencia a la flexion y resistencia a la fatiga.
- No se oxida y permanece estable durante toda la vida útil del concreto.

En el concreto en estado plástico:

- Disminuye agrietamientos producidos por el fenómeno de la contracción plástica (microagrietamiento).
- Disminuye el agua de sangrado.
- Reduce la segregación.
- Reduce el costo de colocación, transportacion, manipulación y traslados comparados con el concreto armado con malla electrosoldada.
- En procesos de concreto lanzado, reduce el rebote y desgaste de equipos.

En el concreto en estado endurecido:

- Disminuye los agrietamientos producidos por el fenómeno termodinamico.
- Reduce la permeabilidad.
- Contribuye a la resistencia, a la flexión, al corte y a la torsión.
- Permite desmoldar con mayor rapidez sin desjamientos.
- Se logra una superficie limpia y pulida.

### 2.5.6 Usos da la microfibra de polipropileno en concreto.

Está diseñada para:

- Pisos industriales, pavimentos rígidos, plataformas de carga marítimas y de aeropuertos.
- Áreas y concretos en centros comerciales, vivienda y edificios.
- Concreto lanzado.
- Canales, tuneles y en la industria minera.
- Tanques de agua, lagunas artificiales, albercas y lumbreras.
- Estabilización de taludes.
- Como refuerzo secundario.
- Concreto para prefabricados.
- Como remplazo de mallas electrosoldadas.

## 2.6 Fibras de cabello humano

El cabello es el filamento unido al cutis, compuesto de proteínas, Queratina y aminoácidos que lo protegen, lo hacen resistente y es el filamento de estructura cilíndrica que nace y crece dentro de los poros de la piel.

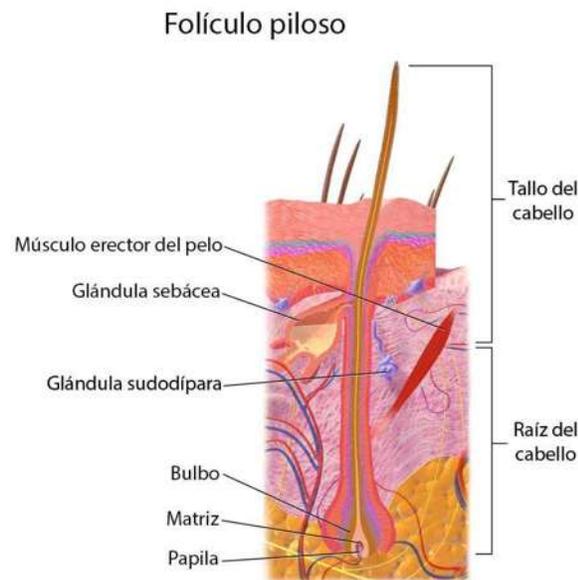
### 2.6.1 Partes del cabello humano.

El cabello tiene *grosso modo* dos partes: **el tallo y la raíz**; que luego a su vez se dividen en en otras zonas:

- **Tallo:** está compuesto por células queratinizadas y desvitalizadas. Comprende tres capas:
  - **Cutícula:** es la capa más externa y transparente, ya que carece de pigmentación, cuyo objetivo es regular la hidratación (absorción y secrección) y proteger de las agresiones externar.
  - **Córtex o corteza:** es la capa que ocupa un mayor espacio en la estructura del cabello y es la responsable de la resistencia y elasticidad del pelo. En ella, se encuentra la melanina que da color al pelo.
  - **Médula:** es la zona más interna del cabello y está formada por células córneas.
- **Raíz**
  - **Vaina externa:** es la prolongación de la epidermis hacia debajo que rodea al folículo piloso.
  - **Vaina interna:** es la envoltura que separa la raíz de la vaina externa.
  - **Bulbo piloso:** es la parte más voluminosa de la raíz del folículo. Está formado por varias capas de células germinativas en forma de anillos situadas alrededor de la papila. Se encarga del crecimiento del cabello.

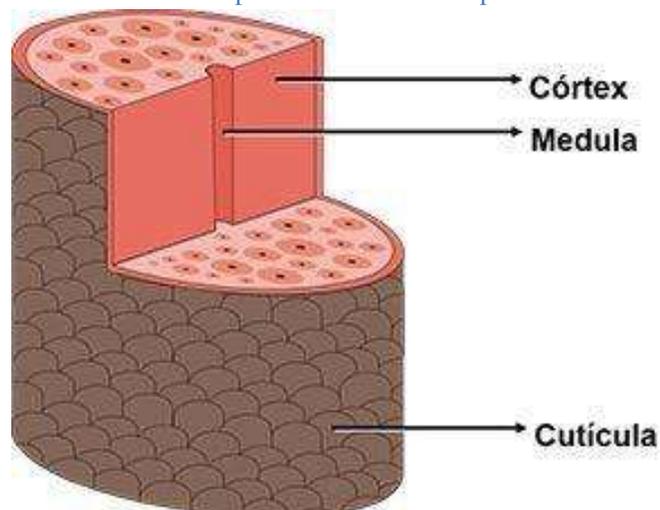
- **Papila dérmica:** estructura conjuntiva con abundantes nervios y vasos sanguíneos que alimentan al pelo; y responsable del control del ciclo piloso.
- **Músculo erector del pelo:** formado por fibras musculares lisas. Al contraerse produce la elevación del pelo.
- **Glándula sebácea:** es la responsable de producir la grasa natural del cuero cabelludo cuya función es la hidratación y protección del cuero cabelludo.
- **Matriz:** es una zona con células madre.

Ilustración 14. Partes del Cabello Humano.



El **tallo piloso** es la **parte más grande del cabello** e incluye todo el pelo que está por encima de la superficie de la piel y, también, parte del pelo que está situado en la piel. El tallo tiene **tres capas circulares**.

Ilustración 15. Capas circulares del tallo piloso



La más interna es la **médula** y está formada por células de queratina. La capa **intermedia es la corteza (o córtex)** que es donde se fija el pigmento (melanina) que determina el color del pelo. Los pigmentos principales de la melanina son la eumelanina y la feomelanina, y la relación de estos pigmentos con otros, producen diferentes colores de pelo. La capa **más externa es la cutícula** y está formada por **células muertas** que se van queratinizando y se van adhiriendo, como tejas, formando escamas.

La cutícula es la parte externa de la fibra del pelo y es la que le da buen aspecto al pelo. También, es la más expuesta a las agresiones externas, como la luz solar, el agua de las piscinas, los químicos, el cepillado, etc. que causan daños a la cutícula, por lo que es importante cuidarla adecuadamente para tener un cabello saludable.

Una cutícula uniforme tendrá una textura más suave y sedosa. Además, reflejará mejor la luz por lo que tendrá mayor brillo.

La **raíz o folículo piloso** se encuentra enteramente bajo la piel. En ella se produce gran parte de la **actividad metabólica y mitótica** (relacionada con el crecimiento del cabello). La raíz termina en un pequeño bulbo, con forma de gota, en cuyo centro se alberga la **papila dérmica** (compuesta por tejido conjuntivo y vasos sanguíneos), que proporcionan al pelo las sustancias necesarias para su crecimiento. (<https://www.wikiversus.com/cuidado-personal/partes-del-pelo-estructura-propiedades-composicion-quimica/>, s.f.)

## 2.6.2 Propiedades

### 2.6.2.1 Propiedades químicas

Un análisis químico del cabello demuestra la presencia de:

Tabla 18. Elementos químicos que conforman el cabello humano.

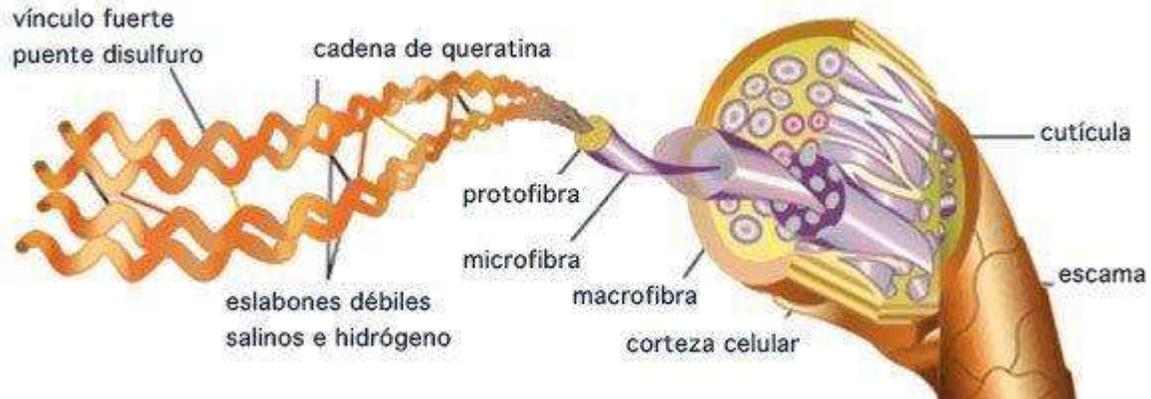
C Carbón.	50%
O Oxígeno.	25%
N Nitrógeno.	7%
H Hidrógeno.	6.5%
S Sulfuro.	4.5%

El cabello está compuesto por **varios tipos de proteínas**, entre las que destaca la **queratina** que supone entre el 85 y el 90 por ciento del peso total.

La queratina del pelo se mantiene fuertemente unida por tres **enlaces** químicos entre las moléculas llamados:

- Puentes disulfuro (unen átomos de azufre)
- Puentes de hidrógeno
- Puentes salinos entre un ácido y una base

Ilustración 16. Morfología del cabello humano



(<https://www.wikiversus.com/cuidado-personal/partes-del-pelo-estructura-propiedades-composicion-quimica/>)

Los enlaces entre las moléculas de queratina determinan las propiedades del cabello.

- Los **puentes de hidrógeno y los puentes salinos se rompen**, de manera temporal, al estar en **contacto con el agua**. Por eso, utilizamos agua para peinarnos más cómodamente.
- Los **puentes de disulfuro se rompen con calor**. Al aplicar calor podemos deformar o romper los enlaces de disulfuro de nuestro pelo.

### 2.6.2.2 Propiedades físicas

Las propiedades más importantes del cabello son:

**Permeabilidad:** Se define la permeabilidad como la capacidad que tiene el cabello de absorber líquidos y debe tenerse muy en cuenta a la hora de aplicar un producto químico. Las fibras de queratina tienen una gran atracción por la humedad del ambiente, pudiendo el cabello llegar a absorber, hasta una tercera parte de su peso. Al producirse en el cabello una absorción de agua, puede producirse en éste una alteración de las demás características tales como su longitud, diámetro y forma. En contacto con el agua puede absorber hasta un 20% de su peso.

**Resistencia:** Se define como la capacidad de soportar la tracción. Esta propiedad del cabello está determinada por su estructura y composición química. La resistencia del pelo puede verse

alterada por la acción de determinados agentes químicos como ocurre en el caso de los cabellos decolorados. La tensión ejercida sobre el cabello está relacionada directamente con el contenido de azufre en éste y antes de romperse el cabello se produce en él una serie de transformaciones en su queratina. También es muy resistente al calor, resistiendo temperaturas superiores a 140° C de calor seco y de calor húmedo hasta 220° C (siendo de vital importancia tenerlo en cuenta en los cambios de forma del cabello). Por último la gran cantidad de azufre y su estructura compacta de la queratina la hace muy resistente a los ataques de microorganismos. Un cabello soporta ente 50grs y 100grs sin romperse; estando seco soporta hasta 140°C y húmedo hasta 200°C; es muy resistente a la putrefacción y sometido a soluciones ácidas o alcalinas extremas, se debilita.

**Plasticidad:** Es la propiedad por la cual podemos moldear o realizar nuevas formas al cabello sin que éste recupere inmediatamente su forma natural. Cuando mojamos el cabello se rompen los puentes de hidrogeno y se moldea éste con mayor facilidad. 3.4

**Elasticidad:** Es la propiedad más importante del cabello y puede variar su forma, longitud y diámetro cuando es aplicada una fuerza sobre él, volviendo a su forma original cuando cesa ésta. Estirando uno moderadamente, toma rápidamente su longitud inicial, la cual puede alargarse hasta un 25%.

Esta propiedad está relacionada con la mayor o menor unión entre las moléculas de la queratina, pudiendo verse afectada por algunos factores tales como la humedad, la temperatura, la radiación ultravioleta y algunas sustancias químicas .La elasticidad puede llegar hasta una tercera parte de la longitud del cabello.

**Eléctricas:** Esta propiedad se produce por fricción (cepillado, peinado, etc.) Es debido a la presencia de cargas electrostáticas, se carga fácilmente con electricidad estática.  
<https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd7484.pdf>

### *2.6.2.3 Datos interesantes del cabello humano.*

- La zona de nuestro cabello que podemos observar, está biológicamente muerta.
- La actividad de las glándulas sebáceas, que nutren y lubrican el cabello, disminuye con el frío. Por eso, puede que notes el pelo más apagado y sin vida en los meses más fríos del año.
- Nacemos con entre 100 mil a 150 mil folículos pilosos. Lo que viene a dar unos 1612 cabellos por pulgada cuadrada o lo que es lo mismo, unos 250 cabellos por centímetro cuadrado. Ese número medio varía dependiendo del color del pelo:
  - Las personas rubias tienen alrededor de 150 mil.
  - Los pelirrojos tienen de media 90 mil.
  - Las personas con el pelo moreno tienen entre 100 mil y 110 mil.
- Un cabello de grosor medio tiene un diámetro de entre 61 y 80  $\mu\text{m}$  (0,61 mm 0,08 mm). Mientras que el diámetro de un cabello fino puede ser de entre 50 y 60  $\mu\text{m}$ . Un cabello grueso puede tener un diámetro de entre 81 y 100  $\mu\text{m}$ .

- El cabello crece a un ritmo de 1 milímetro cada dos días y medio (aproximadamente). Esto significa que crece aproximadamente 0,5 milímetros al día, 1,5 centímetros al mes y entre 10 y 20 centímetros al año.
- Cada cabello tiene aproximadamente 4 mm de longitud por debajo de la superficie de la piel del cráneo (cuero cabelludo).
- Una persona con un cabello sano pierde cerca de 100 diarios.
- Antropológicamente, el cabello tiene las funciones de mantener el calor corporal de la cabeza y proporcionar protección al cráneo contra los golpes.
- Los cabellos están tan firmemente implantados en la cabeza que aguantan un peso de 80 kilos. Una trenza resiste entre 200 y 300 kilos.

(<https://mejorconsalud.com/asombrosas-curiosidades-sobre-el-cabello/>, s.f.)

### **2.6.3 Fibras de cabello humano utilizadas en la investigación.**

Las fibras de cabello humano utilizadas en la investigación se obtuvieron de una peluquería exclusiva para hombres de la localidad de Zitácuaro, Michoacán y se seleccionó esta ya que el cabello de los hombres resulta ser de mayor grosor y son los que con mayor frecuencia se cortan el cabello, debido a esta selección se obtuvo una muestra de cabello homogénea en diámetro y longitud.

## **3 DISEÑO DE MEZCLAS**

### **3.1 Introducción**

El proceso de determinación de las características requeridas del concreto y que se pueden especificar se llama diseño de mezcla. Las características pueden incluir:

- propiedades del concreto fresco,
- propiedades mecánicas del concreto endurecido y
- la inclusión, exclusión o límites de ingredientes específicos.

El diseño de la mezcla lleva al desarrollo de la especificación del concreto.

El proporcionamiento o dosificación de la mezcla se refiere al proceso de determinación de las cantidades de los ingredientes del concreto, usando materiales locales, para que se logren las características especificadas. Un concreto adecuadamente proporcionado debe presentar las siguientes cualidades:

- Trabajabilidad aceptable del concreto fresco
- Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto endurecido
- Economía

Es importante el entendimiento de los principios básicos del diseño de mezclas, tales como los cálculos usados para establecer las proporciones de la mezcla. Las cualidades requeridas se pueden alcanzar en las construcciones en concreto sólo con la selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla. (Steven H. Kosmatka, 2004)

### 3.2 Objetivo

Determinar las proporciones de la mezcla, se seleccionan sus características considerando el uso que se propone dar al concreto, las condiciones de exposición, tamaño y forma de los elementos y las propiedades físicas del concreto (tales como resistencia a la congelación y resistencia mecánica) requeridas para la estructura. Las características deben reflejar las necesidades de la estructura, por ejemplo, se debe verificar la resistencia a los iones cloruros y se deben especificar los métodos de ensayos apropiados.

Después que se hayan elegido las características, se puede dosificar la mezcla a partir de datos de campo o de laboratorio. Como la mayoría de las propiedades deseadas en el concreto endurecido dependen principalmente de la calidad de la pasta cementante, la primera etapa para el proporcionamiento del concreto es la elección de la relación agua-material cementante (ligante) apropiada para la resistencia y durabilidad necesarias.

Las mezclas de concreto se deben mantener lo más sencillas posible, pues un número excesivo de ingredientes normalmente dificulta el control del concreto. Sin embargo, el tecnólogo de concreto no debe descuidar la moderna tecnología del concreto. (Steven H. Kosmatka, 2004)

### 3.3 Método por el método del American Concrete Institute (ACI)

Para la aplicación del método ACI y la correcta dosificación de los materiales que conforman el concreto, anticipadamente se hace la caracterización de las propiedades físicas de estos, ya que es un método volumétrico donde se involucran los valores de densidades para calcular el volumen absoluto que cada ingrediente ocupará en la unidad de volumen de concreto resultando más exacto que otros métodos ya que considera propiedades como:

- Densidad o Peso específico del cemento
- Módulo de finura del arena
- Densidad o Peso específico de la arena
- Absorción de la arena
- Humedad de la arena
- Densidad o Peso específico de la grava
- Tamaño máximo de la grava
- Peso volumétrico seco suelto de la grava
- Peso volumétrico seco varillado de la grava
- Absorción de la grava
- Humedad de la grava

En esencia, el método ACI consiste en una secuencia de pasos lógicos y directos que toman en cuenta las características de los materiales que se van a emplear. Estos pasos se describirán a continuación:

**Paso 1: Selección del revenimiento**

Para el proporcionamiento de la mezcla, el revenimiento se habrá determinado según las exigencias de construcción. Se deberá especificarse no sólo un valor sino también un valor máximo para el revenimiento. Esto es necesario para evitar segregación.

Este valor se puede establecer según la tabla y el uso que se le dará al concreto:

Tabla 19. Revenimientos recomendados.

REVENIMIENTOS RECOMENDADOS PARA DIVERSOS TIPOS DE CONSTRUCCIÓN		
TIPO DE CONSTRUCCIÓN	REVENIMIENTO EN CENTÍMETROS	
	Máximo*	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas	7.5	2.5
Zapatas, cajones de cimentación y muros de Sub-estructura sencillos.	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados.	10	2.5
Columnas para edificios.	10	2.5
Pavimentos y losas.	7.5	2.5
Concreto masivo.	7.5	2.5
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.		

(ACI 211, 1991)

**Paso 2: Selección del tamaño máximo de agregado**

Esto, también, tendrá que decidirse, generalmente lo hará el proyectista de la estructura recordando con cuidado los requisitos geométricos del tamaño del miembro y el espaciamiento del acero de refuerzo o alternativamente, según razones de disponibilidad.

Debe considerar la separación de los costados de la cimbra, el espesor de la losa y el espacio libre entre varillas individuales o paquetes de ellas.

Por consideraciones económicas es preferible el mayor tamaño disponible, siempre y cuando se utilice una trabajabilidad adecuada y el procedimiento de compactación permite que el concreto sea colado sin cavidades o huecos. La cantidad de agua que se requiere para producir un determinado revenimiento depende del tamaño máximo, de la forma y granulometría de los agregados, la temperatura del concreto, la cantidad de aire incluido y el uso de aditivos químicos.

### Paso 3: Estimación del contenido de agua y del contenido de aire

El contenido de agua por volumen unitario requerido para producir un revenimiento dado depende de varios factores: el tamaño máximo de agregado, su forma, textura y granulometría; el contenido de aire incluido; el uso de aditivos con propiedades fluidificantes o reductoras de agua; y la temperatura del concreto. Se han de utilizar tablas que relacionen el revenimiento con estas propiedades, a menos que se cuente con experiencia directa.

Durante la operación del mezclado queda aire incluido dentro del concreto, pero cuando se prevea que habrá condiciones de exposición severa, es conveniente incluir aire en el concreto. Bajo estas condiciones los comités 211 y 318 del ACI indican las cantidades aproximadas de aire atrapado que pueden ser esperadas en concreto sin aire incluido, y los niveles recomendados de aire internacionalmente incluido para diferentes tamaños máximos de agregado, y para los diferentes niveles de exposición. Para la interpretación de estos niveles de exposición el comité ACI-211 contempla las siguientes definiciones:

**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.

Se pueden utilizar los valores que recomienda el ACI 211.

Tabla 20. Relaciones entre la relación Agua/Cemento y la resistencia a la compresión del concreto

REQUISITOS APROXIMADOS DE AGUA DE MEZCLADO Y CONTENIDO DE AIRE PARA DIFERENTES REVENIMIENTOS Y TAMAÑOS MAXIMOS NOMINALES DE AGREGADO.									
Agua, kg. / m <sup>3</sup> de Concreto									
Tamaños máximos nominales de agregado, en (mm).	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"	
ø	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150	
Revenimiento en centímetros	Concreto sin aire incluido								
ø									

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN,  
CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

De 2.5 a 5	207	199	190	179	160	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	175	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	185	178	160	---
Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin inclusión de aire, expresado como un porcentaje.	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Promedio recomendado de contenido de aire total, según el nivel de exposición (%)								
$\delta$								
Exposición ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4
<p>*Estas cantidades de agua de mezclado son para usarse en el cálculo del contenido de cemento para mezclas de prueba. Son cantidades máximas para agregados gruesos angulosos razonablemente bien formados y con granulometría dentro de lo que dictan las especificaciones.</p> <p>+Los valores de revenimiento en el concreto con agregado mayor de 40 mm están basados en pruebas de revenimiento, después de quitar las partículas mayores de 40 mm mediante el cribado húmedo.</p> <p>++Las cantidades de agua de mezclado que se emplean para calcular factores de cemento que se emplean para calcular mezclas de prueba cuando se utilizan agregados de tamaño máximo nominal de 70 o 150 mm son promedios para agregados gruesos razonablemente bien formados y con una buena granulometría de grueso a fino.</p> <p>+++En varios documentos de ACI aparecen recomendaciones adicionales con respecto al contenido de aire y a las tolerancias necesarias de contenido de aire para control en el campo. Entre estos documentos están: ACI 201, 345, 318, 301 Y 302. La forma ASTM C94 para concretos premezclados también proporciona los límites de contenido de aire, Los requerimientos que aparecen en otros documentos no siempre pueden concordar exactamente, por lo que al proporcionar concreto se debe prestar atención a la selección de un contenido de aire que se ajuste a las necesidades de la obra, así como a las especificaciones aplicables.</p> <p># Para concretos que tienen agregados grandes que serán tamizados en húmedo a través de una malla de 1 1/2" (3705 mm) antes de someterse a la prueba de contenido de aire, el porcentaje de aire esperado en el material de tamaño inferior a 40 mm debe ser como el tabulado en la columna de 40 mm.</p> <p>&amp; Cuando se emplea agregado grande en concretos con bajo factor de cemento, la inclusión de aire no debe ir detrimento de la resistencia. En la mayoría de los casos el requerimiento de agua de mezclado se reduce lo suficientemente como para mejorar la relación Agua / Cemento y, esta manera, compensar el efecto reductor de resistencia del concreto con inclusión de aire. Generalmente, sin embargo, para dichos tamaños máximos grandes de agregado los contenidos de aire recomendados en caso de exposición severa se deben considerar, aunque pueda haber poca o ninguna exposición a la humedad o al congelamiento.</p> <p>°° Estos valores se basan en el criterio de que es necesario un 9 % de aire en la fase de mortero del concreto. Si el volumen del mortero va a ser sustancialmente diferente del determinado en esta obra, puede ser conveniente calcular el contenido de aire necesario tomando un 9% del volumen real del mortero.</p>								

*(ACI 211, 1991)*

**Paso 4: Selección de la relación agua/cemento**

Existen dos criterios para la selección de la relación agua/cemento: resistencia y durabilidad. En lo que corresponde a la resistencia a la compresión, el valor promedio que se busca debe exceder la resistencia " mínima" especificada por un margen apropiado.

Es para el cemento real que se va a emplear, que se ha de establecer la relación entre la resistencia a 28 días y la relación agua/cemento.

En lo que corresponde a durabilidad, la relación agua/cemento bien puede ser especificada por el proyectista de la estructura o por un reglamento de diseño apropiado. Lo ideal es que la relación agua/cemento escogida sea la más baja de los dos valores que emanen de los requisitos de resistencia y durabilidad.

Tabla 21. Relaciones entre la relación Agua/Cemento y la resistencia a la compresión del concreto

CORRESPONDENCIA ENTRE LA RELACÓN AGUA/CEMENTO Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO		
Resistencia a la compresión a los 28 días, kg./cm2	Relación Agua/Cemento por peso	
	Concreto	Concreto
	Sin aire incluido	Con aire incluido
420	0.41	--
350	0.48	0.4
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74
*Los valores son resistentes promedio estimadas para concretos que no contienen más del porcentaje de aire que se indica en la tabla N° 2 para una relación A/C constante se reduce la resistencia del concreto conforme se incrementa el contenido de aire.		
La resistencia se basa en cilindros de 15x30 cm, curados con humedad a los 28 días, a 23 + 1.7 °C, de acuerdo con la norma ASTM C31.		
La relación supone un tamaño máximo de agregado de ¾ a 1”; para un banco dado, la resistencia producida por una relación A/C dada se incrementará conforme se reduce el tamaño máximo del agregado.		

(ACI 211, 1991)

**Paso 5: Cálculo del contenido de cemento**

Es el contenido de agua dividido por la relación agua/cemento, es decir, el contenido de cemento se calcula con la cantidad de agua, determinada en el paso tres, y la relación agua cemento, obtenida en el paso cuatro; cuando se requiera un contenido mínimo de cemento o los requisitos

de durabilidad lo especifiquen, la mezcla se deberá basar en un criterio que conduzca a una cantidad mayor de cemento.

### **Paso 6: Estimación de contenido de agregado grueso**

La relación óptima del volumen aparente de agregado grueso respecto del volumen total de concreto depende sólo del tamaño máximo del agregado y de la granulometría del agregado fino. La forma de las partículas de agregado grueso no entra directamente en la relación porque, un agregado triturado tiene un volumen aparente mayor para la misma masa, o sea, una densidad aparente menor que un agregado bien redondeado. Así, el factor forma es tomado en cuenta automáticamente en la determinación de la densidad aparente. La tabla da los valores del volumen óptimo de agregado grueso cuando se utiliza con agregados finos de diferentes módulos de finura. Este volumen se convierte en masa de agregado grueso por metro cúbico de concreto mediante la multiplicación del valor de la tabla por la masa del agregado secado y varillado en kg/m<sup>3</sup>.

*Tabla 22. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen del concreto*

<b>VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO POR VOLUMEN UNITARIO DE CONCRETO</b>							
Tamaño máximo del Agregado (mm)	Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para diferentes <b>módulos de figura</b> de la arena.						
	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51	0.49	0.47
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60	0.58	0.56	0.54
25(1")	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63	0.61	0.59
37.5(1 1/2")	0.75	0.73	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63
50(2")	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68	0.66
75(3")	0.82	0.80	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70
150(6")	0.87	0.85	0.83	0.81	0.79	0.77	0.75
* Los volúmenes se basan en agregados en condiciones de varillado seco, como, como se describe en la forma ASTM C29. Estos volúmenes se han seleccionado a partir de relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado a la construcción. Para concretos menos trabajables, como los requeridos en la construcción de pavimentos de concreto, se pueden incrementar en un 10% aproximadamente.							
+ Para concretos más trabajables, véase la ASTM Método 136 para el cálculo del módulo de figura.							

*(ACI 211, 1991)*

### **Paso 7: Estimación del contenido de agregado fino**

El volumen absoluto de esta masa se puede obtener realizando la suma de los volúmenes absolutos de agua, cemento, aire incluido y agregado grueso del volumen del concreto, es decir, 1m<sup>3</sup>. Para cada ingrediente, el volumen absoluto es igual a la masa dividida por la densidad

absoluta del material en  $\text{kg/m}^3$ , la densidad absoluta es el peso específico del material multiplicado por la densidad del agua  $1,000 \text{ kg/m}^3$ .

El volumen absoluto de agregado fino se convierte en masa al multiplicar este volumen por el peso específico del agregado fino y por la densidad del agua.

### **Paso 8: Ajustes por humedad del agregado**

Las cantidades de agregado 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 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**

Al realizar mezclas de prueba, se refiere a los ajustes a las mezclas de prueba, en las que se debe verificar el peso volumétrico del concreto, su contenido de aire, la trabajabilidad apropiada mediante el revenimiento y la ausencia de segregación y sangrado, así como las propiedades de acabado. Para correcciones por diferencias en el revenimiento, en el contenido de aire o en el peso unitario del concreto el informe ACI 211 proporciona una serie de recomendaciones que ajustan la mezcla de prueba hasta lograr las propiedades especificadas en el concreto.

## **4. METODOLOGÍA**

En este capítulo se mencionan las pruebas y técnicas utilizadas utilizando sus normas respectivas, para obtener las características físico-mecánicas de los materiales, así como la elaboración de especímenes y sus diferentes análisis para determinar sus propiedades.

### **4.1 Pruebas físico-mecánicas de los materiales**

#### **4.1.1 Material cementante**

Tabla 23. Normativas mexicanas y ASTM.

ENSAYE	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico.	NMX-C-057-ONNCCE2010	ASTM-C-187-98
Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico por la aguja de Gillmore.	---	ASTM-C-266-04
Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico.	NMX-C-152-ONNCCE2010	ASTM-C-188-95

#### 4.1.1.1 Densidad del cemento

Es la relación de la masa de cemento en gramos, entre el volumen en milímetros que desplaza éste al introducirse en un líquido, con el cual no efectúe reacción química alguna. El peso específico del cemento varía de 3.10 hasta 3.25, con promedio de 3.15 Mg/m<sup>3</sup>. El análisis de la densidad aparente del cemento se realiza a una muestra representativa del cemento a emplear en el diseño de la mezcla de concreto tal y como se obtiene después de la fabricación y comercialización del cemento. (MNX-C-152-0NNCE, 2014)

#### Equipo empleado:

- Muestra representativa de cemento.
- Frasco de Le Chatelier.
- Balanza con aproximación a los 0.1 gramos.
- Queroseno exento de agua, o nafta cuya densidad no sea menor de 62 API o petróleo.
- Un recipiente con agua.
- Un termómetro.

#### Procedimiento:

Para conocer la densidad aparente del cemento se realiza el ensaye de laboratorio, el cual consiste en que, conocido un peso de cemento, se calcula su volumen por medio de desplazamientos de líquido. Los pasos a seguir durante la prueba son los siguientes:

1. Se llena el matraz Le Chatelier con keroseno libre de agua o nafta a un nivel medido entre 0 y 1 ml. 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.

Ilustración 17. Matraz Le Chatelier con Keroseno Li.



(Duarte, 2019)

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.

Ilustración 18. Peso del cemento.



(Duarte, 2019)

4. Se debe tener cuidado de evitar salpicaduras y que el cementante se adhiera a las paredes interiores del cuello superior del matraz.
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.
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.

Ilustración 19. Keroseno con cementoLf.



(Duarte, 2019)

**Cálculos:**

Partiendo de la masa del cemento y tomando la diferencia entre las lecturas inicial y final como el volumen del líquido desplazado, se tiene que el cálculo de la densidad aparente del cemento es:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa del cemento}}{\text{volumen del cemento}} = \frac{60 \text{ gr.}}{L_f - L_i}$$

El valor resultante del cálculo queda representado en unidades de  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

#### 4.1.1.2 Consistencia normal método vicat

Nos indica el grado de fluidez o dificultad con que la pasta puede ser manejada. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 26 y 33% (CONCRETO., 1997).

Determinar la cantidad de agua mínima necesaria para hidratar por completo a las partículas de cemento Portland para presentar una penetración de 10 mm  $\pm$  1 mm, bajo la superficie libre, empleando una aguja de 1 cm de diámetro y un molde para colocar tal pasta, en un tiempo de 30 segundos después de haber iniciado la prueba (NMX-C-057-ONNCCE., 2015). Esta cantidad puede variar dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad del ambiente existente en el momento de realizar el ensaye, para la misma cantidad y tipo de cemento Portland. La consistencia del cemento se mide por medio del aparato de Vicat, se muestra en la ilustración 16.

#### Equipo empleado:

- Muestra representativa de cemento.
- Agua destilada o limpia.
- Balanza
- Recipiente para realizar la mezcla del cemento con el agua.
- Pesas con las variaciones permitidas en la tabla A.S.T.M. C187-55.
- Probeta graduada de 100 y 200 mililitros.
- Aparato de Vicat.
- Cristal liso.

#### Procedimiento:

El desarrollo de la prueba para conocer la consistencia normal se resume en dos incisos principalmente.

- A. Obtención de la muestra representativa de cemento.
- B. Preparación de la pasta de cemento.

A continuación, se describe paso a paso el desarrollo del ensaye, teniendo en cuenta los dos incisos anteriores.

1. Se pesan 650 g 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.

Ilustración 20. Peso del cemento para densidad.



(Duarte, 2019)

2. Se fija una cantidad de agua expresada en porciento. Respecto a la masa del cemento seco, se mide en la probeta graduada y se vierte en el centro del cráter (cronometrando a partir de que cae el agua sobre el cemento).

Ilustración 21. Determinacion del agua optima.



(Duarte, 2019)

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.

Ilustración 22. Mezcaldo del cemento.



(Duarte, 2019)

- 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.
- 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.

Ilustración 23. Moldeado de la esfera.



(Duarte, 2019)

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).

Ilustración 24. Se introduce a presión dentro del anillo cónico



(Duarte, 2019)

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”.

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

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN,  
CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

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.

Ilustración 25. Centrado con respecto a la barra



(Duarte, 2019)

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.

Ilustración 26. Consistencia normal



(Duarte, 2019)

### Cálculos:

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.

$$CN = \frac{\text{Mililitros de agua}}{\text{Masa del cemento}} * 100$$

#### *4.1.1.3 Tiempo de fraguado guillmore*

El fraguado se refiere a un cambio del estado fluido al estado rígido. Aunque durante el fraguado la pasta adquiere cierta resistencia, para efectos prácticos es conveniente distinguir el fraguado del endurecimiento, pues este último término se refiere al incremento de resistencia de una pasta de cemento fraguada. En el ensaye, se utilizan los términos de fraguado inicial y fraguado final para describir etapas de fraguado elegidas arbitrariamente.

El fraguado inicial según la norma se define como el 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. (NMX-C-414-ONNCCE., 2014)

El fraguado final es el tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta ya esta dura.

Para la determinación del fraguado inicial como final del cemento hidráulico se realiza el ensaye de tiempos de fraguado mediante las agujas de Gillmore, de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM-C-266. El desarrollo del ensaye se realiza con ayuda del manual de prácticas de Análisis de Materiales, en donde el procedimiento de tal análisis es el siguiente:

##### **Equipo empleado:**

- Aparato de Gillmore.
- Balanzas.
- Pesas.
- Probetas graduadas.

##### **Temperatura y humedad:**

La temperatura del laboratorio, material y equipo deben mantenerse entre 20° y 27° C, la que respecta a la del agua de mezclado y la cámara de humedad no deben variar de 23° C  $\pm$  2° C y la humedad relativa del laboratorio no será inferior a 50.

##### **Procedimiento:**

1. Preparación de la pasta de cemento. Siguiendo el procedimiento descrito en la preparación de mezcla para la consistencia normal se mezclan 650g del cemento con el agua necesaria para su consistencia normal.
2. Moldeado del espécimen. Con la pasta de cemento preparada y sobre una placa de vidrio cuadrada, plana y limpia de aproximadamente 4" por lado, se hace una pastilla de poco más o menos 7.5 centímetros de diámetro y 1.3 centímetros de espesor en la parte central, disminuyendo hacia los bordes. Para moldearla, se aplanan primero la pasta de cemento sobre el vidrio moviendo la cuchara desde los bordes hacia el centro, aplanando a continuación la parte central superior, se coloca la pastilla en el cuarto húmedo, salvo cuando vaya efectuarse determinaciones del tiempo de fraguado.

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

3. Determinación de los tiempos de fraguado. Al determinar el tiempo de fraguado, se mantienen las agujas en posición vertical y se ponen en contacto ligeramente con la superficie de la pastilla. Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado inicial cuando soporta a las agujas de Gillmore inicial (la de menor masa), sin que marque huellas apreciables. Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado final cuando soporta la aguja de Gillmore Final (la de mayor peso), sin que marque huella apreciable.

Ilustración 27. Agujas de Gillmore y pasta cementante



(Duarte, 2019)

Las mediciones para la determinación de los tiempos de fraguado comienzan a llevarse a cabo a los 15 minutos después de la preparación de la pastilla y posteriormente se repite el proceso cada 15 minutos, y a consideración del observador se establecen los tiempos de medición posteriores hasta conseguir que cada aguja se pueda apoyar sobre la masa de pasta de cemento sin dejar huella apreciable. Es de vital importancia que las condiciones de humedad y temperatura no varíen dentro del cuarto húmedo.

Ilustración 28. Procedimiento tiempo de fraguado con agujas Gillmore



(Duarte, 2019)

**Especificaciones respecto al ensaye:**

El tiempo de fraguado se afecta no solo por el porcentaje de sustitución, temperatura del agua empleada y cantidad de amasado que haya recibido la pasta, sino también por la humedad relativa del ambiente, entonces su determinación es solo aproximada.

#### 4.1.2 Materiales pétreos

Ilustración 29. Gava.



Ilustración 30. Arena.



Tabla 24. Normas correspondientes a los agregados pétreos.

ENSAYE	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Práctica estándar para el muestreo de agregados.	NMX-C-030-ONNCCE-2004	ASTM-D-75-03
Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba	NMX-C-170-ONNCCE-1997	ASTM-C-702-03
Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporado por secado	NMX-C-166-ONNCCE-2006	ASTM-C-566-97
Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados.	NMX-C-073-ONNCCE-2004	ASTM-C-29-97
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino.	NMX-C-165-ONNCCE-2014	ASTM-C-128-04
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso.	NMX-C-164-ONNCCE-2014	ASTM-C-127-04
Método de prueba estándar para materiales finos que pasan la malla N° 200 en agregados por lavado.	NMX-C-084-ONNCCE-2006	ASTM-C-117
Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.	NMX-C-071-ONNCCE-2004	ASTM-C-142-97

Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concretos	NMX-C-088-ONNCCE-1997	ASTM-C-40-99
Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos	NMX-C-077-ONNCCE-1997	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

#### 4.1.2.1 Muestreo de agregados

Estos procedimientos serán aplicables para los agregados pétreos tanto finos como gruesos. La importancia del muestreo de materiales es tan relevante como los mismos ensayos de caracterización, dado que el material obtenido debe representar las características del conjunto, ser representativo y así al ser evaluado obtener datos confiables para un correcto diseño de mezcla. (NMX-C-030-ONNCCE, 2004)

Ilustración 31. Muestreo de los agregados petreos



(Duarte, 2019)

#### Procedimiento:

1. El muestreo se realiza en el banco de material, en los camiones que hacen el transporte y suministro del material a la obra o del mismo material que se tenga ya en obra.
2. El procedimiento se realiza en forma sistemática seleccionando de manera objetiva y aleatoria el material para la posterior determinación de sus características.
3. El tamaño de las muestras parciales, su número y frecuencia para cada tipo de muestreo se realiza de acuerdo a la tabla.

Tabla 25. Especificaciones del agregado pétreo.

MATERIAL	T.M. nominal (mm)	Pasa por la malla (cribado N°)	Masa mínima de la muestra de campo
Arena	Hasta 5	4.75 mm (N° 4)	100
Grava	Hasta 75	75 mm (3")	150
Grava	Mayor de 75	-----	200
Grava	Cualquiera	-----	300

(NMX-C-030-ONNCCE, 2004)

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. 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.

Tabla 26. Número, frecuencia y tamaño del muestreo

TIPO	NÚMERO Y FRECUENCIA	TAMAÑO DE LA MUESTRA EN Kg.
Exploración de bancos.	*Una muestra por sondeo por cada 20,000 m <sup>3</sup> de material homogéneo. * Una muestra por sondeo por cada 5,000 m <sup>3</sup> de material heterogéneo.	20

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN,  
CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

Estudio de bancos.	*Una muestra por sondeo por cada 10,000 m3 de material homogéneo. *Una muestra por sondeo por cada 2,500 m3 de material heterogéneo.	50
Estudio de almacenamientos.	* Una muestra por cada 400 m3 de material	20
Control de calidad.	* Una muestra por cada 250 m3 de material. * Una muestra por cada 2,500 m3 de material.	5 40

**4.1.2.2 Cuarteo**

También conocido por ensaye estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba. (NMX-C-170-ONNCCE, 1997)

El objetivo es obtener una muestra del campo para reducir al tamaño requerido para la realización de ensayos, una muestra que represente al conjunto total en todas propiedades para poder obtener así resultados confiables de los posteriores análisis de caracterización. Para que la muestra sea representativa debe elegirse la técnica de muestreo más adecuada que produzca a su vez una muestra aleatoria adecuada. “El cuarteo debe hacerse cuando el volumen es considerable y solo si se requiere una muestra más pequeña que sea representativa para su estudio”. Las consecuencias de no llevar a cabo de manera correcta los procedimientos de muestreo conllevan a no obtener resultados fiables de los análisis consecuentes.

**Cuarteo Manual (cuarteo con palas)**

Ilustración 32. Cuarteo Manual de arena.



Ilustración 33. Cuarteo Manual de grava.



(Duarte, 2019)

**Equipo empleado:**

- Pala
- Cucharón de punta recta o cuchara de albañil
- Escoba o cepillo.

### **Procedimiento:**

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 contaminante.
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 aplana la parte superior de la pila con la parte posterior de la pala.
5. Se divide el material trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie horizontal aplana del material, eliminando las dos porciones opuestas, el material sobrante nos servirá para realizar las pruebas correspondientes.

### **Cuarteo Mecánico, divisor de muestra.**

#### **Equipo empleado:**

- Cuarteador de muestras
- Charolas grandes de lámina.
- Palas de boca recta.
- Cucharones.
- Divisor Mecánico – Cuarteador de Johnson.

Ilustración 34. Equipo para cuarteo mecánico



(Duarte, 2019)

### **Procedimiento:**

1. Se toma la muestra representativa en una charola ancha, más o menos del mismo tamaño que el canal de alimentación del divisor. Tomando el material de los extremos opuestos de cuarte anterior.
2. Se coloca la muestra en la charola de la parte superior del divisor, distribuyéndola uniformemente de orilla a orilla, y 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.

Ilustración 35. Cuarteo Mecánico de arena.



Ilustración 36. Cuarteo Mecánico de grava.



(Duarte, 2019)

### 4.1.3 ARENA

#### 4.1.3.1 Humedad actual

Determinar el porcentaje de humedad que contiene la arena en el momento que se va a utilizar para elaborar una mezcla, para así poder realizar la corrección correspondiente por humedad. (NMX-C-166-ONNCCE-2006)

#### Equipo empleado:

- Muestra representativa de arena de 600 gramos aproximadamente.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Parrilla eléctrica.
- Charolas metálicas.
- Espátulas.
- Cristal.

#### Procedimiento:

1. De la muestra representativa se pesan 300 gramos registrando este valor como masa inicial de la muestra o masa húmeda actual (Mh),
2. Posteriormente, esta muestra se coloca en una charola metálica sobre la parrilla eléctrica para hacer el secado del material moviéndolo esta con la espátula en forma constante para que el secado sea homogéneo hasta eliminar completamente la humedad del material.
3. Para saber cuándo el material ya está seco, se coloca el cristal sobre el material y en el momento que ya no se empañe esto significa que el material ya está seco.

4. Procediendo a dejar enfriar el material a temperatura ambiente y pesarlo. Este peso se registrará como masa final o masa seca de la muestra (Ms).

Ilustración 37. Secado y pesado de la arena para % de humedad actual



(Duarte, 2019)

### Cálculo:

$$\% \text{ de humedad actual} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Dónde:

Mh= masa de la muestra en gramos.

Ms = masa seca del material en gramos.

### 4.1.3.2 Humedad superficial

Quitar el exceso de agua a la arena para su correcto análisis.

Ilustración 38. Molde tronconico.

### Equipo empleado:

- Una muestra representativa.
- Una balanza.
- Una parrilla eléctrica.
- Charolas metálicas.
- Un cono metálico (troncocónico)
- Un pisón.
- Una espátula.



(Duarte, 2019)

### Procedimiento:

1. La muestra de 2 kg se pone a saturar durante 24 horas, como mínimo. Dicha muestra se obtiene mediante alguno de los métodos de reducción de muestras.

2. Al término de este tiempo se seca superficialmente, la arena por medio del molde troncocónico como se describe a continuación:

Ilustración 39. Secado superficial de la arena.



Ilustración 40. Verificación de humedad superficial.



(Duarte, 2019)

Se coloca la arena en la charola y se coloca en la parrilla eléctrica para realizar la eliminación de agua que tiene en exceso, esto es, hacer el secado de la arena en forma superficial.

Para saber cuándo la arena 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 pisón, dando 12 a la primera, 8 a la segunda y 5 a la tercera. Inmediatamente se retira el cono y si la arena trata de disgregarse quiere decir, que ya está seca superficialmente y si la arena mantiene la forma del cono significa que todavía tiene agua en exceso por lo tanto hay que seguir secando el material hasta que se obtenga el secado superficial. Conforme vaya perdiendo la humedad la muestra hay que realizar más continuamente el procedimiento con el cono para evitar que se seque en exceso.

#### *4.1.3.3 Humedad de absorción*

Determinar la capacidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje. (NMX-C-165-ONNCCE., 2014)

#### **Equipo empleado:**

- Una muestra representativa de arena aproximadamente 600gr.
- Charola
- Parrilla
- Espátulas
- Vidrio

### Procedimiento:

1. Una vez que se ha notado que la arena se encuentra seca superficialmente hay que pesar una muestra de 300 gramos, registrando esta masa, como masa saturada y superficialmente seca (Mh).
2. La muestra de 300 gramos, se coloca en una charola para secarla hasta peso constante, o sea, hasta eliminar completamente el agua.
3. Para saber cuándo el material está seco se coloca el cristal sobre el material, si no lo empaña retiramos el material y lo dejamos enfriar un poco, procediendo a pesarlo y registrarlo como masa seca del material (Ms), si todavía se empaña el cristal hay que seguir secando el material hasta secarlo completamente.

Ilustración 41. Masa seca totalmente de arena.



(Duarte, 2019)

### Cálculo:

$$\% \text{ de humedad de absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Donde:

Mh = masa saturada y superficialmente seca, en gramos.

Mf = masa del material seco, en gramos.

#### 4.1.3.4 Masa volumétrica seca y suelta

Determinar la masa por unidad de volumen de la arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural. (NMX-C-073-ONNCCE., 2004)

### Equipo empleado:

- Una muestra de arena seca al sol.
- Un recipiente de masa y volumen conocido.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una balanza o báscula.
- Un cucharón
- Pala

**Procedimiento:**

1. Se toma la arena de los extremos opuestos del cuarteo.
2. Se vacía arena dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros, distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.
3. Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores.
4. Procediendo a pesarlo. La masa obtenida anteriormente se le resta el peso del recipiente para obtener la masa de la arena.

Ilustración 42. Masa volumétrica seca y suelta.



(Duarte, 2019)

**Cálculo:**

$$M.V.S.S. = \frac{M}{V}$$

Dónde:

M.V.S.S. = Masa volumétrica seca y suelta en gramos/cm<sup>3</sup>.

M = Masa de la arena en gramos.

V = Volumen del recipiente en cm<sup>3</sup>.

**4.1.3.5 Masa volumétrica seca y varillada**

Obtener la masa por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación. (NMX-C-073-ONNCCE., 2004)

**Equipo empleado:**

- Una muestra de arena completamente seca.
- Un recipiente de peso y volumen conocido.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una balanza o báscula. Un cucharón y una pala.

**Procedimiento:**

1. Se toma la arena de los extremos opuestos del cuarteo.
2. Se procede a llenar el recipiente con arena a volteo dejándola caer a una altura aproximada de 5 centímetros, el llenado del recipiente debe de hacerse en tres capas dando a cada capa de arena 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material. Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes.
3. Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.
4. Se pesa el recipiente con el material y se le resta el peso del recipiente para así obtener la masa neta del material.

Ilustración 43. Masa Volumétrica Seca Varillada



(Duarte, 2019)

**Cálculo:**

$$M.V.S.V. = \frac{M}{V}$$

Dónde:

M.V.S.V.= Masa volumétrica seca y varillada en gramos/cm<sup>3</sup>.

M = Masa de la arena en gramos.

V = Volumen del recipiente en cm<sup>3</sup>.

**4.1.3.6 Colorimetría**

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

### Equipo empleado:

- botella incoloro de 250 a 350 cm<sup>3</sup> con marcas a cada 25 cm<sup>3</sup> (frasco de biberón).
- Charolas, parrillas de secado, espátulas, balanza, vasos de precipitado.
- Material para las soluciones y tabla colorimétrica.
- Solución de sosa cáustica 30 gramos por litro de solución normal en agua destilada.

### Procedimiento:

1. Se toma una muestra representativa de arena de 500 gramos aproximadamente.
2. Se seca hasta adquirir masa constante a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
3. Se coloca la arena seca y fría en el frasco de biberón hasta 133 cm<sup>3</sup>, adicionándole solución de sosa cáustica hasta los 206 cm<sup>3</sup>.
4. Se tapa el frasco de biberón y se agita fuertemente durante dos minutos como mínimo.
5. posteriormente se dejará reposar 24 horas.
6. Al cabo de este tiempo se compara el color del líquido de la botella con la tabla colorimétrica.

Ilustración 44. Colorimetría en arena.



(Duarte, 2019)

### Interpretación de resultados:

Si el color obtenido es más oscuro que el color normal, podemos sospechar de un exceso de materia orgánica en la arena. Para comprobarlo debemos hacer otra prueba de colorimetría con la misma arena, pero lavada, ya que ocasionalmente se presentan materiales de origen inorgánico que reaccionan con la solución de sosa cáustica dando un color oscuro sin existir materia orgánica. Esta es la razón por la cual debe de repetirse la prueba, si esta vuelve a dar un color oscuro debemos completar la prueba de colorimetría con un análisis químico.

#### 4.1.3.7 Sedimentación

Determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable o no en la elaboración de concreto como control de calidad.

##### Equipo empleado:

- Un frasco graduado con tres marcas, la primera a los 414 ml, la segunda a los 444ml y la tercera a los 828 ml.
- Una muestra de arena seca de 2 kilogramos aproximadamente.
- Un litro de agua de preferencia destilada.

##### Procedimiento:

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

Ilustración 45. Sedimentacion en arenas.



(Duarte, 2019)

##### Interpretación de resultados:

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

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

#### 4.1.3.8 Material que pasa la malla n° 200

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

##### Equipo empleado:

- Malla N° 200.
- Malla N° 16.
- Charola de dimensiones adecuadas para contener el material con agua.
- Una balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Espátula y parrilla eléctrica.
- Un cristal.

##### Procedimiento:

1. Se toma una muestra representativa de 600 gramos de arena, se seca a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
2. La muestra una vez seca y fría se coloca en la balanza y se pesa, registrando su masa al décimo de gramo y considerando esta medición como masa seca inicial (Mi).
3. Se coloca el material en un recipiente y se le agrega agua hasta saturar.
4. Se agita enérgicamente la muestra con agua y se vierte inmediatamente sobre el juego de mallas (la N° 16 arriba y la N° 200 abajo).
5. Una vez puesto el material en el juego de mallas se le sigue agregando agua y agitando hasta que el agua quede completamente clara.
6. Se regresa el material retenido en las mallas por medio del lavado.
7. Se seca el material completamente con ayuda de la fuente de calor, se deja enfriar y se obtiene la masa; considerando esta lectura como la masa seca después de lavar o final (Mf).

Ilustración 46 Material que pasa la malla N° 200.



(Duarte, 2019)

**Cálculo:**

$$A = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100$$

Dónde:

A = porcentaje de material que pasa la malla N° 200.

Mi = masa seca inicial, gramos.

Mf = masa final seca después de lavar en gramos.

**Recomendaciones y especificaciones:**

Cuando la arena se emplea en la elaboración de concreto hidráulico y esta contiene exceso de partículas finas que pasan la malla N° 200, la cantidad de cemento necesario aumenta considerablemente, existiendo la posibilidad de que aparezcan grietas en las estructuras de concreto.

Cuando la arena se encuentra fuera de las especificaciones, si económicamente es posible se recomienda lavarla o adoptar una solución que permita quitarle el material fino o desecharla totalmente.

El material fino de los agregados que pasa por la criba 0.075 mm (malla No. 200) debe cumplir con las condiciones establecidas en la tabla 21. La determinación se realiza de acuerdo con el método de ensayo que indica la norma (NMX-C-111-ONNCCE., 2014).

Tabla 27. Especificaciones para material que pasa la malla N°200 en arenas.

CONCEPTO	Material Máximo permisible en Masa de la muestra total en %	
	NMX-111-ONNCCE-2014	ASTM-C-33-03
En concreto sujeto a abrasión	5.00 (1)	3.00 (A)
En concretos pre-forzados	8.00 (1)	--
En otros concretos	15	5.00 (A)

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

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

#### 4.1.3.9 Densidad

Determinar el peso por unidad de volumen de la arena.

#### Equipo empleado:

- Muestra representativa de arena aproximadamente 1kg.
- Molde troncocónico
- Pisón
- Charola
- Frasco
- Agua
- Bascula

#### Procedimiento:

1. Se toma la arena y se cubre con agua manteniéndola en saturación durante  $24 \pm 4$  horas.
2. Se seca superficialmente la muestra por medio del molde troncocónico y siguiendo los pasos de la prueba de humedad superficial mencionada anteriormente.
3. Una vez seca superficialmente, se pesa una muestra aproximada de 350gr. registrándola como masa de la arena.
4. Se pesa el frasco vacío.
5. Se vacía la arena, de manera que toda la muestra entre al frasco utilizando una embudo.
6. Se llena el frasco hasta el nivel de aforo de agua.
7. Se agita el frasco para liberar las burbujas atrapadas.
8. Se pesa el frasco con el agua y la arena y lo consideraremos como peso total.

Ilustración 47. Densidad de la arena.



(Duarte, 2019)

**Cálculo:**

$$D = \frac{As}{Vf - (K - F - As)}$$

Dónde:

D = Desnsidad de la arena.

As = Peso de la muestra de arena.

Vf = Volumen del grasco.

F = Peso del frasco.

K = Peso total.

#### 4.1.4 GRAVA

##### 4.1.4.1 Humedad actual

Determinar el porcentaje de humedad que contiene la grava en el momento que se va a utilizar para elaborar una mezcla, para así poder realizar la corrección correspondiente por humedad.

**Equipo empleado:**

- Una muestra representativa de grava.
- Charola Metalica
- Balanza.
- Parrilla
- Espátulas
- Vidrio

**Procedimiento:**

1. Se toma una muestra representativa de 400 a 500 g. y se determina su masa, registrándola como masa húmeda Mh.
2. Enseguida se coloca en la charola para exponerlo en la fuente de calor para eliminar el agua que contiene la grava moviéndola constantemente con la espátula para que el secado sea uniforme.
3. Cuando aparentemente este seca colocamos el cristal sobre ella para hacer la verificación del secado, si se empaña el cristal o se le forman gotas de agua quiere decir que el material todavía está húmedo y por lo tanto debemos seguir moviéndolo hasta que se seque completamente, para darnos cuenta de esto repetimos la operación con el vidrio.
4. Cuando esta seca la grava la retiramos de la fuente de calor y la dejamos enfriar un poco, posteriormente la pesamos para determinar la masa seca (Ms) en gramos.

Ilustración 48. Humedad actual en grava



(Duarte, 2019)

**Cálculo:**

$$\% \text{ de humedad actual} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Dónde:

Mh= masa de la muestra en gramos.

Ms = masa seca del material en gramos.

**4.1.4.2 Humedad de absorción**

**Equipo empleado:**

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

**Procedimiento:**

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

**Cálculo:**

$$\% \text{ de humedad de absorción} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

Donde:

Mh = masa saturada y superficialmente seca, en gramos.

Mf = masa del material seco, en gramos.

**Especificaciones:**

Tabla 28. Especificaciones de porcentaje de humedad de absorción

TIPO DE ABSORCIÓN	% H. ABSORCIÓN
Baja	Menor del 2%
Media	Entre 2% y 4%
Alta	Más del 4%

(NMX-C-164-ONNCCE., 2014)

**4.1.4.3 Densidad**

Determinar el peso por unidad de volumen de la grava.

**Equipo empleado:**

- Muestra representativa de grava, aproximadamente 2 kilos.
- Picnómetro
- Probeta de 250 ml.
- Franela
- Charolas

**Procedimiento:**

1. Se deja saturando la muestra durante 24 horas.
2. Después de saturar, se seca superficialmente con la ayuda de la franela.
3. Se pesan 300 gramos de grava seca superficialmente, registrándola como masa húmeda (Mh).
4. Se llena el picnómetro, se deja reposar hasta que deje de gotear por el orificio.
5. Se coloca la probeta de 250 ml por debajo del orificio, después se vierte la muestra (Mh) sobre el picnómetro procurando no salpicar el agua contenida en el picnómetro.
6. Se deja reposar hasta que el goteo sea prácticamente nulo, se mide el volumen desalojado y se registra como vf.
7. De manera análoga se realiza este procedimiento al menos dos veces más a fin de obtener un dato más preciso.

Ilustración 49. Desidad de la grava



(Duarte, 2019)

**Cálculo:**

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa de la grava}}{\text{volumen de la grava}}$$

**4.1.4.4 Masa volumétrica seca y suelta**

Determinar la masa por unidad de volumen de la grava cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural. (NMX-C-073-ONNCCE-2004)

**Equipo empleado:**

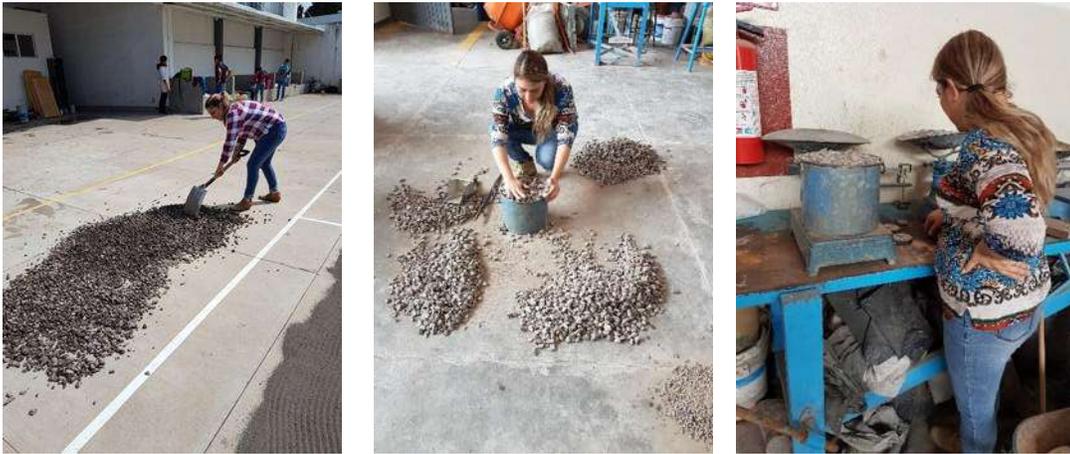
- Una muestra de arena completamente seca.
- Un recipiente de masa y volumen conocido.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una balanza o báscula.
- Un cucharón
- Pala

**Procedimiento:**

5. Se toma la arena de los extremos opuestos del cuarteo.
6. Se vacía arena dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros, distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.
7. Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores.

8. Procediendo a pesarlo. La masa obtenida anteriormente se le resta el peso del recipiente para obtener la masa de la arena.

Ilustración 50: Masa Volumetrica seca suelta de la grava



(Duarte, 2019)

**Cálculo:**

$$M.V.S.S. = \frac{M}{V}$$

Dónde:

M.V.S.S. = Masa volumétrica seca y suelta en gramos/cm<sup>3</sup>.

M = Masa de la arena en gramos.

V = Volumen del recipiente en cm<sup>3</sup>.

**4.1.4.5 Meso volumétrica seca y varillada**

Obtener la masa por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación. (NMX-C-073-ONNCCE., 2004)

**Equipo empleado:**

- Una muestra de arena completamente seca.
- Un recipiente de peso y volumen conocido.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una balanza o báscula. Un cucharón y una pala.

**Procedimiento:**

5. Se toma la arena de los extremos opuestos del cuarteo.
6. Se procede a llenar el recipiente con arena a volteo dejándola caer a una altura aproximada de 5 centímetros, el llenado del recipiente debe de hacerse en tres capas dando a cada capa

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

- de arena 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material. Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes.
7. Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.
  8. Se pesa el recipiente con el material y se le resta el peso del recipiente para así obtener la masa neta del material.

Ilustración 51. Masa volumétrica seca y varillada en grava



(Duarte, 2019)

**Cálculo:**

$$M.V.S.V. = \frac{M}{V}$$

Dónde:

M.V.S.V.= Masa volumétrica seca y varillada en gramos/cm<sup>3</sup>.

M = Masa de la arena en gramos.

V = Volumen del recipiente en cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.5 Granulometría de los agregados

##### 4.1.5.1 Granulometría o análisis granulométrico en arena

Pasar por una serie de mallas o tamices la muestra representativa de arena, para conocer la distribución de los diámetros de las partículas y el módulo de finura.

**Equipo empleado:**

- Muestra representativa de arena.
- Un juego de mallas con abertura rectangular o circular del N° 4, 8, 16, 30, 50, 100.
- Equipo Raf-Tap.
- Una balanza al décimo de gramo.
- Espátulas
- Cepillos de cerdas y alambre.
- Hojas de papel.

### Procedimiento:

1. Se toma una muestra representativa de arena.
2. Se pesa y se registra el dato.
5. Se colocan las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100 y charola), se coloca la muestra de 500 gramos y se tapa.
6. Se agita mecánicamente el juego de mallas durante un tiempo de 10 minutos como mínimo, en el equipo (Raf-tap).
7. Se procede a pesar el material retenido en cada una de las mallas con aproximación al décimo de gramo, anotando los pesos en el registro correspondiente. Para lo cual se invertirán las mallas con todo cuidado y utilizando cepillo de alambre las mallas 4, 8, 16 y 30 para desalojar el material que se encuentra entre los espacios de la malla, mientras que las mallas 50 y 100 se limpiarán con cepillo de cerdas.

Ilustración 52. Análisis granulométrico en arena



(Duarte, 2019)

### Cálculos:

- Se anotan las masas retenidas en las respectivas mallas.
- El porcentaje retenido se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ RETENIDO} = \frac{\text{peso retenido}}{\text{suma del peso retenido}} * 100$$

- El porcentaje acumulativo se calcula como sigue:

$$\% \text{ acumulativo} = \% \text{ retenido malla} + \% \text{ acumulativo de malla anterior}$$

- El porcentaje que pasa se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ que pasa la malla} = 100 - \% \text{ acumulativo de malla}$$

- Se calculan los porcentajes basándose en la masa total de la muestra incluyendo el del material que pasó la malla No. 200.

- Módulo de finura:

$$M. F. = \frac{\Sigma \text{ del \% de mallas \#8 a la \#100}}{100}$$

**Recomendaciones y especificaciones:**

Para fines de calidad se recomienda que el Módulo de finura esté entre 2.5 y 3.0, de acuerdo a la norma mexicana (NMX-C-111-ONNCCE., 2014), puede estar entre 2.3 y 3.2.

En la tabla 20. Bureau Of Reclamation A.S.T.M. menciona las siguientes especificaciones granulométricas.

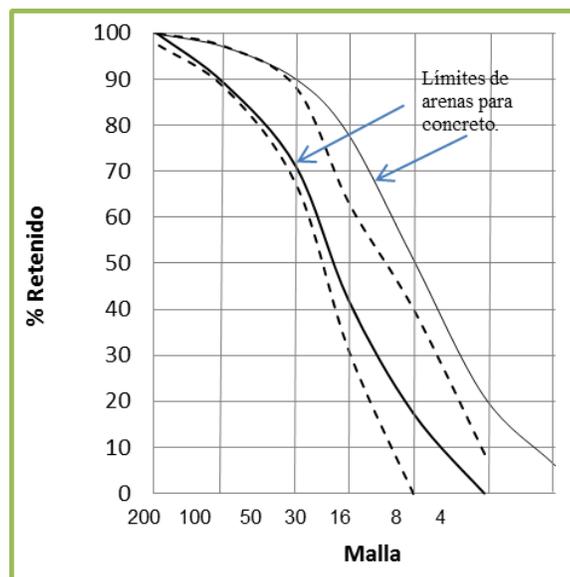
El porciento referido de dos mallas sucesivas no debe ser mayor a 45%.

Tabla 29. Especificaciones granulométricas en arena

MALLA	% QUE PASA
3/8	100
4	95-100
8	80-100
16	50-85
30	25-60
50	10- 30.0
100	2.0-10

Los resultados obtenidos se grafican y si se encuentran dentro de estos límites es adecuada la granulometría para su uso en concreto.

Grafica 3. Límites de granulometría de arena para concreto



(NMX-C-111-ONNCCE., 2014)

#### 4.1.5.2 Granulometría o análisis granulométrico en grava

Obtener la distribución de los tamaños de las partículas de la grava así, como el tamaño máximo (T.M.) de la grava, valor que se utiliza para el CÁLCULO del diseño de mezclas. (NMX-C-111-ONNCCE., 2014)

##### Equipo empleado:

- Muestra aproximadamente 15 kilogramos en estado suelto.
- Juego de mallas: 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2 ",3/8",1/4",y N° 4.
- Juego de charolas para recibir el material que se retiene en cada una de la mallas.
- Balanza con aproximación al gramo.
- Recipiente de 10 litros.

##### Procedimiento:

1. Se llena el recipiente, previamente destarado
2. Se pesa y se obtiene la masa de la muestra registrándose como masa de la muestra (Mm).
3. Enseguida se pasa la grava a través de las mallas colocándolas de la mayor a la menor
4. Agitándolas con la mano para que las partículas de menor tamaño pasen a la malla siguiente, hasta que se haya terminado con la muestra de grava.
5. Se pesa cada retenido de cada malla.

Ilustración 53. análisis granulométrico de grava



(Duarte, 2019)

- El retenido se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ RETENIDO} = \frac{\text{Masa retenida en la malla}}{\text{Masa de la muestra}} * 100$$

- El porcentaje acumulativo se calcula como sigue:

$$\% \text{ acumulativo} = \% \text{ acumulado} + \% \text{ retenido malla}$$

- El porcentaje que pasa se calcula de la siguiente manera:

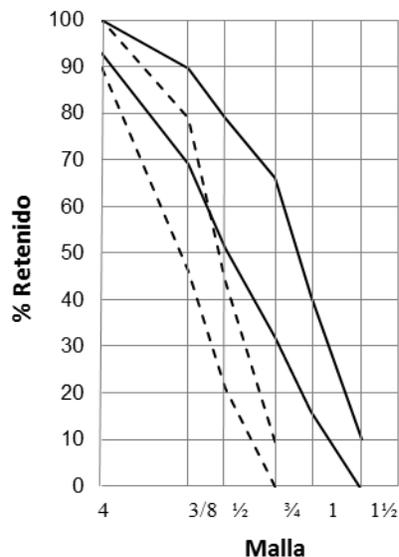
$$\% \text{ que pasa} = 100 - \% \text{ acumulativo de malla}$$

### Recomendaciones y especificaciones:

El tamaño máximo de la grava se obtiene observando la columna de los porcentajes retenidos y el tamaño máximo será el tamaño de la malla que retenga el 5% o más de la masa de la muestra.

Los resultados obtenidos se grafican y si se encuentran dentro de estos límites es adecuada la granulometría para su uso en concreto.

Grafica 4. Límites de granulometría de grava para concreto



(NMX-C-111-ONNCCE., 2014)

## 4.2 Fabricación de especímenes y pruebas al concreto fresco

En este capítulo se describirá el procedimiento de elaboración del concreto para los diferentes especímenes cilíndricos y prismáticos a evaluar, se diseñó un concreto de alta resistencia con un  $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$  referido a los datos obtenidos de la caracterización de las propiedades de los materiales y relacionados con el método ACI antes mencionados, para el proporcionamiento adecuado de los mismos, logrando realizar 10 cilindros con un diámetro de 10cm por 30cm de alto, 8 vigas de 15cm alto 15cm ancho y 60cm de largo, para posteriormente analizarlos a

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

diferentes pruebas físico-mecánicas destructivas y no destructivas para conocer sus propiedades al unirse en una matriz cementante a las edades de 7, 14, 28, 70 y 120 días.

Se realizaron 3 mezclas en total de concreto con el mismo proporcionamiento de cemento, agua, arena y grava; pero a una de ellas se les adicono microfibras de polipropileno y a la otra fibras de cabello humano respectivamente en una proporción del 0.8% respecto del cemento utilizado, así se pudo comparar el comportamiento de cada una de las fibras y una muestra testigo.

Los procesos de elaboración y pruebas realizadas se basaron en las recomendacione y técnicas de las normas establecidas para cada procedimiento.

#### 4.2.2 Elaboración de concreto para especímenes

Para la elaboración del concreto diseñado, se pesaron los materiales que conforman el concreto de estudio como es la grava, la arena, el cemento el agua, la microfibra de polipropileno y la fibra de cabello humano.

Se fueron integrando en la charola de trabajo para su mezclado, incorporando primeramente el agregado fino y el cemento, se añadió el agregado grueso y se procedió a integrarlos con ayuda de palas, al observar una distribución uniforme de las partículas se incorporó el agua gradualmente hasta proporcionar la humedad calculada para obtener la relación agua-cemento adecuada asegurando su trabajabilidad sin bajar la resistencia.

En el caso de las mezclas con la adición de microfibra de polipropileno y las fibras de cabello humano se pesaron previamente según la proporción de diseño y se adicionaron al concreto antes de añadir humedad.

Ilustración 54. Elaboración del concreto



(Duarte, 2019)

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

Ilustración 55. Proporcionamiento de micro-fibra de polipropileno y de cabello humano.



(Duarte, 2019)

Ilustración 56. adición de micro.fibras de polipropileno y cabello humano



(Duarte, 2019)

### 4.2.3 Revenimiento

Una manera de verificar y asegurarnos de la fluidez y plasticidad del concreto a la que diseño es el revenimiento ya que su procedimiento es muy sencillo de realizar tanto en campo como en laboratorio y nos da un parámetro inicial de que nuestro concreto obtuvo la humedad necesaria óptima, lo que resulta en una buena trabajabilidad.

#### Equipo empleado:

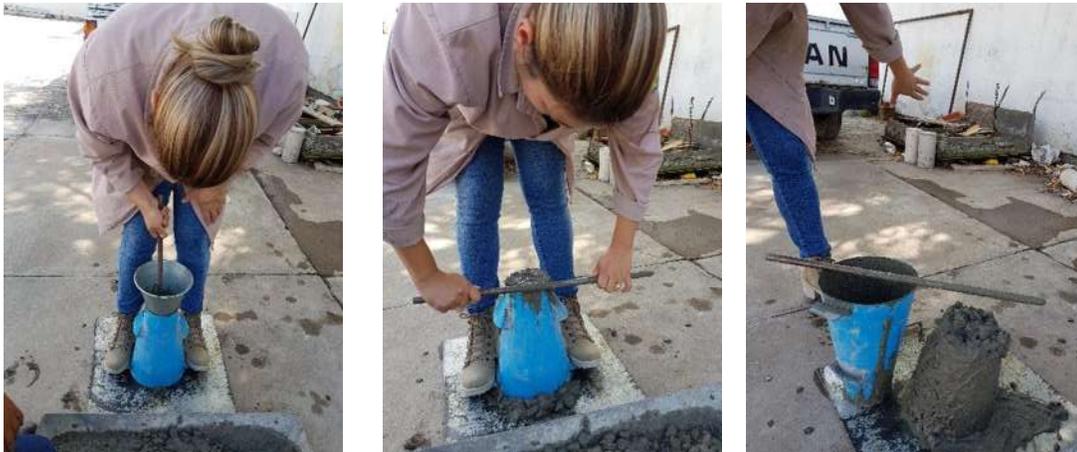
- Molde metálico, troncocónico, abierto por ambos extremos, con un diámetro superior de 10 cm e inferior de 20 cm además de pisaderas.
- Varilla punta de bala lisa, de un diámetro de 5/8 de pulgada.
- Placa de apoyo, rígida, no absorbente y por lo menos de 40 x 60 cm.
- Cucharón metálico
- Fluxómetro

- Esponja para humedecer el material necesario.

**Procedimiento:**

1. Se coloca la placa sobre una superficie de apoyo horizontal, sobre esta se coloca el molde, ambos limpios y humedecidos con agua, (no se permite humedecer con aceites ni grasa).
2. El operador se posiciona sobre las pisaderas del molde, evitando el movimiento de éste durante el llenado.
3. Se llena el molde en tres capas de aproximadamente igual volumen y se apisona cada capa con 25 golpes de la varilla pisón distribuidos uniformemente. La capa inferior se llena hasta aproximadamente 7 cm de altura y la capa media hasta aproximadamente 16cm de altura. Al apisonar la capa inferior se darán los primeros golpes con el pisón ligeramente inclinado alrededor del perímetro. Al apisonar la capa media y superior se darán los golpes de modo que la varilla pisón penetre 2.5 cm la capa subyacente. Durante el apisonado de la última capa se deberá mantener permanentemente un exceso de concreto sobre el borde superior del molde.
4. Toda la operación de llenado y levantamiento del molde no debe demorar más de tres minutos.
5. Se coloca el molde a un lado de la mezcla para medir la disminución de altura del concreto respecto al molde, para esto se coloca la varilla sobre el molde de forma horizontal y se mide la distancia entre el concreto y la varilla, como se muestra en la ilustración. Verificando que sea el de proyecto.

Ilustración 57. Revenimiento



(Duarte, 2019)

Tabla 30. Valor nominal del revenimiento y tolerancias

Revenimiento Nominal (mm)	Tolerancias (mm)
Menor de 50	± 15
De 50 a 100	± 25
Mayor de 100	± 35

(NMX-C-156-ONNCCE., 2010).

Ilustración 58. Revenimientos obtenidos de las micro-fibras



(Duarte, 2019)

#### 4.2.4 Fabricación de cilindros y vigas.

Estos especímenes cilíndricos y prismáticos se elaboraron en moldes específicos y apegados a la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2016).en la cual nos especifica que deben ser de acero o fierro fundido no reactivos con el concreto, beben conservar su forma y dimensiones bajo condiciones severas de uso y ser impermeables y estáticos, deben lubricarse con un aceite para facilitar su desmolde.

Ilustración 59. Moldes para especímenes



(Duarte, 2019)

#### Procedimiento:

1. De la mezcla 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 la Tabla.

Tabla 31. Número de capas requeridas para los especímenes. (NMX-C-159-ONNCCE, 2016).

TAMAÑO DEL ESPÉCIMEN (cm)	MÉTODO DE COMPACTACIÓN	Nº DE CAPAS	ESPELOR APROXIMADO DE LACAPA (mm)
Hasta 300	Varillado	3 iguales	---
Más de 300	Varillado	Según se requiera	100
Hasta 450	Varillado	2 iguales	---
Más de 450	Varillado	3 o más	150 o lo más cercano

3. Se varilla cada capa con el extremo redondeado empleando el número de penetraciones y tamaño de varilla especificado en la Tabla 30.

Tabla 32. Número de penetraciones por capa

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

(*NMX-C-159-ONNCCE, 2016*).

4. 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.

Nota: De acuerdo con lo explicado en la sección “Elaboración de especímenes preliminares” los especímenes elaborados de las 4 mezclas se varillaron, siguiendo el procedimiento descrito en su respectiva normativa.

5. 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.

6. Se enraza la superficie superior con la varilla punta de bala, haciéndola rodar por la superficie.

7. Para evitar pérdidas de agua por evaporación, se recomienda cubrir los cilindros con bolsas de plástico o tapas.

8. los especímenes deben ser descimbrados entre 20 y 48 horas después de su elaboración.

Ilustración 60. Elaboracion de especimenes prismaticos y cilinfricos





(Duarte, 2019)

### 4.3 Pruebas al concreto endurecido

Tabla 33. Pruebas al 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-2013	ASTM-C-617-98
Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.	NMX-C-083-ONNCCE-2014	ASTM-C-39-86
Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.	NMX-C-191-ONNCCE-2004	ASTM C 78 – 02
Extracción de especímenes cilíndricos o prismáticos de concreto hidráulico endurecido.	NMX-C-169-ONNCCE-2009	ISO 1920-6:2004
Método de prueba estándar para las frecuencias de resonancia fundamentales longitudinales de especímenes de concreto.	NMX-C-089-1997-ONNCCE	ASTM-C-215-02

### 4.3.1 Curado del concreto

Para evitar que el agua de mezcla del concreto se evapore en forma rápida o para reintegrar al mismo la perdida de humedad durante el tiempo de fraguado y desmolde, es necesario dar condiciones de humedad a estos hasta el momento de la prueba. NMX-C-159-ONNCCE-2004

#### Equipo empleado:

- Cuarto húmedo o pila de curado

#### Procedimiento:

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, hasta que los especímenes sean extraídos de los moldes.
2. Los especímenes deben ser descimbrados no antes de 20 horas ni después de 48 horas de su elaboración.
3. todos los especímenes deben ser curados en humedad a temperatura de  $2^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  durante las primeras 24 horas, después de ese tiempo deben mantenerse a una temperatura constante de  $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ , con una humedad relativa de 95 % mínima, hasta el momento de la prueba.
4. El almacenaje durante las primeras 48 horas 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.

Ilustración 61. Curado del concreto



(Duarte, 2019)

### 4.3.2 Cabeceado de cilindros

Proporcionar superficies planas en los extremos de los cilindros de concreto aplicando una capa de material con resistencia igual o mayor al  $F'_c$  del concreto de manera que primero falle el concreto, que puede ser de azufre o neopreno para que la carga aplicada por la máquina de pruebas se distribuya uniformemente en toda el área del cilindro y que las dos caras queden paralelas entre si y a la vez perpendicular a la carga aplicada.

Tabla 32. Resistencia a la compresión y espesor máximo del mortero de azufre. (NMX-C-109-ONNCCE., 2013)

Resistencia del concreto (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia mínima del mortero de azufre (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Espesor máximo de capa 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

#### Equipo empleado:

- Moldes de cabeceo con guías para asegurar la verticalidad.
- Aceite.
- Estopa.
- Parilla.
- Jarra metálica
- Varilla

#### Procedimiento:

1. Se sacan los cilindros a probar del cuarto húmedo o pila de curado, se seca el exceso de agua con una franela o dejándolo escurrir unos minutos para evitar que el agua excedente se evapore y forme burbujas dentro del azufre caliente.

2. Se pone a calentar el azufre suficiente para los especímenes a cabecear en la jarra metálica, hasta lograr que se convierta de estado sólido a estado líquido a una temperatura de  $140^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  moviendo constantemente con la varilla. Si el azufre utilizado es reusado, cuidar que no tenga más de 10 usos y que cumpla con la resistencia necesaria.

3. Se aceita el molde de cabeceo cuyo diámetro es mayor que le dé cilindro, esto para que no se pegue definitivamente el azufre al molde.

4. Una vez líquido el azufre se vierte en el molde de cabeceo a un nivel adecuado inmediatamente, se toma el cilindro y se desliza por las guías hasta sumergir su cara en el molde, se golpea suavemente en la otra cara para eliminar cualquier burbuja de aire que pueda quedar atrapado, se ajusta con las manos hacia las guías, para mantener la verticalidad y nivelar el cilindro.

Se espera un momento a que se solidifique el azufre, se retira el molde, se limpia y se repite la operación para cabecear la otra cara del cilindro.

5. Una vez terminado el cabeceo se deben cubrir los especímenes con un material que evite la pérdida de humedad.

La base de los especímenes de concreto endurecido tiene la opción de prepararse para su ensaye puliendo su superficie, omitiendo el cabeceo, también se puede usar placas o almohadillas de neopreno u otro material similar que sustituya el cabeceo.

Ilustración 62. Cabeceo de especimene cilindricos



(Duarte, 2019)

### 4.3.3 Resistencia a la compresión simple

Conocer la resistencia real o el esfuerzo de ruptura por compresión del concreto, para comparar su resistencia y saber si es equivalente a la resistencia de proyecto y verificar su calidad. (NMX-C-083-ONNCCE., 2014)

**Compresión simple.** Significa que se le aplicara una carga axial concéntrica al cilindro de concreto.

#### Equipo empleado:

- Regla para medir el diámetro de cilindro.
- Máquinas hidráulicas: máquina universal, Forney o prensas.

### Procedimiento:

1. Se mide el diámetro del espécimen de prueba de sus dos caras.
2. Se limpia perfectamente las placas de apoyo en la máquina, suave y uniformemente se coloca el cilindro en la máquina centrando el eje vertical del espécimen en el centro de la placa de apoyo.
3. Se ajusta la platina superior a la cara del espécimen de manera que no se aplique carga de impacto si no que apenas quiera rozar el espécimen.
4. Se pone en ceros la máquina. Se aplica la carga a una velocidad constante es decir continua y sin impactos, de 84 Kgf/cm<sup>2</sup>/min a 210 Kgf/cm<sup>2</sup>/min, equivalente para un diámetro estándar de 15 cm a un rango de 14.8 Tonf/min a 37.1 Tonf/min. Esta velocidad puede ser un poco mayor a la primera mitad de la carga total del espécimen, respecto a este punto se pueden hacer las siguientes recomendaciones: Que no se suspenda la aplicación de la carga por ningún contratiempo y luego se vuelva a poner a funcionar cuando el espécimen ya se aproxime a la carga de falla. Esta carga falla la podemos prefijar conociendo el porciento de resistencia según su edad, que debe de observar, esta masa se prefija multiplicando el área de la sección transversal del cilindro por la resistencia de proyecto F'c.
5. Se continúa la carga del espécimen hasta la falla registrándola y observando su tipo de falla y la apariencia del material.

Ilustración 63. Resistencia a la compresión simple



(Duarte, 2019)

### Cálculos:

Para calcular el esfuerzo real que resiste el concreto, se divide la masa resistente entre el área de la sección transversal.

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

Dónde:

P = es la carga de ruptura en kgf.

A = Área de la sección transversal del espécimen en cm<sup>2</sup>.

$\sigma$  = Esfuerzo que resiste el espécimen en kgf/cm<sup>2</sup>

Conociendo y registrando su edad se determina su porcentaje de resistencia respecto a la resistencia de proyecto.

$$\% \text{ resistencia} = \frac{R}{R_p}$$

Dónde:

R = resistencia real a cierta edad en días y en kgf/cm<sup>2</sup>.

R<sub>p</sub> = resistencia de proyecto en kg/cm<sup>2</sup>.

% resistencia = porcentaje de la resistencia real del espécimen.

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

#### 4.3.4 Resistencia a la flexión en Vigas

Conocer el procedimiento de ensaye para determinar la resistencia a flexión del concreto en vigas moldeadas en el laboratorio con cargas concentradas en los tercios del claro.

##### **Equipo empleado:**

- Máquina hidráulica: máquina universal, Forney o prensas.
- Metro
- Accesorios para la flexión. Metro.

##### **Procedimiento:**

1. El espécimen debe de voltearse sobre uno de sus lados, respecto a la posición original en la que fue colado para obtener una cara más lisa y uniforme. Las caras laterales del espécimen deben estar en ángulo recto con las caras horizontales.
2. se marcará con un plumón la posición en donde tendrán que ir los apoyos, debe ser de 3 veces el peralte de la viga, con una tolerancia de +/- 2%.
3. Se centran en los bloques de apoyo y éstos a su vez deben estar centrados respecto a la fuerza aplicada. Los bloques de aplicación de carga se ponen en contacto con la superficie del espécimen en los puntos tercios entre los apoyos. Se debe tener contacto total, entre la aplicación de la carga y los bloques de apoyo con la superficie del espécimen.

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETO MODIFICADO PARA USO EN LA CONSTRUCCIÓN, CON ADICIÓN DE MICRO-FIBRA DE POLIPROPILENO Y CABELLO HUMANO.”

4. La carga se debe aplicar a una velocidad uniforme tal que el aumento de esfuerzo de las fibras extremas no exceda de 980 kPa/min (10 Kgf/cm<sup>2</sup> por minuto), permitiéndose velocidades mayores antes del 50% de la carga estimada de ruptura.
5. Se registra la carga máxima aplicada, indicada por la máquina de prueba en el momento de la falla.

Ilustración 64. Resistencia a la flexión en Vigas



(Duarte, 2019)

**Cálculos:**

Si la fractura ocurre en el tercio medio del claro el módulo de ruptura se calculará con:

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

Donde:

R = módulo de ruptura, en Kgf/cm<sup>2</sup>.

P = es la carga máxima aplicada, Kgf.

L = es la distancia entre apoyos, en cm.

b = es el ancho promedio del espécimen, en cm.

d = es el peralte promedio del espécimen, en cm.

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en liornas del 5 % del claro, el módulo de ruptura se calculará:

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

Dónde:

R = Módulo de ruptura en kg/cm<sup>2</sup>.

P = Carga de ruptura en kg.

b = Ancho promedio en cm.

d = Peralte promedio en cm.

a = es la distancia promedio entre la línea de fractura y el apoyo más cercano en la superficie de la viga, en mm.

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en más del 5 % del claro, los resultados deben de descartarse.

#### 4.4 Pruebas no destructivas al concreto endurecido

La durabilidad es la capacidad que tienen las estructuras de concreto de conservar inalteradas sus condiciones físicas y químicas durante su vida útil cuando se ven sometidas a la degradación de su material por diferentes efectos de cargas y sollicitaciones, las cuales están previstas en su diseño estructural. El diseño estructural de un edificio de concreto reforzado, debe estipular las medidas adecuadas para que éste alcance la vida útil establecida en el proyecto, teniendo en cuenta las condiciones ambientales, climatológicas y el género de edificio a construir. Todos los agentes agresivos a los cuales estará expuesto el edificio deberán de identificarse. Las medidas preventivas indicadas en la etapa de proyecto suelen ser muy eficaces y reducen posibles gastos posteriores, y garantizar que las estructuras sean seguras y funcionales y sean capaces de soportar las acciones externas e internas a las que se verán expuesta y sometidas.

Tabla 34. Pruebas no destructivas al concreto endurecido

ENSAYE	NORMA MEXICANA	DURAR
Método de prueba estándar para la velocidad de pulso a través del concreto.	NMX-C-275-ONNCCE-2004	CYTED-DURAR, 2000
Resistividad Eléctrica a través del concreto.	NMX-C-514-ONNCCE-2016	CYTED-DURAR, 2000

##### 4.4.2 Resistividad eléctrica

Determinar la Resistividad Eléctrica del concreto hidráulico en función de la porosidad del material como un método indirecto para valorar el nivel de corrosión del acero de refuerzo y evaluar el riesgo de daño. (NMX-C-514-ONNCCE., 2016)

Es una propiedad de los materiales que mide la capacidad del material para oponerse al flujo de una corriente eléctrica, corresponde al recíproco de su conductividad, y se obtiene de la relación entre la diferencia de potencial y la intensidad de corriente circulante referida a una geometría normalizada. Su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa.

La corrosión del acero de refuerzo es uno de los problemas patológicos que más afectan la vida de servicio de las estructuras de concreto. Existe varios métodos para medirla y únicamente la

interpretación simultánea de varios de ellos conduce a un adecuado dictamen sobre el grado de deterioro.

Sus resultados aportan datos para valorar el nivel de corrosión y evaluar el riesgo de daño.

### **Equipo empleado:**

- Resistómetro mide la resistencia eléctrica en suelos y medios porosos.
- Esponjas o tela de microfibra, facilita el contacto eléctrico entre los electrodos metálicos y el concreto.
- Agua para la humectación de las y la saturación del concreto.
- Fuente de corriente alterna con un rango de frecuencia de 50 HZ a 1000Hz.
- 2 contactos de tipo terminal con caimán.
- Dos placas de cobre o acero inoxidable.
- Vernier
- Flexómetro
- Especímenes de concreto.

### **Procedimiento:**

1. Verificar que los especímenes cumplan con lo siguiente:

- No incluyan acero de refuerzo y en la superficie no presenten carbonatación, ya que estos dos errores provocan errores en las lecturas de medición de la resistividad.
- Las bases de los especímenes sean paralelas entre sí y que no presenten oquedades o discontinuidades que impidan la correcta transmisión de la corriente eléctrica a través de ellas.
- Los especímenes estén saturados en agua.

2. Determinar las dimensiones de los especímenes.

3. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.

4. Se conecta cada caimán a cada lámina de cobre y se colocan las caras laterales del espécimen a realizar la prueba entre las placas de cobre y entre éstas esponjas húmedas.

5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el espécimen a una corriente dada, y voltaje. Importante colocar un peso muerto (no metálico) para garantizar el buen contacto de corriente eléctrica y operar el Resistómetro de acuerdo al manual del operador.

Instrucciones si operamos el Resistómetro Marca Nilsson:

- Mover la palanca del aparato hacia la parte baja “low” y girar la perilla pequeña en sentido contrario a las manecillas del reloj hasta que la aguja del aparato cambie de sentido.
- Dejar de tirar la palanca y regresar una escala de la perilla pequeña.
- Mover la palanca a la parte alta “high” y girar la perilla más grande en el sentido contrario a las manecillas hasta que la aguja quede en el centro.

Se registra la resistencia eléctrica, el Resistómetro la calcula como  $E/I$  y la expresa en ohm ( $\Omega$ ).

Ilustración 65. Resistividad eléctrica



(Duarte, 2019)

**Cálculos:**

La resistencia eléctrica es la relación entre la diferencia de potencial entre electrodos y la intensidad de corriente que circula por el interior del espécimen; su unidad de medida es el ohm.

Se calcula de manera indirecta aplicado la siguiente ecuación:

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

Donde:

$\rho$  = resistividad eléctrica, en ohm-cm.

Re = resistencia eléctrica, en ohms.

A = área transversal del espécimen, en cm<sup>2</sup>.

L = longitud del espécimen, en cm.

**Especificaciones:**

Las especificaciones de durabilidad de acuerdo a la resistividad se muestran, especificaciones de RED DURAR.

Tabla 35. Criterios de evaluación. (DURAR., 2000)

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

(DURAR., 2000)

Las especificaciones de durabilidad de acuerdo a la resistividad se muestran, especificaciones mexicanas.

Tabla 36. Criterios de evaluacion (NMX-C-514-ONNCCE., 2016).

Resistividad eléctrica (KΩ-cm)	Riesgo de corrosión
>100-200	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o del nivel de carbonatación. No existe distinción entre acero en estado activo o pasivo.
50 a 100	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son bajas.
10 a 50	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, permitiendo el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
<10	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, permitiendo el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy altas en concretos carbonatados o con cloruros.

(NMX-C-514-ONNCCE., 2016)

#### 4.4.3 Velocidad de pulso ultrasónico

Evaluar la calidad y la homogeneidad del concreto, e indicar presencia de vacíos o grietas.

La prueba de velocidad de pulso ultrasónico es una prueba no destructiva, la relación que existe entre la distancia de viaje a través del concreto de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en

recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del mortero hasta que es detectado por el receptor. Aquí el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico, el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividido entre el tiempo de viaje, da la velocidad promedio de la propagación de la onda.

es aplicable para la verificación de la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa); para detectar las fallas internas (presencia de vacíos) introducidas durante la fabricación, la profundidad de las fisuras y otras imperfecciones y para el monitoreo de las variaciones de las propiedades del mortero a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio. Homogeneidad: Es la cualidad del concreto por la cual sus componentes aparecen regularmente distribuidos en toda su masa, de manera tal que se encuentre en toda ella, uniformidad de características, estructura, composición y propiedades físicas, mecánicas y químicas.

Con respecto al empleo del valor de la velocidad de pulsación ultrasónica para determinar la resistencia del concreto, debe señalarse que no hay ninguna relación física entre las dos. Sin embargo, la velocidad de onda ultrasónica está relacionada con la densidad del concreto.

### **Equipo empleado:**

- Equipo comercial de ultrasonido, modelo V-Meter MK IVTM marca NDT - JAMES INSTRUMENTS con dos transductores, un emisor y un receptor.
- Agente de acoplamiento (gel comercial para cabello).
- Especímenes de concreto.
- Vernier.
- Flexómetro.

### **Procedimiento:**

1. Conectar los transductores al aparato de pulso ultrasónico, mediante los cables coaxiales aptos para el equipo.
2. Calibrar el equipo de velocidad de pulso ultrasónico usando gel entre los transductores y hasta que en el mismo aparezca la leyenda calibración terminada.
3. Extraer del recipiente de curado los especímenes saturados hasta masa constante, verificar que la superficie donde se pretende hacer el ensayo (cara de prueba e inferior y superior del espécimen), este plana, lisa, exenta de suciedad y no carbonatada.
4. Medir el espesor o longitud promedio de prueba en el espécimen.
5. Seleccionar en el aparato la longitud promedio de prueba de la muestra y la cantidad de pulsos por segundo que se le debe dar, normalmente 3 pulsos en 2 segundos, para concreto.
6. Aplicar un adecuado agente de acoplamiento (gel para cabello), en la cara de los transductores que estará en contacto con el espécimen y en ambas caras del espécimen a ensayar.
7. Se logra al poner en contacto ambos transductores en las caras opuestas del espécimen a ensayar.
8. Se registra el valor de Velocidad de Pulso Ultrasónico. En el caso de que haya mucha oscilación en el aparato se tomara la lectura que se repita al menos 2 veces.

No se realizan cálculos debido que el equipo nos arroja la Velocidad de manera directa.

Ilustración 66. Velocidad de pulso ultrasónico



(Duarte, 2019)

**Especificaciones:**

Los criterios de evaluación por (DURAR., 2000), para la calidad del concreto se muestran en la Tabla.

Tabla 37. Criterios de Evaluación para la Calidad del Concreto. (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.

(DURAR., 2000)

Los criterios de evaluación por la norma mexicana (NMX-C-275-ONNCCE., 2004), para la calidad del concreto se muestran en la Tabla.

Tabla 38. Criterios de evaluación del concreto. (NMX-C-275-ONNCCE., 2004)

Velocidad de propagación (m/s)	Tolerancia permisible
>2350 m/s	Pocos vacíos o agrietamientos bajo o nulo.
2350-1750 m/s	Algunos vacíos o agrietamiento medio.
<1700 m/s	Muchos vacíos o agrietamiento alto.

(NMX-C-275-ONNCCE., 2004)

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la investigación realizada durante un periodo de 120 días, para lo cual primero se muestran las propiedades de los materiales utilizados, pruebas no destructivas de los diferentes especímenes y por último las pruebas destructivas de los distintos especímenes. Con la finalidad de conocer el comportamiento físico-mecánico de las 3 mezclas analizadas en esta investigación; todo basado a la normativa vigente ASTM Y NMX.

Las mezclas analizadas fueron: Mezcla con 0.8% de masa de cabello humano respecto a la masa del cemento, Mezcla con 0.8% de masa de Microfibra de polipropileno respecto a la masa del cemento y Mezcla testigo. Con la finalidad de comparar sus propiedades físico-mecánicas.

### 5.1. Propiedades de los materiales utilizados

#### 5.1.1. Cemento.

El cemento utilizado fue de la marca Tolteca CPC 30R RS, al cual se le realizaron pruebas de calidad.

##### 5.1.1.1. Densidad del cemento.

Esta prueba se realizó empleando el matraz de Le Chatelier, y de acuerdo a parámetros normales este valor se encuentra entre  $3.15 \text{ g/cm}^3$  y  $2.90 \text{ g/cm}^3$ , el resultado obtenido se muestra en la Tabla xx.

Tabla 39. Densidad del cemento.

Densidad	
Peso del cemento	60.00 g
Li	$0.30 \text{ cm}^3$
Lf	$20.10 \text{ cm}^3$
Volumen	$19.80 \text{ cm}^3$
Densidad	$3.03 \text{ g/cm}^3$

##### 5.1.1.2. Consistencia normal del cemento.

Esta prueba se realizó empleando el aparato Vicat, de acuerdo a la norma (NMX-C-057-ONNCCE., 2015), el resultado obtenido se muestran en la Tabla xx.

Tabla 40. Consistencia normal del cemento.

Consistencia Normal	
Masa de cemento (g)	600
Mililitros de agua (ml)	135
Penetración (mm)	10.139
Consistencia normal (%)	0.45

### 5.1.1.3. *Tiempos de fraguado del cemento.*

Los tiempos de fraguado del cemento son parámetros indicativos de la calidad del cemento y se determinaron con base en la norma (ASTM-C-266-04, 2004), el resultado se comparó con la norma (NMX-C-177-ONNCCE, 1997), obtenido un resultado adecuado, como se muestra en la Tabla xx.

Tabla 41. *Tiempos de fraguado del cemento.*

<b>Tiempos de fraguado</b>	
<b>Fraguado inicial</b>	<b>Fraguado final</b>
<b>02:10 min</b>	04:30 min

### 5.1.2. *Agregado pétreo fino (arena).*

El agregado fino utilizado fue de origen volcánico del banco Joyitas, ya que este agregado representa gran consumo en la ciudad de Morelia Michoacán y sus alrededores.

#### 5.1.2.1. *Porcentaje de humedad de absorción de la arena.*

El porcentaje de humedad de absorción indica la cantidad de agua presente en el agregado fino saturado y superficialmente seco, el cual fue determinado con base a la norma (NMX-C-165-ONNCCE., 2014) y la SCT, N-CMT-2-01-003/02 establece que la absorción en los fragmentos de rocas no será mayor del 4%, el resultado obtenido se muestra en la tabla xx.

Tabla 42. *Porcentaje de absorción de la arena.*

<b>%H. Absorción</b>		
<b>Masa húmeda</b>	350.00 g	350.00 g
<b>Masa seca</b>	336.40 g	336.40 g
<b>Humedad</b>	13.60 g	13.60 g
<b>% Abs.</b>	4.04%	4.04%
<b>Promedio</b>	4.04%	

#### 5.1.2.2. *Densidad de la arena.*

La densidad indica la relación que hay entre la masa del agregado fino y el volumen que ocupa el agregado en estado saturado y superficialmente seco, el cual se determinó con ayuda de la norma (NMX-C-165-ONNCCE., 2014) y la SCT, -N-CMT-2-01-005/02 establece que la densidad de fragmentos de rocas debe ser de 2.3 g/cm<sup>3</sup> como mínimo, el resultado obtenido se muestra en la tabla xx.

Tabla 43. Densidad de la arena.

<b>Densidad</b>		
<b>Arena húmeda</b>	350.00 cm <sup>3</sup>	325.00 cm <sup>3</sup>
<b>Volumen de frasco</b>	450.00 g	450.00 g
<b>Peso del frasco</b>	323.40 g/cm <sup>3</sup>	323.40 g/cm <sup>3</sup>
<b>Peso de frasco+ Arena + Agua</b>	977.100 g/cm <sup>3</sup>	974.100 g/cm <sup>3</sup>
<b>Densidad</b>	2.392 g/cm <sup>3</sup>	2.615 g/cm <sup>3</sup>
<b>Promedio</b>	2.503 g/cm <sup>3</sup>	

#### 5.1.2.3. Masa volumétrica seca suelta de la arena.

La MVSS de la arena indica la relación que hay entre la masa y el volumen que ocupa el agregado fino, el cual fue determinado con la norma (NMX-C-073-ONNCCE., 2004), el resultado obtenido se muestran en la tabla xx.

Tabla 44. MVSS de la arena.

<b>MVSS</b>		
<b>Peso bruto</b>	5,770.00 g	5,770.00 g
<b>Tara</b>	1,945.00 g	1,945.00 g
<b>Peso neto</b>	3,825.00 g	3,825.00 g
<b>Volumen</b>	2,750.00 cm <sup>3</sup>	2,750.00 cm <sup>3</sup>
<b>Peso volumétrico</b>	1,390.91 kg/m <sup>3</sup>	1,390.91 kg/m <sup>3</sup>
<b>Promedio</b>	1,390.91 kg/m <sup>3</sup>	

#### 5.1.2.4. Masa volumétrica seca varillada de la arena.

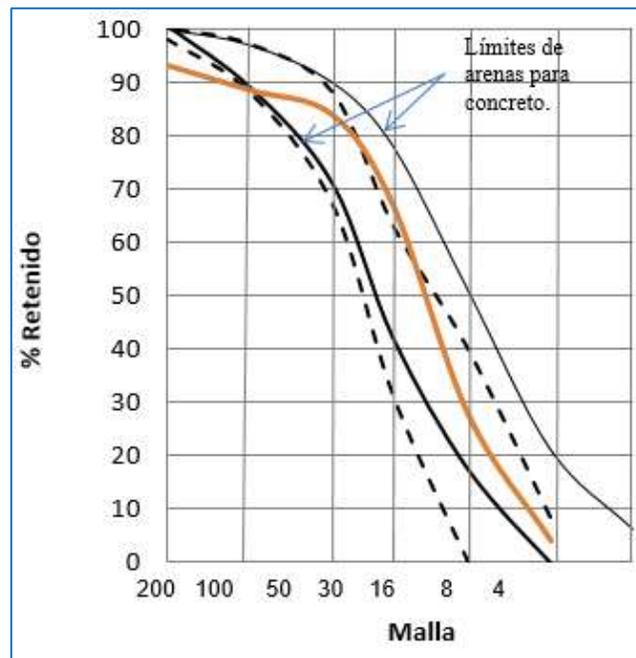
La MVSV de la arena indica la relación que hay entre la masa compacta y el volumen que ocupa el agregado fino, el cual fue determinado con la norma (NMX-C-073-ONNCCE., 2004), el resultado obtenido se muestran en la tabla xx.

Tabla 45. MVSV de la arena.

<b>MVSV</b>		
<b>Peso bruto</b>	6,140.00 g	6,140.00 g
<b>Tara</b>	1,945.00 g	1,945.00 g
<b>Peso neto</b>	4,195.00 g	4,195.00 g
<b>Volumen</b>	2,750.00 cm <sup>3</sup>	2,750.00 cm <sup>3</sup>
<b>Peso volumétrico</b>	1,525.45 kg/m <sup>3</sup>	1,525.45 kg/m <sup>3</sup>
<b>Promedio</b>	1,525.45 kg/m <sup>3</sup>	

### 5.1.2.5. Granulometría de la arena.

El análisis granulométrico indica los diferentes tamaños de partícula para que el acomodo dentro del concreto sea compacto, el cual fue determinado con base en el procedimiento marcado en la norma (NMX-C-077-ONNCCE., 1997) y los límites superior e inferior con base a la norma mexicana (NMX-C-111-ONNCCE., 2014), el resultado obtenido se muestran en la gráfica xx.



Gráfica 5. Granulometría de la arena.

Además se obtuvo el módulo de finura promedio, el cual fue de 2.70, que de acuerdo a la norma (NMX-C-111-ONNCCE., 2014) y (ASTM-C-33-03, 2003) se encuentra dentro del parámetro comprendido entre 2.3 y 3.2 para especímenes elaborados en laboratorio.

### 5.1.2.6. Colorimetría de la arena.

La colorimetría indica el grado de impurezas orgánicas presentes en el agregado fino, lo cual fue determinado con base en la norma (NMX-C-088-ONNCCE., 1997) y la norma (NMX-C-111-ONNCCE-2014) establece que el parámetro máximo permisible es de 3, el resultado obtenido se muestran en la tabla.

Tabla 46. Colorimetría de la arena.

Parámetro de colorimetría	
Parámetro de materia orgánica	2

### 5.1.2.7. *Sedimentación de la arena.*

La sedimentación indica la cantidad cualitativa de limo o arcilla presente en el agregado fino, lo cual fue determinado de acuerdo a las especificaciones marcadas por el manual de prácticas del Laboratorio de Materiales (Navarro Sánchez, 2011), observándose que la arena es adecuada para fabricación de concreto hidráulico.

### 5.1.2.8. *Partículas finas que pasan la malla #200 por lavado.*

Las partículas finas que pasan la malla # 200 indican la cantidad de limo o arcilla presente en la arena, lo cual fue determinado mediante los procedimientos de la norma (NMX-C-084-ONNCCE., 2006) y la norma (NMX-C-084-ONNCCE., 2006) establece el valor límite de 5% máximo, el resultado obtenido se muestran en la tabla.

Tabla 47. Porcentaje de partículas finas.

<b>% Que pasa la malla 200</b>		
<b>Peso inicial</b>	200.00 g	200.00 g
<b>Peso final</b>	196.50 g	197.10 g
<b>Pasa</b>	3.50 g	2.90 g
<b>% Que pasa</b>	1.78%	1.47%
<b>Promedio</b>	1.63%	

### 5.1.3. *Agregado pétreo grueso (grava).*

El agregado grueso utilizado fue de origen basáltico del banco “La Roca”, ya que este agregado es de buena calidad y representa gran consumo en la ciudad de Morelia Michoacán.

#### 5.1.3.1. *Porcentaje de humedad de absorción de la grava.*

El porcentaje de humedad de absorción indica la cantidad de agua presente en el agregado grueso saturado y superficialmente seco, el cual fue determinado con base a la norma (NMX-C-164-ONNCCE., 2014) y la SCT, N-CMT-2-01-003/02 establece que la absorción en los fragmentos de rocas no será mayor del 4%, el resultado obtenido se muestra en la tabla.

Tabla 48. Porcentaje de absorción de la grava.

<b>%H. Absorción</b>		
<b>Peso húmedo</b>	401.00 g	400.70 g
<b>Peso seco</b>	394.75 g	393.40 g
<b>Humedad</b>	6.25 g	7.30 g
<b>% Abs.</b>	1.58%	1.86%
<b>Promedio</b>	1.72%	

### 5.1.3.2. Densidad de la grava.

La densidad indica la relación que hay entre la masa del agregado grueso y el volumen que ocupa el agregado en estado saturado y superficialmente seco, el cual se determinó con ayuda de la norma (NMX-C-164-ONNCCE., 2014), y la SCT, -N-CMT-2-01-005/02 establece que la densidad de fragmentos de rocas debe ser de 2.3 g/cm<sup>3</sup> como mínimo, el resultado obtenido se muestra en la tabla.

Tabla 49. Densidad de la grava.

<b>Densidad</b>		
<b>Volumen desalojado</b>	148.00 cm <sup>3</sup>	143.00 cm <sup>3</sup>
<b>Peso húmedo</b>	400.20 g	400.10 g
<b>Densidad relativa</b>	2.70 g/cm <sup>3</sup>	2.80 g/cm <sup>3</sup>
<b>Promedio</b>	2.751 g/cm <sup>3</sup>	

### 5.1.3.3. Masa volumétrica seca suelta de la grava.

La MVSS de la grava indica la relación que hay entre la masa y el volumen que ocupa el agregado grueso, el cual fue determinado con la norma (NMX-C-073-ONNCCE., 2004), el resultado obtenido se muestran en la tabla.

Tabla 50. MVSS de la grava.

<b>MVSS</b>		
<b>Peso bruto</b>	5,770.00 g	5,770.00 g
<b>Tara</b>	1,945.00 g	1,945.00 g
<b>Peso neto</b>	3,825.00 g	3,825.00 g
<b>Volumen</b>	2,750.00 cm <sup>3</sup>	2,750.00 cm <sup>3</sup>
<b>Peso volumétrico</b>	1,390.91 kg/m <sup>3</sup>	1,390.91 kg/m <sup>3</sup>
<b>Promedio</b>	1,390.91 kg/m <sup>3</sup>	

### 5.1.3.4. Masa volumétrica seca varillada de la grava.

La MVSV de la grava indica la relación que hay entre la masa compacta y el volumen que ocupa el agregado grueso, el cual fue determinado con la norma (NMX-C-073-ONNCCE., 2004), el resultado obtenido se muestran en la tabla.

Tabla 51. MVSV de la grava.

<b>MVSV</b>		
<b>Peso bruto</b>	6,140.00 g	6,140.00 g
<b>Tara</b>	1,945.00 g	1,945.00 g
<b>Peso neto</b>	4,195.00 g	4,195.00 g
<b>Volumen</b>	2,750.00 cm <sup>3</sup>	2,750.00 cm <sup>3</sup>
<b>Peso volumétrico</b>	1,525.45 kg/m <sup>3</sup>	1,525.45 kg/m <sup>3</sup>
<b>Promedio</b>	1,525.45 kg/m <sup>3</sup>	

#### 5.1.3.5. Granulometría de la grava.

El análisis granulométrico indica los diferentes tamaños de partícula para que el acomodo dentro del concreto sea compacto, el cual fue determinado con base en el procedimiento marcado en la norma (NMX-C-077-ONNCCE., 1997) y el tamaño máximo con base a la norma mexicana (NMX-C-155-ONNCCE., 2014), el resultado obtenido se muestran en la tabla.

Tabla 52. Granulometría de la grava.

<b>Granulometría</b>				
	Malla	Peso retenido parcial	Retenido parcial	Retenido acumulado
	#	(g)	%	%
<b>Tamaño máximo</b>	3/4"	5905.00	34.80	34.80
	1/2"	6975.00	41.10	75.90
	3/8 "	2295.00	13.52	89.42
	No. 4	1270.00	7.48	96.91
	PASA No.4	525.00	3.09	100.00
	SUMAS	16,970.00	100.0	---

#### 5.1.4. Agua para concreto.

El agua utilizada fue del “Laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas”, donde ya existe un reporte emitido por el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en el año de 2014, el cual se establece las condiciones de este líquido y que se muestran en la tabla.

Tabla 53. Calidad del agua del laboratorio

<b>Resultados del análisis del agua utilizada para la fabricación del concreto</b>				
<b>Muestra:</b>		Agua potable de la Red de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.		
<b>Sitio de muestreo:</b>		Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”		
<b>Fecha de muestreo:</b>		18 de mayo de 2014		
<b>Normativa de referencia:</b>		NMX-C-122-ONNCCE-2004.		
<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>Límite permisible (NMX-C-122-ONNCCE-2004)</b>	<b>Unidades</b>	<b>Método utilizado</b>
<b>pH</b>	7.86	>6	U pH	NMX-AA-008-SCFI2000
<b>Temperatura</b>	29.8	-----	°C	NMX-AA-007-SCFI2000
<b>Conductividad eléctrica</b>	456	-----	µs/cm	NMX-AA-093-SCFI2000
<b>Sólidos disueltos totales</b>	352	3500	mg/L	NMX-AA-034-SCFI2001
<b>Oxígeno disuelto</b>	337	-----	mg/L	NMX-AA-012-SCFI2001
<b>Sulfatos</b>	5	3000	mg/L	NMX-AA-074-1981
<b>Cloruros</b>	13.36	400	mg/L	NMX-AA-073-SCFI2001
<b>Dureza cálcica</b>	21	-----	(mg/L) CaCO <sub>3</sub>	Volumétrico
<b>Sales de magnesio</b>	5	100	mg/L	Volumétrico

(Reyes Bernabé, 2015).

### 5.1.5. Diseño del concreto.

Para el diseño del concreto se utilizó el método ACI, dicho método requiere las características mecánicas de los materiales para poder calcular y encontrar la dosificación adecuada, de acuerdo al tipo de agregado que se esté utilizando en la elaboración de concreto.

#### 5.1.5.1. Características de los agregados pétreos y cementante.

Las características de los pétreos son de mucha importancia, ya que con estos datos se realizó la dosificación de la mezcla para el diseño ACI, los resultados obtenidos se muestran en la tabla.

Tabla 54. Características de los pétreos y cementante.

<b>Características de los materiales para dosificación</b>						
<b>Material</b>	MVSS (kg/m <sup>3</sup> )	PVSV (kg/m <sup>3</sup> )	DU (gr/cm <sup>3</sup> )	MF	TM	% de absorción
<b>Grava</b>	1492.453	1610.377	2.751	-----	3/4 "	1.72%
<b>Arena</b>	1390.909	1525.455	2.503	2.70	--- ---	4.04%
<b>Cemento</b>	1490.000	-----	3.030	-----	--- ---	-----

#### *5.1.5.2. Cantidades dosificadas por el método ACI para 1m<sup>3</sup>.*

De acuerdo al cálculo de dosificación por el método ACI, se obtuvieron las cantidades de cada material a utilizar por metro cubico, los resultados se muestran en la tabla.

Tabla 55. Cantidades dosificadas por 1m<sup>3</sup>.

<b>Cantidades de materiales corregidas para un metro cúbico</b>				
<b>Materiales</b>	Masa (kg)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Relación en peso
<b>Cemento</b>	376.640	3.030	0.124	1
<b>Agua</b>	250.991	1	0.251	0.666
<b>Aire</b>	0	0	0.020	-----
<b>Arena</b>	678.31	2.503	0.271	1.800
<b>Grava</b>	996.427	2.751	0.362	2.646
<b>Total</b>	2301.895	-----	1	-----

#### *5.1.5.3. Cantidades a utilizar para cada mezcla.*

Las cantidades a utilizar fueron las mismas para la 3 mezclas, sin embargo, cada mezcla es diferente a la otra de acuerdo al tipo de adición empleada, ya que la finalidad es analizar el comportamiento físico–mecánico de las fibras adicionadas, los resultados se muestran en la tabla.

Tabla 56. Cantidades dosificadas para cada mezcla.

<b>Cantidad de material a usar para 10 cilindros y 8 prismas</b>	
<b>MATERIALES</b>	Masa (kg)
<b>Cemento</b>	65.50 kg
<b>Agua</b>	43.65 kg
<b>Aire</b>	0.00 kg
<b>Arena</b>	117.87 kg
<b>Grava</b>	173.27 kg
<b>Fibra (0.8% cem.)</b>	0.524 kg
<b>Total</b>	400.814 kg

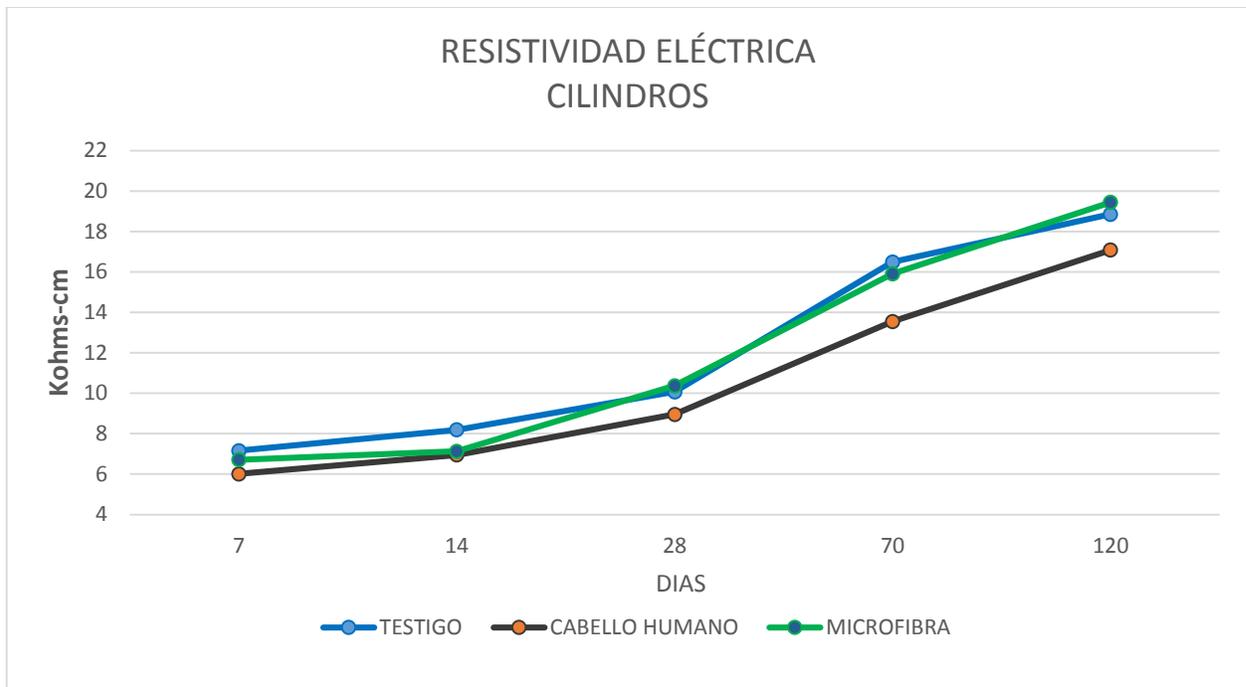
#### **5.1.6. Pruebas no destructivas al concreto endurecido.**

Las pruebas no destructivas del concreto son muy importantes, ya que se puede determinar de manera muy aproximada la calidad y durabilidad de un concreto endurecido, sin ocasionar daños estructurales al elemento analizado.

##### **5.1.6.1. Resistividad eléctrica del concreto.**

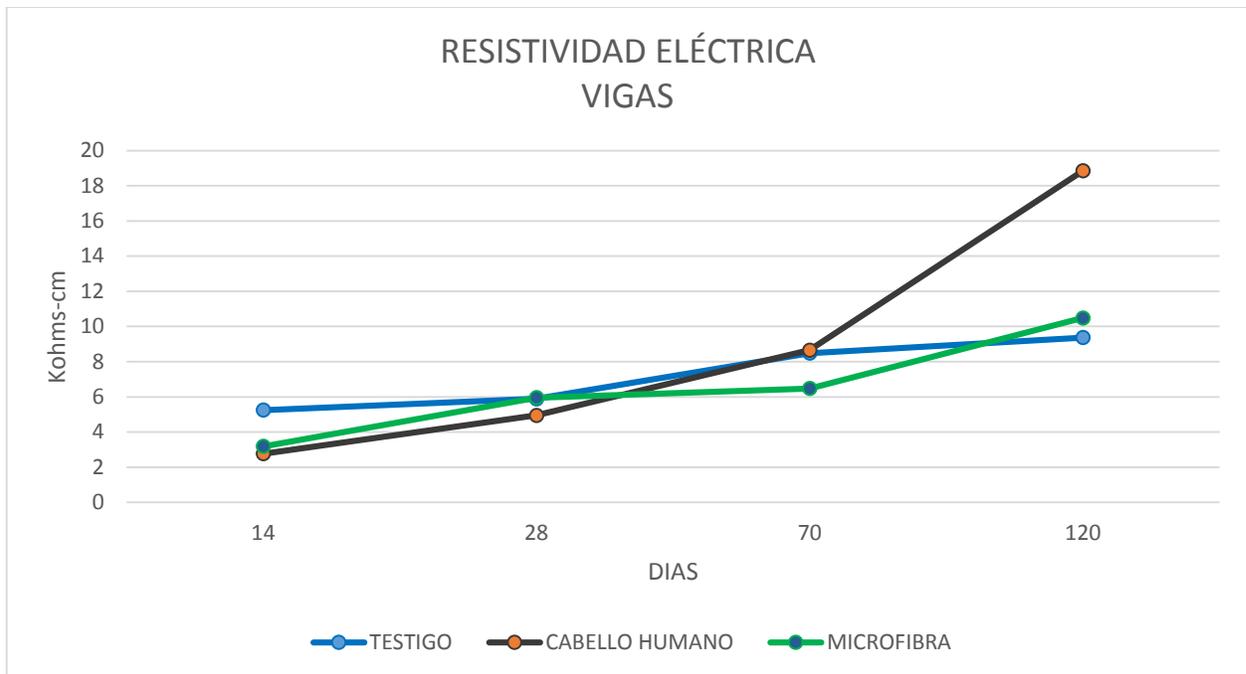
La prueba de resistividad eléctrica es una prueba no destructiva de calidad del concreto que se relaciona con la porosidad del elemento y que interviene en la protección del acero estructural embebido en el concreto.

La gráfica muestra los resultados promedio obtenidos en la prueba de resistividad eléctrica en especímenes cilíndricos de concreto de las 3 mezclas realizadas. Se observa que a lo largo de las edades de prueba, las mezclas presentan resultados muy homogéneos y ascendentes, la mezcla testigo y la mezcla con microfibras presentan ligeramente un mejor comportamiento respecto a la mezcla con cabello humano. De acuerdo a las especificaciones marcadas por la Red DURAR, el riesgo de corrosión de la mezcla testigo y la mezcla con microfibras es moderado a partir de la edad de 28 días, ya que supera el valor establecido de 10  $K\Omega$ -cm, mientras que la mezcla con cabello humano lo supera hasta la edad de 70 días. De acuerdo a la norma mexicana (NMX-C-514-ONNCCE., 2016), las 3 mezclas tienen una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo, sea excesivamente rápido a la edad de 7 y 14 días con valores menores a 10  $K\Omega$ -cm. La mezcla testigo y la mezcla con microfibras en el periodo de edad de 28 a 120 días con valores de 10 a 50  $K\Omega$ -cm tienen una porosidad interconectada de consideración, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo, sea rápido.



Grafica 6. Resistividad eléctrica en cilindros de concreto

La gráfica muestra los resultados promedio obtenidos en la prueba de resistividad eléctrica en especímenes prismáticos de concreto de las 3 mezclas. Se observa que la mezcla con cabello humano muestran un mejor comportamiento de crecimiento a la edad de 120 días, mientras que la mezcla con microfibra supera ligeramente los 10 KΩ-cm establecidos en la Red DURAR, lo cual indica riesgo de corrosión moderado. A edades inferiores a 70 días las 3 mezclas presentan alto riesgo de corrosión al no sobrepasar el límite de 10 KΩ-cm. De acuerdo a la norma mexicana (NMX-C-514-ONNCCE., 2016), las 3 mezclas tienen una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo, sea excesivamente rápido en el periodo de edad de 14 a 70 días con valores menores a 10 KΩ-cm, además la mezcla testigo no superó este valor a la edad de 120 días, mientras que la mezcla con cabello humano y la mezcla con microfibra a la edad de 120 días con valores de 10 a 50 KΩ-cm tienen una porosidad interconectada de consideración, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo, sea rápido.

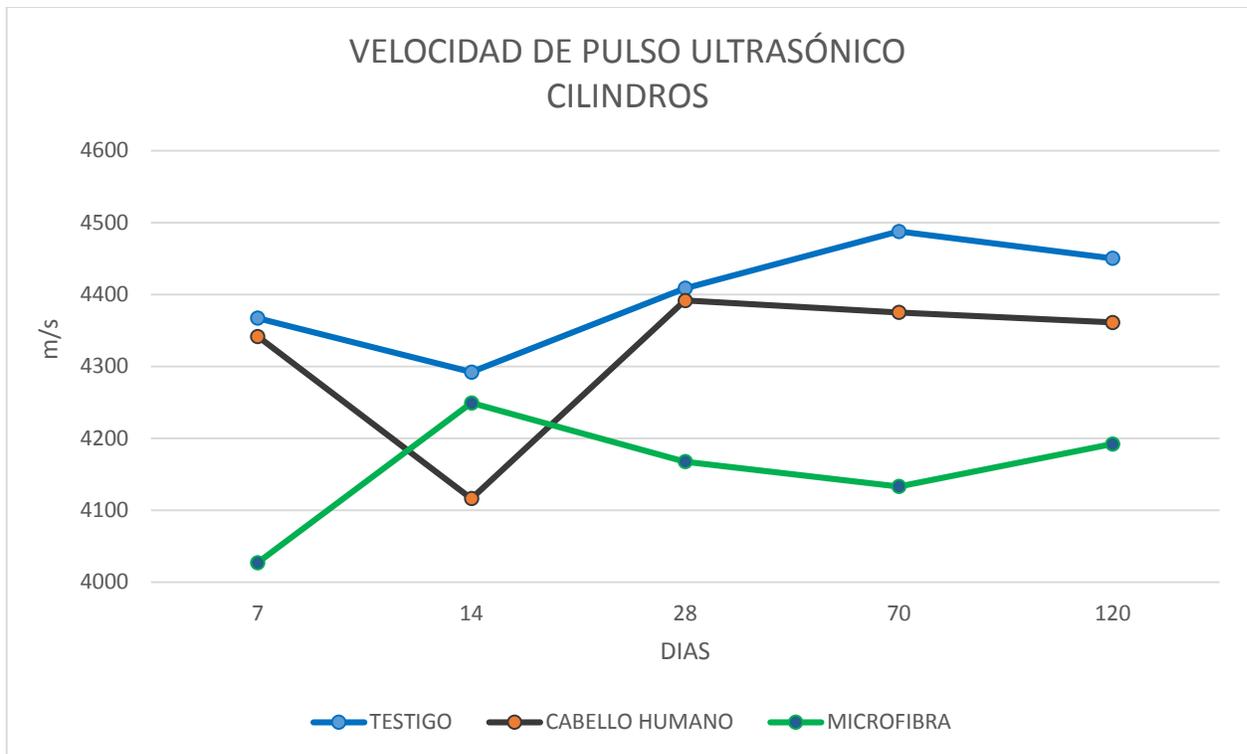


Grafica 7. Resistividad eléctrica en vigas de concreto.

#### 5.1.6.2. Velocidad de pulso ultrasónico del concreto.

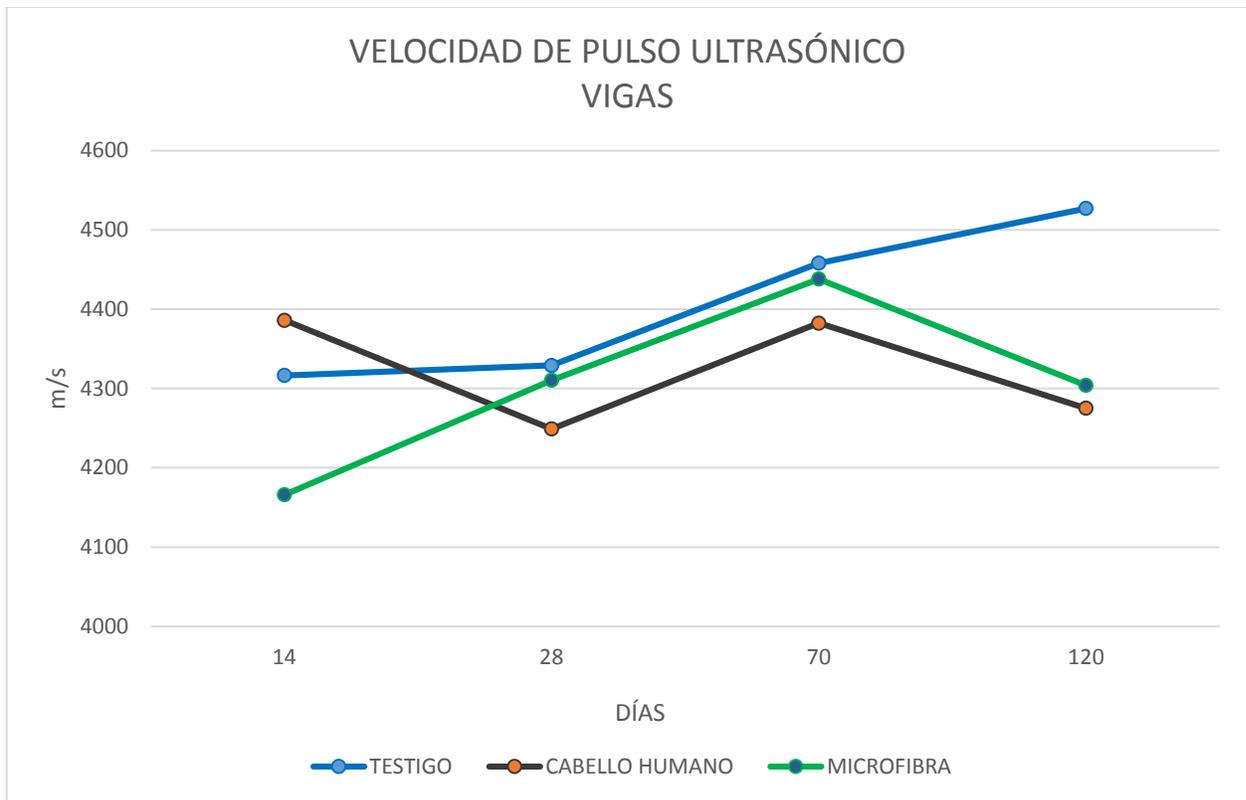
La prueba de velocidad de pulso ultrasónico, consiste en determinar de manera no destructiva la uniformidad del concreto de acuerdo a los vacíos y fisuras en el interior del elemento que se esté analizando.

La gráfica muestra los resultados promedio obtenidos en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico en especímenes cilíndricos de las 3 mezclas elaboradas. Se observa que para los especímenes cilíndricos los valores de VPU para la mezcla testigo y para la mezcla con cabello humano presentan un comportamiento adecuado a lo largo de la edad de prueba, sin embargo la mezcla con microfibra presenta un decremento a 28 y 70 días de edad, lo cual genera cierta incertidumbre. De acuerdo a los parámetros especificados en la Red DURAR, las 3 mezclas se clasifican como un concreto durable al haber alcanzado valores de VPU mayores a 4000 m/s a partir de la edad de 7 días y según los criterios de evaluación de la norma mexicana (NMX-C-275-ONNCCE., 2004), las 3 mezclas contienen pocos vacíos o agrietamiento bajo o nulo en el concreto al registrar valores mayores a 2350 m/s a partir de 7 días de edad.



Grafica 8. Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros de concreto.

La gráfica muestra los resultados promedio obtenidos en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico en especímenes prismáticos de las 3 mezclas elaboradas. Se observa que para los especímenes prismáticos los valores de VPU para la mezcla testigo presentan un comportamiento ascendente a lo largo de la edad de prueba, mientras que para la mezcla con microfibra y la mezcla con cabello humano los valores de VPU presentan un decremento a la edad mayor 120 días. Sin embargo los resultados de las 3 mezclas de acuerdo a los parámetros especificados en la Red DURAR, clasifica al concreto, como un concreto durable al haber alcanzado valores de VPU mayores a 4000 m/s a partir de la edad de 14 días, según los criterios de evaluación de la norma mexicana (NMX-C-275-ONNCCE., 2004), las 3 mezclas contienen pocos vacíos o agrietamiento bajo o nulo en el concreto al registrar valores mayores a 2350 m/s a partir de 7 días de edad.



Gráfica xx. Velocidad de pulso ultrasónico en vigas de concreto.

### 5.1.7. Pruebas destructivas al concreto endurecido.

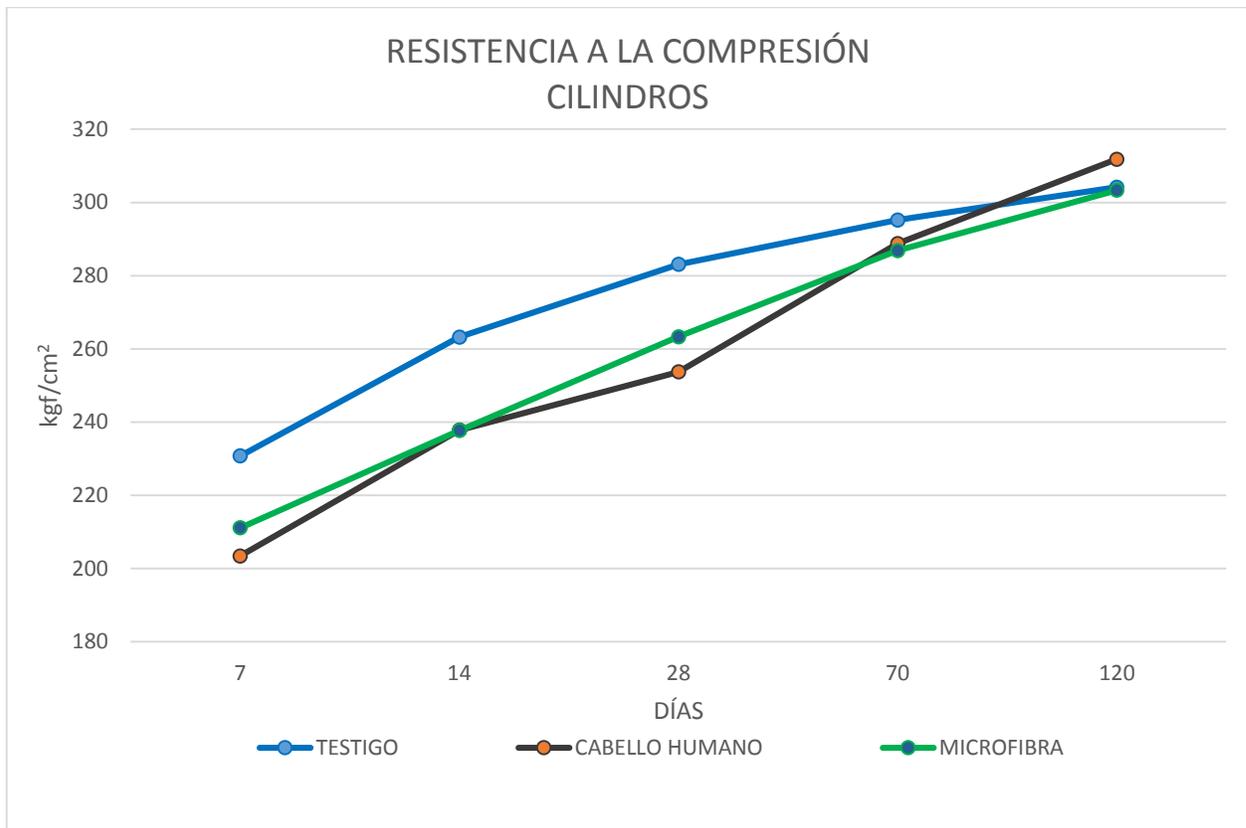
#### 5.1.7.1. Resistencia a la compresión simple del concreto.

La prueba destructiva de compresión simple a cilindros de concreto es un parámetro de calidad de la mezcla de acuerdo a la resistencia de diseño, por lo que es una de las pruebas más importantes de esta investigación.

La gráfica xx muestra los resultados promedio obtenidos de compresión simple en elementos cilíndricos de concreto, con medidas de 15 cm x 30 cm, de acuerdo a la norma (NMX-C-083-ONNCCE-2014), las 3 mezclas a edades de 7 y 14 días presentan un comportamiento adecuado, sin embargo a la edad de 28 días las probetas no superaron el 100% de resistencia, de acuerdo al diseño ACI de 300 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que a la edad de 120 días todas alcanzaron y superaron el porcentaje indicado. Presentando un mejor comportamiento la mezcla testigo a edades de 7, 14, 28 y 70 días, la cual fue superada a la edad de 120 días por la mezcla con cabello humano, mientras que la mezcla con microfibra presenta un resultado promedio similar a la testigo, lo cual demuestra que las fibras le brindan cohesión al concreto hidráulico y así mismo mejor comportamiento mecánico.

La mezcla con cabello humano obtuvo una resistencia promedio de 311.8 kg/cm<sup>2</sup> a los 120 días de edad, correspondiente al 104% del f<sup>c</sup> de proyecto, superando a la mezcla testigo (Tt), la cual

obtuvo una resistencia promedio de 304.17 kg/cm<sup>2</sup> (101% del f'c de proyecto). Y presentando una tendencia ascendente, por lo cual se pretende seguir monitoreando las 3 mezclas a edades tardías con la finalidad de encontrar resultados más específicos.

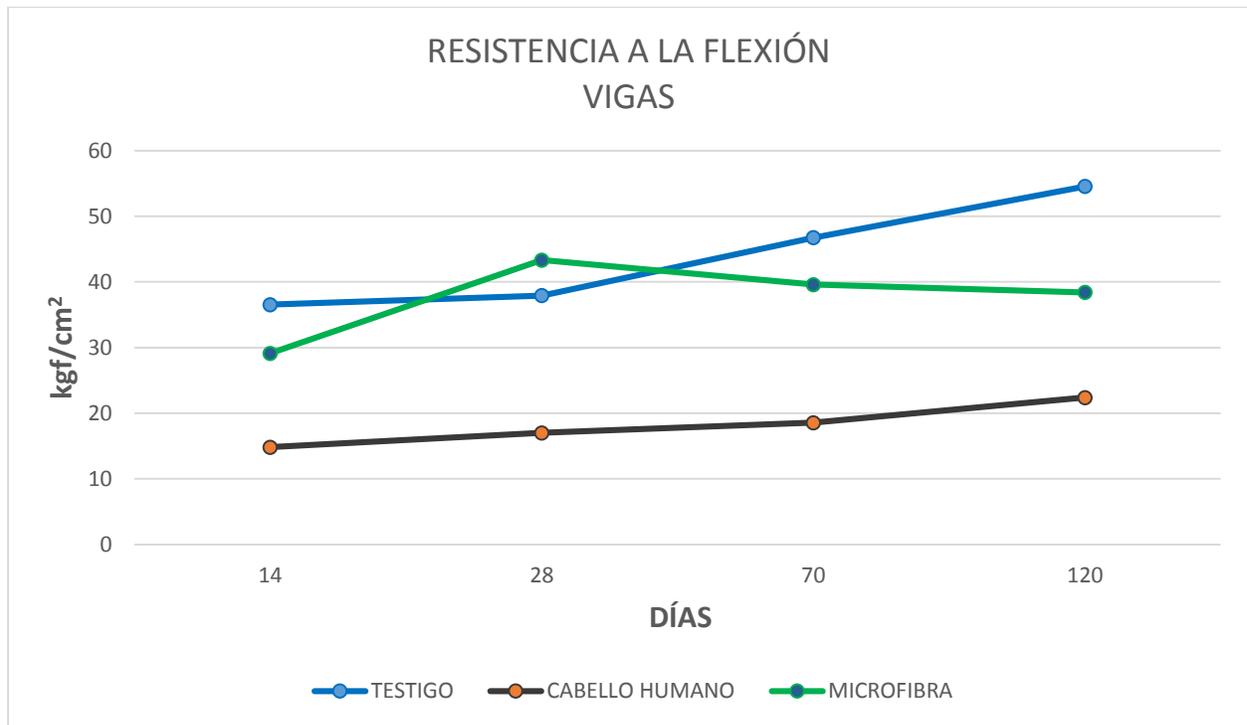


Grafica 9. Resistencia a compresión en cilindros de concreto.

#### 5.1.7.2 Resistencia a flexión del concreto (MR).

La prueba de flexión al concreto es un parámetro de calidad para especímenes prismáticos en los cuales se determina el MR al tercio medio, que indica el comportamiento mecánico del concreto hidráulico respecto a cargas de compresión y tensión.

La grafica xx muestra los resultados promedios obtenidos en las 3 mezclas analizadas en la prueba de flexión, donde se encontró un valor de MR o Módulo de Ruptura. Los resultados indican que la mezcla testigo presento un mejor comportamiento ascendente, mientras que las mezclas con cabello humano y con microfibra presentaron un comportamiento ascendente limitado. Lo cual quiere decir que en esta prueba la incorporación de las fibras no beneficio al concreto, al ser superior el resultado de la mezcla testigo. Caso contrario a lo que se esperaba, ya que se tenía la teoría que las fibras mejorarían el esfuerzo a flexión. Así pues queda demostrado en esta investigación que este tipo de fibras no aportan resistencia a la flexión, sin embargo de acuerdo a la ficha técnica benefician en la reducción del agrietamiento de losas de concreto.



Gráfica xx. Resistencia a flexión en vigas de concreto (MR).

## 6. CONCLUSIÓN

Los resultados promedio obtenidos en la prueba de resistividad eléctrica en especímenes cilíndricos de concreto de las 3 mezclas realizadas, presentan resultados muy homogéneos y ascendentes, la mezcla testigo y la mezcla con microfibra presentan ligeramente un mejor comportamiento respecto a la mezcla con cabello humano, caso contrario a la prueba en especímenes prismáticos, ya que la mezcla con cabello humano presento un mejor resultado. De acuerdo a las especificaciones marcadas por la Red DURAR, el riesgo de corrosión de la mezcla testigo y la mezcla con microfibra en especímenes cilíndricas es moderado a partir de la edad de 28 días, ya que supera el valor establecido de 10 K $\Omega$ -cm, mientras que la mezcla con cabello humano lo supera hasta la edad de 70 días, sin embargo en especímenes prismáticos a edades inferiores a 70 días las 3 mezclas presentan alto riesgo de corrosión al no sobrepasar el límite de 10 K $\Omega$ -cm, destacando a una edad de 120 días la mezcla con cabello humano ya que sobrepaso el límite de 10 K $\Omega$ -cm.

De acuerdo a la norma mexicana (NMX-C-514-ONNCCE., 2016), en cilindros las 3 mezclas tienen una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo, sea excesivamente rápido a la edad de 7 y 14 días con valores menores a 10 K $\Omega$ -cm, mientras que en los especímenes prismáticos se presentó a 14 y 70 días. En especímenes cilíndricas la mezcla testigo y la mezcla con microfibra en el periodo de edad de 28 a 120 días con valores de 10 a 50 K $\Omega$ -cm tienen una porosidad interconectada de consideración, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo, sea rápido, mientras que en especímenes prismáticos esto ocurrió en la mezcla con cabello humano.

Los resultados promedio para la prueba de VPU en especímenes cilíndrico y prismáticos presentan un comportamiento homogéneo a lo largo de la edad de prueba y de acuerdo a los parámetros especificados en la Red DURAR, las 3 mezclas se clasifica como un concreto durable al haber alcanzado valores de VPU mayores a 4000 m/s a partir de la primera edad de prueba. Según los criterios de evaluación de la norma mexicana (NMX-C-275-ONNCCE., 2004), las 3 mezclas contienen pocos vacíos o agrietamiento bajo o nulo en el concreto al registrar valores mayores a 2350 m/s a partir de 7 días de edad.

Los resultados destructivos de compresión simple de cilindros de concreto se realizaron de acuerdo a la norma (NMX-C-083-ONNCCE-2014), los cuales indican que las 3 mezclas a la edad de 28 días no superaron el 100% de resistencia, de acuerdo al diseño ACI de 300 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que a la edad de 120 días todas alcanzaron y superaron el porcentaje indicado, obteniendo a la edad de 120 días un mejor resultado con la mezcla de cabello humano. La mezcla con cabello humano obtuvo una resistencia promedio de 311.8 kg/cm<sup>2</sup> a los 120 días de edad, correspondiente al 104% del f'c de proyecto, superando a la mezcla testigo (Tt), la cual obtuvo una resistencia promedio de 304.17 kg/cm<sup>2</sup> (101% del f'c de proyecto). Y presentando una tendencia ascendente,

por lo cual se pretende seguir monitoreando las 3 mezclas a edades tardías con la finalidad de encontrar resultados más específicos.

Los resultados promedios obtenidos en las 3 mezclas analizadas en la prueba de flexión, indican que la mezcla testigo presento un mejor comportamiento ascendente, mientras que las mezclas con cabello humano y con microfibra presentaron un comportamiento ascendente limitado. Lo cual quiere decir que en esta prueba la incorporación de las fibras no beneficio al concreto, al ser superior el resultado de la mezcla testigo. Caso contrario a lo que se esperaba, ya que se tenía la teoría que las fibras mejorarían el esfuerzo a flexión. Así pues queda demostrado en esta investigación que este tipo de fibras no aportan resistencia a la flexión, sin embargo de acuerdo a la ficha técnica benefician en la reducción del agrietamiento de losas de concreto.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (<http://www2.cemex.com/ES/ProductosServicios/TiposConcreto.aspx>). (s.f.).
- ACI 211, A. C. (1991). *ACI Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, 1991 reapproved 2002.*. ACI Committee 211 Report.
- Askerland, D. R. (1998). *Cienci e Ingenieria de los Materiales*. Internatinal Thomson.
- ASTM-C-266. (2015). *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles*. EE.UU.: ASTM.
- ASTM-C-266-04. (2004). *Tiempo de fraguado para la pasta de cemento hidáulico por el método de las agujas de Gillmore*. ASTM.
- ASTM-C-33-03. (2003). *Especificación normalizada para agregados para concreto*. ASTM.
- BEGUERÍA, S. (2019). *EL AGUA. SUS CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES*. Recuperado el 13 de 08 de 2019, de Centro europeo de postgrado: <https://www.ceupe.com/blog/categories/medio-ambiente-calidad.html>
- CONCRETO., I. D. (1997). *Manual tecnología y propiedades*. Colombia: Asociación colombiana productores de concreto.
- Duarte, J. (2019). Propia.
- DURAR. (2000). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (Tercera ed.)*. México: CYTED.
- EIA, B. y. (2007). *Energy Information Administration* .
- Gas., O. &. (2007.).
- <http://www.imcyc.com/concreto/>. (s.f.). *imcyc.com*. Obtenido de *imcyc.com*.
- <https://mejorconsalud.com/asombrosas-curiosidades-sobre-el-cabello/>. (s.f.). <https://mejorconsalud.com/asombrosas-curiosidades-sobre-el-cabello/>. Obtenido de <https://mejorconsalud.com/asombrosas-curiosidades-sobre-el-cabello/>.
- [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/323492/CTEIERSP\\_Sesio\\_n\\_abril\\_5\\_\\_2018\\_\\_RESIDUOS\\_SOLIDOS.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/323492/CTEIERSP_Sesio_n_abril_5__2018__RESIDUOS_SOLIDOS.pdf). (s.f.). *gob.mx*. Obtenido de *gob.mx*.
- <https://www.wikiversus.com/cuidado-personal/partes-del-pelo-estructura-propiedades-composicion-quimica/>. (s.f.).
- <https://www.wikiversus.com/cuidado-personal/partes-del-pelo-estructura-propiedades-composicion-quimica/>. (s.f.). <https://www.wikiversus.com/cuidado-personal/partes-del-pelo-estructura-propiedades-composicion-quimica/>. Obtenido de <https://www.wikiversus.com/cuidado-personal/partes-del-pelo-estructura-propiedades-composicion-quimica/>.
- Knudsen, T. (1976). *QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE COMPOUND COMPOSITION OF CEMENT AND CEMENT CLINKER BY X-RAY DIFFRACTION*. AMER. CERAMIC. SOC. BUL.

- MX-C-152-ONNCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CEMENTANTES HIDRÁULICOS- DETERMINACION DE LA DENCIDAD DEL CEMENTO HIDRAULICO*. CDMX: ONNCE.
- Navarro Sánchez, L. M. (2011). *Análisis de Materiales (Tercera Edición ed.)*. Morelia, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Facultad de Ingeniería Civil.
- NEVILLE, A. M. (1999). *TECNOLOGÍA DEL CONCRETO* (1999 ed.). (I. HUERTA MARTÍNEZ, & A. ESQUEDA HUIDOBRO, Edits.) MÉXICO, D.F., MÉXICO.
- NMX-C-030-ONNCE. (2004). *Industria de la construcción - Agregados - Muestreo*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-057-ONNCE. (2015). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos- Determinación de la Consistencia Normal. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación. S.C.*
- NMX-C-073-ONNCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-MASA VOLUMETRICA-METODO DE PRUEBA*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-077-ONNCE. (1997). *Industria de la construcción - Agregados para concreto - Análisis granulométrico - Método de prueba*. CDMX: S.C.
- NMX-C-083-ONNCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO- DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPÉCIMENES- MÉTODO DE ENSAYO*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-084-ONNCE. (2006). *Industria de la construcción - Agregados para concreto - Partículas más finas que la criba 0,075 mm (No. 200) por medio de lavado - Método de prueba*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-088-ONNCE. (1997). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS- DETERMINACIÓN DE IMPUREZAS ORGÁNICAS EN EL AGREGADO FINO*. CDMX: S.C.
- NMX-C-109-ONNCE. (2013). *Cabeceo de especímenes cilíndricos*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-111-ONNCE. (2014). *Industria de la construcción-Agregados para concreto hidráulico-. Especificaciones y métodos de prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación,.* CDMX: S.C.
- NMX-C-122-ONNCE. (2014). *Industria de la Construcción -Agua para Concreto- Especificaciones. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación,.* CDMX: ONNCE.
- NMX-C-148-ONNCE. (s.f.). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CEMENTOS HIDRÁULICOS-GABINETES Y CUARTOS HÚMEDOS Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO PARA EL CURADO DE ESPÉCIMEN DE MORTERO Y CONCRETO DE CEMENTANTES HIDRÁULICOS*. CDMX: ONNCE.
- NMX-C-156-ONNCE. (2010). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO HIDRÁULICO-DETERMINACIÓN DEL REVENIMIENTO EN EL CONCRETO FRESCO*. CDMX: ONNCE.

- NMX-C-159-ONNCCE. (2016). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN -CONCRETO- ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECIMENES EN EL LABORATORIO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-164-ONNCCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS- DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DE AGUA EL AGREGADO GRUESO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino - Método de ensayo*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación. CDMX: S.C.
- NMX-C-170-ONNCCE. (1997). *Industria de la construcción-Agregado- Reducción de las muestras de agregado*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-191-ONNCCE. (2015). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO- DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO USANDO UNA VIGA SIMPLE CON CARGA EN LOS TERCIOS DEL CLARO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-275-ONNCCE. (2004). *DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PULSO A TRAVÉS DEL CONCRETO (MÉTODO DE PRUEBA)*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-275-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO- DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PULSO A TRAVÉS DEL CONCRETO- MÉTODO DE ULTRASONIDO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2010). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CEMENTANTES HIDRÁULICOS-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción -cementos hidráulicos- Especificaciones y métodos de prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S.C.
- NMX-C-514-ONNCCE. (2016). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO HIDRÁULICO-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO*. CDMX: ONNCCE.
- Reyes Bernabé, C. (2015). “*EVALUACIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO SUSTITUIDOS CON CENIZAS PUZOLÁNICAS PARA MITIGAR EL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN REHABILITACIÓN*”. MORELIA.
- Romo, M. (2009). *Fundamentos del hormigón simple*. Escuela Politécnica del Ejército,. Ecuador.
- SENER. (2011). *Prospectiva de petrolíferos*.
- Steven H. Kosmatka, B. K. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Portland Cement Association.