



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis profesional

“Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras PET y Polipropileno”

Para obtener el título de:

Ingeniero Civil

Presenta:

Ana Daniela Martínez González

Director:

Dr. Wilfrido Martínez Molina

Codirector interno:

M.I.T. Jorge Alberto Pacheco Segovia

Codirector externo:

Dr. Herwin Zeth López Calvo

Morelia, Michoacán, noviembre 2021

Resumen

En el presente trabajo: “Comportamiento Físico-Mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras de PET y Polipropileno”, se buscó dar aportes para alargar la vida útil de una estructura de concreto hidráulico, dosificado en masa, y proponer alternativas mediante diferentes mezclas con distintos porcentajes de adición de fibras de Tereftalato de Polietileno comúnmente conocido como PET, y Polipropileno. Se determinaron los parámetros de diseño en los materiales a utilizarse en esta investigación, para realizar el diseño especificado en el código ACI 211 y en la norma (NMX-C-155-ONNCCE, 2014).

Posteriormente se realizaron las pruebas al concreto en estado fresco: Revenimiento del concreto de cemento hidráulico, índice de pH; y en estado endurecido: Curado de especímenes, cabeceo de especímenes cilíndricos, resistencia a compresión, resistencia a tensión, absorción por capilaridad, resistividad eléctrica del concreto hidráulico. En la evaluación de Resistividad Eléctrica Húmeda se corrigió por temperatura y se determinó la vida útil o periodo de iniciación (T_i) de las 5 mezclas en estudio bajo la metodología propuesta en los documento (PNE83994-2, 2016).

Con base en los resultados de las pruebas de Resistividad Eléctrica Húmeda a 90 días y de acuerdo con las especificaciones de la norma de durabilidad (NMX-C-530-ONNCCE-2018, 2018), el concreto puede ser sometido a un ambiente inducido a carbonatación (C3).

Se logró determinar la vida útil o periodo de iniciación (T_i) de las 5 mezclas en estudio, éste periodo de iniciación está en función del espesor de recubrimiento, así como un factor edad (q). Estos resultados fueron obtenidos midiendo la facilidad con la que los iones atravesarán el recubrimiento que protege nuestro acero de refuerzo hasta alcanzar la armadura, determinando así que es posible, bajo ciertos porcentajes de adición de éstas fibras, aumentar el tiempo de vida útil.

Palabras clave: Concreto, resistividad, coeficiente de temperatura, vida útil.

Abstract

In the present work: "Physical-Mechanical Behavior in concrete mixtures modified with PET and Polypropylene fibers", it was sought to give contributions to extend the useful life of a hydraulic concrete structure, dosed in mass, and propose alternatives through different mixtures with different percentages of addition of Polyethylene Terephthalate fibers commonly known as PET, and Polypropylene. The design parameters were determined in the materials to be used in this research, to carry out the design specified in the ACI code 211 and in the standard (NMX-C-155-ONNCCE, 2014).

Subsequently, the tests were carried out on the concrete in a fresh state: Revenimiento of the hydraulic cement concrete, pH index; and in hardened state: Curing of specimens, pitching of cylindrical specimens, compressive strength, tensile resistance, capillary absorption, electrical resistivity of hydraulic concrete. In the evaluation of Wet Electrical Resistivity, it was corrected by temperature and the useful life or initiation period (T_i) of the 5 mixtures under study was determined under the methodology proposed in the document (PNE83994-2, 2016).

Based on the results of the 90-day Wet Electrical Resistivity tests and in accordance with the specifications of the durability standard (NMX-C-530-ONNCCE-2018, 2018), concrete can be subjected to a carbonation-induced environment (C3).

It was possible to determine the useful life or initiation period (T_i) of the 5 mixtures under study, this initiation period is a function of the coating thickness, as well as an age factor (q). These results were obtained by measuring the ease with which the ions will pass through the coating that protects our reinforcing steel until they reach the armature, thus determining that it is possible, under certain percentages of addition of these fibers, to increase the service life.

Keywords: Concrete, resistivity, temperature coefficient, service life.

Objetivos

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño FÍSICO-MECÁNICO en muestras de concreto modificado con fibras de PET determinando su vida útil con base en los resultados de su resistividad eléctrica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Producir macrofibras de PET derivadas de envases de plástico post-consumo adaptándolas para implementar la utilización de materiales sustentables
- Aplicar PET a los procesos de elaboración de mezclas de concreto convencionales para mejorar las características de éste.
- Analizar si la variación de la temperatura afecta los resultados de resistividad eléctrica húmeda por medio de la obtención de un coeficiente de temperatura.
- Evaluar el desempeño FÍSICO-MECÁNICO del concreto modificado resultante de los valores obtenidos mediante las pruebas, determinando la mejor proporción de materiales.
- Determinar la vida útil con base en los resultados de la prueba de resistividad eléctrica midiendo la capacidad que tiene el material para resistir el flujo de una corriente eléctrica.

Justificación

El concreto es el material más usado en la industria de la construcción, pero su producción es una actividad industrial altamente contaminante, aspecto que no debe escapar a la práctica académica desde cualquier especialidad.

Por otro lado, la desproporcionada producción de envases tipo PET o Polipropileno, es también objeto de preocupación de ambientalistas y gobiernos a nivel global.

Este trabajo pretende abonar a dos propósitos a la vez, por un lado, dar un aporte a la práctica de reciclaje de un producto de uso muy común, y por otro, proponer mejoras a la calidad y durabilidad del concreto, tema de primordial interés para nuestra facultad.

Es por ello que nos propusimos experimentar con PET y Polipropileno como agregados al concreto y aplicar diversas pruebas a nuestras muestras para hacer un marco referencial a la normatividad vigente sobre el tema.

ÍNDICE

Resumen	II
Abstract	III
Objetivos.....	IV
Justificación.....	V
ÍNDICE.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
<i>Dedicatorias</i>	XVI
<i>Agradecimientos</i>	XVII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Impacto del PET en el planeta.	2
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Descripción y análisis de investigaciones relacionadas (Estado Del Arte)	4
2.2 Estudio general de los materiales. Historia, características y propiedades.	6
2.2.1 Cemento Portland	8
2.2.1.1 Clasificación del cemento	10
2.2.1.2 Cemento empleado en la investigación.....	11
2.2.2 Arena	11
2.2.2.1 Arena Utilizada en la Investigación.....	12
2.2.3 Grava.....	13
2.2.3.1 Grava utilizada en la investigación.	13
2.3 Fibras como refuerzo en el concreto.	13
2.4 Fibras a estudiar.....	15
2.4.1 PET.....	15
2.4.2 Polipropileno.....	15
CAPÍTULO 3 DISEÑO DE MEZCLAS.	16
3.1 Planificación del estudio experimental	16
3.2 Proceso de elaboración de fibras de PET.	17
3.3 Factores que intervienen en el diseño de mezclas	20

3.4	Métodos de proporcionamiento.....	21
3.5	Método ACI 211	22
3.6	Elaboración de mezclas y especímenes.....	32
CAPÍTULO 4 PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS.....		36
4.1	Cemento Portland.....	36
4.1.1	Consistencia normal del cemento hidráulico.....	36
4.1.2	Tiempo de fraguado del cemento hidráulico método de las agujas de Gillmore.	40
4.1.3	Determinación de la densidad del cemento hidráulico.....	42
4.2	Agregados pétreos.	44
4.2.1	Agregados Finos.	46
4.2.1.1	Reducción de Muestras de Agregados Finos	46
4.2.1.1	Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca suelta de los agregados finos.....	50
4.2.1.2	Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca varillada de los agregados finos.....	51
4.2.1.3	Determinación de la humedad de absorción del agregado fino.	53
4.2.1.4	Determinación de la densidad relativa en agregado fino.....	56
4.2.1.5	Análisis granulométrico de agregados finos para concreto.....	58
4.2.1.6	Determinación de la sedimentación en agregados finos.....	63
4.2.1.7	Determinación del contenido de Material Orgánico (No de Colorimetría).	65
4.2.2	Agregados Gruesos.....	67
4.2.2.1	Reducción de Muestras de Agregados Gruesos.....	67
4.2.2.2	Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca suelta de los agregados gruesos.	69
4.2.2.3	Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca varillada de los agregados gruesos.	70
4.2.2.4	Determinación de la humedad de absorción del agregado grueso.....	72
4.2.2.1	Determinación de la densidad relativa en agregado grueso.	73
4.2.2.2	Análisis granulométrico de agregados gruesos para concreto.	75
4.3	Agua	78
4.3.1	Estudios que se le realizan al agua.	78
4.4	Concreto fresco.....	79
4.4.1	Revenimiento del concreto de cemento hidráulico.	79

“Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno”

4.4.2	Índice de PH	81
4.5	Concreto endurecido.....	82
4.5.1	Curado de especímenes de prueba en el laboratorio.	82
4.5.2	Cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto.	83
4.5.3	Resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto.	84
4.5.4	Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto.	88
4.5.5	Absorción por Capilaridad (Porosidad Efectiva).....	90
4.5.6	Resistividad eléctrica del concreto hidráulico.....	94
CAPÍTULO 5	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	98
5.1	Cemento	99
5.1.1	Determinación de la densidad del cemento hidráulico.....	99
5.2	Agregados pétreos	100
5.2.1	Agregados finos.....	100
5.2.1.1	Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca suelta de los agregados finos.....	100
5.2.1.2	Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca varillada de los agregados finos.....	101
5.2.1.3	Determinación de la humedad de absorción del agregado fino.	101
5.2.1.4	Determinación de la densidad relativa en agregado fino.	102
5.2.1.5	Análisis granulométrico de agregados finos para concreto	103
5.2.1.6	Determinación de la sedimentación en agregados finos.....	106
5.2.2	Agregado grueso	107
5.2.2.1	Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca suelta de los agregados gruesos.	107
5.2.2.2	Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca varillada de los agregados gruesos.	107
5.2.2.3	Determinación de la humedad de absorción del agregado grueso.....	108
5.2.2.4	Determinación de la densidad relativa en agregado grueso.	108
5.2.2.5	Análisis granulométrico de agregados gruesos para concreto.	109
5.3	Agua.	109
5.4	Concreto Freso.....	112
5.4.1	Revenimiento del concreto de cemento hidráulico.	112
5.4.2	Índice de PH	113

5.5	Concreto endurecido.....	113
5.5.1	PRUEBAS FISICO-MECÁNICAS.	113
5.5.1.1	Resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto.	113
5.5.1.2	Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto.	115
5.5.1.3	Absorción por Capilaridad (Porosidad Efectiva).....	117
5.5.2	Resistividad eléctrica del concreto hidráulico.....	121
5.5.2.1	Corrección de la medida de resistividad eléctrica por efectos de la temperatura.	126
5.5.2.2	Comportamiento del coeficiente de temperatura (α) en función del tiempo.....	138
5.5.2.3	Comportamiento del coeficiente de temperatura (α) en función del tipo de mezcla.	147
CAPÍTULO 6	. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES.	160
6.1	CONCLUSIONES.....	160
6.2	FUTURAS INVESTIGACIONES.....	162
CAPÍTULO 7	BIBLIOGRAFÍA.....	163

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Variación de las proporciones usadas en concreto. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).....	8
Figura 2.2. Saco de cemento CPC 30R RS marca TOLTECA. Fuente: Cemex. 17/10/21.....	11
Figura 2.3. Banco de material “El Coro”. Fuente: Google Earth Pro.	12
Figura 2.4. Muestra representativa de Agregado fino A. Fuente: Elaboración propia.....	12
Figura 2.6. Muestra representativa de Agregado fino B. Fuente: Elaboración propia.....	12
Figura 2.5. Banco de Material “san Bernabé”. Fuente: Google Earth Pro.	12
Figura 2.7. Banco de Material “La Roka”. Fuente: Google Earth Pro.	13
Figura 2.8. Muestra representativa de Agregado Grueso. Fuente: Fuente: Elaboración propia.....	13
Figura 3.1 Planificación del estudio experimental. Fuente: Elaboración propia.....	17
Figura 3.2. Equipos elaborados para la producción de tiras de PET: Fuente: Elaboración propia.....	18
Figura 3.3. Proceso de obtención de tiras de PET. Fuente: Elaboración propia..	19
Figura 3.4. Aparato elaborado para lijar las fibras de PET. Fuente: Elaboración propia..	19
Figura 3.6. Resultado de elaboración de fibra de PET. Fuente: Elaboración propia.	20
Figura 3.5. Cortado de fibra de PET. Fuente: Elaboración propia..	20
Figura 3.3. Vaciado de mezcla en carretiva y toma de lectura de temperatura. Fuente:Elaboración propia.....	33
Figura 3.4. . Varillado en elaboración de muestras de concreto fresco. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 3.5. Moldes cilíndricos. Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 3.10. Proceso de enrasado de moldes en vigas y cilindros, Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 4.1 Proceso de humedecer el cemento y amasado de la pasta. Fuente: Elaboración propia.....	38
Figura 4.3 Aparato de Vicat.F uente: Elaboración propia.....	39
Figura 4.2 Aparato de Vicat (NMX-C-057-ONCCE, 2015)	39
Figura 4.4 Colocación de la pasta en el anillo y toma de lectura inicial. Fuente: Elaboración propia.	40
.....	40
Figura 4.5. Colocado de especímenes de prueba en cuarto húmedo.F uente: Elaboración propia..	42
Figura 4.7. Realizado de prueba de consistencia normal. Fuente: Elaboración propia..	42
Figura 4.6. Aparato de Gillmore utilizado. Fuente: Elaboración propia..	42
Figura 4.8. A- Llenado del matraz Le Chatelier con keroseno. B- Sumergido el matraz en un baño de agua a la temperatura del laboratorio. C-introducción del cementante en pequeñas porciones dentro del matraz. D- Desalajo del aire en el frasco. Fuente: Propia.	44

Figura 4.2 Vaciado de material sobre la parte superior del cuarteador mecánico. Material A y B.	Figura 4.3 A- Llenado del matraz Le Chatelier con keroseno. B- Sumergido el matraz en un baño de agua a la temperatura del laboratorio. C-introducción del cementante en pequeñas porciones dentro del matraz. D- Desalajo del aire en el frasco.....	44
Figura 4.9. Vaciado de material sobre la parte superior del cuarteador mecánico. Material A y B. Fuente: Elaboración propia.		47
Figura 4.4 Colocación del agregado en una superficie limpia y mezclado de muestra en material A y B.	Figura 4.5 Vaciado de material sobre la parte superior del cuarteador mecánico. Material A y B.	47
Figura 4.10. Colocación del agregado en una superficie limpia y mezclado de muestra en material A y B. Fuente: Elaboración propia.....		48
Figura 4.6 Aplanado de muestra en material A y B.	Figura 4.7 Colocación del agregado en una superficie limpia y mezclado de muestra en material A y B.	48
Figura 4.11. Aplanado de muestra en material A y B. Fuente: Elaboración propia.		49
Figura 4.12. División del material en cuatro partes iguales, materiales A y B.		49
Figura 4.13. Llenado y enrazado del recipiente con la muestra en materiales A y B. Fuente: Propia		51
Figura 4.8 Llenado, varillado y enrazado del recipiente con la muestra en materiales A y B.	Figura 4.9 Llenado y enrazado del recipiente con la muestra en materiales A y B.....	51
Figura 4.14. Llenado, varillado y enrazado del recipiente con la muestra en materiales A y B. Fuente: Elaboración propia.		53
Figura 4.10 Masa superficialmente seca en materiales A y B.	Figura 4.11 Llenado, varillado y enrazado del recipiente con la muestra en materiales A y B.	53
Figura 4.16. Masa superficialmente seca en materiales A y B. Fuente: Elaboración propia.		55
Figura 4.15. Colocación de molde troncocónico sobre el material. Fuente: Elaboración propia.		55
Figura 4.17. Colocado de material en frasco. Fuente: Elaboración propia.....		57
Figura 4.19. Llenado de agua hasta la marca de aforo. Fuente: Elaboración propia.....		57
Figura 4.18. Agitado de frasco para expulsión de aire atrapado. Fuente: Elaboración propia.....		57
Figura 4.20. Acomodo de mallas en orden decreciente y vaciado de la muestra de agregado fino. Fuente: Elaboración propia..		60
Figura 4.22. Retenido de material colocado sobre hojas de papel. Fuente: Elaboración propia.....		61
Figura 4.21 Vaciado de material retenido y limpieza de mallas. Fuente: Elaboración propia.....		61
Figura 4.23. Llenado de frasco con material y agua. Fuente: Elaboración propia..		64
Figura 4.24. Reposo de materiales A y B durante 24 horas. Fuente: Elaboración propia.		64
Figura 4.27. Agregado del material. Fuente: Elaboración propia.		66
Figura 4.26. Llenado de solución de sosa cáustica. Fuente: Elaboración propia.		66

Figura 4.25. Preparación de la solución de sosa cáustica. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 4.28. Colorimetría en arenas A y B. Fuente: Elaboración propia.....	67
Figura 4.29. Cuarteo en agregado grueso.....	68
Figura 4.30. Agregado de muestra y desalojo de agua. Fuente:Elaboración propia.....	75
Figura 4.31. Acomodo de mallas y resultado final de cribado en agregado grueso. Fuente:Elaboración propia.....	77
Figura 4.35. Acomodo del molde. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 4.34 . Mezcla recién elaborada .F uente: Elaboración propia.	80
Figura 4.37. Enrase después del llenado. Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 4.38. Toma de lectura del revenimiento. Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 4.36. Varillado sobre la superficie de la mezcla. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 4.39 Colocación de tira indicadora sobre la muestra de concreto fresco. Fuente: Elaboración propia.....	81
Figura 4.40 Comparación con la table de colores indicadores de p.H. Fuente: Elaboración propia.....	81
Figura 4.41. Especímenes de concreto en pila de curado.F uente: Elaboración propia.....	82
Figura 4.42. Proceso de cabeceo en especímenes de concreto. Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 4.43 Acomodo del espécimen y aplicación de carga.	86
Figura 4.44 Falla del espécimen de concreto.....	86
Figura 4.46. Diagrama de fallas de cilindros sometidos a compresión (NMX-C-083-ONNCCE, 2014).	86
Figura 4.45. Especímen fallado después de la prueba.	87
Figura 4.48. Cilindro fallado después de la aplicación de la carga. Fuente: Elaboración propia.	89
Figura 4.47. Colocación de espécimen en la máquina y aplicación de carga. Fuente: Elaboración propia.	89
Figura 4.49 Secado y sellado de muestras de concreto. Fuente: Elaboración propia.	92
Figura 4.50 Colocación de muestras sobre la esponja. Fuente: Elaboración propia.....	92
Figura 4.13Acomodo de placas metálicas y toma de lectura de resistencia eléctrica. Fuente: Elaboración propia.....	97
Figura 4.13 Equipo utilizado para la prueba de Resistividad Eléctrica Húmeda. Fuente: Elaboración propia.....	97
Figura 5.1 Tabla indicadora de Ph . Fuente: Elaboración propia.....	113
Figura 5.2 Enfriamiento de agua para saturar el espécimen y toma de lectura de Re. Fuente: Propia...	127
Figura 5.3. Modelo de durabilidad. (Andrés A. Torres Acosta, Miguel Martínez Madrid, 2001).....	148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición de la basura en México. (ARTURO CRISTÁN FRÍAS, 2003)	3
Tabla 2.1 Clasificación de cementos (NMX-C-414-ONNCCE-2017, 2017)	10
Tabla 3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	22
TABLA 3.2. REVENIMIENTO PARA DIFERENTES TIPOS DE CONSTRUCCIÓN. FUENTE: ACI 211	23
Tabla 3.3 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.	24
Tabla 3.4 Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.	25
Tabla 3.5 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.	27
Tabla 3.6 Resultados obtenidos mediante el desarrollo del proporcionamiento.....	28
Tabla 3.7 Cantidades de agregados corregidas para 1m ³	29
Tabla 3.8. Cantidades de materiales corregidas y adición de fibra PET para la mezcla de 0.4%-PET	30
Tabla 3.9. Cantidades de materiales corregidas y adición de fibra PET para la mezcla de 0.8%-PET	31
Tabla 3.10. Cantidades de materiales corregidas y adición de fibra PET para la mezcla de 1.2%-PET	31
Tabla 3.11. Cantidades de materiales corregidas y adición de fibra PET para la mezcla de 0.23%-PET y 0.77% POLIPROPILENO	32
Tabla 3.12. CANTIDAD DE CAPAS REQUERIDAS PARA DIFERENTES DIMENSIONES DE ESPECÍMENES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	35
Tabla 3.13. Diámetro de varilla y número de penetraciones. Fuente: (nmx-c-159-onncce, 2016)	35
Tabla 4.1 Normativas correspondientes a las pruebas realizadas al cemento.....	36
Tabla 4.2 Características, pruebas y normativa correspondiente a los agregados.....	45
Tabla 4.3 Límites del módulo de finura (NMX-C-111-ONNCCE, 2014)	46
Tabla 4.4 Ejemplo de tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de Granulometría.....	61
Tabla 4.5 Límites del Módulo de Finura (NMX-C-111-ONNCCE, 2014)	62
Tabla 4.6 Límites de Granulometría para agregado Fino.....	63
Tabla 4.7 Carta colorimétrica para determinar impurezas orgánicas (ASTM-C-40, 2004)	66
Tabla 4.8 Ejemplo de tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de Granulometría.....	77
Tabla 4.9 Resistencia a la compresión y espesor máximo del mortero de azufre (NMX-C-109-ONNCCE., 2013).....	84
Tabla 4.10 Tolerancias NMX-C-083:ONNCCE,2014	87
Tabla 5.1 Mezclas consideradas en la investigación.	98
Tabla 5.2 Resultados de densidad del cemento empleado en la investigación.....	99
Tabla 5.3. Resultados de la determinación de MVSS de los agregados finos. Fuente: Elaboración propia.	100
Tabla 5.4. Resultados de la determinación de MVSV de los agregados finos. Fuente: Elaboración propia.	101
Tabla 5.5. Resultados de la determinación de la humedad de absorción de los agregados finos. Fuente: Elaboración propia.	102
Tabla 5.6. Resultados de la determinación de la densidad relativa en agregados finos. Fuente: Elaboración propia.	102

Tabla 5.7. Resultados del análisis granulométrico en arena negra. Fuente: Elaboración propia.	103
Tabla 5.8. Resultados del análisis granulométrico en arena blanca. Fuente: Elaboración propia.	104
Tabla 5.9. Resultados del análisis granulométrico en arena combinada. Fuente: Elaboración propia. ...	105
Tabla 5.10. Resultados de la determinación de sedimentación en agregados finos.	106
Tabla 5.11. Resultados de la determinación de MVSS en agregado grueso. Fuente: Elaboración propia.	107
Tabla 5.12. Resultados de la determinación de MVSV en agregado grueso. Fuente: Elaboración propia	107
Tabla 5.13. Resultados de la determinación de humedad de absorción en agregado grueso. Fuente: Elaboración propia	108
Tabla 5.14. Resultados de la determinación de la densidad relativa en agregado grueso. Fuente: Elaboración propia	108
Tabla 5.15. Resultados de la determinación del análisis granulométrico en agregado grueso. Fuente: Elaboración propia.	109
Tabla 5.16. Resultados de pruebas realizadas al agua.	110
Tabla 5.17. Resultados de revenimiento en mezclas. Fuente: Elaboración propia.	112
Tabla 5.18. Resultados promedios de especímenes clasificados por mezcla y por edad.	114
Tabla 5.19. Resultados de la prueba de tensión por compresión Fuente: Elaboración propia.	115
Tabla 5.20 Especificaciones de la penetración de agua.	117
Tabla 5.21. Especificaciones del cilindro testigo sometido al proceso experimentación Fuente: Elaboración propia.	118
Tabla 5.22. Resultados de porosidad efectiva expresada en porcentaje. Fuente: Elaboración propia. ..	120
Tabla 5.23. Resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las cinco mezclas de concreto a la edad de 7 días.	122
Tabla 5.24. Resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las cinco mezclas de concreto a la edad de 14 días.	122
Tabla 5.25. Resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las cinco mezclas de concreto a la edad de 28 días.	123
Tabla 5.26. Resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las cinco mezclas de concreto a la edad de 60 días.	123
Tabla 5.27. Resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las cinco mezclas de concreto a la edad de 90 días.	124
Tabla 5.28. Resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las cinco mezclas de concreto a la edad de 121 días.	124
Tabla 5.29. Valores promediados de las 5 mezclas en estudio.	125
Tabla 5.30. Resultados de pruebas de REH promediados.	128
Tabla 5.31. Valores de temperatura tomados en °C convertidos a k.	131
Tabla 5.32. Valores del logaritmo natural de la REH y la inversa de temperatura	131
Tabla 5.33. VALOR DE ALPHA EN CILINDRO DE 15X30. FUENTE: PROPIA.	133
Tabla 5.34 Datos de REH corregidos	136
Tabla 5.35. Porcentaje de error existente entre los resultados de REH antes y después de la corrección.	138

Tabla 5.36. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura-cilindro 1, 96 días.....	139
Tabla 5.37. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura- cilindro 2, 96 días.....	140
Tabla 5.38. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura-cilindro 1, 121 días.....	141
Tabla 5.39. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura- cilindro 2, 121 días.....	142
Tabla 5.40. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura- cilindro 3, 121 días.....	143
Tabla 5.41. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura-cilindro 1, 168 días.....	143
Tabla 5.42. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura-cilindro 2, 168 días.....	144
Tabla 5.43. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura-cilindro 3, 168 días.....	145
Tabla 5.44. Valores promedio del coeficiente de temperatura a diferentes edades.....	145
Tabla 5.45. Resultados de obtención de coeficiente de temperatura.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5.46. Valores del factor de exposición ambiental en función de la clase de ambiente (PNE83994-2, 2016).....	152
Tabla 5.47. Valores simplificados del factor de retardo (PNE83994-2, 2016)	153
Tabla 5.48. Valores de REH clasificado por edades y mezclas. Fuente: Propia.....	154
Tabla 5.49. Valores de conductividad clasificado por edades y mezclas. Fuente: Propia.....	154
Tabla 5.50. Valores de la conductividad obtenidos a partir de la ecuación que se genera del ajuste potencial.	158
Tabla 5.51. Conjunto de datos para realizar el cálculo de tiempo de iniciación.....	159
Tabla 5.52. Resultados de tiempo de iniciación para las mezclas. (días)	159

Dedicatorias

*Mis padres, Gerardo Martínez Tafolla y Virginia González Flores,
que han sido mi soporte cuando la vida se me presenta como
un crisol que exige lo mejor de mí.
Los amo.*

Agradecimientos

A Paula, mi gemela y compañera de vida. Hermana, mis logros son los tuyos.

A mis hermanos y familia: Daniel, Pablo y, sobre todo, a mis padres. Mi soporte siempre en mi formación afectiva, emocional y académica.

A mis más sinceros amigos, Marco Miguel Granados y Oswaldo Castolo, por haber hecho mi estancia universitaria la mejor experiencia y caminar siempre a mi lado.

Al Dr. Wilfrido Martínez y al Mtro. Jorge Alberto Pacheco, asesor y co-asesor de mi tesis, así como a la Mtra. Sandra Arguello y Mtro. Cipriano Bernabé, por compartir conocimientos y experiencias.

A mi universidad, me siento favorecida por el gran legado del espíritu Nicolaita que ha formado tantas conciencias transformadoras.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Dado el interés que despertó en nosotros el trabajo de investigación para obtener el grado de maestría del ahora Mtro. Víctor Hugo Blancas Herrera, nos atrajo la idea de abundar sobre el tema y dar inicio a la presente investigación, haciendo mención que la fase experimental de esta investigación fue realizada en equipo, en el cual participamos: Oswaldo Castolo Montero, analizando el comportamiento elastoplástico del concreto, Diana Laura Charco Ángel, realizando la evaluación por durabilidad del concreto y Fabricio Ali Hernández Ferreyra, analizando el módulo de ruptura del concreto.

El presente trabajo de investigación surge a partir de dos premisas que consideramos prioritarias para cualquier propuesta de aporte, en lo referente a Ingeniería Civil en lo general y en todas sus aplicaciones en lo particular.

La primera de ellas es atender el carácter social como sentido de toda investigación exacta, recordando la falsa idea de una separación entre las ciencias exactas y las ciencias sociales. Es sí que, con este trabajo, se pretende responder a una necesidad de mejor y mayor satisfacción del uso del concreto en estructuras civiles.

Por otro lado, y en atención al tema de sustentabilidad, se propone el uso de PET y Polipropileno como adición en concreto, con lo que se pretende mejorar las características del mismo y contribuir al cuidado del medio con la reutilización de los desechos de envases.

En el primer capítulo se precisa el impacto contaminante del PET en el planeta.

En el capítulo dos se presentan las referencias de las investigaciones más significativas, que sirven como base de la presente investigación y precisa tanto aspectos conceptuales de sus variantes como tipos de fibras utilizadas, resaltando

el uso de PET como principal propuesta para mejorar sus características físico-mecánicas.

En el capítulo tres se aborda el tema de las mezclas en sus componentes y proporciones para garantizar resultados útiles en la fase experimental.

Un cuarto capítulo trata el tema de las diversas pruebas y métodos utilizados para lograr objetivos específicos tales como humedad, evaporado por secado, densidad relativa, absorción del agregado fino y grueso, entre otros.

Por último, se presentan los resultados y discusiones acerca de la investigación y queda plasmado en este quinto capítulo. Por ejemplo, diferentes tipos de concreto y sus respectivas resistividades.

Al final resaltamos las conclusiones de nuestra investigación.

1.1 Impacto del PET en el planeta.

Por sus diversas propiedades, el PET ha sido utilizado en las últimas décadas para diversos usos, siendo uno de los principales, la producción de envases para refrescos, aguas, productos farmacológicos, cosmetológicos, agroquímicos y un largo etcétera. Sin embargo, esta producción a gran escala ha generado preocupación no tanto porque signifique un contaminante como tal, sino por su no degradación, pues no presenta descomposición con el tiempo. Es así que, el aumento de volumen de producción de PET, es directamente proporcional a la generación de basura en el planeta y en nuestro país.

De acuerdo con estudio reciente hecho en colaboración entre Greenpeace y la UNAM (Greenpeace México - Laboratorio de Biodiversidad Arrecifal y Conservación, 2020), que refiere el impacto de la contaminación por plásticos en áreas naturales protegidas en México, en 2015 se produjeron 380 millones de toneladas de plásticos en el mundo, de los cuales, un estimado de 4.8 a 13 millones de toneladas terminaron en los océanos.

Según este estudio, sólo en la Cd. de México se producen más de 13,000 toneladas diarias de residuos de los que entre 12 y 15% son residuos plásticos y es muy bajo el porcentaje de reciclaje, sólo un 6.07%.

Conforme a la Gaceta Ecológica de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (ARTURO CRISTÁN FRÍAS, 2003) (SEMARNAT), de toda la generación de basura, los plásticos significan un 11% *Tabla 1.1*, ante esta situación, surgen algunas propuestas de acciones para el trato de los residuos PET, como son los rellenos sanitarios, la compactación de envases, la incineración, entre otros, pero la más viable y sugerida, es el reciclado como una manera de volver a integrar en usos industriales y comerciales los desechos PET, creando, incluso negocios rentables en el reciclado.

Tabla 1.1 Composición de la basura en México. (ARTURO CRISTÁN FRÍAS, 2003)

COMPONENTE	%
Desechos orgánicos	47
Papel	14
Otros	14
Plásticos	11
Materiales peligrosos	10
Metales	2
Vidrio	2

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción y análisis de investigaciones relacionadas (Estado Del Arte)

Hoy en día, no podemos imaginar la industria de la construcción sin el uso del concreto, es por ello que, como objeto de estudio, ha abierto un gran campo de investigación y experimentación, siempre con el fin de optimizar su durabilidad; de ahí el sin-número de pruebas al que es sometido para mejorar sus usos. Estas diversas pruebas pretenden abonar a muchos aspectos, por ejemplo: a su resistencia mecánica, a su compacidad, a sus índices de flexión, a su dureza, a su porosidad, etc.

De acuerdo con estudio del Instituto Mexicano del Transporte (TRANSPORTE, 2019) y, dejando establecido que las estructuras de concreto basan su durabilidad principalmente en su baja permeabilidad a agentes como cloruros y dióxido de carbono, que, a la postre, dañan al acero de refuerzo, se reporta el empleo de la prueba de Resistividad Eléctrica Húmeda (REH), cuya mayor bondad, podría decirse, es que puede ser aplicada muchas veces, por ser una medida no destructiva, pero que puede ser alterada por la temperatura ambiente, factor que hay que cuidar al realizarla.

Como lo afirma el IMT, la prueba REH, ha ganado aceptación en años recientes por ser más práctica que otras pruebas y por, entre otros aspectos, mostrar información sobre microestructura, porosidad, grado de saturación e impermeabilidad del concreto.

Es fácil entender la relación inversamente proporcional entre porosidad en el concreto y resistividad eléctrica, por lo que se convierte de vital importancia el reducir más y más la porosidad para aumentar la resistividad que protege sustancialmente a las estructuras de concreto armado con acero. Esta condición

nos llevó a pensar en la influencia de agregados en el concreto, acerca de lo cual, conocemos muchas experiencias.

Entre la variedad de agregados al concreto, podemos encontrar diversos tipos de fibras, y entre las fibras, una gama de experiencias con fibras de PET.

En estudio publicado por la Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil: “La influencia de fibras tipo PET en las características de resistencia y durabilidad del mortero cemento hidráulico” (MARÍA ALEJANDRA RIAÑO BOLAÑOS, 2019), podemos observar que, por ejemplo, en cuanto a rigidez, una adición al 0.50% de fibras, ésta alcanza su mejor valor, así como la absorción al 0.25% y la porosidad al 0.50%, dejando claro los beneficios del agregado de fibras PET.

Se evidencia también en este estudio que el coeficiente de difusión a la penetración de cloruros disminuye considerablemente con la adición de fibras, abonando así a su durabilidad; de igual manera, se observa que el uso de fibras garantiza una disminución de la porosidad y la absorción.

En otro estudio acerca del comportamiento del cemento reforzado con fibras PET, a cargo del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (Fernández, 2014) se concluye, entre otros resultados, que es factible el uso de estas fibras, ya que el PET no presenta degradación al interactuar con el concreto. Por otro lado, que puede ser recomendado el uso del PET en la construcción de edificaciones en zonas sísmicas para mitigar fisuras.

El interés de predecir la durabilidad, genera una variedad de propuestas de pruebas al concreto, una de las más aceptadas es la prueba de Resistividad Eléctrica Húmeda, ya que ésta nos permite valorar aspectos del concreto como:

-El endurecimiento.

-El grado de curado

- La resistencia a la penetración de cloruros y la carbonatación
- La velocidad de corrosión de la armadura.
- La porosidad efectiva y tortuosidad del material.

Esta prueba es capaz de informar sobre la microestructura, porosidad y contenido en agua del concreto, con la gran bondad de ser una prueba no destructiva.

2.2 Estudio general de los materiales. Historia, características y propiedades.

En nuestros días, el universo generalizado del cemento en el ramo de la construcción, seguramente nos hace difícil imaginar cómo sería la vida sin su uso; de esta manera no podemos evitar pensar en las edificaciones centenarias y milenarias que hoy nos revelan otros usos y métodos de construir, así como la utilización de técnicas y materiales que bien podrían compararse con usos y prácticas modernas.

El ramo de la construcción a nivel global, ha demandado muchos esfuerzos en el mejoramiento de materiales y procesos para satisfacer muchas necesidades en lo económico, lo diverso, la seguridad, la durabilidad, etc., así como la labor permanente de la investigación y el ejercicio académico.

Hoy podemos admirar grandes obras de ingeniería ancestrales como las majestuosas pirámides, murallas, acueductos, que fueron construidos sin un gramo de cemento como lo conocemos ahora y que se alzan como un desafío a las técnicas y materiales modernas.

En propias palabras de Hernán Cortés, en sus informes a la corona española, se relata lo que a primera vista se observa en las casas de los nativos: “Son de cal y canto, de adobe con revestimiento y techos de paja, casas frescas y de muchos aposentos, algunas de cinco patios”. Y en otra parte: “El palacio de Moctezuma, no

había nada comparable en España por lo grande y maravilloso. La mayor parte estaba hecha de tezontle y mármol”. (Hernán Cortes, 1990)

Por otro lado, leemos testimonios de construcción en la civilización Náhuatl en los que refieren el uso de adobe con techos de vigas, paja, otates, argamasa y barro duro, en casas de tres, cuatro y hasta de seis pisos. (MEXICO A TRAVES DE LOS SIGLOS, 1981)

Sin embargo, ante las ventajas que hoy vemos en el uso de aplicaciones de cemento Portland, no podemos menos que voltear nuestra mirada a sus antecedentes, si es que queremos abonar el mejoramiento de su utilidad tanto en su resistencia y durabilidad, como en su hermeticidad, que es lo que nos ocupa en el presente trabajo de investigación.

Este trabajo tiene íntima relación con un componente básico que es el concreto, con el afán de aportar un plus a las bondades ya conocidas y abonar a su versatilidad.

Básicamente podemos describir al concreto como la mezcla de cemento Portland, agua y material de agregado como arena y grava. Algunas acepciones de concreto son durabilidad, resistencia, impermeabilidad, trabajabilidad, etc.

El estudio del concreto nos lleva a atender un sin fin de aspectos tales como: tipos de cemento, tipos de agregados, proporciones de mezclas, calidades de agua, diversos usos, etc.

En la *Figura 2.1*, (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004) nos presenta cuatro tipos de mezclas en las que podemos observar variación de porcentajes de los componentes básicos del concreto, que nos arrojarán diferentes calidades del mismo. Las barras 1 y 3 representan mezclas ricas con agregados de pequeños tamaños, las barras 2 y 4 representan mezclas pobres con agregados gruesos grandes.

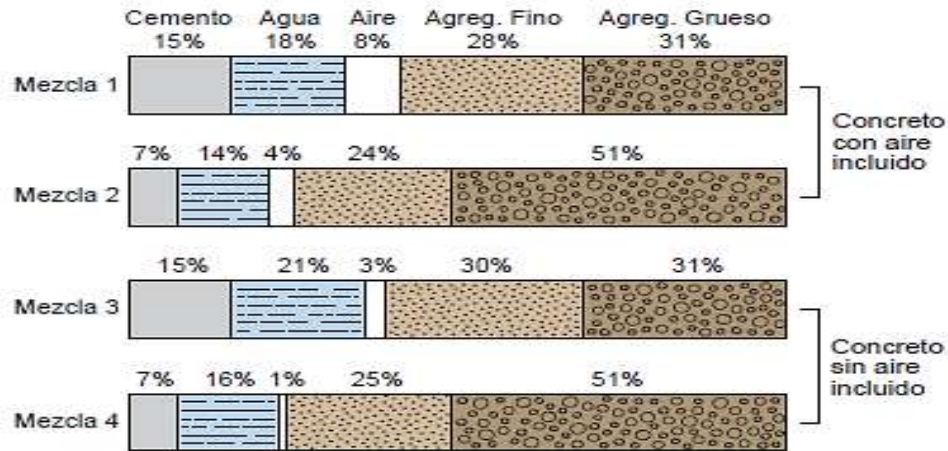


Figura 2.1. Variación de las proporciones usadas en concreto. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

2.2.1 Cemento Portland

Siendo el cemento Portland, como lo conocemos ahora, un material básico en el campo de la ingeniería civil, es importante que echemos un vistazo a sus precedentes, que fueron respondiendo a las necesidades que se iban presentando y que podemos, en general, citar como: resistencia, dureza, maleabilidad, adherencia, entre otros.

De acuerdo con (Amador Montaña, 2003), el precursor más remoto es el yeso, que se encuentra libre en la naturaleza y que, se sabe, fue usado en el antiguo Egipto hace cinco mil años, básicamente en piezas decorativas y revestimiento de paredes. Luego se experimentó con diferentes tipos de arcillas ubicándose las mejores en Puzzuoli, zona de intensa actividad volcánica cerca del Vesubio y la bahía de Nápoles, hace unos dos mil años, en tiempo de los romanos, de ahí el nombre de “Puzolanas” a las arcillas en los siglos XV y XVI.

Se ubican algunos aportes importantes como el del ingeniero inglés John Smeaton, que en 1756 descubrió una caliza que llamó “Cemento Romano”, o el de Vicat en 1813 en Francia y James Frost en 1822 en Inglaterra, quienes realizaron una recopilación de lo conocido en su tiempo y descubrieron que sometiendo a muy altas temperaturas cal y arcilla se lograban mejores resultados.

Curiosamente, el antecedente inmediato al cemento como lo usamos actualmente, es el llamado cemento Portland y se debe a un estudio llevado a cabo, no por un ingeniero, sino por un maestro albañil inglés, llamado Joseph Aspdin, quien, sometiendo en un horno a altas temperaturas diferentes mezclas, llegó al cemento que debe su nombre a la similitud que tiene su dureza a ciertas canteras de piedra de la isla de Portland, Inglaterra.

Las primeras manufacturas de cemento Portland en Inglaterra, fueron establecidas en 1825, y fuera de Inglaterra, se hicieron en Alemania en 1855. Después en Estados Unidos en 1865. En México comenzó a producirse cemento en 1906.

Como sabemos, el cemento es un material inorgánico resultado de la conformación de escoria granulada de alto horno, sulfato de calcio y Clinker Portland, que tiene la capacidad de fraguar y endurecer mediante la hidratación conservando su estabilidad y ampliando su resistencia.

Según (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004), el concreto es una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento Portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava, creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua.

De acuerdo con (Sanjuán Barbudo, 2014) el cemento es un polvo finamente molido, compuesto principalmente por silicatos de calcio y, en menor proporción, por aluminatos de calcio, que, mezclado con agua, se combina, fragua y endurece a temperatura ambiente, tanto al aire como bajo el agua. El más conocido y utilizado

es el cemento Portland, y con éste se hicieron todas las pruebas del presente trabajo.

2.2.1.1 Clasificación del cemento

Existe una clasificación del cemento Portland establecida por la norma (NMX-C-414-ONNCCE-2017, 2017) , la cual integra el tipo y la clase resistente al que pertenece el cemento.

El cemento Portland utilizado fue un CPC 30R RS, el cual nos indica que es un Cemento Portland Compuesto de clase resistente 30, con resistencia especificada a 3 días de 30 MPa y resistente a los sulfatos, según la clasificación de la *Tabla 2.1*.

Tabla 2.1 Clasificación de cementos (NMX-C-414-ONNCCE-2017, 2017)

TIPO	DENOMINACIÓN	CLASE RESISTENTE	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES
CPO	Cemento Portland Ordinario	20	RS (Resistente a los Sulfatos)
CPP	Cemento Portland Puzolánico	30	BRA (Baja Reactividad Alkali Agregado)
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R (R= Resistencia rápida)	BCH Bajo calor de Hidratación
CPC	Cemento Portland Compuesto	40	B (Blanco)
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	40 R	-
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	-	-

2.2.1.2 Cemento empleado en la investigación.

El Cemento Portland resistente a los sulfatos, es aquel que presenta a un bajo contenido de Aluminato tricálcico (C3A), la norma (ASTM-C-150, 2016) vigente para este cemento, lo clasifica como un tipo II, con un contenido máximo de 8% de C3A.

Figura 2.2.



Figura 2.2. Saco de cemento CPC 30R RS marca TOLTECA. Fuente: Cemex. 17/10/21

2.2.2 Arena

Como se mencionó con anterioridad, para la elaboración del concreto, se utilizan agregados que pueden ser finos o gruesos, la arena es el agregado fino, que puede ser natural o piedra triturada y que, para homologar (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004), se entiende, menor a 5mm. Las dimensiones de los agregados no es lo único que se observa para su utilización, hay algunos requerimientos en general, como lo precisa Kosmatka: “Los agregados deben cumplir con algunas normas para que su uso en ingeniería se optimice: deben ser partículas limpias, duras, resistentes, durables, y libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcilla u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento”.

2.2.2.1 Arena Utilizada en la Investigación

Para la presente investigación se hizo uso de dos tipos de agregado fino.

- Agregado fino A: Arena blanca (*Figura 2.4*) obtenida en el banco de material “El Coro”, éste se encuentra en el municipio de Zinapécuaro en el estado Michoacán (*Figura 2.3*), sobre la carretera Morelia-Zinapécuaro.



Figura 2.3. Banco de material “El Coro”. Fuente: Google Earth Pro.



Figura 2.4. Muestra representativa de Agregado fino A. Fuente: Elaboración propia..

- A. Agregado fino B: Arena negra (*Figura 2.6*) obtenida en el banco de material llamado “San Bernabé” en la localidad de Morelia. (*Figura 2.5*). Ubicado en la localidad de San Bernabé a 22.2 kilómetros de la carretera Pátzcuaro-Cuitzeo en dirección Oeste, de la localidad de Morelia. El material obtenido es volcánico y el tratamiento dado es trituración parcial y cribado.



Figura 2.5. Banco de Material “san Bernabé”. Fuente: Google Earth Pro.



Figura 2.6. Muestra representativa de Agregado fino B. Fuente: Elaboración propia..

2.2.3 Grava

Consecuentemente, se considera como agregado grueso a la grava o piedra triturada cuando son partículas mayores a 5mm hasta 37.5mm y las mismas especificaciones que se precisan para la arena en cuanto a su limpieza, se observan para el agregado grueso. También se considera como agregado grueso al concreto reciclado o desperdicio triturado, siendo éste una alternativa sobre todo en donde hay escasez de material natural.

2.2.3.1 Grava utilizada en la investigación.

El agregado grueso (*Figura 2.8*) fue obtenido en un banco de material llamado “La Roka” ubicado sobre la carretera Morelia-Guadalajara dentro del municipio de Tarímbaro, Michoacán. *Figura 2.7*.



Figura 2.7. Banco de Material “La Roka”. Fuente: Google Earth Pro.



Figura 2.8. Muestra representativa de Agregado Grueso. Fuente: Fuente: Elaboración propia..

2.3 Fibras como refuerzo en el concreto.

El uso de fibras mezcladas en materiales para construcción, es tan antiguo como las incipientes construcciones del hombre en su afán de cobijo y protección;

baste mencionar los componentes del adobe para construcción con siglos de aplicación, y que, hasta nuestros días se sigue utilizando: tierra (barro, arcilla), agua y fibras de pasto o paja, o bien, de estiércol de algunos animales que, según el conocimiento empírico, dan consistencia al adobe, sea en crudo o luego de un proceso de cocción a unos 800 ó 900 °C para dar origen al tabique rojo que hoy tiene un lugar importante en la industria de la construcción.

De esta manera, resulta lógico que en algún momento se haya pensado en el uso de fibras en concreto como refuerzo, principalmente contra la fisuración, así como la diversidad de las mismas en sus componentes, tamaños, texturas, etc. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004) hace una clasificación de tipos de fibras que se han usado, y señala: fibras de acero, fibras de vidrio, fibras sintéticas, fibras naturales, fibras naturales no procesadas, fibras de madera y sistemas múltiples de fibras. Sin embargo, aunque se mencionan las fibras sintéticas (acrílicas, aramidas, nylon, poliéster, carbón), no se hace referencia específicamente al PET como alternativa de uso de fibras como refuerzo para concreto.

Siendo el PET un material sustentable con enormes propiedades mecánicas y físicas, se ha empleado con diversos fines en proyectos concernientes a materiales para construcción. En tesis de maestría (Palapa, 2013) se mencionan algunas propiedades que hacen del PET una buena alternativa como refuerzo en el ramo de la construcción, éstas son: buen comportamiento frente a esfuerzos, alta resistencia al desgaste, buena resistencia química, muy ligero, entre otras.

Pero las fibras PET aún no se producen como componente común de agregados para concreto, de tal manera que cuando se utilizan en procesos experimentales, se tienen que elaborar, según los requerimientos del investigador. De acuerdo con estudios de la UAQ, la metodología de los diferentes procesos de corte mecánico del PET, está en proceso de patente, dada la proyección que se le puede dar a nivel industrial.

2.4 Fibras a estudiar

2.4.1 PET

Las propiedades de fibras PET no difieren mucho de las ventajas que hemos anotado respecto a las fibras de polipropileno, igual ofrecen prácticamente nula corrosión, muy alta resistencia a embates de agentes químicos, alta resistencia a ataques de bacterias y hongos, etc. Creemos que lo que más sustenta y alienta el uso de fibras PET, es el tema de la sustentabilidad, por los alarmantes índices de producción principalmente de envases y, consecuentemente, sus bajos porcentajes de reciclado, lo que ha despertado gran preocupación en lo social a nivel global.

Las pruebas e investigaciones que se han hecho en el ámbito académico y en la industria de la construcción, han demostrado buenos resultados del uso de éstas fibras, de tal manera que es deseable su producción a nivel industrial, dado que, para trabajos como éste, se tienen que elaborar las fibras según los requerimientos que el mismo investigador necesita, con base en experiencias similares.

2.4.2 Polipropileno

Ya hemos hablado acerca del uso de fibras en el concreto y hemos señalado la gran variedad de las mismas como agregados. Dos de los tipos que ofrecen más y mejores resultados, que han ganado mayor aceptación en su aplicación, son las fibras de polipropileno y de PET.

La empresa TEX DELTA (DELTA, s.f.), en su blog oficial, promociona las ventajas del uso de fibras de polipropileno, entre las que destaca:

- Buena relación costo-beneficio.
- Buen balance rigidez-impacto.
- Excelente resistencia química a solventes comunes.

- Buena estabilidad a alta temperatura.
- Evita el traspaso de humedad.
- Ayuda a disminuir la formación de grietas.
- No son corrosivas ni magnéticas.
- Resistencia a alta tracción.

CAPÍTULO 3 DISEÑO DE MEZCLAS.

3.1 Planificación del estudio experimental

Para la elaboración de la presente investigación se desarrolló una planificación del estudio experimental como se muestra en la *Figura 3.1*, indicando los pasos a seguir para llevar un orden durante el proceso de experimentación, el cual describe los pasos que se siguieron para la obtención de resultados.

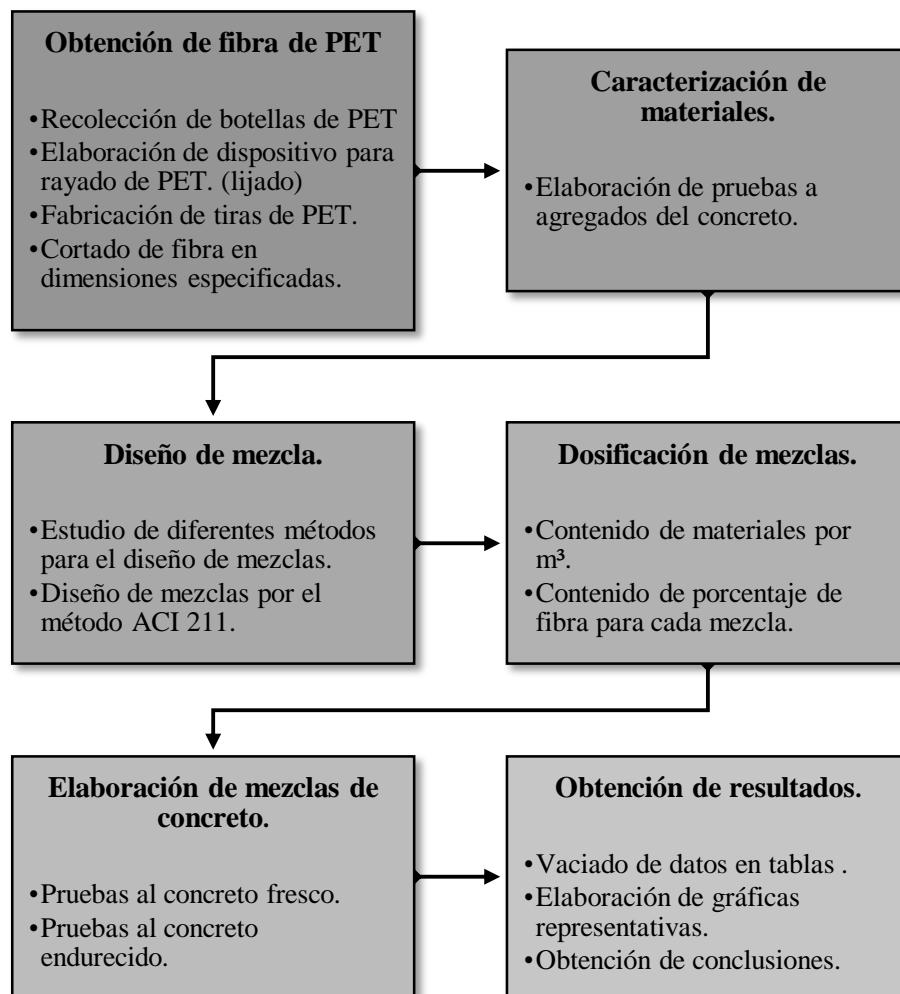


Figura 3.1 Planificación del estudio experimental. Fuente: Elaboración propia..

3.2 Proceso de elaboración de fibras de PET.

Desde el momento en que optamos por usar fibras de PET como elemento clave en nuestro proyecto de investigación, procedimos a hacer acopio de envases, designando un lugar para su almacenamiento.

Una vez definidas las características de las fibras PET a utilizar, nos encontramos con el problema de que no existen en el mercado tales especificaciones ni una herramienta que nos hiciera los cortes y el rayado tal como lo requeríamos. Es así que nos dimos a la tarea de fabricar nosotros mismos unos dispositivos que convirtiera en delegadas tiras los envases PET, variando las técnicas y materiales para su elaboración. *Figura 3.2.*



Figura 3.2. Equipos elaborados para la producción de tiras de PET: Fuente: Elaboración propia.

Decidimos que las tiras debían medir 3mm de ancho, así que, luego de varios intentos logramos elaborar un dispositivo de madera consistente en un pedazo de pino de 2” cuadrado y 25 cm de largo, al que le adaptamos una navaja y una ranura a través de la cual giraba el envase y luego de un pequeño tramo de avance íbamos jalando, sacando las tiras hasta terminar en envase y así sucesivamente, el material obtenido se iba enrollando como se muestra en *la Figura 3.3* ,a modo de evitar posibles enredos en las tiras obtenidas.



Figura 3.3. Proceso de obtención de tiras de PET. Fuente: Elaboración propia..

El siguiente paso era rayar las tiras para obtener mejor adherencia, para lo cual, también hicimos un dispositivo consistente en dos pedazos de madera con lijas pegadas por donde hacíamos pasar las tiras para que la fricción nos produjera el rayado, este aparato se contempló para ser fijado en alguna superficie con el fin de poder jalar libremente la tira de PET. *Figura 3.4.*



Figura 3.4. Aparato elaborado para lijar las fibras de PET. Fuente: Elaboración propia..

Finalmente, el corte a 1 ½” o 3.81 cm que hicimos con la guillotina o de manera manual, cortando de manera minuciosa fibra por fibra, cuidando sus dimensiones,

como se muestra en la *Figura 3.5*. Cuando la fibra se encuentra lista se almacena en una bolsa. *Figura 3.6*.



Figura 3.5. Cortado de fibra de PET. Fuente: Elaboración propia..



Figura 3.6. Resultado de elaboración de fibra de PET. Fuente: Elaboración propia.

3.3 Factores que intervienen en el diseño de mezclas

De manera muy simple, del concreto podemos decir que lo obtenemos de una mezcla de material cementante, agregados finos o gruesos, o ambos y agua. Sin

embargo, hoy podemos decir que es posible jugar con estos elementos de tal manera que logramos obtener una mezcla que se ajuste a las necesidades requeridas que irán en función del uso y propiedades deseadas, de ahí que tengamos que atender a diversas proporciones en nuestras mezclas, información que nos arroja el trabajo en laboratorio.

De acuerdo con (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004), la relación agua-material cementante, es la primera etapa a considerar para obtener la resistencia, durabilidad y permeabilidad deseadas, y dicha relación la determinará la característica preponderante deseada, es decir, si se pretende una mezcla que sea más durable, más resistente al desgaste, etc.

3.4 Métodos de proporcionamiento.

El proporcionamiento de la mezcla hace referencia a la determinación de las cantidades de materiales que componen el concreto, (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004) explica que, Un concreto adecuadamente proporcionado debe presentar las siguientes cualidades:

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

El proceso de dosificación de la mezcla se debe realizar una vez que los materiales hayan sido caracterizados para que puedan ser proporcionados de acuerdo a los datos arrojados durante la experimentación.

3.5 Método ACI 211

El Método utilizado para la realización del proporcionamiento de la presente investigación tiene como base el procedimiento del American Concrete Institute elaborado por el comité ACI (211, 2002), el cuál es el más conocido y usado.

Éste método consiste en seguir una secuencia de pasos para obtener como resultado la cantidad de masa y volumen para 1m³ de concreto.

Paso 1. Elección del Revenimiento.

Partimos de la obtención de las características físicas de los agregados pétreos y del cemento que se estarán utilizando para el diseño de la mezcla de concreto los cuales se presentan en la *Tabla 3.1*

Los materiales pétreos fueron secados totalmente antes de hacer uso de ellos, por lo que no presentan humedad actual.

Tabla 3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES						
MATERIAL	MVSS	MVSV	Densidad	Módulo	Tamaño	Absorció
GRAVA	1467.925	1587.736	2.713	-	3/4 "	0.0219
ARENA	1293.041	1452.519	2.273	2.67	-	0.0526
CEMENTO	1490	-	3.046	-	-	-

El cálculo del valor de la resistencia a compresión (f_c) del concreto es una propiedad principalmente física y frecuentemente es usada en los cálculos para el diseño de puentes, edificios y otras estructuras, ésta se obtiene a partir de la resistencia a la flexión o MR, (42 Kg/cm²)

La resistencia a la flexión de concretos es, comúnmente, de 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión en kg/cm² (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

$$MR = 1.99 \text{ a } 2.65 \sqrt{f'c}$$

$$MR = 2.32 \sqrt{f'c}$$

Si se despeja el $f'c$ de la ecuación anterior

$$f'c = \left(\frac{MR}{2.32} \right)^2$$

$$f'c = 327.735$$

Redondeando el valor obtenemos que:

○ $f'c = 330 \text{ kgf/cm}^2$

Paso 2. Cálculo de la cantidad de agua.

Al no ser especificado el revenimiento, éste debe de ser designado con base en la *Tabla 3.2*, el cual indica los parámetros máximo y mínimo de revenimiento, clasifica los revenimientos en milímetros para diferentes tipos de construcción.

TABLA 3.2. REVENIMIENTO PARA DIFERENTES TIPOS DE CONSTRUCCIÓN. FUENTE: ACI 211

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

La presente investigación fue diseñada para pavimentos y losas, por lo cual, obtuvimos:

- **Revenimiento = 7.5 cm.**

De acuerdo al revenimiento presentado (7.5 cm) y el tamaño máximo del agregado grueso (3/4”), obtenemos de la *Tabla 3.3* los valores estimados del agua requerida para concretos con diferentes tamaños máximos de agregados, la cual, viene clasificada en concretos con aire incluido y sin aire incluido. El concreto en estudio fue sin aire incluido, en la parte inferior de la clasificación de dicha tabla se puede observar el contenido de aire atrapado para concretos sin aire incluido.

Tabla 3.3 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.

Revenimiento, mm	Agua, Kg/m ³ de concreto para tamaño máximo nominal de agregado indicado							
	3/8”	1/2”	3/4”	1”	1 1/2”	2”	3”	6”
	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
Concreto Sin Aire Incluido								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
% aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto Con Aire Incluido								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-
Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo al nivel de exposición								
Exposición Ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1.0
Exposición Moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3.0
Exposición Severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4.0

Considerando que el tamaño máximo de la grava de la presente investigación es de 19 mm (3/4”), y el concreto de esta investigación es un concreto sin aire incluido, obtenemos como resultado los siguientes datos:

$$\% \text{ de aire atrapado} = 2$$

Se procedió a calcular el volumen de aire atrapado por accidente en la mezcla:

$$\text{Volumen de aire atrapado} = 0.02 \times 1000 \text{ L/m}^3$$

- **Volumen de aire atrapado = 20 L/m³**
- **Cantidad de agua = 205 L/m³**

PASO 3: Selección de la relación Agua/Cemento.

La relación agua/cemento requerida se determina por medio de la resistencia, así como por otros factores como la durabilidad y las propiedades del acabado.

Se ingresó a la *Tabla 3.4* considerando un concreto sin aire incluido y una resistencia a la compresión a los 28 días igual a 330 kg/cm².

Tabla 3.4 Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.

Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm ²	Relación agua/cemento por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto 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

Se interpolaron los valores respectivos con la resistencia a la compresión, los cuales son de 280 kg/cm² y 350 kg/cm²

$$Rel. a / c \text{ peso} = \frac{(0.48-0.57)(330-280)}{(350-280)} + 0.57$$

- **Obteniendo una relación en peso a/c = 0.51**

Una vez teniendo la relación agua/cemento de 0.51, se determinó el contenido de cemento:

$$\text{Cantidad de cemento en peso} = \frac{\text{Litos de agua Kg/cm}^3}{\text{Relación agua/cemento}}$$

$$\text{Cantidad de cemento en peso} = \frac{205 \text{ Kg/cm}^3}{30.51}$$

- **Cantidad de cemento en peso = 401.96 kg/m³**

Volumen de cemento requerido para la mezcla:

$$\text{Volumen de cemento} = \frac{\text{Cantidad de cemento en peso}}{\text{Densidad del cemento}}$$

$$\text{Cantidad de cemento en peso} = \frac{401.96 \text{ Kg/m}^3}{3.05}$$

- **Volumen de cemento=131.80 L/m³**

Paso 4. Determinación del contenido de agregado grueso por volumen unitario de concreto hidráulico.

Los valores apropiados de volumen para el agregado grueso están dados en la *Tabla 3.5* en la cual se puede observar que el volumen de agregado grueso por

unidad de volumen de concreto depende sólo de su tamaño máximo nominal y del módulo de finura del agregado fino.

Tabla 3.5 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.

VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO POR VOLUMEN UNITARIO DE CONCRETO					
Tamaño máximo del Agregado (mm)	Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de la arena.				
	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60	0.58
25(1")	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63
37.5(1 1/2 ")	0.75	0.73	0.71	0.69	0.67
50(2")	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70
75(3")	0.82	0.80	0.78	0.76	0.74
150(6")	0.87	0.85	0.83	0.81	0.79

El volumen de agregado se obtiene mediante la interpolación de los valores entre los que colinda nuestro módulo de finura (2.67) los cuales son 2.60 y 2.80.

$$\text{Volumen de agregado grueso varillado en seco} = \frac{(0.62 - 0.64)(2.67 - 2.6)}{(2.8 - 2.6)} + 0.62$$

- **Volumen de agregado grueso varillado en seco = 0.633**

Del valor obtenido de volumen de agregado grueso varillado en seco, se procedió a calcular la grava en peso por metro cubico de concreto:

$$\text{Masa de la grava} = \text{Volumen del agregado grueso} \times \text{MVSV}$$

$$\text{Masa de la grava} = 0.633 \times 1588 \text{ kg/m}^3$$

○ **Masa de la grava= 1005.204 kg/m³**

Se divide la masa de la grava entre la densidad del material, esto nos arrojará el valor de el volumen de la grava por metro cúbico de la mezcla.

Volumen de la grava=1005.204 kg/m³ / 2.713

○ **Volumen de la grava =370.514 L/m³**

Paso 5. Cálculo por diferencia de volúmenes de los materiales para obtener el agregado fino.

Volumen de la arena=1000 L/m³- (V. cemento + V. agua + V. aire + V. grava)

Volumen de la arena=1000-(131.80+205+20+370.514)

○ **Volumen de la arena=272.686 L/m³**

Masa de la arena=Volumen de la arena x Densidad de la arena

Masa de la arena=272.686 L/m³x2.27

○ **Masa de la arena= 618.997 kg/m³**

A continuación, la *Tabla 3.6* muestra los resultados obtenidos mediante el proceso de elaboración del proporcionamiento.

Tabla 3.6 Resultados obtenidos mediante el desarrollo del proporcionamiento.

Materiales	Volumen (L/m³)	Masa total (kg/m³)
Cemento	131.8	401.96
Arena	272.686	618.997
Grava	370.514	1005.204
Agua	205	205
Aire	20	-
Suma	1000	2231.161

Paso 6. Ajuste de la mezcla por humedad de absorción.

El siguiente procedimiento se realiza recordando que la humedad actual de los agregados fue nula, el agua que se le añade al agregado es proporcional al porcentaje de absorción de agua de los agregados.

$$\text{Masa corregida del agregado} = \text{Masa del agregado} \times (1 - \% \text{ Absorción})$$

$$\text{Masa corregida de la arena} = 618.997 \text{ kg/m}^3 \times (1 - 0.0526)$$

- **Masa corregida de la arena = 586.438 Kg/m³**

$$\text{Masa corregida de la grava} = 1005.204 \text{ kg/m}^3 \times (1 - 0.0219)$$

- **Masa corregida de la grava = 983.190 Kg/m³**

$$\text{Masa corregida del agua} = \text{Masa total del agua} + \sum (\text{Masa del agregado} \times \% \text{ Absorción})$$

$$\text{Masa corregida del agua} = 205 \text{ kg/m}^3 + [(618.997 \text{ kg/m}^3 \times 0.0526) + (1005.204 \text{ kg/m}^3 \times 0.0219)]$$

- **Masa corregida del agua = 259.573 Kg/m³**

A continuación, en la *Tabla 3.7* se muestran las cantidades corregidas para 1m³ de la mezcla Testigo (TEST), las cuales fueron calculadas tomando como base una relación agua/cemento de 0.51.

Tabla 3.7 Cantidades de agregados corregidas para 1m³

MATERIALES	PESO (kg)
CEMENTO	401.961
AGUA	259.573
AIRE	0
ARENA	586.438
GRAVA	983.19
TOTAL	2231.347

Paso 7. Dosificación de las fibras de PET y Polipropileno.

Como ya se mencionó anteriormente, se realizó el diseño de una mezcla control para 1m³, a la cual se le agregaron los porcentajes correspondientes de fibras al proporcionamiento original para así lograr obtener nuestras 5 diferentes mezclas de estudio. Obteniendo como resultado las siguientes tablas de cantidades:

Tabla 3.8. Cantidades de materiales corregidas y adición de fibra PET para la mezcla de 0.4%-PET

0.4% PET						
CANTIDADES DE MATERIALES CORREGIDAS PARA UN METRO CÚBICO					FIBRA= 0.40%	
MATERIALES	PESO (kg)	DENSIDAD	VOL (m3)	RELACIÓN EN PESO	Kg	g
CEMENTO	401.96	3.05	0.13	1	1.608	851.01
AGUA	259.66	1	0.26	0.66		
AIRE	0	0	0.02	----		
ARENA	586.76	2.27	0.26	1.46		
GRAVA	983.04	2.71	0.36	2.46		
TOTAL	2231.42	----	1.03	----		

"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"

Tabla 3.9. Cantidades de materiales corregidas y adición de fibra PET para la mezcla de 0.8%-PET

0.8% PET						
CANTIDADES DE MATERIALES CORREGIDAS PARA UN METRO CÚBICO					FIBRA= 0.80%	
MATERIALES	PESO (kg)	DENSIDAD	VOL (m3)	RELACIÓN EN PESO	Kg	g
CEMENTO	401.96	3.06	0.13	1	3.22	3215.68
AGUA	259.66	1	0.26	0.65		
AIRE	0	0	0.02	---		
ARENA	586.76	2.27	0.26	1.46		
GRAVA	983.04	2.71	0.36	2.45		
TOTAL	2231.42	---	1.03	---		

Tabla 3.10. Cantidades de materiales corregidas y adición de fibra PET para la mezcla de 1.2%-PET

1.2% PET						
CANTIDADES DE MATERIALES CORREGIDAS PARA UN METRO CÚBICO					FIBRA=	1.20%
MATERIALES	PESO (kg)	DENSIDAD	VOL (m3)	RELACIÓN EN PESO	Kg	g
CEMENTO	401.96	3.06	0.13	1	4.824	2553.04
AGUA	259.66	1	0.26	0.65		
AIRE	0	0	0.02	---		
ARENA	586.76	2.27	0.26	1.46		
GRAVA	983.04	2.71	0.36	2.45		
TOTAL	2231.42	---	1.03	---		

"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"

Tabla 3.11. Cantidades de materiales corregidas y adición de fibra PET para la mezcla de 0.23%-PET y 0.77%
POLIPROPILENO

0.23% PET y 0.77% POLIPROPILENO						
CANTIDADES DE MATERIALES CORREGIDAS PARA UN METRO CÚBICO					FIBRA= 0.80%	
MATERIALES	PESO (kg)	DENSIDAD	VOL (m3)	RELACIÓN EN PESO	Kg	g
CEMENTO	401.96	3.046	0.13	1	PET	739.61
AGUA	259.66	1	0.26	0.65	POLIPROPILENO	2476.08
AIRE	0	0	0.02	---		
ARENA	586.76	2.27	0.26	1.46		
GRAVA	983.05	2.71	0.36	2.45		
TOTAL	2231.42	---	1.032	---		

3.6 Elaboración de mezclas y especímenes

Esta prueba establece los requisitos necesarios para la preparación de las mezclas utilizadas para las pruebas de resistencia a la compresión, flexión, y tensión indirecta, con la finalidad de realizar los especímenes de manera correcta y así puedan ser usados para revelar resultados confiables para la evaluación de mezclas de diferentes materiales y adiciones, correlación con pruebas no destructivas y aportar muestras con fines de investigación.

En la presente investigación se realizaron 5 mezclas diferentes, una mezcla testigo, etiquetada como "TEST", una mezcla con 0.4% de adición de fibra de PET, etiquetada como "0.4%-PET", una con 0.8% de adición de fibra de PET, etiquetada como "0.8%-PET, una mezcla con 1.2% de adición de fibra de PET, etiquetada

como “1.2%-PET” y finalmente una mezcla con 0.8% de fibra, el cual está conformado por 0.23% fibra de PET y 0.77% de fibra de polipropileno, etiquetada como “PET-P”.

Las condiciones de dosificación de materiales se mantuvieron constantes para las 5 mezclas, así como para el llenado de especímenes y vibrado de los mismos.

Procedimiento:

1. Pesamos el agregado fino, el agregado grueso y el agua para cada mezcla.
2. Se ingresó aproximadamente el 10% del agua a la mezcladora, así como una proporción respectiva de grava, se repitió este proceso hasta llegar al 50% del agua con la grava correspondiente, dejando homogenizar hasta que la grava esté en un estado de superficialmente húmedo.
3. Ingresamos el cemento, dejamos homogenizar durante unos minutos, incorporamos el agregado fino acompañado del restante de agua, dejando homogenizar la mezcla durante un tiempo aproximado de 3 minutos.
4. Después de un tiempo aproximado de 10 minutos desde el comienzo de la elaboración y verificando que la mezcla está totalmente homogénea se coloca en la carretilla, como se muestra en la *Figura 3.3*.



Figura 3.3. Vaciado de mezcla en carretiva y toma de lectura de temperatura. Fuente:Elaboración propia.

5. En caso de las mezclas con adición de fibra de PET, se incorpora la fibra en las cantidades calculadas, dejamos mezclar totalmente, posteriormente se coloca en la carretilla.
6. Una vez realizada la mezcla, se mide su trabajabilidad por medio de la prueba de revenimiento realizada con el cono de Abrams, tomamos la lectura de la temperatura y el pH de dicha mezcla.
7. De la revoltura del concreto se obtiene la porción representativa para elaborar los especímenes colocando el concreto dentro del molde. *Figura 3.5.*
8. Se elaboraron 20 cilindros de 10x20 cm y 15 cilindros de 15x30 cm por cada mezcla, se varilla cada capa con el extremo redondeado empleando el número de penetraciones y tamaño de varilla especificado en la *Tabla 3.13.*
9. Se distribuyen los golpes uniformemente en toda la sección transversal del molde y permitiendo que la varilla penetre aproximadamente 10 mm en la capa contigua inferior, siendo el espesor de esa capa menor a 100 mm. *Figura 3.4.*



Figura 3.4. . Varillado en elaboración de muestras de concreto fresco. Fuente: Elaboración propia.

10. Después de compactar cada capa especificada en la *Tabla 3.12* se golpean ligeramente las paredes del molde con ayuda del mazo de hule para eliminar hasta donde sea posible los vacíos que deja el proceso de varillado.

“Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno”

Tabla 3.12. CANTIDAD DE CAPAS REQUERIDAS PARA DIFERENTES DIMENSIONES DE ESPÉCIMENES. FUENTE:
ELABORACIÓN PROPIA



Figura 3.5. Moldes cilíndricos. Fuente: Elaboración propia

TIPO Y TAMAÑO DEL ESPÉCIMEN	MODO DE COMPACTACIÓN	NÚMERO DE CAPAS
Cilindro de 10x20 cm	Varillado	2
Cilindro de 15x30 cm	Varillado	3

Tabla 3.13. Diámetro de varilla y número de penetraciones. Fuente: (nmx-c-159-onnce, 2016)

DIÁMETRO DEL CILINDRO	DIÁMETRO DE VARILLA (MM)	NÚMERO DE PENETRACIONES POR CAPA
10 cm	10±2	25
15 cm	16±2	25

11. Finalmente, se enrasó el molde con ayuda de una varilla lisa de acero, eliminando todo exceso de mezcla dejando la superficie lo más lisa y uniforme posible. *Figura3.10.*



Figura 3.10. Proceso de enrasado de moldes en vigas y cilindros, Fuente: Elaboración

CAPÍTULO 4 PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS

4.1 Cemento Portland

Los ensayos que se desarrollaron para caracterizar y conocer las propiedades físicas de los agregados pétreos, fueron llevados a cabo bajo una serie de normas tanto mexicanas como extranjeras, las cuales se relacionan en la *Tabla 4.1*.

Tabla 4.1 Normativas correspondientes a las pruebas realizadas al cemento.

PRUEBA	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Consistencia normal del cemento hidráulico.	NMX-C-057-2015-ONNCCE	ASTM-C-187-98
Tiempo de fraguado del cemento hidráulico.	NMX-C-059-ONNCCE-2006	ASTM-C-266-2015
Densidad del cemento hidráulico.	NMX-C-152-2015-ONNCCE	ASTM-C-188-95

4.1.1 Consistencia normal del cemento hidráulico.

El objetivo de esta prueba es obtener la cantidad de agua necesaria para combinarla con una determinada masa de cemento que sirva como referencia para efectuar las pruebas de sanidad del cemento y determinar los tiempos de fraguado para conseguir una consistencia normal. Con esta prueba se logra obtener el líquido necesario para que la aguja de 1 cm de diámetro del aparato de Vicat, penetre en la pasta de cemento $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ durante 30 segundos después de soltar la aguja.

La cantidad de agua idónea para que esto suceda se define como agua de consistencia normal. (NMX-C-057-0NCCE, 2015).

Equipo empleado:

- 600g aproximadamente de cemento.
- Agua.
- Espátulas.
- Recipiente liso e impermeable.
- Aparato de Vicat.
- Balanza con aproximación de 0.1 gramos.
- Placas de vidrio.
- Guantes de látex.

Procedimiento:

1. Se pesan 650 g de cemento y se vierten sobre un recipiente con superficie lisa e impermeable y se forma una especie de cráter con el cemento ayudados con una espátula.
2. Se fija una cantidad de agua expresada en porcentaje, respecto a la masa del cemento seco, se mide en la probeta graduada y se vierte dentro del centro del cráter (iniciando el conteo de un cronómetro al caer el agua sobre el cemento).

3. Con la espátula se lleva el material de la orilla del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca, como se muestra en la *Figura 4.1*. (Esto debe de hacerse en un máximo de 30 segundos).



Figura 4.1 Proceso de humedecer el cemento y amasado de la pasta. Fuente: Elaboración propia.

4. En otro ciclo de 30 segundos consecuentes a los anteriores se deja reposar la mezcla para que la humedad se homogenice.
5. Se hace el amasado de la pasta como se muestra en la *Figura 4.1* en un tiempo global de 1.5 minutos contados a partir de los anteriores.
 - A. En los primeros 30 segundos se mezcla perfectamente la masa con las manos, golpeando la mezcla, con la parte pesada de las manos hasta lograr una pasta uniforme y homogénea.
 - B. En otros 30 segundos se forma una esfera con la pasta y se pasa de una palma a otra a una distancia de aproximada de 15 centímetros, este ciclo de pasar de una mano a otra se debe de repetir 6 veces terminado lo anterior.
 - C. En los últimos 30 segundos de los 1.5 minutos, descansamos la bola en la palma de la mano, se introduce a presión por la abertura mayor del anillo cónico del aparato de Vicat, el cual se sostiene con la otra mano llenando completamente el anillo con pasta (la otra abertura se descansa sobre un cristal).

- D. Se coloca el anillo descansando en su base mayor, sobre una placa de vidrio y se enrasa con una espátula que se mantendrá formando un pequeño ángulo en el borde de la cuchara durante las operaciones de enrasado y enlisado, debe tenerse cuidado de no comprimir la pasta.
6. La pasta confinada en el anillo que descansa sobre una placa procurando que quede centrado con respecto a la barra “B” hasta que toque con la parte “C” la superficie de la pasta confinada, se aprieta el tornillo “B” sujetador después se coloca el indicador móvil F en la marca cero en la parte superior de la escala o se hace una lectura inicial como se muestra en la *Figura 4.4*.

Las denominaciones de los tornillos se pueden observar en las *Figuras 4.2 y 4.3*.

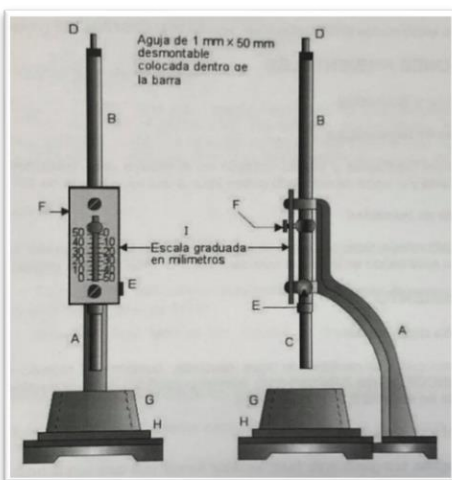


Figura 4.2 Aparato de Vicat (NMX-C-057-0NCCE, 2015)



Figura 4.3 Aparato de Vicat. Fuente: Elaboración propia.

7. Se deja caer la aguja sobre la superficie de la pasta de cemento como se muestra en la *Figura 4.4*, se dejan pasar 30 segundos y se toma la lectura de penetración de la aguja, si la lectura es de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, se toma esa cantidad de agua como la necesaria para obtener la consistencia normal del

cemento (si la lectura no es de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, se repite el procedimiento antes visto hasta conseguir la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia normal del cemento).

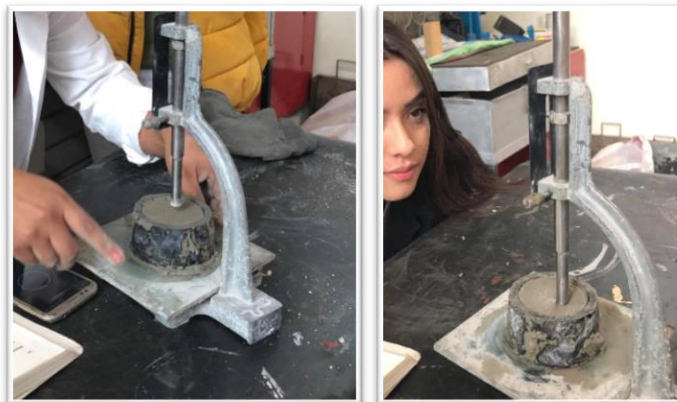


Figura 4.4 Colocación de la pasta en el anillo y toma de lectura inicial. Fuente: Elaboración propia.

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 s a partir del momento que se suelta la barra.

Se siguió el mismo procedimiento para las diferentes mezclas, agregando la sustitución correspondiente para cada una.

4.1.2 Tiempo de fraguado del cemento hidráulico método de las agujas de Gillmore.

Esta prueba permite establecer el método de ensayo para determinar los tiempos de fraguado de pastas de cemento hidráulico, por medio de las agujas de Gillmore, determina los tiempos de fraguado inicial y final de las pastas de cementante hidráulico midiendo la resistencia que opone ante la penetración de las agujas.

Para determinar el tiempo de fraguado intervienen factores como la cantidad de agua y temperatura en porcentaje obtenida en la prueba de consistencia normal, de la temperatura y humedad del ambiente. (ASTM-C-266, 2015)

Equipo empleado:

- 600 g aproximadamente de cemento.
- Agua.
- Espátulas.
- Recipiente liso e impermeable.
- Aparato de Gillmore.
- Balanza con aproximación de 0.1 gramos.
- Placas de vidrio.
- Guantes de látex.

Procedimiento:

1. Una vez terminado el moldeado con la pasta de cemento en la prueba de consistencia normal, se colocó sobre una placa de vidrio cuadrada, plana y limpia de aproximadamente 4" por lado, se hizo 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. Guardando el espécimen de prueba en el cuarto húmedo durante 30 minutos, como se muestra en la *Figura 4.5*.
2. Una vez pasados los 30 minutos, se determinó la penetración de la aguja de 1 mm de diámetro del aparato de Guillmore (*Figura 4.6.*) manteniendo las agujas en posición vertical y se poniendo en contacto ligeramente con la superficie de la pastilla. (*Figura 4.7*).

Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado inicial cuando la aguja más liviana no penetre la superficie de la pastilla. Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado final cuando la aguja más pesada no deje huella apreciable sobre la superficie de la pastilla. (ASTM-C-266, 2015).



Figura 4.5. Colocado de especímenes de prueba en cuarto húmedo. Fuente: Elaboración propia..

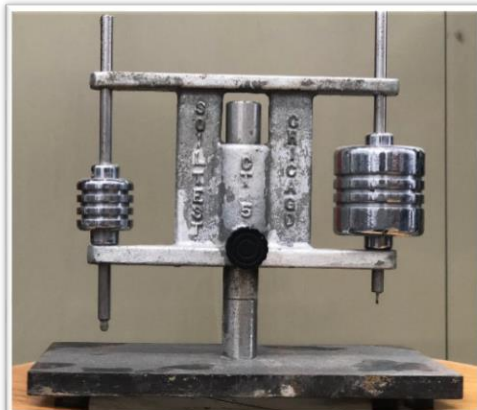


Figura 4.6. Aparato de Gillmore utilizado. Fuente: Elaboración propia..



Figura 4.7. Realizado de prueba de consistencia normal. Fuente: Elaboración propia..

4.1.3 Determinación de la densidad del cemento hidráulico.

Se entiende por densidad del cemento hidráulico, la relación de la masa de cemento en gramos, entre el volumen en milímetros que desplaza este al introducirse en un líquido, con el cual no efectuó reacción química alguna.

Equipo empleado:

- Muestra representativa de cemento.
- Matraz de Le Chatelier.
- Balanza con aproximación de 0.1gramos.
- Reactivo: petróleo.
- Recipiente con agua.

- Termómetro.
- Embudo de cristal.

Procedimiento:

1. Se llena el matraz Le Chatelier con keroseno libre de agua o nafta a un nivel medido entre cero y un mililitro como se muestra en la *Figura 4.8.A*. La parte superior interna del matraz se debe secar en caso necesario, esto para evitar la adherencia del material. Se registra la primera lectura después de haber sumergido el matraz en un baño de agua a la temperatura del laboratorio como se muestra en la *Figura 4.8 B*.
2. Se debe observar que la temperatura del baño sea constante durante la prueba de modo que, a 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 cuidando que se provoquen salpicaduras y que el cementante se adhiera a las paredes interiores del cuello superior del matraz. *Figura 4.8.C*.
4. Se desaloja el aire que haya sido atrapado al introducir el cementante en el líquido tomando el frasco entre las manos y haciéndolo girar en posición inclinada sobre una superficie plana como se muestra en la *Figura 4.8.D*.
5. La segunda lectura se debe tomar estando el líquido en la parte graduada superior y después de sumergir el frasco en el baño de agua durante un tiempo suficiente para estabilizar la temperatura.

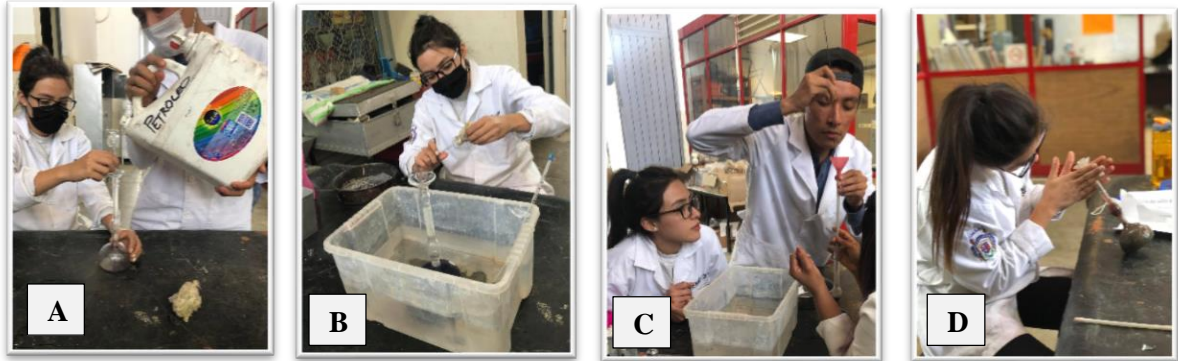


Figura 4.8. A- Llenado del matraz Le Chatelier con keroseno. B- Sumergido el matraz en un baño de agua a la temperatura del laboratorio. C-introducción del cementante en pequeñas porciones dentro del matraz. D- Desalojo del aire en el frasco. Fuente: Propia.

Cálculo:

La diferencia entre lecturas inicial y final representa el volumen del líquido desplazado por la masa de cementante empleado en la prueba. Se utiliza la ecuación mostrada a continuación.

$$D = \frac{M}{V} = \frac{60 \text{ g}}{L_f - L_i}$$

Donde:

D = Densidad del cementante hidráulico, en g/cm³.

M = Masa del cementante hidráulico, en g.

V = volumen del líquido desalojado, en cm³.

4.2 Agregados pétreos.

Los ensayos que se realizaron en nuestra investigación para conocer las propiedades físicas de los agregados pétreos se llevaron a cabo bajo las normas

“Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno”

mexicanas NMX que se presentan a continuación establecidas en la Tabla 4.2, la cual también incluye las normas extranjeras.

Tabla 4.2 Características, pruebas y normativa correspondiente a los agregados.

PRUEBA	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Reducción de Muestras de Agregados.	NMX-C-170-ONNCCE-2019	ASTM C702-18
Determinación de la masa volumétrica de los agregados.	NMX-C-073-ONNCCE-2004	ASTM C29-17
Determinación de la humedad de absorción de los agregados finos.	NMX-C-165-ONNCCE-2014	ASTM C128-15
Determinación de la humedad de absorción de los agregados gruesos.	NMX-C-164-ONNCCE-2014	ASTM C127-15
Determinación de la densidad relativa del agregado.	NMX-C-164-ONNCCE-2014	ASTM C127-15
Análisis granulométrico de agregados para concreto.	NMX-C-077-ONNCCE-1997	ASTM C136-14
Determinación de la sedimentación en agregados finos.	-	-
Determinación del contenido de Material Orgánico (No de Colorimetría).	NMX-C-088-ONNCCE-1997	ASTM C40-16

4.2.1 Agregados Finos.

Durante el proceso de experimentación en la prueba de Análisis Granulométrico de agregado fino obtuvimos que el Módulo de finura no cumplía con los estipulado en la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014), la cual establece los límites del Módulo de Finura del agregado para concreto hidráulico. (*Tabla 4.3*).

Tabla 4.3 Límites del módulo de finura (NMX-C-111-ONNCCE, 2014)

Módulo de Finura de la Arena
Entre 2.3 y 3.1

Por lo cual se hizo uso de dos diferentes tipos de agregados: Agregado Fino A (Arena blanca), Agregado Fino B (Arena negra), con el fin de analizar sus características y propiedades por separado, así como creando una mezcla de los materiales A y B con porcentajes de 50% material A y 50% material B, obteniendo como resultado un material denominado “C”.

Teniendo como resultado tres tipos de agregados finos: Agregado Fino A (Arena blanca), Agregado Fino B (Arena negra) y Agregado Fino C (Arena combinada).

4.2.1.1 Reducción de Muestras de Agregados Finos

El objetivo es obtener una muestra que represente al total del agregado fino e integre todas sus propiedades para obtener resultados confiables de los análisis a realiza en la caracterización del agregado. Para que la muestra sea representativa debe elegirse la técnica de muestreo más adecuada.

Existen tres procedimientos usuales para efectuar el cuarteo de las muestras (NMX-C-170-ONNCCE, 1997) (ASTM-C-70, 2003), las cuales fueron aplicadas a los tres tipos de agregados finos.

Procedimiento.

▪ **Método “A”. Cuarteo Mecánico.**

Equipo empleado:

- Cuarteador de muestras con 12 o más conductos
- Tres charolas grandes de lámina o recipientes
- Una pala de boca recta
- Un Cucharón
- Procedimiento para divisor de muestras.

1. Se tomó el material de dos cuartos opuestos de la muestra y se colocó en uno de los recipientes para después vaciar la arena sobre la parte superior del cuarteador mecánico, como se observa en la *Figura 4.9*, procurando repartirla en toda la longitud del cuarteador, de tal forma que fluya por cada uno de los conductos cantidades aproximadamente iguales de material.



Figura 4.9. Vaciado de material sobre la parte superior del cuarteador mecánico. Material A y B. Fuente: Elaboración propia.

2. El material recibido en uno de los recipientes se elimina o se reintegra a la bolsa de donde se extrajo. El material no eliminado se vuelve a introducir al cuarteador y se repite este proceso de división y eliminación hasta lograr la muestra del tamaño que se requiera.

▪ **Método “B”. Cuarteo Manual.**

Equipo empleado:

- Una pala
- Un cucharón de punta recta o cuchara de albañil
- Una escoba

Procedimiento:

1. Se coloca la muestra original sobre un nivel de superficie limpia y duro, donde no pueda existir ninguna pérdida de material o adición accidental de material extraño.
2. Se mezcla la muestra desde abajo y se gira tres veces cambiándola cada vez al extremo opuesto como se muestra en la *Figura 4.10*.



Figura 4.10. Colocación del agregado en una superficie limpia y mezclado de muestra en material A y B. Fuente: Elaboración propia.

3. En el último cambio se superpone la muestra cónica depositando cada palada sobre la punta superior de la pila formando así una pila cónica.

4. Se aplanan la parte superior de la pila con la parte posterior de la pala. *Figura 4.11.*



Figura 4.11. Aplanado de muestra en material A y B. Fuente: Elaboración propia.

5. Se divide la masa aplanada en cuatro cuartos iguales con la pala como se muestra en la *Figura 4.12*, trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie del material, removiendo y eliminando dos cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino recogido al barrer los espacios y dejando limpia la zona.



Figura 4.12. División del material en cuatro partes iguales, materiales A y B.

6. Los dos cuartos restantes se utilizan para efectuar las pruebas necesarias.
7. Cuando se desea una muestra más pequeña, se repite el procedimiento desde el paso 2 para reducir la muestra al tamaño deseado.

Especificaciones:

Las muestras de campo de agregado fino se encuentran superficialmente secas se deben reducir en tamaño por el método “A”. Las muestras de campo que se reduzcan por el método “B” deben encontrarse húmedas superficialmente, de no ser así se deben humedecer y después deben ser remezcladas.

4.2.1.1 Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca suelta de los agregados finos.

El objetivo es determinar la masa por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural. (NMX-C-073-ONNCCE, INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-MASA VOLUMÉTRICA-MÉTODO DE PRUEBA, 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 báscula
- Una pala y un cucharón

Procedimiento:

1. Se vacía arena dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros, como se muestra en la *Figura 4.13*, distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.

2. Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo.



Figura 4.13. Llenado y enrasado del recipiente con la muestra en materiales A y B. Fuente: Proipia

3. La masa obtenida anteriormente se le resta la masa del recipiente para obtener la masa de la arena.

Cálculos.

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

Dónde:

M.V.S.S = Masa volumétrica seca y suelta (g/cm³).

M = Masa de la arena (g).

V = Volumen del recipiente (cm³).

4.2.1.2 Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca varillada de los agregados finos.

El objetivo es obtener la masa por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación. (NMX-C-073-ONNCCE, Industria de la Construcción- Agregados-Masa Volumétrica-Método de Prueba, 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 báscula
- Una pala y un cucharón

Procedimiento:

1. 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. *Figura 4.14.*
2. Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes. Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.
3. después de haber realizado los pasos anteriores se pesa el recipiente con el material y se le resta la masa del recipiente para así obtener la masa neta del material.

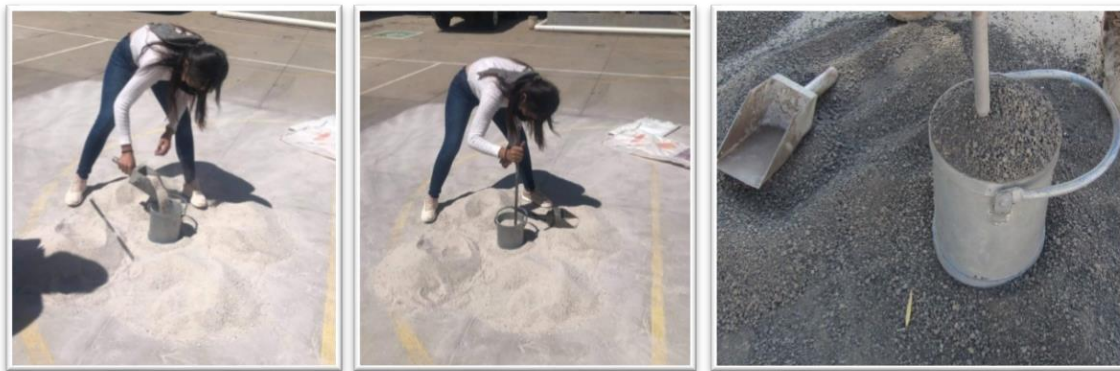


Figura 4.14. Llenado, varillado y enrazado del recipiente con la muestra en materiales A y B. Fuente:
Elaboración propia.

Cálculos a realizar.

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

Dónde:

MVSV= Masa volumétrica seca y varillada (g/cm³).

M = Masa de la arena (g).

V = Volumen del recipiente (cm³).

4.2.1.3 Determinación de la humedad de absorción del agregado fino.

La absorción es la propiedad del agregado más importante en la consistencia del mortero, ya que las partículas absorben agua directamente al momento de crear la mezcla, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla. (NMX-C-165-ONNCCE, 2004)
(ASTM-C-128, 2004)

Equipo:

- Aproximadamente 2 kg de arena seca.
- Balanza.
- Parrilla.
- Charolas metálicas.
- Molde troncocónico.
- Pisón.
- Espátula.
- Vidrio reloj.

Procedimiento:

1. La muestra de 2 kilogramos 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, esto se logra por medio del molde troncocónico como se describe a continuación.
 - Una porción de la muestra se coloca en una charola para lograr un estado superficialmente seco, esto se logra poniendo la charola con el material en contacto directo con fuego.
 - Para saber cuándo el material está superficialmente seco (SSS) se colocó el molde troncocónico sobre el material, se llena completamente el cono y se dieron 10 compactaciones con el peso propio del pisón, se llena nuevamente el cono y se dan 10 compactaciones más, para la tercera capa se llenó el cono más 3 compactaciones y finalmente en la última capa se dan 2 compactaciones, haciendo un total de 25 compactaciones, como

se muestra en la *Figura 4.15*.

- Se retira el cono verticalmente y se observa que, si la arena mantiene la forma del cono, esta aun contiene exceso de agua, por lo que el proceso se repite. Cuando al retirar el cono éste se disgrega deformándose parcialmente, la muestra ya alcanzó la condición de superficialmente seco. *Figura 4.16*.
3. Cuando la arena está seca superficialmente, se procede a pesar una muestra de 300 gramos, registrándola como masa saturada y superficialmente seca (MSS).
 4. La muestra de 300 gramos, se coloca en una charola para secarla hasta masa constante, o sea, hasta eliminar completamente el agua.
 5. 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, se pesa y registra la masa como masa seca del material (Ms), si todavía se empaña el cristal hay que seguirlo secando hasta alcanzar el objetivo.



Figura 4.15. Colocación de molde troncocónico sobre el material. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.16. Masa superficialmente seca en materiales A y B. Fuente: Elaboración propia.

Cálculos.

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

Donde:

M_{sss} = Masa saturada y superficialmente seca. (g).

M_s = Masa seca del material. (g).

4.2.1.4 Determinación de la densidad relativa en agregado fino.

La Densidad relativa es la propiedad que se utiliza para la determinación del volumen ocupado por el agregado en las mezclas de concreto que son proporcionadas o analizadas sobre la base del volumen absoluto.

El objetivo es determinar el volumen obstáculo de las partículas de arena, es decir, el volumen efectivo excluyendo los vacíos que se forman entre las partículas de arena cuando se acomodan una sobre la otra.

Equipo empleado:

- Una muestra representativa de arena de aproximadamente 2 Kg.
- Charolas metálicas
- Una espátula
- Una parrilla eléctrica
- Un molde metálico de forma troncocónica
- Un pisón
- Una probeta
- Un Frasco de Chapman
- Un vidrio reloj

- Una báscula con aproximación al décimo de gramo

Procedimiento:

- Utilizando la probeta.
1. Se pone a saturar la arena obtenida en el método de cuarteo en una charola durante 24 horas ($\pm 4h$), al término de este tiempo se seca superficialmente utilizando el procedimiento descrito en la prueba de humedad de absorción con el molde tronco cónico.
 2. Enseguida se pesa una muestra de arena superficialmente seca que sea de aproximadamente sea entre 200 y 300 g. Se registra este valor como masa de la arena (M_{sss}).
 3. Se llenó con agua el frasco de Chapman hasta la marca de aforo (450 ml), y se registró este dato como (M_{pa})
 4. Retiramos el agua hasta el nivel de 200ml y posteriormente se coloca la arena dentro del frasco, procurando que no salpique agua (*Figura 4.17*) porque esto no ocasionaría un error en la prueba, agitando un poco el frasco para expulsar el aire atrapado, esta operación va a provocar un aumento en el volumen de agua. (*Figura 4.18 y 19*)
 5. Después se llenó con agua el frasco hasta la marca de aforo (450 ml) y se registró este dato como (M_{pma}). *Figura 4.12*



Figura 4.17. Colocado de material en frasco. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.18. Agitado de frasco para expulsión de aire atrapado. Fuente: Elaboración propia.

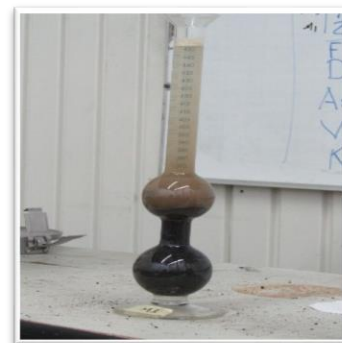


Figura 4.1 9. Llenado de agua hasta la marca de aforo. Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

La densidad de la arena se calcula de la siguiente manera:

$$Dr_{ss} = \frac{M_{sss}}{M_{pa} + M_{sss} - M_{pma}}$$

Donde:

Dr_{ss}= Densidad relativa.

M_{pa}= Masa del frasco de Chapman lleno, en g.

M_{sss}= Masa de la muestra superficialmente seca, en g.

M_{pma}= Masa del picnómetro, muestra y agua, en g.

4.2.1.5 Análisis granulométrico de agregados finos para concreto

La granulometría afecta las porciones relativas del agregado, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, la economía y la durabilidad del mortero.

En el agregado fino existen elementos de máxima importancia y los cuales deben ser considerados. Por un lado, tenemos el módulo de finura (MF), el cual, si es mayor de 3.5 (arena gruesa) puede generar mezclas muy poco trabajables, poca cohesión entre sus componentes y un consumo mayor de cemento para mejorar su trabajabilidad. En cambio, si el módulo de finura es menor a 1.9 (arena fina), puede ocurrir que los concretos sean pastosos y que haya mayores consumos de cemento y agua para una resistencia determinada.

El módulo de finura es de máxima importancia ya que afecta directamente en la resistencia, en la trabajabilidad de la mezcla, en la cohesión de sus agregados y

sobre todo requiere una mayor cantidad de cemento y lo cual impactaría directamente en el costo de producción. (NMX-C-111-ONNCCE, 2014)

Equipo empleado:

- Una muestra representativa de arena.
- Un juego de mallas o cribas con abertura cuadrada del No. 4 (4.75 mm), No. 8 (2.36 mm), No. 16 (1.18 mm), No. 30 (0.60 mm), No. 50 (0.30 mm), No. 100 (0.15 mm), No. 200 (0.075 mm) y una charola con su respectiva tapa.
- Maquina Ro-Tap.
- Una báscula con aproximación de 0.1 gramo.
- Charolas metálicas y espátulas.
- Una parrilla eléctrica.
- Cepillos de cerdas suaves y de alambre.
- Hojas de papel.

Procedimiento:

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos y se e seca hasta masa constante, a una temperatura de no mayor de 110°C, cuando el material este seco y frío, se toman 500 gramos, pesados al décimo de gramo.

2. 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. *Figura 4.20.*



Figura 4.20. Acomodo de mallas en orden decreciente y vaciado de la muestra de agregado fino. Fuente: Elaboración propia..

3. Una vez tapado el juego de mallas, con ayuda de la máquina agitadora (Ro-Tap), se agitó la muestra durante un tiempo aproximado de 10 ± 5 minutos.
4. En una superficie horizontal y limpia se colocan siete hojas de papel y sobre ellas se coloca el material retenido en cada una de las mallas previamente pesado, se limpian las mallas cuidadosamente para no perder material retenido. *Figura 4.21 y 4.22.*
5. Se pesa el material retenido en cada una de las mallas con aproximación al décimo de gramo, anotando las masas 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.

“Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno”



Figura 4.21 Vaciado de material retenido y limpieza de mallas. F uente: Elaboración propia.



Figura 4.22. Retenido de material colocado sobre hojas de papel. F uente: Elaboración propia.

Cálculos:

El registro debe hacerse en una tabla como la *Tabla 4.4*.

Tabla 4.4 Ejemplo de tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de Granulometría

MALLA	MASA RETENIDO	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
4				
8				
16				
30				
50				
100				
200				
CHAROLA				
SUMA				

1. Se anotan las masas en las respectivas mallas en la columna (1).
2. El retenido de la columna (2) se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{masa retenida}}{\text{suma de la masa retenida}} * 100$$

3. Se anotan las masas en las respectivas mallas en la columna (1).
4. El retenido de la columna (2) se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{masa retenida}}{\text{suma de la masa retenida}} * 100$$

5. El % acumulativo se calcula a partir de los datos de la columna (2) como sigue:

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

6. El % que pasa se calcula de la siguiente manera:

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

7. Módulo de finura:

$$MF = \frac{\Sigma \text{ de malla \#8 hasta \#100}}{100}$$

Especificaciones:

Tabla 4.5 Límites del Módulo de Finura (NMX-C-111-ONNCCE, 2014)

Módulo de Finura de la Arena
Entre 2.3 y 3.1

Tabla 4.6 Límites de Granulometría para agregado Fino

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

4.2.1.6 Determinación de la sedimentación en agregados finos.

El objetivo es determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable para reportar si se acepta o no en la elaboración de concreto.

Equipo empleado:

- Frasco graduado con tres marcas (la primera a 414 ml, la segunda a los 444 ml y la tercera a los 828 ml).
- Muestra de arena seca de aproximadamente 2 kg.
- Agua destilada.

Procedimiento:

1. Se coloca arena seca dentro del frasco hasta la marca de 414 ml, enseguida se coloca agua hasta la marca de 828 ml. *Figura 4.23.*



Figura 4.23. Llenado de frasco con material y agua. Fuente: Elaboración propia..

2. Se tapa el frasco, se agita hasta que todo el material fino quede en suspensión en el agua durante dos minutos.
3. Se deja reposar el frasco durante 24 horas como se muestra en la *Figura 4.24.* para determinar el nivel del material fino, esto es que durante el tiempo de reposo el material se va sedimentar y hay que observar si el material fino rebasa o no el nivel de 444 ml.



Figura 4.24. Reposo de materiales A y B durante 24 horas. Fuente: Elaboración propia.

Reporte:

- 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 reportará que el contenido de material fino es aceptable.

4.2.1.7 Determinación del contenido de Material Orgánico (No de Colorimetría).

En los agregados finos naturales suelen encontrarse impurezas orgánicas (debido a su origen o ubicación), las cuales disminuyen la hidratación del cemento y el desarrollo durable del mortero.

El objetivo de este ensayo es determinar si el agregado fino presenta impurezas por la presencia de materia orgánica dañina. Los resultados son un gran parámetro de advertencia al usar este material en conjunto con los ensayos mencionados para la producción de morteros. (NMX-C-088-ONNCCE, 1997)

Equipo empleado:

- Botellas iguales de vidrio incoloro (biberón) de aproximadamente 350 cm³ con marcas a cada 25 cm³.
- Muestra representativa de arena.
- Solución de sosa cáustica 30g por litro de agua destilada.
- Balanza con aproximación de 0.1g.
- Tabla colorimétrica.
- Espátula y charolas metálicas.

Procedimiento:

1. Se tomó una muestra representativa de arena de aproximadamente de 1 kg, la cual se secó hasta una masa constante a una temperatura no mayor a 110°C.
2. Una vez seca la arena, la dejamos enfriar y colocamos una muestra en el frasco de biberón hasta 133 cm³. *Figura 4.26 y 4.27.*
3. Añadimos la solución de sosa cáustica hasta la marca de 206 cm³. *Figura 4.25.*
4. Agregamos la muestra representativa de arena como se muestra en la Figura 4.26, tapamos el frasco de biberón y agitamos durante 2 minutos aproximadamente y dejamos reposar durante 24 horas. *Figura 4.28.*



Figura 4.25. Preparación de la solución de sosa cáustica. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.26. Llenado de solución de sosa cáustica. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.27. Agregado del material. Fuente: Elaboración propia.

5. Una vez cumplidas las 24 horas, comparamos el líquido de la botella con la tabla colorimétrica.

Tabla 4.7 Carta colorimétrica para determinar impurezas orgánicas (ASTM-C-40, 2004)

CARTA COLORIMÉTRICA				
1	2	3 (Color Límite)	4	5



Figura 4.28. Colorimetría en arenas A y B. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Agregados Gruesos

Una vez que se consiguió el material, se trasladó al laboratorio, se extendió en el patio para poderlo secar y realizar las pruebas necesarias para así obtener sus características físicas y efectuar el proporcionamiento de forma adecuada.

4.2.2.1 Reducción de Muestras de Agregados Gruesos.

La normativa (NMX-C-170-ONNCCE, 1997) establece los métodos para la reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo, empleando en cada caso una técnica para minimizar las variaciones en características medibles entre la muestra probada y la muestra de campo.

Para realizar el cuarteo o reducción del agregado grueso, se aplicó el método “B” o cuarteo manual. La metodología que se siguió en este apartado se describe a continuación.

Equipo empleado:

- Cucharón
- Pala
- Escoba

Procedimiento:

1. Se coloca la muestra de campo sobre una superficie plana, dura y limpia, no puede haber pérdida de material, ni contaminación con materias extrañas.
2. Se mezcla el material completamente traspaleando toda la muestra en una pila cónica, depositando cada paleada sobre la interior.
3. Por medio de la pala se ejerce presión sobre el vértice, se aplanar con cuidado la pila hasta que se tenga un espesor y un diámetro uniformes. El diámetro debe ser aproximadamente de cuatro a ocho veces el espesor.
4. Se divide la pila aplanada en cuatro partes iguales con la pala o la cuchara y se eliminan dos de las partes diagonalmente opuestas, incluyendo todo el material fino.
5. Se mezcla el material restante y se cuartea sucesivamente hasta reducir la muestra al tamaño requerido para las pruebas.



Figura 4.29. Cuarteo en agregado grueso.

4.2.2.2 Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca suelta de los agregados gruesos.

La masa se considera seca cuando el agregado se ha mantenido en una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, esto se comprueba cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas es igual o menor que 0,1% de la masa del material.

La masa volumétrica es la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen el ocupado por el material en un recipiente especificado (NMX-C-073-ONNCCE, INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-MASA VOLUMÉTRICA-MÉTODO DE PRUEBA, 2004)

Dicho ensayo se llevó a cabo siguiendo el procedimiento de la norma correspondiente y como a continuación se presenta.

Equipo empleado:

- Muestra representativa de grava de 15 Kg (aproximadamente)
- Un recipiente de masa y volumen conocido
- Escoba.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro
- Báscula
- Una pala cuadrada y un cucharón metálico

Procedimiento:

1. Se llena el recipiente con ayuda de un cucharón hasta que el material sobrepase el borde sin derramarse, dejando caer el agregado de una altura no mayor de 50 mm sobre el borde del recipiente, distribuyéndolo uniformemente para evitar segregación.

2. Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla, quitando y poniendo partículas, de tal manera que los agregados salientes sobre la superficie del borde compensen los huecos que haya por debajo de él y procedemos a pesarlo.
3. A la masa obtenida anteriormente se le resta la masa del recipiente para obtener la masa de la grava.

Cálculos:

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

Donde:

MVSS = Masa volumétrica seca y suelta (g/cm³)

M = Masa de la arena (gramos)

V = Volumen del recipiente (cm³)

4.2.2.3 Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca varillada de los agregados gruesos.

El método de prueba que se siguió para determinar la MVSV de la grava es de acuerdo con lo descrito en la normativa correspondiente (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

Equipo empleado:

- Una muestra de grava seca hasta masa constante.
- Un recipiente de masa y volumen conocido
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro

- Una báscula
- Una pala cuadrada y un cucharón metálico

Procedimiento:

1. Se llenó el recipiente hasta la tercera parte de su volumen y la superficie se niveló con los dedos. El material se compactó con la varilla dándole 25 penetraciones distribuidas de manera uniforme sobre la superficie cuidando que la fuerza con la que se golpeó no triturara las partículas del agregado.
2. Se agregó material hasta las dos terceras partes de su volumen y nuevamente se compactó con 25 penetraciones.
3. Se llenó el recipiente totalmente hasta que el material sobrepasó el borde superior y se volvió a compactar con 25 penetraciones.
4. Se enrasó el recipiente con la varilla punta de bala y se precedió a pesar el material, se le restó la masa del recipiente para así obtener la masa neta del material.

Cálculos:

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

Donde:

MVSV= Masa volumétrica seca y varillada (g/cm³)

M = Masa de la arena (g)

V = Volumen del recipiente (cm³)

4.2.2.4 Determinación de la humedad de absorción del agregado grueso

La absorción es definida como el incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante un tiempo determinado a temperatura ambiente; este aumento de masa es debido al agua que se introduce en los poros de material no incluye el agua debida a la superficie de las partículas.

La determinación de la humedad de absorción del agregado determina la capacidad máxima de absorción de una grava expresándola en porcentaje respecto a su peso seco. (NMX-C-164-ONNCCE, 2014).

Equipo empleado:

- Muestra representativa de aproximadamente 3 kilogramos
- Franela limpia y seca
- Vidrio reloj.
- Charolas metálicas.
- Parrilla eléctrica.
- Espátula.
- Cribas de tamaño de 3/4" y 3/8".
- Báscula con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento:

1. Se mezcla perfectamente la muestra de aproximadamente 3 kg de grava, se pasó por la criba de 3/4" y se retuvo en la criba de 3/8", colocando la porción del retenido en una charola metálica y se procedió a saturar la grava con agua durante 24 h \pm 4 h.
2. Enseguida se saca del agua las porciones del agregado y se secan superficialmente con una tela húmeda hasta que las superficies pierden el brillo acuoso.

3. Se pesó el material y se registró esta masa como masa saturada y superficialmente seca (M_{SSS}).
4. Se colocaron las partículas de grava en una charola metálica, para posteriormente ponerla en contacto con la parrilla eléctrica y así eliminar el total de agua que contenía la muestra cuidando que no se calcinen ni se desgasten las partículas.
5. Se comprobó el secado del material colocando un cristal sobre la muestra hasta que no haya empañamiento, en ese momento, se retiró el material de la fuente de calor y se dejó enfriar a temperatura ambiente, procediendo a pesarlo y registrándolo como masa de la muestra seca (M_S).

Cálculos.

$$A = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} * 100$$

Donde:

A = Es la humedad de absorción (%)

M_{SSS} = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca (g)

M_S = Masa de la muestra seca (g)

4.2.2.1 Determinación de la densidad relativa en agregado grueso.

La densidad del agregado grueso es la relación de la densidad del agregado saturado y superficialmente seco a la densidad del agua, equivalente a la relación de la masa del agregado saturado superficialmente seco a la masa del volumen del agua desalojada, considerando la masa de las partículas saturadas de agua y superficialmente secas y la masa de las partículas de agua, que se incluyen en los

poros que se encuentran dentro de las mismas NMX-C-164-ONNCCE (NMX-C-164-ONNCCE, 2014),

Equipo empleado:

- Una muestra representativa de aproximadamente 3 kilogramos
- Una báscula con aproximación al décimo de gramo
- Charolas metálicas
- Cribas de tamaño de 3/4” y 3/8”
- Una franela limpia y seca
- Probeta graduada
- Un picnómetro

Procedimiento:

1. Se mezcla perfectamente la muestra de aproximadamente 3 kg de grava, se pasó por la criba de 3/4” y se retuvo en la criba de 3/8”, colocando la porción del retenido en una charola metálica y se procedió a saturar la grava con agua durante $24\text{ h} \pm 4\text{ h}$.
2. Enseguida se saca del agua las porciones del agregado y se secan superficialmente con una tela húmeda hasta que las superficies pierden el brillo acuoso.
3. Se pesó el material y se registró esta masa como masa saturada y superficialmente seca (M_{ss}).
4. Se llenó el picnómetro con agua y se dejó que fluyera el líquido hasta que dejara de gotear, se colocó en una superficie plana, se introdujo la muestra evitando que salieran partículas de agua del picnómetro y el agua desalojada se recibió en una probeta graduada. *Figura 4.30.*

5. Una vez que se terminó de colocar toda la muestra dentro del picnómetro, se dejó que se escurriera en su totalidad el agua desalojada y se procedió a medir el volumen de agua contenido en la probeta.



Figura 4.30. Agregado de muestra y desalojo de agua. Fuente:Elaboración propia.

Cálculos:

$$D = \frac{M_{SSS}}{V}$$

Donde:

D = densidad de la grava (g/cm^3)

M_{SSS} = masa de la grava saturada y superficialmente seca (g)

V = Volumen desalojado por la grava (cm^3)

4.2.2.2 Análisis granulométrico de agregados gruesos para concreto.

Esta prueba determina la distribución de tamaño de las partículas de los agregados finos y gruesos mediante el tamizado.

Su objetivo es determinar la clasificación de los materiales propuestos para su uso como agregados. Los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la

distribución del tamaño de las partículas con los requisitos de las especificaciones aplicables, y proporcionar los datos necesarios para la producción de diversas mezclas.

El tamaño máximo de agregado que se utiliza en el concreto tiene su fundamento en la economía. Comúnmente se necesita más agua y cemento para agregados pequeños que para agregados mayores, este se determinan por medio del tamizado en mallas o cribas con unas aberturas especificadas en la norma (NMX-C-077-ONNCCE-2019, 2019)

Equipo empleado:

- Muestra grava de aproximadamente 15 kg.
- Un juego de mallas o cribas con abertura cuadrada de 1 ½”, 1”, ¾”, ½ “, 3/8” y No.4.
- Charolas metálicas.
- Balanza
-

Procedimiento:

1. Tomamos una muestra de aproximadamente 15 kg obtenida de la prueba de cuarteo en gravas. Esta tiene que estar secada previamente.
2. Colocamos las mallas de mayor a menor. Se trabaja individualmente cada malla usando charolas rectangulares, procediendo de la siguiente forma (Figura 4.31).
3. Pasamos el material por las mallas, agitándolas con ambas manos y se verifica que todas las partículas tengan movimiento sobre ésta. Cuando ya no pase material, el retenido en la malla se coloca en la tercera charola y así sucesivamente.

4. Este procedimiento mencionado en el paso 3 se repite hasta terminar la muestra de grava.



Figura 4.31. Acomodo de mallas y resultado final de cribado en agregado grueso. Fuente:Elaboración propia.

Cálculos:

El registro debe hacerse en una tabla como la siguiente.

Tabla 4.8 Ejemplo de tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de Granulometría

MALLA	MASA RETENIDO	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
1 "				
3/4 "				
1/2 "				
3/8 "				
No. 4				
PASA No.4				
Suma				

1. El porcentaje retenido se calcula con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{masa retenida en la malla}}{\text{masa de la muestra}} \times 100$$

2. Porcentaje acumulado se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ acumulado de la malla} = \% \text{ acumulado} + \% \text{ retenido en la malla}$$

3. Porcentaje de la malla que pasa:

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

4. Tamaño máximo de la grava se obtiene observando en la columna de los % retenidos y el tamaño máximo será el tamaño de la malla que retiene el 5% o más de la masa de la muestra.

4.3 Agua

4.3.1 Estudios que se le realizan al agua.

A la muestra del agua se le realizaron las pruebas correspondientes conforme a la norma (NMX-C-122-ONNCCE, 2014), la cual establece los límites máximos de calidad del agua para la elaboración de mezclas de concreto.

El agua utilizada en la presente investigación fue tomada de la red de abastecimiento de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, la cual cuenta con un reporte de calidad de muestreo tipo “simple”, realizado el día 18 del mes de Mayo del presente año, por el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, quienes remitieron los resultados conforme a la normativa mexicana NMX-

C-122-ONNCCE (NMX-C-122-ONNCCE, 2004) especificando los límites máximos de calidad del agua para la elaboración de concretos hidráulicos.

4.4 Concreto fresco.

4.4.1 Revenimiento del concreto de cemento hidráulico.

Equipo empleado:

- Molde troncocónico de dimensiones específicas
- Carretilla
- Cucharón metálico
- Varilla punta de bala de 5/8” de diámetro
- Placa metálica de acero de 60x60 cm
- Flexómetro

Procedimiento:

1. Después de haber obtenido una muestra representativa de la mezcla elaborada, se remezcla el concreto con una pala o cucharón para garantizar uniformidad en la mezcla y se procede a realizar la prueba. *Figura 4.34.*
2. Se humedece el molde y se coloca sobre la placa de acero la cual debe ser, plana, rígida, húmeda y no absorbente.
3. Se colocan los pies sobre los estribos del molde cónico para mantener firme en su lugar durante la operación de llenado. *Figura 4.35.*
4. Se llena el molde con tres capas de igual volumen. La primera capa a un tercio aproximadamente de la longitud del molde y con la varilla punta de bala compactamos con 25 golpes distribuidos por toda la superficie. La segunda

capa a dos tercios de la longitud del molde y compactamos con 25 golpes cuidando de penetrar la primera capa a 2 cm aproximadamente y finalmente la tercera capa, llenamos completamente el molde y damos 25 varilladas igual cuidando penetrar en la segunda a 2 cm de esta.

5. Retiramos todo exceso de mezcla con la varilla, enrazando el molde y limpiando los laterales del molde.



Figura 4.34 . Mezcla recién elaborada

.Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.35. Acomodo del molde.

Fuente: Elaboración propia.

6. Retiramos el molde en forma vertical en un tiempo aproximado de 5 s, colocamos el molde cerca de la mezcla asentada de forma contraria a como se utilizó, se colocó la varilla de forma horizontal sobre el molde. *Figura 4.37 y 4.38.*



Figura 4.36. Varillado sobre la superficie de la mezcla. Fuente:

Elaboración propia.



Figura 4.37. Enrase después del llenado. Fuente: Elaboración

propia.



Figura 4.38. Toma de lectura del revenimiento. Fuente:

Elaboración propia.

7. Con ayuda del flexómetro se midió el asentamiento de la mezcla, de la parte inferior de la varilla, hasta una altura pro medio del cono formado por el molde.

4.4.2 Índice de PH

Procedimiento:

1. Se colocó una tira indicadora sobre la muestra de concreto fresco, como se observa en la *Figura 4.39*.
2. Se dejó la tira un tiempo aproximado de 1 minuto, con la finalidad de obtener una lectura exacta.
3. Finalmente retiramos la tira y la comparamos con la tabla de colores indicadores de pH. *Figura 4.40*.



Figura 4.39 Colocación de tira indicadora sobre la muestra de concreto fresco. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.40 Comparación con la table de colores indicadores de p.H. Fuente: Elaboración propia.

4.5 Concreto endurecido.

4.5.1 Curado de especímenes de prueba en el laboratorio.

El curado es el proceso más importante e indispensable para lograr el proceso de hidratación del cemento, este nos lleva a la obtención de resistencia y a la reducción de la porosidad, contracciones y agrietamiento a edad temprana. (NMX-C-530-ONNCCE-2018, 2018)

Durante el fraguado y endurecimiento del concreto es necesario mantener un contenido de humedad durante el proceso de hidratación de los materiales cementantes en el concreto recién colado. Este proceso se vuelve fundamental en el transcurso de la investigación, es el último paso después del colado.

Procedimiento:

1. Los especímenes deben ser descimbrados no antes de las veinte horas, ni después de cuarenta y ocho horas de su elaboración.
2. Los especímenes deben ser curados en humedad a temperatura de $296\text{ K} \pm 3\text{ K}$ ($23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$) durante las primeras 24 h, después de ese tiempo deben mantenerse a una temperatura de $296\text{ K} \pm 2\text{ K}$ ($23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$).
3. El almacenaje durante las primeras 48 h debe ser en un sitio libre de vibraciones. Los especímenes de prueba deben mantenerse con agua libre



Figura 4.41. Especímenes de concreto en pila de curado. Fuente: Elaboración propia.

en su superficie en todo tiempo, por lo cual se sumergen en agua agregando cal para evitar la contaminación de esta. *Figura 4.41.*

4.5.2 Cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto.

Esta práctica describe el proceso para darle a los cilindros de concreto una superficie plana en los extremos, estos se cabecean con materiales adheribles al concreto como lo es el azufre.

Procedimiento:

1. Se prepara el azufre para su empleo calentándolo en el fuego directo, como recomendación, debe colocarse en el recipiente la cantidad justa para los especímenes por cabecear en esa etapa, y se elimina el material sobrante antes de volverse a llenar. El material re-usado no debe de tener más de 10 usos, siempre y cuando se garantice que se cumple con lo indicado en la tabla 4.9.
2. El azufre debe mantenerse alejado de cualquier humedad, este tiene que estar completamente seco en el momento que se coloque en el recipiente para su fundición, ya que la humedad puede producir espuma.
3. El equipo para el cabeceo debe ser calentado ligeramente antes de ser empleados, esto para disminuir la velocidad de endurecimiento y permitir la formación de capas delgadas. Antes de vaciar cada capa, se lubrica el plato de cabeceo con una capa delgada de aceite y se vierte el azufre fundido, como se muestra en la *Figura 4.42.*
4. Las bases de los especímenes curados deben estar suficientemente secas en el momento del cabeceo, para evitar que dentro de las capas se formen burbujas de vapor o bolsas de espuma de diámetro mayor de 6 mm.

5. Los especímenes cabeceados no se probarán hasta que el mortero de azufre haya desarrollado la resistencia requerida.



Figura 4.42. Proceso de cabeceo en especímenes de concreto. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.9 Resistencia a la compresión y espesor máximo del mortero de azufre (NMX-C-109-ONNCE., 2013)

Resistencia del concreto (Kgf/cm ²)	Resistencia mínima del mortero de azufre (Kgf/cm ²)	Espesor máximo de cada de cabeceo en cualquier punto (mm)
350 a 500	350 o la del concreto, cualquiera que sea mayor	8
Más de 500	No menor que la resistencia del concreto	5

4.5.3 Resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

Se define la resistencia a la compresión como la medida máxima de la resistencia de carga axial de especímenes de concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). Esta propiedad normalmente es expresada en kilogramos-fuerza por

centímetro cuadrado (kgf/cm²), Megapascales (MPa) o en libras-fuerza por pulgada cuadrada (lbf/pulg² o psi), a una edad de 28 días.

Los valores obtenidos dependerán de la forma y tamaño del espécimen, de la dosificación, de los procedimientos de mezclado, de los métodos de muestreo, de los moldes, de la fabricación, de la edad, de la temperatura y de las condiciones de humedad durante el curado.

Los resultados de este método se utilizan como base para el control de calidad del concreto.

Procedimiento:

1. Se limpian las superficies de las placas y así como las cabezas del espécimen de prueba, se coloca el espécimen sobre la placa inferior alineando su eje con el centro de la placa de carga. La placa superior se baja hacia el espécimen asegurándose que se tenga un contacto suave y uniforme. *Figura 4.43.*
2. Se aplica la carga con una velocidad uniforme. La velocidad de carga debe estar dentro del intervalo de 84 Kgf/cm²/min a 210 Kgf/cm²/min, equivalente para un diámetro estándar de 15 cm a un rango de 14.8 Tonf/min a 37.1 Tonf/min
3. Se permite una velocidad mayor durante la aplicación de la primera mitad de la carga máxima esperada siempre y cuando durante la segunda mitad se mantenga la velocidad especificada hasta que ocurra la falla, *Figura 4.44.* registrándola en el informe.
4. Los especímenes para determinar si el concreto cumple o no, con las especificaciones deben probarse a la edad de 14 días en el caso del concreto de resistencia rápida o 28 días en el caso de resistencia normal con las tolerancias que se indican en la *Tabla 4.10.*

"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"

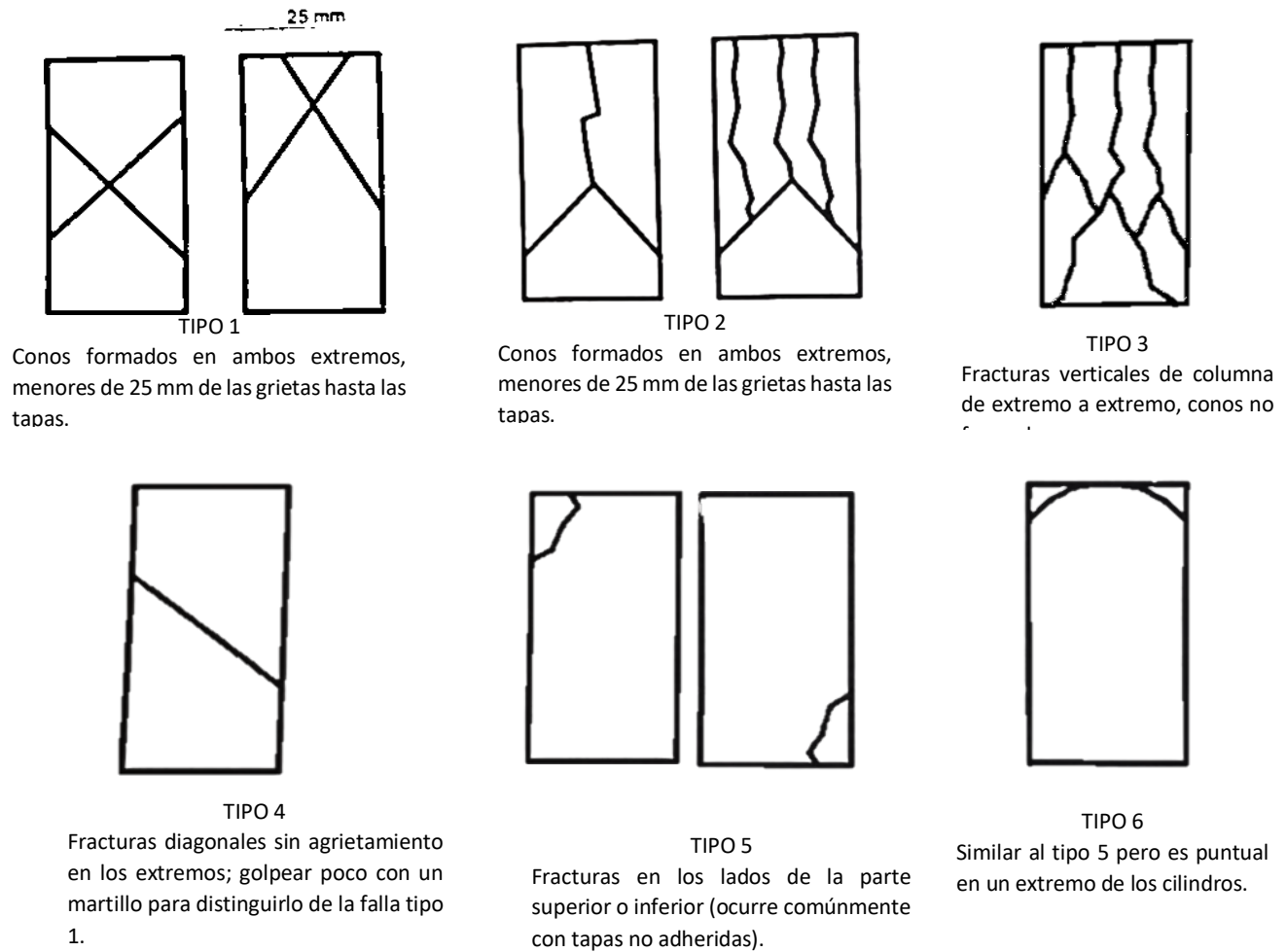


Figura 4.46. Diagrama de fallas de cilindros sometidos a compresión (NMX-C-083-ONNCCE, 2014).



Figura 4.43 Acomodo del espécimen y aplicación de carga.



Figura 4.44 Falla del espécimen de concreto.



Figura 4.45. Especimen fallado después de la prueba.

Tabla 4.10 Tolerancias NMX-C-083:ONNCCE,2014

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

Cálculos:

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

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

Donde:

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

P = carga de ruptura, en Kgf

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

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

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

Donde:

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

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

σ_P = resistencia de proyecto, Kgf/cm²

4.5.4 Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto.

La resistencia a la tensión se utiliza en el diseño de secciones estructurales de concreto ligero para evaluar la resistencia al corte y determinar la longitud de desarrollo de refuerzo.

Procedimiento:

1. Para cada prueba se debe contar con dos tiras de madera de triplay, las cuales se colocan entre el espécimen y ambas platinas de carga, superior e inferior de la máquina de prueba, o entre el espécimen y las placas suplementarias cuando se utilicen.
2. Se centra una de las tiras de carga sobre la platina inferior como se muestra en la *Figura 4.47*. Se coloca el espécimen sobre la tira y se alinea con el objetivo de que las líneas marcadas en los extremos del cilindro estén verticales y centradas. Se coloca la segunda tira de carga longitudinalmente sobre el cilindro. Se acomoda el conjunto para asegurar que se cumplan las condiciones anteriores.
3. Se debe aplicar la carga en forma continua sin impacto a una velocidad constante de tal manera, que se logren esfuerzos de tensión por compresión diametral de 5 Kgf/cm² a 15 Kgf/cm² por minuto hasta la falla del espécimen.

4. Para cilindros de 15 por 30 cm, el rango de esfuerzos de tensión corresponde a una carga aplicada aproximadamente entre 3467 Kgf y 10 605 Kgf por minuto.
5. Se registra la carga máxima aplicada, indicada por la máquina de prueba en

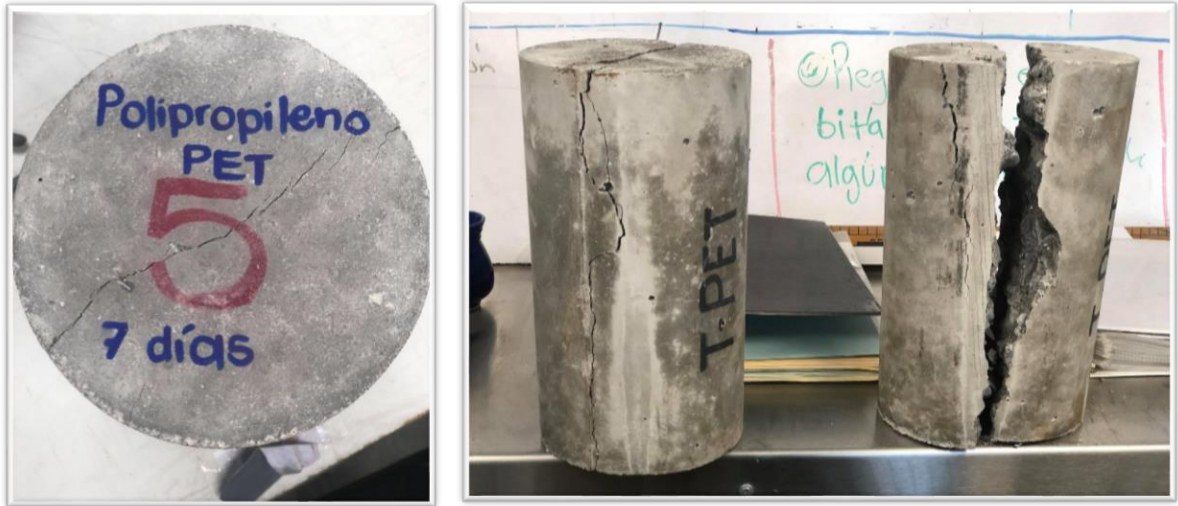


Figura 4.48. Cilindro fallado después de la aplicación de la carga. Fuente: Elaboración propia. el momento de la falla.

6. Se analiza el tipo de falla y la apariencia del concreto, *Figura 4.48.*



Figura 4.47. Colocación de espécimen en la máquina y aplicación de carga. Fuente: Elaboración propia.

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

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

Donde:

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

P = carga máxima aplicada, en Kgf.

L = longitud en cm.

d = diámetro en cm.

4.5.5 Absorción por Capilaridad (Porosidad Efectiva)

La absorción capilar se refiere al proceso mediante el cual el agua penetra en el concreto, es definida como la masa de agua por unidad de área y tiempo que puede ser absorbida en los espacios capilares cuando el concreto se encuentra en contacto con el agua en estado líquido. La absorción capilar representa la porosidad efectiva accesible al agua y por lo tanto los agentes agresivos que se encuentran en el ambiente. (NMX-C-530-ONNCCE-2018, 2018)

La propuesta de la metodología de ensayo se debe a Fagerlund, este describe la cinética de la absorción capilar de morteros y hormigones a través de 3 coeficientes: ("DURAR", 1998)

m = resistencia a la penetración del agua.

K = coeficiente de absorción capilar.

ξ_e = porosidad efectiva.

Equipo empleado:

- 5 muestras de concreto de 10 cm Ø x 5 cm de espesor.
- Horno de secado.

- Balanza con aproximación de 0.1 g.
- Vernier y cronómetro.
- Parrilla de gas.
- Material de sellado (80% parafina + 20% brea).
- Bolsas de plástico.
- Ligas.
- Brocha.
- Tela absorbente.
- Recipiente de almacenamiento con tapa.
- Esponja.
- Agua.

Procedimiento:

1. Extraemos las muestras de concreto de la pila de curado y las colocamos en el horno a una temperatura de 50°C durante 3 días.
2. Después de los 3 días, colocamos las muestras en un recipiente hermético sellado durante 15 días, con una separación que permita el flujo de aire.
3. Una vez cumplidos los 15 días, se extrajeron las muestras del recipiente y se pesaron antes de sellar los laterales.
4. Con ayuda del vernier se midieron el diámetro y la altura de cada muestra.
5. Preparamos el recipiente que mantendrá las muestras durante todo el ensayo, colocando la esponja en el fondo y cubriendo con agua esta hasta un nivel de 3 ± 1 mm por encima.
6. Calentamos el material de sellado hasta conseguir el estado líquido y sellamos los laterales completamente de cada espécimen



Figura 4.49 Secado y sellado de muestras de concreto. Fuente: Elaboración propia.

7. Colocamos la bolsa sujeta con la liga sobre la superficie que no estará expuesta al agua y pesamos las muestras, registrando como masa inicial (m_0).
8. Con ayuda del cronómetro, iniciamos la medida del tiempo, inmediatamente colocamos las muestras sobre la esponja, anotando hora y fecha del contacto con el agua.



Figura 4.50 Colocación de muestras sobre la esponja. Fuente: Elaboración propia.

9. Registramos cada masa en intervalos de tiempo de 60s, 5min, 10min, 20min, 30min, 60min, 2 horas, 3 horas, 4 horas, 5 horas, 6 horas, 24 horas, 48 horas, 72 horas, 96 horas, 120 horas, 144 horas, 168 horas, 192 horas después el primer contacto con el agua.

10. Retiramos el espécimen del recipiente, lo secamos con la tela y colocamos la muestra en la balanza, cuidando que la cara que está en contacto con el agua no está en contacto con el platillo de la balanza y registramos esta masa como m_t , de cada una de las muestras.
11. Al finalizar el ensayo, calculamos la absorción capilar y el índice de absorción.

Cálculos

Siguiendo la metodología que establece la red ("DURAR", 1998) calculamos tres coeficientes dados por Fagerlund, que son los siguientes:

- Coeficiente de la resistencia a la compresión del agua (m):

$$m = \frac{t}{z^2}, \text{ (s/m}^2\text{)}$$

Donde:

z = profundidad de penetración del agua al tiempo t .

- Coeficiente de absorción capilar (k):

$$k = \frac{(m_t - m_0)/A}{\sqrt{t}} \text{ (kg/m}^2 \text{ s}^{1/2}\text{)}$$

Donde:

m_0 = masa inicial del espécimen antes de ingresar en contacto con el agua, en kg.

m_t = masa del espécimen después de cada intervalo de tiempo, en kg A = área. expuesta del espécimen, en m^2 .

- Porosidad efectiva (ϵ_e):

$$\epsilon_e = \frac{k\sqrt{m}}{1000} (\%)$$

- Con los coeficientes ya mencionados, calculamos la Sorción Capilar (S):

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (\text{mm/h}^{1/2}) \text{ o } (\text{m/s}^{1/2})$$

La norma (NMX-C-504-ONNCCE-2015, 2015), establece el cálculo mediante el cual se obtiene el índice de absorción (I), es decir el “cambio de la masa dividida entre el producto del área transversal del espécimen por la densidad del agua”.

$$I = \frac{m_t - m_o}{a * d}$$

Donde:

I = índice de absorción, en mm

m_t = masa, en el tiempo t , en g

m_o = masa, en el tiempo o , en g

a = zona expuesta de la muestra, en mm^2

d = densidad del agua, en g/mm^3

4.5.6 Resistividad eléctrica del concreto hidráulico.

La necesidad de determinar y, por supuesto, alargar la vida útil del concreto, ha llevado a la aplicación de diversas pruebas que arrojen un nivel real de calidad del mismo, con base en diversos aspectos.

Una de éstas pruebas es la de Resistividad Eléctrica Húmeda (REH), mediante la cual se mide el grado de oposición al paso de un flujo de corriente inducida a través de un espécimen de concreto, que, en nuestro caso, se trata de cilindros de 10x20 cm y de 15x30 cm.

Algunos cuerpos tienen la propiedad de conductividad de la corriente eléctrica, estrictamente el concreto no es conductor, sin embargo, la porosidad de su composición permite el paso de humedad, y, siendo esta un conductor propicio, nos facilita la aplicación de la prueba REH y sus resultados nos dan cuenta de la mayor o menos capilaridad y, a su vez, de la calidad del concreto. (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019)

De acuerdo con la revista ALCONPAT, entendemos resistividad como un indicador del grado de impermeabilidad o resistencia al ingreso de sustancias agresivas a la mezcla (concreto). Dicho de otro modo, el grado de microporosidad que inhiba la degradación del acero por el paso de sustancias que lo amenacen.

La Resistividad Eléctrica se define como una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad, 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. Es función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. ("DURAR", 1998)

El ensayo de resistividad eléctrica realizado a los especímenes de la investigación (cilindros y vigas), fue el primer ensayo después de extraerlos de la pila de curado para posteriormente mantenerlos húmedos y así realizar la siguiente metodología bajo lo estipulado por la norma (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019)

Equipo empleado:

- Equipo medidor de dimensiones.
- Equipo “Resistómetro”.
- Placas metálicas
- Almohadillas absorbentes de agua

Procedimiento:

1. Considerando que ya se encuentran enumerados los especímenes de prueba, con ayuda de un flexómetro, se tomaron las dimensiones de cada espécimen, partiendo de las caras extremas donde se colocaron las placas metálicas (área de contacto) y posteriormente su parte longitudinal.
2. Se humedecieron las almohadillas para colocarlas entre las placas metálicas y el espécimen de concreto, colocamos un peso extra en la base superior para garantizar el contacto eléctrico.
3. Se realizó la conexión de las placas metálicas al resistómetro (*Figura 4.15*) y se colocó la muestra correspondiente dentro de las placas metálicas, considerando que dicha muestra debe estar húmeda.
4. A través de las placas metálicas colocadas a las caras laterales del espécimen, se le indujo una corriente (I), y registrando un voltaje (E), se obtuvo una resistencia eléctrica (Re). *Figura 4.14*.
5. Se registró la resistencia eléctrica dada en kΩ y se procedió a aplicar la siguiente fórmula para conocer la resistividad eléctrica.

Cálculos:

$$\rho = Re \left(\frac{A}{L} \right)$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica, en KΩ-cm (ohm-m).

“Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno”

R_e = Resistencia eléctrica, en $K\Omega$.

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

L = Longitud del espécimen, en cm.



Figura 4.13 Acomodo de placas metálicas y toma de lectura de resistencia eléctrica. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.13 Equipo utilizado para la prueba de Resistividad Eléctrica Húmeda. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Este capítulo se concentra la información de cada prueba aplicada a los diferentes especímenes elaborados con diferentes mezclas de concreto en estado fresco y endurecido, así como las características de los materiales que componen el concreto producido en el laboratorio y sus propiedades físicas mecánicas.

La concentración de esta información se llevó a cabo por medio de tablas de cálculo, las cuales se hicieron con base en las ecuaciones proporcionadas por la normativa vigente, cada espécimen mostró resultados característicos los cuales fueron proyectados en gráficos para así facilitar las correlaciones del material adicionado respecto a la mezcla control y concretar la tabla comparativa de los resultados de las cinco mezclas estudiadas

En ésta investigación se consideraron 5 tipos de mezclas con diferentes proporciones de fibra, a cada una de estas mezclas se les etiquetó según la cantidad de adición de fibra correspondiente, representada de la siguiente tabla para su identificación.

Tabla 5.1 Mezclas consideradas en la investigación.

Mezcla	Etiqueta
Mezcla Control.	TES
Mezcla con 0.4% de adición de PET.	0.4%-PET
Mezcla con 0.8% de adición de PET.	0.8%-PET
Mezcla con 1.2% de adición de PET .	1.2%-PET
Mezcla con % de adición de PET y % de fibra de polipropileno.	PP

5.1 Cemento

5.1.1 Determinación de la densidad del cemento hidráulico.

El análisis de la densidad del cemento se realizó en una muestra característica tal y como se consigue después de la fabricación y comercialización del cemento.

Se explica que la masa específica (peso específico, densidad) se presenta en megagramos por metro cúbico (Mg/m^3) o gramos por centímetro cúbico (g/cm^3), siendo el valor numérico el mismo en las dos unidades. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

La densidad del cemento varía de 3.10 hasta 3.25, con promedio de 3.15 Tn/m^3 . El valor de la densidad del cemento obtenido en durante la experimentación se encuentra dentro del rango de valores investigados.

Tabla 5.2 Resultados de densidad del cemento empleado en la investigación.

DENSIDAD DEL CEMENTO		
	Muestra 1	Muestra 2
PESO DEL CEMENTO	60.00 g	60.00 g
Li	0.90 cm^3	0.80 cm^3
Lf	20.60 cm^3	20.50 cm^3
VOLUMEN	19.70 cm^3	19.70 cm^3
DENSIDAD	3.05 g/cm^3	3.05 g/cm^3
PROMEDIO	3.046 g/cm^3	

5.2 Agregados pétreos

5.2.1 Agregados finos

La prueba para determinar la masa volumétrica de los agregados finos se realizó para los tres diferentes tipos de agregados utilizados durante la investigación, los cuáles son: Agregado Fino A (Arena blanca), Agregado Fino B (Arena negra) y Agregado Fino C (Arena combinada).

Se tomaron dos muestras representativas para cada una de ellas, obteniendo como resultado los siguientes datos:

5.2.1.1 Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca suelta de los agregados finos.

Tabla 5.3. Resultados de la determinación de MVSS de los agregados finos. Fuente: Elaboración propia.

DATOS	ARENA BLANCA (A)		ARENA NEGRA (B)		ARENA 50% BLANCA Y 50% NEGRA (C)	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Masa total (g)	5,300	5,310	5,565	5,535	5,455	5,460
Masa del recipiente (g)	1,840	1,840	1,840	1,840	1,890	1,890
Masa de arena (g)	3,460	3,470	3,725	3,695	3,565	3,570
Volumen del recipiente (cm ³)	2,787	2,787	2,787	2,787	2,759	2,759
MVSS (g/cm ³)	1.24	1.25	1.34	1.33	1.292	1.29
PROMEDIO	1.24 g/cm ³		1.33 g/cm ³		1.29 g/cm ³	

5.2.1.2 Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca varillada de los agregados finos.

Tabla 5.4. Resultados de la determinación de MVSV de los agregados finos. Fuente: Elaboración propia.

DATOS	ARENA BLANCA (A)		ARENA NEGRA (B)		ARENA 50% BLANCA Y 50% NEGRA (C)	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Masa total (g)	5710	5720	5855	5850	5900	5895
Masa del recipiente (g)	1840	1840	1840	1840	1890	1890
Masa de arena (g)	3870	3880	4015	4010	4010	4005
Volumen recipiente (cm ³)	2787	2787	2787	2787	2759	2759
MVSV (g/cm ³)	1.389	1.392	1.441	1.439	1.453	1.452
PROMEDIO	1.390 g/cm ³		1.440 g/cm ³		1.453 g/cm ³	

5.2.1.3 Determinación de la humedad de absorción del agregado fino.

Para determinar la cantidad de agua que absorbe un agregado fino, expresada en porcentaje, se siguió la metodología descrita por la normativa (NMX-C-165-ONNCCE, 2004), obteniendo como resultado los siguientes valores:

“Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno”

Tabla 5.5. Resultados de la determinación de la humedad de absorción de los agregados finos. Fuente: Elaboración propia.

DATOS	ARENA BLANCA (A)		ARENA NEGRA (B)		ARENA 50% BLANCA Y 50% NEGRA (C)	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
PESO HUMEDO (g)	300.00	300.00	320.00	306.50	300.00	300.00
PESO SECO (g)	285.40	285.60	304.00	290.50	284.90	285.10
HUMEDAD (g)	14.60	14.40	16.00	16.00	15.10	14.90
% ABS.	5.12%	5.04%	5.26%	5.51%	5.30%	5.23%
PROMEDIO	5.08%		5.39%		5.26%	

5.2.1.4 Determinación de la densidad relativa en agregado fino.

Tabla 5.6. Resultados de la determinación de la densidad relativa en agregados finos. Fuente: Elaboración propia.

ARENA 50% BLANCA Y 50% NEGRA (C)		
	Muestra 1	Muestra 2
MPA (g)	771.20	772.80
MSSS (g)	300.00	300.00
MPMA (g)	939.50	940.50
DRSSS	2.28	2.27
PROMEDIO	2.27	

5.2.1.5 Análisis granulométrico de agregados finos para concreto

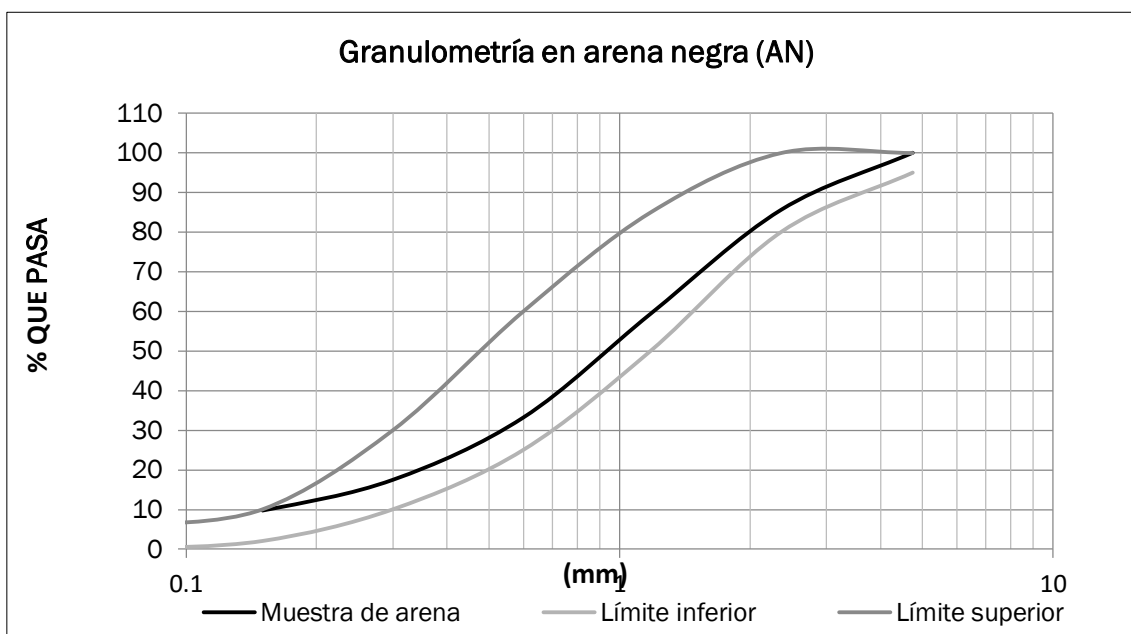
El agregado fino debe cumplir con los límites granulométricos que especifica la norma (NMX-C-073-ONNCCE, Industria de la Construcción- Agregados-Masa Volumétrica-Método de Prueba, 2004), los cuales son:

- a) Estar dentro de los límites establecidos en el capítulo 4 (*Tabla 5.7*).
- b) El módulo de finura debe estar comprendido entre los parámetros 2.3 y 3.1.

Tabla 5.7. Resultados del análisis granulométrico en arena negra. Fuente: Elaboración propia.

MUESTRA PROMEDIO ARENA NEGRA			
PESO DE LA MUESTRA:	500.00 Kg		
MALLA	PEO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO
	(g)	%	%
8	72.00	14.40	14.40
16	131.10	26.22	40.62
30	130.90	26.18	66.80
50	78.60	15.72	82.52
100	38.80	7.76	90.28
200	25.40	5.08	95.36
CHAROLA	23.20	4.64	100.00
SUMAS	500.00	100.00	---
MÓDULO DE FINURA			2.95

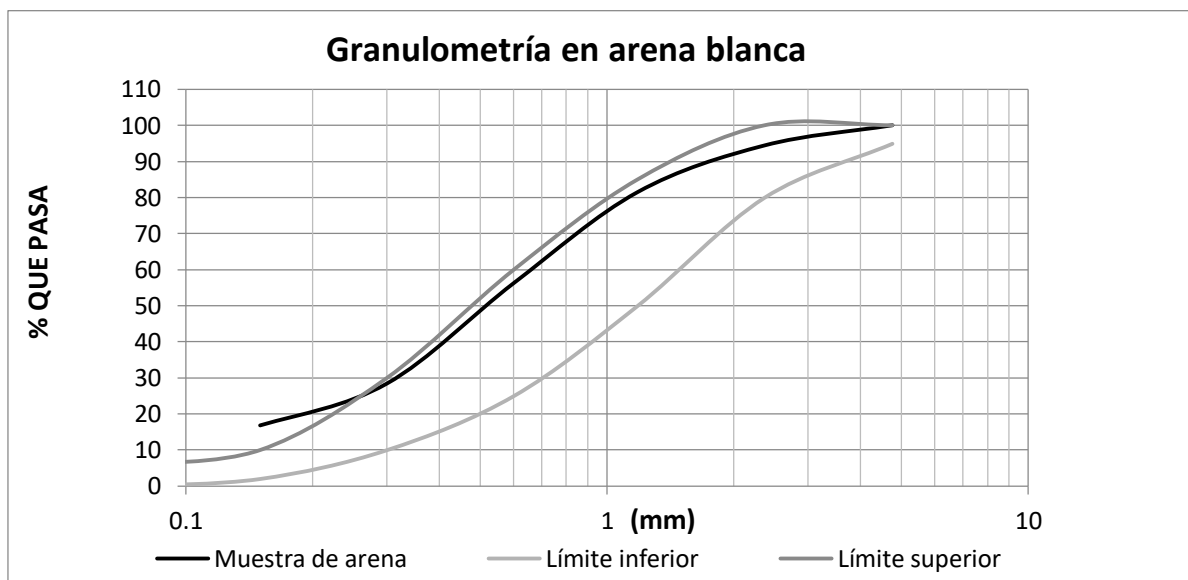
"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"



Gráfica 5.1. Gráfico de límites en arena negra. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.8. Resultados del análisis granulométrico en arena blanca. Fuente: Elaboración propia.

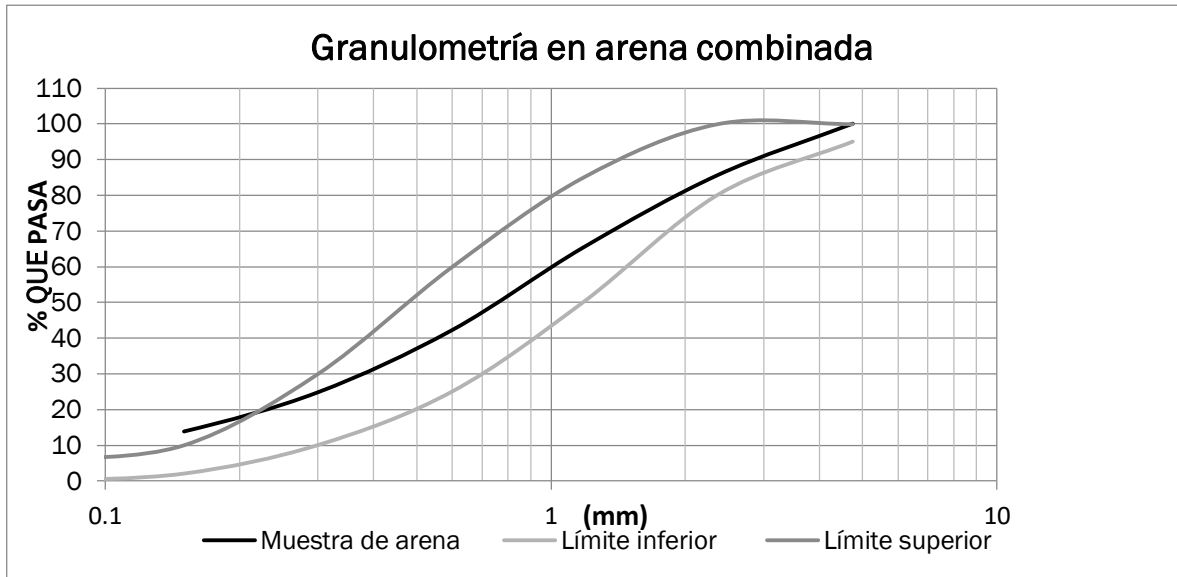
MUESTRA PROMEDIO ARENA BLANCA			
PESO DE LA MUESTRA:	500.00 Kg		
	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO
MALLA	(g)	%	%
8	27.95	5.59	5.59
16	64.50	12.90	18.49
30	125.70	25.14	43.63
50	138.85	27.77	71.40
100	57.90	11.58	82.98
200	44.10	8.82	91.80
CHAROLA	40.30	8.06	99.86
SUMAS	499.30	99.86	---
MÓDULO DE FINURA			2.22



Gráfica 5.2. Gráfico de límites en arena blanca. Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.9. Resultados del análisis granulométrico en arena combinada. Fuente: Elaboración propia.

MUESTRA PROMEDIO ARENA COMBINADA			
PESO DE LA MUESTRA:	300.00 Kg		
MALLA	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO
	(g)	%	%
8	43.13	14.38	14.38
16	60.40	20.13	34.51
30	68.93	22.98	57.49
50	52.00	17.33	74.82
100	32.83	10.94	85.76
200	21.40	7.13	92.90
CHAROLA	20.33	6.78	99.67
SUMAS	299.02	99.67	---
MÓDULO DE FINURA			2.67



Gráfica 5.3. Gráfico de límites en arena combinada. Fuente: Elaboración propia

5.2.1.6 Determinación de la sedimentación en agregados finos.

Tabla 5.10. Resultados de la determinación de sedimentación en agregados finos.

	MUESTRA	RESULTADO
Arena blanca (A)	1-3	Aceptable
Arena negra (B)	1-2	Aceptable

Observaciones:

- Si el nivel del material fino rebasa la marca de los 444 ml, el material se reporta con exceso de finos.
- Si el material fino no rebasa la marca de los 444 ml, el material se reporta como aceptable.

5.2.2 Agregado grueso

5.2.2.1 Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca suelta de los agregados gruesos.

Tabla 5.11. Resultados de la determinación de MVSS en agregado grueso. Fuente: Elaboración propia.

DATOS	GRAVA	
	Muestra 1	Muestra 2
Masa total (g)	18,590.00	18,390.00
Masa del recipiente (g)	2,930.00	2,930.00
Masa de la grava (g)	15,660.00	15,460.00
Volumen recipiente (cm ³)	10,600.00	10,600.00
MVSS (g/cm ³)	1.48	1.46
PROMEDIO	1.47 g/cm³	

5.2.2.2 Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica seca varillada de los agregados gruesos.

Tabla 5.12. Resultados de la determinación de MVSV en agregado grueso. Fuente: Elaboración propia

DATOS	GRAVA	
	Muestra 1	Muestra 2
Masa total (g)	19,720.00	19,800.00
Masa del recipiente (g)	2,930.00	2,930.00
Masa de la grava (g)	16,790.00	16,870.00
Volumen recipiente (cm ³)	10,600.00	10,600.00
MVSV (g/cm ³)	1.58	1.59
PROMEDIO	1.59 g/cm	

5.2.2.3 Determinación de la humedad de absorción del agregado grueso

Tabla 5.13. Resultados de la determinación de humedad de absorción en agregado grueso. Fuente: Elaboración propia

GRAVA		
DATOS	Muestra 1	Muestra 2
MASA HÚMEDA	307.60	307.00
MASA SECA	300.80	300.60
HUMEDAD	6.80	6.40
% ABS.	2.26	2.1
PROMEDIO	2.19%	

Especificaciones: (NMX-C-164-ONNCCE-2014, 2014)

Tipo de absorción	% H. Absorción.
BAJA	Menos de 2%
MEDIA	Entre 2 y 4%
ALTA	Más de 4%

Por lo cual, establecemos que nuestro agregado grueso pertenece a un tipo de absorción “MEDIOS”.

5.2.2.4 Determinación de la densidad relativa en agregado grueso.

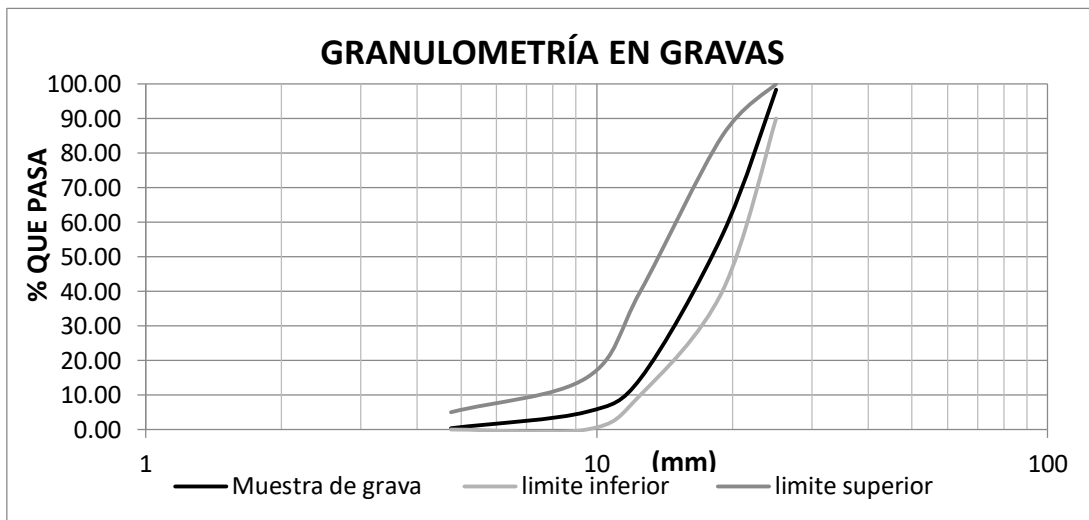
Tabla 5.14. Resultados de la determinación de la densidad relativa en agregado grueso. Fuente: Elaboración propia

GRAVA		
	Muestra 1	Muestra 2
VOLUMEN DESALOJADO (cm ³)	110.00	112.00
MASA HÚMEDA (g)	300.40	301.80
DENSIDAD RELATIVA (g/cm ³)	2.73	2.69
PROMEDIO	2.713 g/cm ³	

5.2.2.5 Análisis granulométrico de agregados gruesos para concreto.

Tabla 5.15. Resultados de la determinación del análisis granulométrico en agregado grueso. Fuente: Elaboración propia.

Malla	Masa retenida	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
1 "	232.50	1.51	1.51	98.49
3/4 "	6495.00	42.13	43.64	56.36
1/2 "	6425.00	41.67	85.31	14.69
3/8 "	1487.50	9.65	94.96	5.04
No. 4	732.50	4.75	99.71	0.29
PASA No.4	45.00	0.29	100.00	0.00
Suma	15417.50			



Gráfica 5.4. Gráfico de límites en agregado grueso. Fuente: Elaboración propia.

5.3 Agua.

Como ya se mencionó en los capítulos anteriores, el agua ocupa un papel importante en el concreto, es por eso que se debe dar una visión generalizada sobre las características de ésta. En la siguiente tabla se presentan los valores obtenidos durante la experimentación, los cuales fueron realizados el día 18 del mes de mayo

“Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno”

del presente año, por el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, arrojando los siguientes resultados.

Tabla 5.16. Resultados de pruebas realizadas al agua.

PARÁMETRO/ UNIDADES	RESULTADO	LÍMITE MÁXIMO NMX- C-122-ONNCCE- 2004		MÉTODO DE PRUEBA
Sólidos en suspensión (SST mg/l)	1	200	cumple	NMX-AA-034-SCFI- 2001
Sólidos totales (ST mg/l)	436			NMX-AA-034-SCFI- 2001
Total, de impurezas en solución Sólidos disueltos totales (SDT mg/l)	435	3500	cumple	NMX-AA-034-SCFI- 2001
Cloruros Cl (mg/l)	14.9	400	cumple	NMX-AA-073-SCFI- 2001
Sulfatos como SO ₄ (mg/l)	10	3000	cumple	NMX-AA-074-1981
Dureza magnésica (mg/l CaCO ₃)	38.3	100	cumple	NMX-AA-072-SCFI- 2001
Dureza cálcica (mg/l CaCO ₃)	27			NMX-AA-072-SCFI- 2001
Dureza total (mg/l CaCO ₃)	65.25			NMX-AA-072-SCFI- 2001

"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"

Carbonatos CO ₃ (mg/l)	1.34	600	cumple	NMX-AA-036-SCFI-2001
Alcalinidad total (mg/l CaCO ₃)	270	300	cumple	NMX-AA-036-SCFI-2001
Alcalinidad a la fenolftaleína (mg/l)	0.67			NMX-AA-036-SCFI-2001
Hidróxidos OH (mg/l)	0			NMX-AA-036-SCFI-2001
Bicarbonatos HCO ₃ (mg/l)	268.66			NMX-AA-036-SCFI-2001
Grasa o aceites (mg/l)	0	0	cumple	NMX-AA-005-SCFI-2000
Materia Orgánica como DQO (mg/l)	0	150	cumple	NMX-AA-030-SCFI-2001
Potencial de hidrógeno (unidades pH)	6.5	>6	cumple	NMX-AA-008-SCFI-2000
Conductividad eléctrica (µs/cm)	442			Electrométrico
Oxígeno disuelto (mg O ₂ /l)	3.75			Electrométrico
Salinidad (%)	0.2			Electrométrico
Cloro total (mg/l)	0			Comparación colorimétrica
Cloro libre (mg/l)	0			Comparación colorimétrica
Temperatura de análisis (°C)	21			NMX-AA-007-SCFI-2000

De lo cual se determinó que la muestra de agua analizada por éste laboratorio cumple con los límites máximos de calidad, establecidos en la Norma Mexicana correspondiente.

5.4 Concreto Freso

5.4.1 Revenimiento del concreto de cemento hidráulico.

En la *Tabla 5.17* se muestran los valores obtenidos de la prueba de revenimiento de cada una de las mezclas.

Tabla 5.17. Resultados de revenimiento en mezclas. Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	Revenimiento nominal (cm)	Revenimiento real (cm)	Tolerancia (cm)
TEST	7.5	8	2.5
0.4%-PET	7.5	10	2.5
0.8%-PET	7.5	12	2.5
1.2%-PET	7.5	7	2.5
PET-P	7.5	9	2.5

Se observa que los valores de revenimiento de las mezclas TEST, 0.4%-PET y PET-P se encuentran en el límite superior de la tolerancia. La mezcla 1.2%-PET está dentro del límite, pero es la mezcla más densa. La mezcla 0.8%-PET excede el límite, siendo la mezcla que más fluida.

5.4.2 Índice de PH

De acuerdo con los indicadores para medir el potencial de hidrogeno (pH), el cual se presenta en la *Figura 5.1*. Todas las mezclas presentaron un valor de entre 12 y 13, lo cual indica que es un concreto sano, por lo que la adición de fibras no modifico su composición.



Figura 5.1 Tabla indicadora de Ph.

Fuente: Elaboración propia.

5.5 Concreto endurecido

5.5.1 PRUEBAS FISICO-MECÁNICAS.

5.5.1.1 Resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

Una vez obtenidos los datos de resistencia a compresión se procedió a realizar un promedio entre los especímenes de cada mezcla, recordando que se obtuvieron lecturas de 3 especímenes por mezcla, por edad.

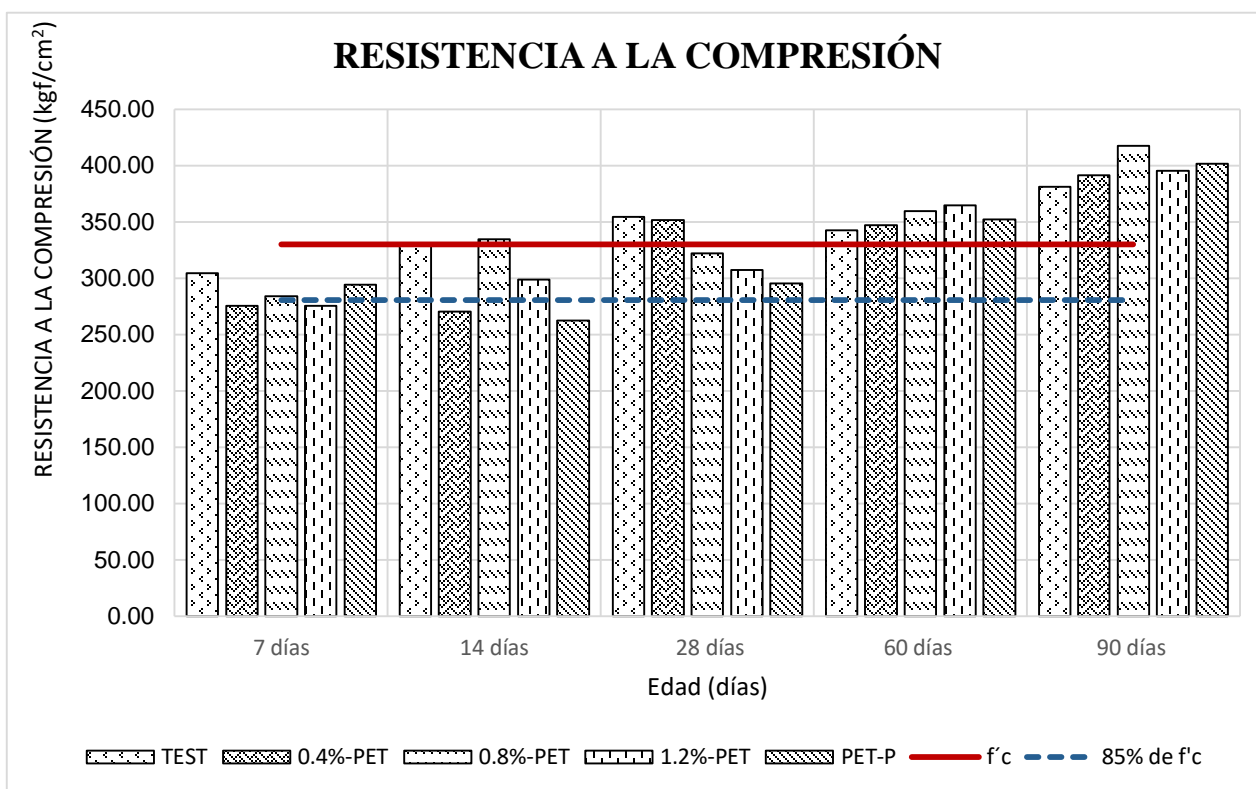
La *Tabla 5.18* muestra los resultados promedios obtenidos.

"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"

Tabla 5.18. Resultados promedios de especímenes clasificados por mezcla y por edad.

MUESTRA	7 días	14 días	28 días	60 días	90 días
TEST	304.24	329.34	354.19	342.27	381.09
0.4%-PET	275.57	270.23	351.34	347.09	391.16
0.8%-PET	283.72	334.31	322.04	359.37	417.15
1.2%-PET	275.13	298.90	307.11	364.34	395.19
PET-P	293.88	262.51	295.43	352.15	401.70
f'c	330	330	330	330	330

Se realizó la *gráfica 5.5* con la finalidad tener una mejor apreciación y comparación entre las diferentes mezclas.



Gráfica 5.5. Resultados obtenidos de esfuerzo a compresión en especímenes de concreto.

En la *Gráfica 5.5* se puede observar que, al pasar los 7 días, todas las mezclas se encuentran por debajo de la línea que representa nuestro diseño, lo cual es de esperarse, ya que el concreto tarda 28 días en alcanzar su máxima resistencia.

A los 28 días las mezclas Testigo y 0.4%-PET superan el valor de diseño y las mezclas de 1.2%-PET y PET-P se mantienen por debajo de la línea que representa los 330 kgf/cm².

De acuerdo a la norma (NMX-C-083-ONNCCE, 2014) las mezclas deben cumplir con el 85% del valor del $f'c$ de diseño como mínimo, la cual está representada con una línea punteada azul en la *Gráfica 5.5*, por lo que podemos establecer que las mezclas de esta investigación cumplen con lo mencionado.

5.5.1.2 Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto.

Los resultados de la prueba de tensión por compresión diametral realizada a las edades de 7, 28 y 90 días de cilindros de concreto se encuentran plasmados en la *Tabla 5.19*.

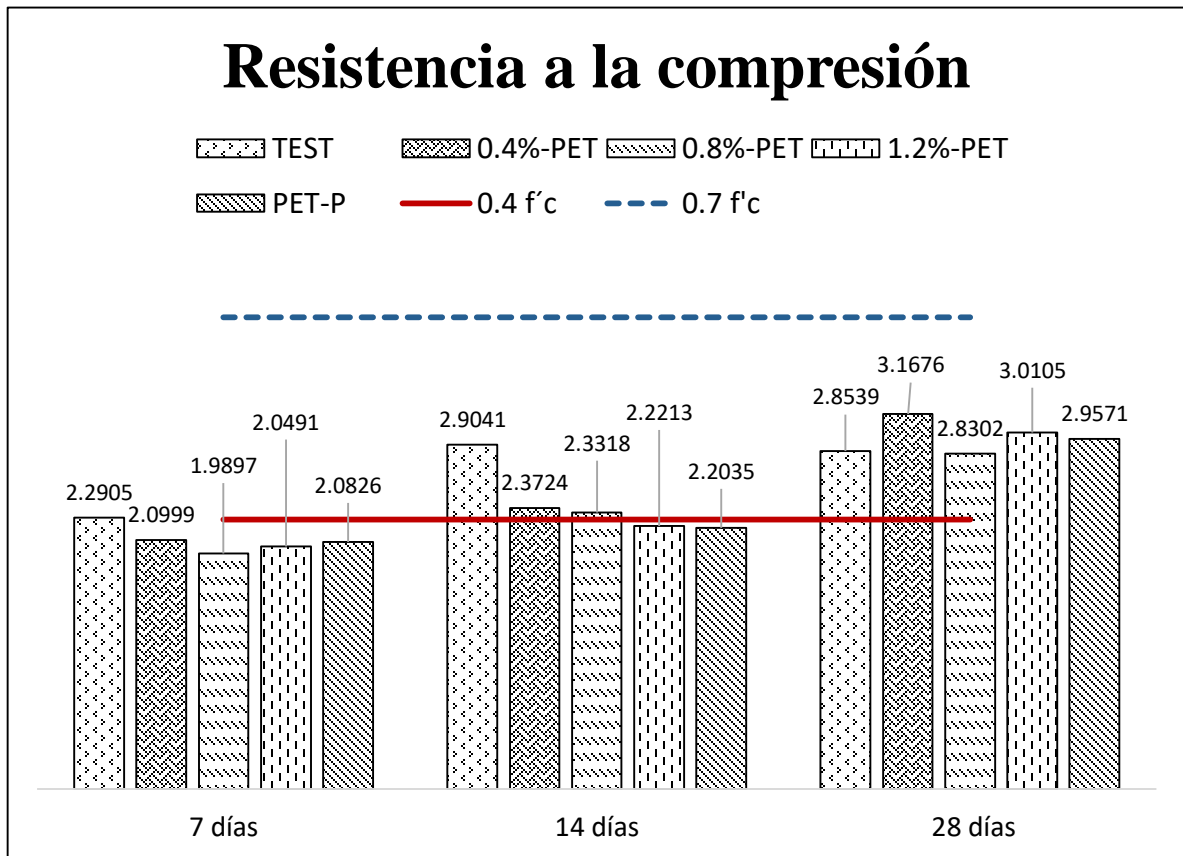
Tabla 5.19. Resultados de la prueba de tensión por compresión Fuente: Elaboración propia.

MUESTRA	7 días	28 días	90 días
TEST	23.35	29.61	29.10
0.4%-PET	21.41	24.19	32.30
0.8%-PET	20.28	23.78	28.86
1.2%-PET	20.89	22.66	30.69
PET-P	21.24	22.47	30.15
0.4 $f'c$	7.3	7.3	7.3
0.7 $f'c$	12.7	12.7	12.7

Es bien sabido que estos valores son menos a los adquiridos en la prueba de compresión, sin embargo, es importante realizarla ya que éstos valores revelan la resistencia a fallas por producto de contracciones en el concreto.

La resistencia a la tensión (resistencia a tracción, resistencia en tracción) directa del concreto es aproximadamente de 8% a 12% de la resistencia a compresión y se estima normalmente como siendo de 0.4 a 0.7 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en Megapascales o de 1.3 a 2.2 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kilogramos por centímetro cúbico. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

En la gráfica 5.6 se puede observar que a los 28 días todas las mezclas se encontraron dentro de los valores entre 0.4 y 0.7 veces la raíz cuadrada del f'_c de diseño.



Gráfica 5.6 Resistencia a la tensión indirecta en especímenes de concreto de 15x30 cm.

La mezcla que tuvo una mejor respuesta a la prueba de tensión indirecta, fue la mezcla número dos, “0.4% PET” con un valor de 3.1679 MPa a la edad de 28 días. De acuerdo con lo que indica (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004), nuestro concreto cumple con la resistencia, siendo de 0.4 a 0.7 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en Megapascales, líneas que están representadas en color rojo y azul de la *Gráfica 5.6*.

Todas las mezclas cumplen con el rango especificado a los 28 días.

5.5.1.3 Absorción por Capilaridad (Porosidad Efectiva)

Este ensayo se realizó a una edad de 28 días, bajo las recomendaciones de la norma (NMX-C-504-ONNCCE-2015, 2015) y la red ("DURAR", 1998), en especímenes de concreto de 10 cm de diámetro.

La prueba de absorción por Capilaridad consiste en graficar una serie de puntos con la raíz cuadrada del tiempo en segundos, como se muestra en la gráfica...y posteriormente realizar una retracción lineal para obtener un valor de Sorción Capilar Gráfica..., éste procedimiento se realizó para 3 muestras de concreto por cada mezcla, es decir, 15 rodajas de concreto.

En la *Tabla 5.20* se muestran las especificaciones de la penetración del agua que establece la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2018), mostrando una altura media de 3 mm para condiciones de exposición ambiental en zona rural/urbana.

Tabla 5.20 Especificaciones de la penetración de agua.

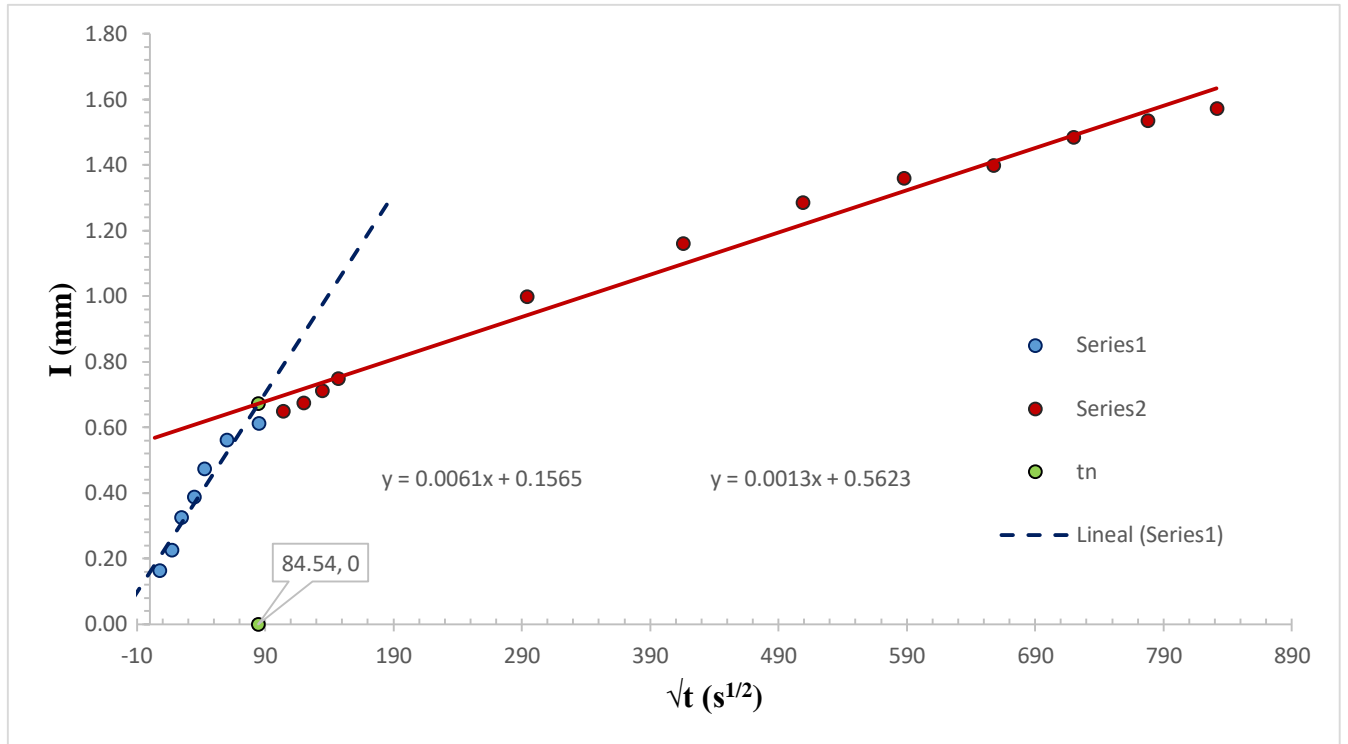
Clase de exposición ambiental	Especificación para la altura máxima	Especificación para la altura media
C	50mm	≤30mm
M, CI, Q y F	30mm	≤20mm

A continuación, en la *Tabla 5.21*, se describe el proceso experimental de la primera muestra de concreto, especificando la metodología y aplicando este mismo proceso para las demás muestras, obteniendo así una serie de resultados, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 5.21. Especificaciones del cilindro testigo sometido al proceso experimentación Fuente: Elaboración propia.

ESPÉCIMEN DE CONCRETO DE CONCRETO:			1-TEST		
Relación a/c=			0.51		
Altura (z):			49 mm		
Diámetro			101 mm		
Área (A ₀):			8011.847 mm ²		
Tiempo (t)		\sqrt{t}	Masa (m)	Δm	l
min	s	s ^{^(1/2)}	g	g	mm
0	0		828.20	0.000	0.00
1	60	8	829.50	1.300	0.16
5	300	17	830.00	1.800	0.22
10	600	24	830.80	2.600	0.32
20	1200	35	831.30	3.100	0.39
30	1800	42	832.00	3.800	0.47
60	3600	60	832.70	4.500	0.56
120	7200	85	833.10	4.900	0.61
180	10800	104	833.40	5.200	0.65
240	14400	120	833.60	5.400	0.67
300	18000	134	833.90	5.700	0.71
360	21600	147	834.20	6.000	0.75
1440	86400	294	836.20	8.000	1.00
2880	172800	416	837.50	9.300	1.16
4320	259200	509	838.50	10.300	1.29
5760	345600	588	839.10	10.900	1.36
7200	432000	657	839.40	11.200	1.40
8640	518400	720	840.10	11.900	1.49
10080	604800	778	840.50	12.300	1.54
11520	691200	831	840.80	12.600	1.57

Con la serie de datos de la *Tabla 5.21* se procedió a graficar los resultados de la raíz cuadrada del tiempo en relación con el índice de absorción, obteniendo como resultado la *gráfica 5.7*.



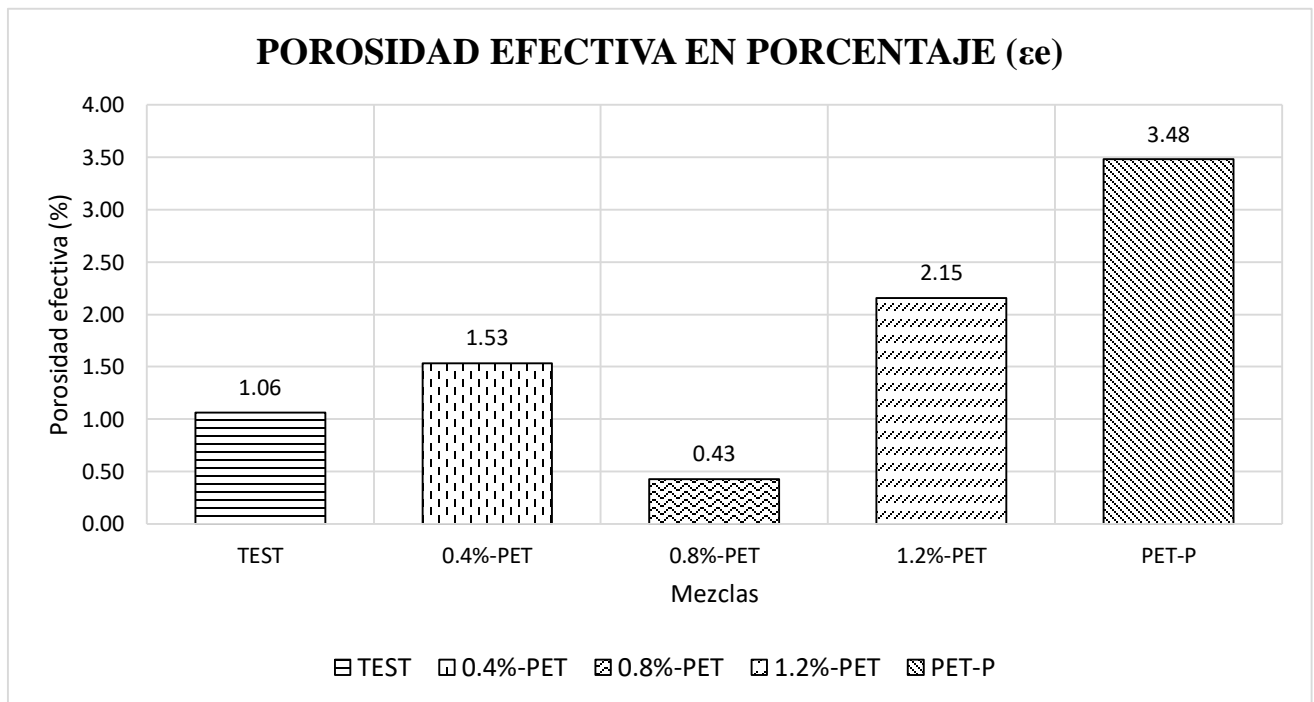
Gráfica 5.7. Líneas de tendencia proyectadas en gráfica. Fuente: Elaboración propia.

En la *Gráfica 5.7* se puede apreciar la primera línea de tendencia (azul), la cual indica la absorción inicial durante las primeras 24 horas. La segunda línea de tendencia (rojo), indica la absorción secundaria durante los 7 días restantes. En ésta gráfica también se integra la intercepción de las dos líneas de tendencia, ésta nos indica una altura media de 0.672 mm, siendo inferior a 30mm, como lo indicado en la *Tabla 5.20*, situando el espécimen concreto 1-TEST en un ambiente C (Ambiente expuesto al ataque por carbonatación) según recomendaciones de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2018).

Una vez obtenidas las líneas de tendencia, así como las coordenadas del punto de intersección éstas nos permiten obtener los valores de porosidad efectiva. En la tabla... se muestra los promedios de los resultados de la porosidad efectiva en las diferentes mezclas de concreto elaboradas para esta investigación calculados con base en los parámetros indicados en la norma (NMX-C-504-ONNCCE, 2015) y la Red ("DURAR", 1998).

Tabla 5.22. Resultados de porosidad efectiva expresada en porcentaje. Fuente: Elaboración propia.

MUESTRA	POROSIDAD EFECTIVA EN PORCENTAJE (ϵ_e)
TEST	1.06
0.4%-PET	1.53
0.8%-PET	0.43
1.2%-PET	2.15
PET-P	3.48



Gráfica 5.8. Resultados de porosidad efectiva expresada en porcentaje. Fuente: Elaboración propia.

En la *Gráfica 5.8* se observa que la mezcla 0.8%-PET tiene el menor porcentaje de porosidad efectiva, con un 0.43%, en cambio, la mezcla PET-P presenta un mayor valor de porosidad efectiva, con un valor de 3.48%, resulta ser la mezcla con una mayor porosidad efectiva.

5.5.2 Resistividad eléctrica del concreto hidráulico.

La resistividad eléctrica se define como el fenómeno de oposición al paso de la corriente a través de diferentes materiales, éste corresponde al recíproco de su conductividad. El comportamiento de resistencia se basa en la Ley de Ohm, la cual, según (Juárez, 2019) describe un comportamiento lineal entre la resistencia, la intensidad y la diferencia de potencial.

La resistividad eléctrica depende principalmente 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 en función de variables como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. (Carmen Andrade, 2000)

Para esta investigación, se analizaron 5 mezclas de concreto con diferente porcentaje de adición de fibra y se realizaron mediciones de resistencia eléctrica por el método directo con un resistómetro marca Nilsson modelo 400, mediante el cual se pueden obtener los valores de la resistencia en cada una de las muestras de concreto, obteniendo de 2 a 3 lecturas de las cuales se obtuvo un valor promedio. A continuación, se presentan los resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las cinco mezclas de concreto a diferentes edades.

“Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno”

Tabla 5.23. Resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las cinco mezclas de concreto a la edad de 7 días.

Resistividad (ρ) a los 7 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm ²)	Resistividad (ρ)		Resistividad (ρ) k Ω -cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (k Ω)	ρ (k Ω -cm)	
1	TEST	1-1	30.1	15	176.71	0.728	4.274	4.072
		1-2	30	15	176.71	0.681	4.011	
		1-3	29.9	15	176.71	0.665	3.930	
2	0.4%-PET	2-1	30.4	15	176.71	0.63	3.662	3.504
		2-2	30.5	15	176.71	0.572	3.314	
		2-3	30	15	176.71	0.6	3.534	
3	0.8%-PET	3-1	30.1	15	176.71	0.688	4.039	3.980
		3-2	29.05	15	176.71	0.66	4.015	
		3-3	30.05	15	176.71	0.661	3.887	
4	1.2%-PET	4-1	30	15	176.71	0.68	4.006	3.911
		4-2	30.4	15	176.71	0.635	3.691	
		4-3	30	15	176.71	0.685	4.035	
5	PET-P	5-1	29.8	15	176.71	0.56	3.321	3.546
		5-2	29.9	15	176.71	0.61	3.605	
		5-3	30	15	176.71	0.63	3.711	

Tabla 5.24. Resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las cinco mezclas de concreto a la edad de 14 días.

Resistividad (ρ) a los 14 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm ²)	Resistividad (ρ)		Resistividad (ρ) k Ω -cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (k Ω)	ρ (k Ω -cm)	
1	TEST	1-1	30	15	176.71	0.81	4.771	4.635
		1-2	29.85	15	176.71	0.748	4.428	
		1-3	30.5	15	176.71	0.812	4.705	
2	0.4%-PET	2-1	30	15	176.71	0.815	4.801	4.746
		2-2	29.9	15	176.71	0.8	4.728	
		2-3	29.9	15	176.71	0.797	4.710	
3	0.8%-PET	3-1	30.35	15	176.71	0.79	4.600	4.637
		3-2	30.55	15	176.71	0.805	4.656	
		3-3	30	15	176.71	0.79	4.653	
4	1.2%-PET	4-1	30.4	15	176.71	0.85	4.941	5.177
		4-2	30	14.9	174.37	0.93	5.405	
		4-3	30	15	176.71	0.88	5.184	
5	PET-P	5-1	30	15	176.71	0.705	4.153	4.152
		5-2	29.8	15	176.71	0.66	3.914	
		5-3	30	15	176.71	0.745	4.388	

"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"

Tabla 5.25. Resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las cinco mezclas de concreto a la edad de 28 días.

Resistividad (ρ) a los 28 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área	Resistividad (ρ)		Resistividad (ρ)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	(cm ²)	Re (k Ω)	ρ (k Ω -cm)	k Ω -cm
1	TEST	1-1	29.9	14.95	175.54	1.15	6.751	6.919
		1-2	29.9	14.95	175.54	1.3	7.632	
		1-3	30.5	15	176.71	1.1	6.373	
2	0.4%-PET	2-1	30.1	15	176.71	1.2	7.045	6.747
		2-2	30.4	15	176.71	1.05	6.104	
		2-3	29.9	15	176.71	1.2	7.092	
3	0.8%-PET	3-1	29.85	15	176.71	1.28	7.578	7.061
		3-2	30	15	176.71	1.15	6.774	
		3-3	29.75	15	176.71	1.15	6.831	
4	1.2%-PET	4-1	30.1	15	176.71	1.12	6.575	6.686
		4-2	30.1	15	176.71	1.2	7.045	
		4-3	30.2	15	176.71	1.1	6.437	
5	PET-P	5-1	30	15	176.71	1.05	6.185	6.483
		5-2	29.9	15	176.71	1.1	6.501	
		5-3	30.05	15	176.71	1.15	6.763	

Tabla 5.26. Resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las cinco mezclas de concreto a la edad de 60 días.

Resistividad (ρ) a los 60 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área	Resistividad (ρ)		Resistividad (ρ)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	(cm ²)	Re (k Ω)	ρ (k Ω -cm)	k Ω -cm
1	TEST	1-1	30	15	176.71	1.7	10.014	9.916
		1-2	30.1	15	176.71	1.65	9.687	
		1-3	29.9	15	176.71	1.7	10.047	
2	0.4%-PET	2-1	30.2	15	176.71	1.8	10.533	10.470
		2-2	30.1	15	176.71	1.8	10.568	
		2-3	30	15	176.71	1.75	10.308	
3	0.8%-PET	3-1	30.1	15	176.71	1.65	9.687	9.897
		3-2	30	14.97	176.01	1.7	9.974	
		3-3	29.95	15	176.71	1.7	10.031	
4	1.2%-PET	4-1	30.05	15	176.71	2	11.761	12.123
		4-2	30.1	15.02	177.19	2.1	12.362	
		4-3	30.1	14.95	175.54	2.1	12.247	
5	PET-P	5-1	29.9	15	176.71	1.8	10.638	11.212
		5-2	30.1	14.95	175.54	2.05	11.955	
		5-3	30	14.9	174.37	1.9	11.043	

“Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno”

Tabla 5.27. Resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las cinco mezclas de concreto a la edad de 90 días.

Resistividad (ρ) a los 90 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área	Resistividad (ρ)		Resistividad (ρ)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	(cm ²)	Re (k Ω)	ρ (k Ω -cm)	k Ω -cm
1	TEST	1-1	30	14.98	176.24	2.1	12.337	13.906
		1-2	30.5	15.25	182.65	2.5	14.972	
		1-3	30.5	15.27	183.13	2.4	14.411	
2	0.4%-PET	2-1	30.1	15	176.71	2.1	12.329	12.855
		2-2	30.1	15.19	181.22	2.5	15.051	
		2-3	29.9	14.97	176.01	1.9	11.184	
3	0.8%-PET	3-1	30.25	15	176.71	2.4	14.020	13.637
		3-2	30	15	176.71	2.3	13.548	
		3-3	30.4	15.15	180.27	2.25	13.342	
4	1.2%-PET	4-1	31.1	15	176.71	2.6	14.774	14.422
		4-2	31.1	15.1	179.08	2.8	16.123	
		4-3	30	15	176.71	2.1	12.370	
5	PET-P	5-1	30.15	15	176.71	2.2	12.895	13.706
		5-2	30	15	176.71	2.2	12.959	
		5-3	30.5	15.1	179.08	2.6	15.266	

Tabla 5.28. Resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las cinco mezclas de concreto a la edad de 121 días.

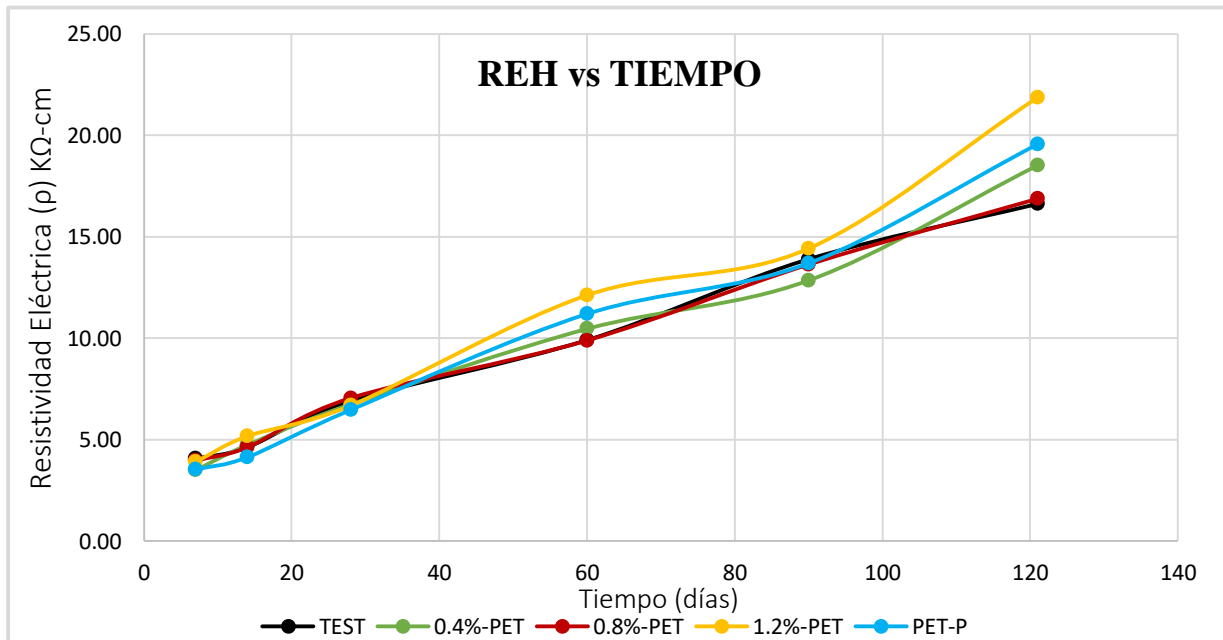
Resistividad (ρ) a los 121 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área	Resistividad (ρ)		Resistividad (ρ)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	(cm ²)	Re (k Ω)	ρ (k Ω -cm)	k Ω -cm
1	TEST	1-1	20	10.05	79.33	4.25	16.857	16.635
		1-2	20	9.9	76.98	4.25	16.358	
		1-3	20	10	78.54	4.25	16.690	
2	0.4%-PET	2-1	20	10	78.54	4.7	18.457	18.522
		2-2	20	10	78.54	4.75	18.653	
		2-3	20	10	78.54	4.7	18.457	
3	0.8%-PET	3-1	20	9.95	77.76	4.3	16.718	16.876
		3-2	20.2	10	78.54	4.35	16.913	
		3-3	20.1	10	78.54	4.35	16.997	
4	1.2%-PET	4-1	20	10	78.54	5.5	21.598	21.860
		4-2	20	10	78.54	5.6	21.991	
		4-3	20	10	78.54	5.6	21.991	
5	PET-P	5-1	19.9	10.1	80.12	4.9	19.728	19.565
		5-2	20	10.1	80.12	4.9	19.629	
		5-3	19.9	10	78.54	4.9	19.339	

Como se puede observar en las tablas anteriores se obtuvo un valor promedio de los 3 especímenes probados de cada mezcla de concreto a los 7, 14, 28, 60, 90, y 121, días. A continuación, en la *Tabla 5.29* se muestran los valores promedios de cada mezcla.

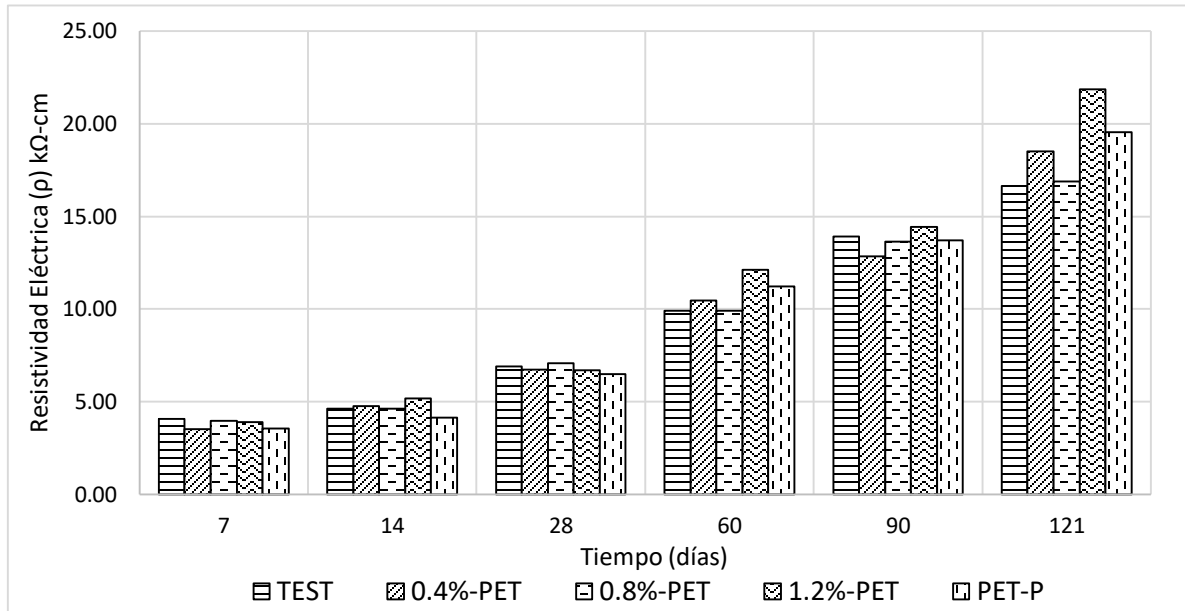
Tabla 5.29. Valores promediados de las 5 mezclas en estudio.

Resistividad Eléctrica promedio ρ (k Ω -cm)							
Número	Mezcla	Edad en días					
		7	14	28	60	90	121
1	TEST	4.07	4.63	6.92	9.92	13.91	16.63
2	0.4%-PET	3.50	4.75	6.75	10.47	12.85	18.52
3	0.8%-PET	3.98	4.64	7.06	9.90	13.64	16.88
4	1.2%-PET	3.91	5.18	6.69	12.12	14.42	21.86
5	PET-P	3.55	4.15	6.48	11.21	13.71	19.57

A partir de la *Tabla 5.29* se realizó una gráfica en la cual podemos observar el comportamiento a través del tiempo de los valores de resistividad eléctrica húmeda de cada una de las diferentes mezclas, la cual se muestra a continuación.



Gráfica 5.9. Resultados de valores de REH vs tiempo representados en gráfica de puntos. Fuente: Propia.



Gráfica 5.10. Resultados de valores de reh vs tiempo representados en gráfica de barras. Fuente: propia.

En la *Gráfica 5.10* se puede observar que la mezcla de concreto con un mayor valor de resistividad eléctrica húmeda a la edad de 121 días es la mezcla número cuatro “1.2%-PET”, por lo tanto, es la que presenta un mejor desempeño en términos de durabilidad.

5.5.2.1 Corrección de la medida de resistividad eléctrica por efectos de la temperatura.

La norma NMX-C514 (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019) establece que la temperatura de los cilindros deberá ser de 23°C al momento de realizarle la prueba de resistividad eléctrica, sin embargo, en el laboratorio no se cuenta con pilas de curado con temperatura controlada, por lo cual se deriva la siguiente duda: ¿De qué manera afecta la temperatura a los valores de resistividad?.

Para responder las preguntas anteriores, se procedió a realizar una serie de pruebas, las cuales asocian los resultados de Resistividad Eléctrica Húmeda (REH) y su temperatura utilizando un espécimen con dimensiones de 10 x 20 cm, con un área de 0.01 m² implementando la siguiente metodología:

1. Se tomó un cilindro de concreto el cual se llevó a diferentes temperaturas con el objetivo de verificar si existía o no una variación en las lecturas de resistencia.
2. Se llenó una cubeta con agua a temperatura ambiente y se le colocó una bolsa de hielos, se introdujo el espécimen como se muestra en la figura 5.2, con el objetivo de bajar su temperatura, dejándolo por 40 minutos, logrando llegar a los 7°C.
3. Se extrajo el espécimen de la cubeta, se tomaron tres lecturas de temperatura registrándolas como la temperatura en agua fría. Luego, tomamos tres lecturas de resistencia.



Figura 5.2 Enfriamiento de agua para saturar el espécimen y toma de lectura de Re. Fuente: Propia.

4. Una vez tomadas las lecturas de resistencia, se vació la cubeta y procedimos a llenarla con agua de la llave, la cual tenía una temperatura de 19°C, introdujimos el espécimen y lo mantuvimos sumergido durante 40 minutos.

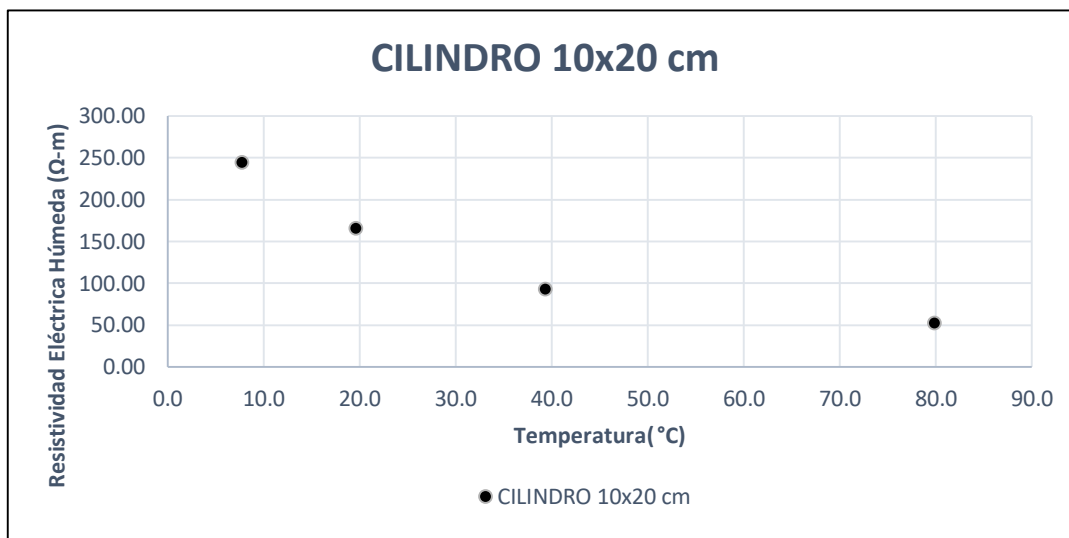
Extrajimos la muestra y procedimos a tomar lecturas de temperatura y resistencia, registrándolo como los datos de temperatura ambiente.

- Una vez más, se calentó el agua, pero ahora llevándola hasta los 79°C, se procedió a hacer la toma de lecturas.

Se obtuvo un promedio de éstas lecturas, teniendo como resultado los datos mostrados en la *Tabla 5.4*, estos resultados fueron graficados, teniendo como resultado la *Gráfica 5.4*.

Tabla 5.30. Resultados de pruebas de REH promediados.

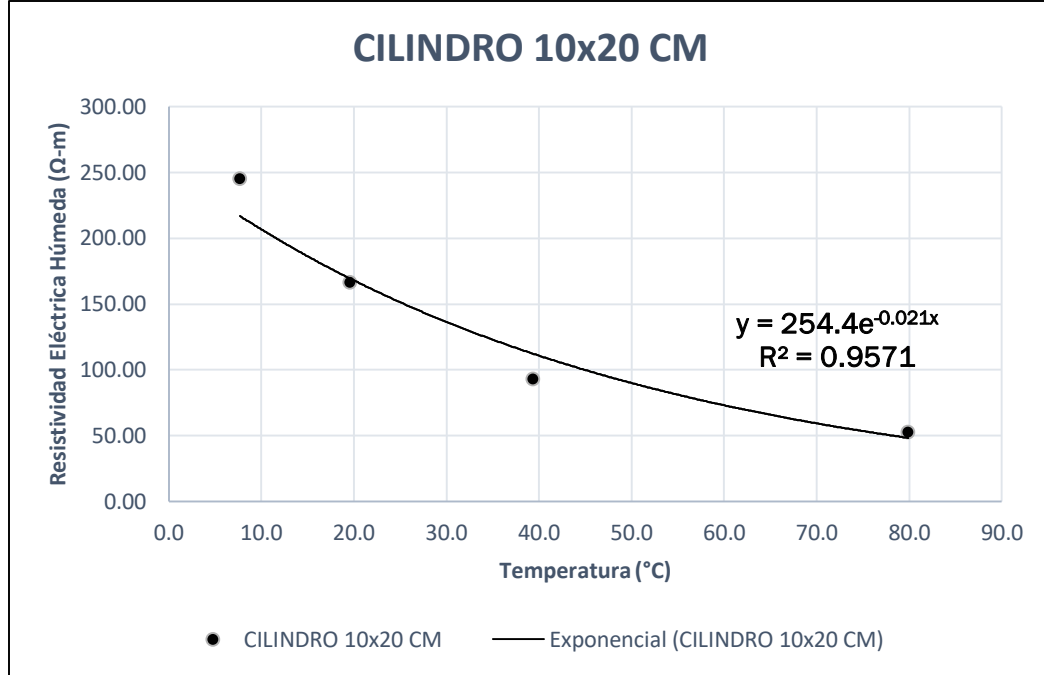
CILINDRO 10x20 cm					
	Temperatura (°C)	Temperatura promedio (°C)	Resistencia (Ω)	Resistencia promedio (Ω)	REH (Ω-m)
AGUA FRIA	7.6	7.7	6300	6266.67	244.86
	7.9		6250		
	7.7		6250		
AGUA TEMPERATURA AMBIENTE	19.4	19.6	4250	4250.00	166.06
	19.4		4250		
	19.9		4250		
AGUA CALIENTE	39.1	39.3	2350	2383.3	93.1
	39		2400		
	39.9		2400		
AGUA HIRVIENDO	79.9	79.9	1350	1350.0	52.7
	79.8		1350		
	79.9		1350		



Gráfica 5.11. Datos de REH vs temperatura

En la *Gráfica 5.11* se puede apreciar que los valores de Resistividad Eléctrica Húmeda decrecen conforme la temperatura del cilindro de concreto aumenta. Esto sucede cuando, al aumentar la temperatura, los iones que se encuentran en el agua de los poros, aumentan su vibración y viajan a una velocidad mayor, lo cual ayuda a que se transporten de una manera más rápida y, por ende, disminuye la resistividad, o sea, la oposición a que fluya la carga eléctrica a través del espécimen.

Se procedió a graficar los datos, agregando una línea de tendencia en la gráfica, eligiendo la de mejor ajuste con los datos graficados, buscando que el valor de correlación sea lo más cercano a la unidad, eligiendo así la línea de tendencia exponencial, como se muestra en la *Gráfica 5.12*.



Gráfica 5.12. Línea de tendencia exponencial en gráfica de REH vs tiempo. Fuente: Propia.

De esta manera podemos observar claramente la disminución de la REH conforme la temperatura aumenta.

Durante la consulta en libros de física, (Montiel) encontramos que la resistencia eléctrica de los conductores metálicos aumenta casi en forma proporcional a su temperatura, experimentalmente se ha demostrado que cuando se desea calcular la resistencia R de un conductor a una cierta temperatura T , conociendo su resistencia a una temperatura de 0°C , se utiliza la siguiente expresión:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T)$$

Por medio de la cual se obtiene el valor de resistencia del conductor en ohms a una cierta temperatura. Lo que la presente investigación busca, es lograr hacer este

mismo proceso para obtener la variación de la resistividad con la temperatura, pero ahora siendo el concreto el conductor.

Durante el proceso de la investigación, encontramos que al aumentar la temperatura del conductor el decremento de su resistencia no se presenta en forma proporcional como lo hace el metal, es decir, éste decremento no muestra un comportamiento lineal, esto se puede observar en la *Gráfica 5.12*.

Para corregir la variación en las mediciones de resistividad por efecto de la temperatura, se utiliza la ecuación de aproximación de Arrhenius, siguiendo una serie de pasos, los cuales se presentan a continuación:

Paso 1: Convertir los valores de resistividad eléctrica a unidades de Ohm-metro

Paso 2. Convertir los valores de temperatura a kelvin (K).

Tabla 5.31. Valores de temperatura tomados en °C convertidos a k.

Temperatura promedio (°C)	REH promedio (Ω-m)	Temperatura (K)
7.73	244.86	280.88
19.57	166.06	292.72
39.33	93.13	312.48
79.87	52.75	353.02

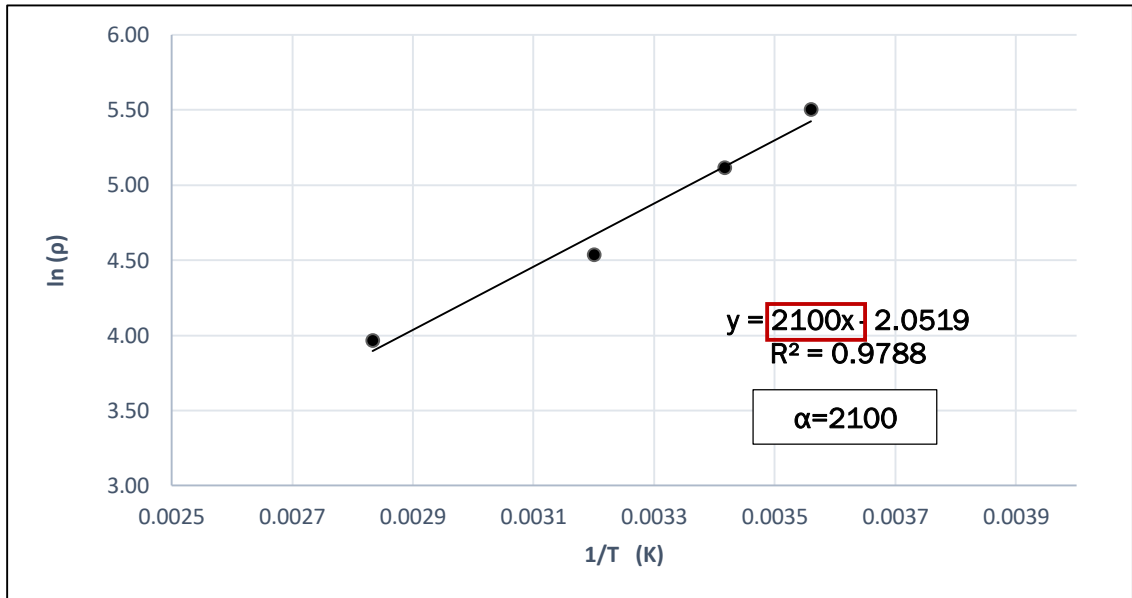
Paso 3: Se obtiene el logaritmo natural de los valores los de REH y el valor inverso de la temperatura, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 5.32. Valores del logaritmo natural de la REH y la inversa de temperatura

ρ_0 (Ω-m)	Temperatura (k)	$\ln(\rho)$	1/T (K)
244.86	280.88	5.50	0.00356
166.06	292.72	5.11	0.00342
93.13	312.48	4.53	0.00320
52.75	353.02	3.97	0.00283

Paso 4: Se grafica el logaritmo natural de la REH en el eje de las ordenadas y la inversa de la temperatura en el eje de las abscisas, posteriormente se agrega una línea de tendencia.

Esta gráfica nos servirá para obtener el **coeficiente de temperatura (α)** ya que este indica la variación relativa de la REH del concreto por cada grado centígrado de incremento en su temperatura.



Gráfica 5.13. logaritmo natural de REH vs inverso de la temperatura.

Partiendo de la ecuación general de la línea recta, tenemos que:

$$y = mx + b$$

Dónde:

m = pendiente de la línea recta

Proponiendo que:

$$m = \alpha$$

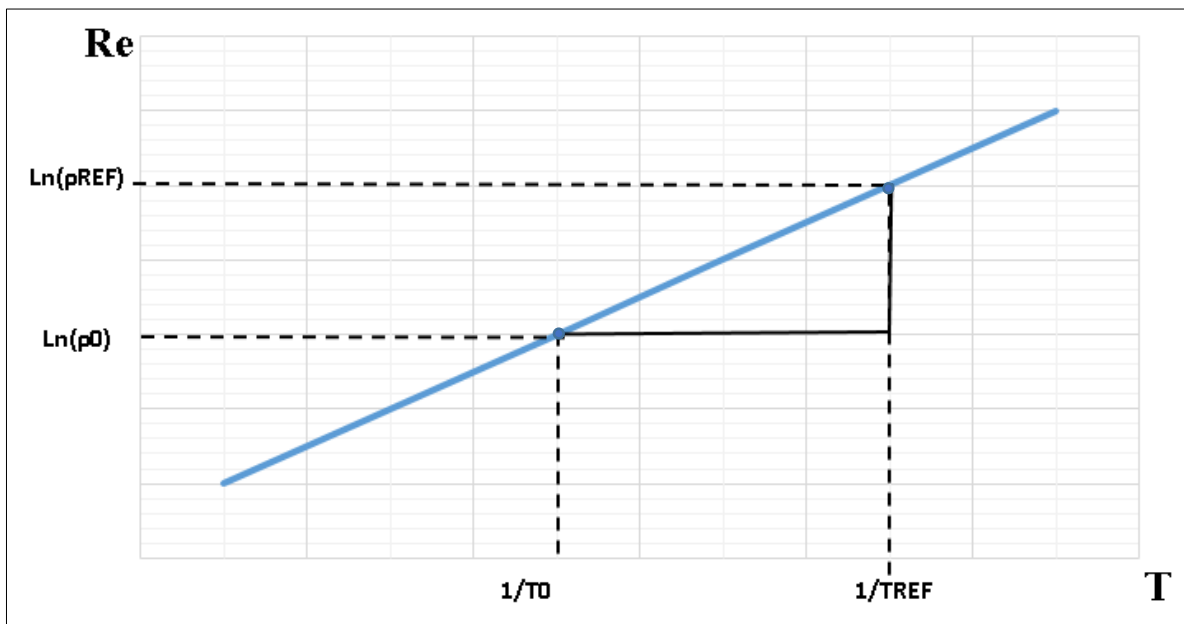
Proponiendo que el valor de la pendiente de la línea recta es igual al coeficiente de temperatura.

Con base en la gráfica 5.13, el valor del coeficiente de temperatura es el que se muestra en la *Tabla 5.33*.

Tabla 5.33. VALOR DE ALPHA EN CILINDRO DE 15X30. FUENTE: PROPIA.

Muestra	Coef. De temp (α) K
Cilindros 15x30 cm	2100

Ahora para obtener la ecuación de aproximación de Arrhenius que nos servirá para realizar la corrección por temperatura a partir del valor del coeficiente de temperatura, modelamos una gráfica de comportamiento similar a la *Gráfica 5.13*, obtenida de manera experimental, teniendo como resultado la *Gráfica 5.14*.



Gráfica 5.14 Gráfica modelo para la deducción de la ecuación de aproximación de Arrhenius.

**DEDUCCIÓN DE LA ECUACIÓN DE APROXIMACIÓN DE ARRHENIUS PARA
OBTENER LA RESISTIVIDAD DE REFERENCIA CON DIFERENTES VALORES
DE TEMPERATURA.**

Partiendo de la fórmula para obtener la pendiente de una línea recta, tenemos que:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Adecuando la fórmula para nuestro caso y sabiendo que α nos indica la relación de cómo aumenta o disminuye la pendiente, tenemos que:

$$\alpha = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Obteniendo las coordenadas de nuestra grafica tenemos que:

$$P_1\left(\frac{1}{T_0}, \text{Ln}(\rho_0)\right)$$

$$P_2\left(\frac{1}{T_{ref}}, \text{Ln}(\rho_{ref})\right)$$

Sustituyendo valores en la ecuación de la pendiente tenemos que:

$$\alpha = \frac{\text{Ln}(\rho_{ref}) - \text{Ln}(\rho_0)}{\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_0}}$$

Recordando la propiedad de los logaritmos

$$\text{Ln}\left(\frac{a}{b}\right) = \text{Ln}(a) - \text{Ln}(b)$$

Y aplicándola a nuestra ecuación obtenemos que:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{\rho_{ref}}{\rho_0}\right)}{\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_0}}$$

Como que el dato que nos interesa conocer es la resistividad de referencia, lo despejamos de la ecuación.

$$\alpha * \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_0}\right] = \ln\left(\frac{\rho_{ref}}{\rho_0}\right)$$

Aplicando el número de Euler y utilizando la siguiente propiedad:

$$e^{\ln(a)} = a$$

Obtenemos que:

$$e^{\alpha * \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_0}\right]} = e^{\ln\left(\frac{\rho_{ref}}{\rho_0}\right)}$$

$$e^{\alpha * \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_0}\right]} = \frac{\rho_{ref}}{\rho_0}$$

$$\rho_{ref} = \rho_0 * e^{\alpha \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_0}\right]}$$

Donde:

ρ_{ref} = resistividad de referencia, en $\Omega \cdot m$

"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"

ρ_0 = resistividad obtenida en el laboratorio, en $\Omega\text{-m}$

α = coeficiente de temperatura, en *kelvin*

T_{ref} = temperatura de referencia (temperatura deseada), en *kelvin*

T_0 = temperatura obtenida en laboratorio, en *kelvin*

Paso 5: Sustituir en la ecuación de aproximación de Arrhenius los valores correspondientes, utilizando como temperatura de referencia 23°C (296.15 K). Esto permite obtener los valores de resistividad corregidos:

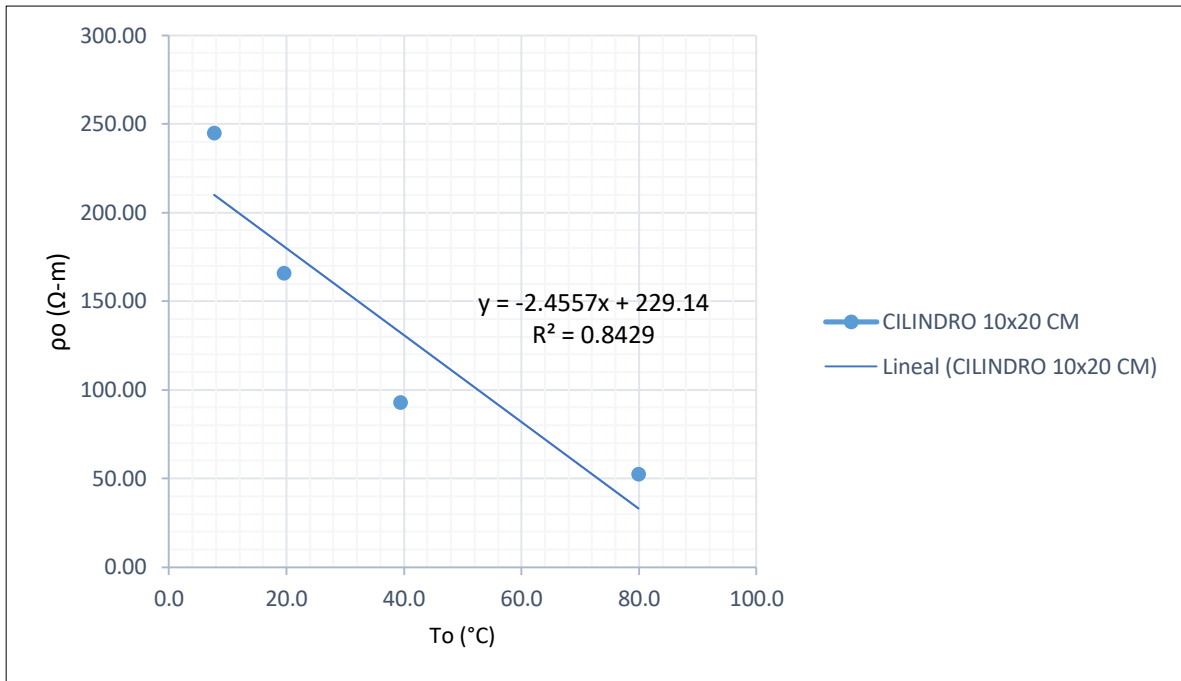
Tabla 5.34 Datos de REH corregidos

CILINDRO 10x20 CM													
Resistencias (Ω)	Resistencia promedio (Ω)	Diámetros (cm)	Diámetro promedio (m)	Longitudes (cm)	Longitud promedio (m)	Area promedio (m^2)	ρ_0 ($\Omega\text{-m}$)	Temperatura (K)	$\ln(\rho)$	Inverso de la temperatura	Coef. De temp (α)	pref ($\Omega\text{-m}$)	(23° c) k $\Omega\text{-cm}$
6300	6266.67	10.05	0.0998	20	0.2	0.01	244.86	280.88	5.50	0.00356	2100	166.548	16.65
6250		9.9		20									
4250		10.05		20									
4250	4250.00	10.05	0.09975	20	0.2	0.01	166.06	292.72	5.11	0.003416	2100	152.811	15.28
4250		9.9		20									
2350		10.05		20									
2400	2383.3	9.9	0.09975	20	0.2	0.01	93.13	312.48	4.53	0.0032	2100	134.908	13.49
2400		10.05		20									
1350		9.9		20									
1350	1350.0	10.05	0.09975	20	0.2	0.01	52.75	353.02	3.97	0.002833	2100	165.311	16.53
1350		9.9		20									
												pref (k $\Omega\text{-mc}$)	15.49

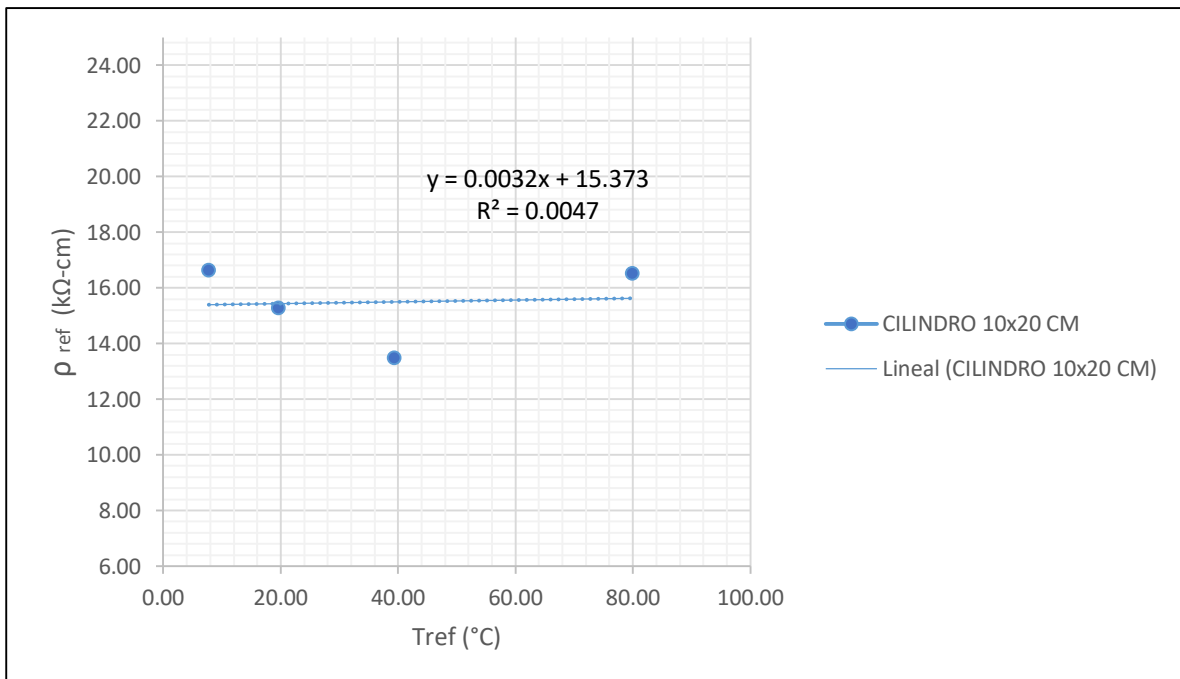
En la *Tabla 5.34* se puede observar que la influencia de la temperatura en los valores de resistividad eléctrica húmeda disminuye, llegando a tener resultados muy similares entre ellos, obteniendo así una diferencia mínima entre las lecturas, por lo cual podemos concluir que la fórmula empleada para realizar un ajuste por corrección de temperatura fue exitosa.

Procedimos a graficar los resultados de REH antes y después de la corrección por temperatura, proyectando estos valores en las *Gráficas 5.15* y *5.16* con el fin de mostrar cómo disminuye la influencia de la temperatura en los valores de Resistividad Eléctrica Húmeda.

“Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno”



Gráfica 5.15 Influencia de la temperatura en los valores de resistividad eléctrica húmeda.



Gráfica 5.16 Valores de resistividad eléctrica húmeda corregidos por temperatura.

A continuación, en la *Tabla 5.35* se obtuvo el porcentaje de error que existe entre las lecturas tomadas en el laboratorio, y las lecturas corregidas llevando el espécimen a 23°C, tal como lo indica la normatividad. Utilizando la siguiente ecuación:

$$\%error = \frac{|\rho_{ref} - \rho_0|}{\rho_{ref}} * 100$$

Tabla 5.35. Porcentaje de error existente entre los resultados de REH antes y después de la corrección.

Temperatura en laboratorio (To) en °C	REH en laboratorio (ρo) en Ω-m	Temperatura de referencia (Tref) °C	REH de referencia (ρref) en Ω-m	% de error
7.7	244.86	23	166.548	47.02
19.6	166.06	23	152.811	8.67
39.3	93.1	23	134.908	30.97
79.9	52.7	23	165.311	68.09

5.5.2.2 Comportamiento del coeficiente de temperatura (α) en función del tiempo.

Como se explicó con anterioridad, el símbolo α representa el coeficiente de temperatura, el cual nos ayudó a realizar el ajuste para así obtener nuestros valores de REH corregidos, determinando datos más confiables, concluyendo por medio de la experimentación que, entre mayor es el valor del coeficiente de temperatura, mayor será la influencia de la temperatura en los valores de resistividad, pero, ¿Cómo se comporta este coeficiente de temperatura a diferentes edades?

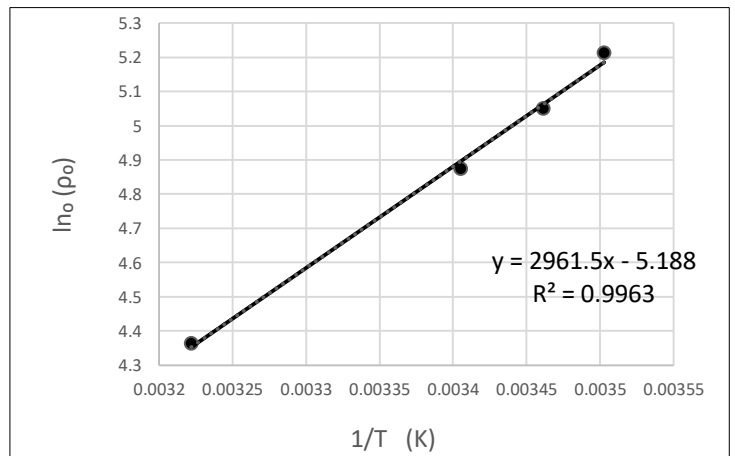
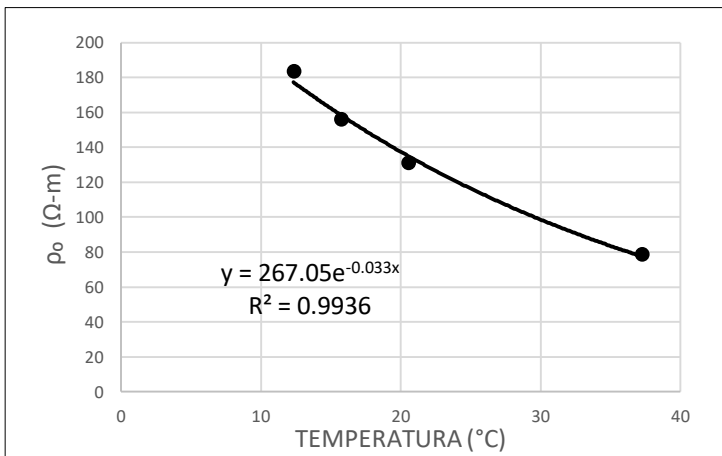
Se realizaron las pruebas ya explicadas en el apartado 5.5.1.1. a especímenes de 10x20 cm, muestras testigo a las edades de 96, 121 y 168 días.

Para descartar que nuestros resultados sean influenciados por el factor forma del espécimen probado, se le realizaron la misma serie de pruebas a dos especímenes con la misma edad y misma mezcla. Obteniendo los siguientes resultados:

MUESTRAS DE TESTIGOS 96 DIAS

Tabla 5.36. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura-cilindro 1, 96 días.

CILINDRO 1								
Temperatura (°C)	ρ_0 (Ω -m)	Temperatura (K)	$\ln(\rho)$	1/T (K)	Pendiente α (k)	ρ_{ref} (Ω -m)	T_{ref} (K)	ρ_{ref} (k Ω -cm)
12.33	183.39	285.48	5.21	0.0035	2961.50	126.21	296.15	12.62
15.77	155.90	288.92	5.05	0.0035	2961.50	121.37	296.15	12.14
20.53	130.77	293.68	4.87	0.0034	2961.50	120.23	296.15	12.02
37.23	78.54	310.38	4.36	0.0032	2961.50	124.24	296.15	12.42

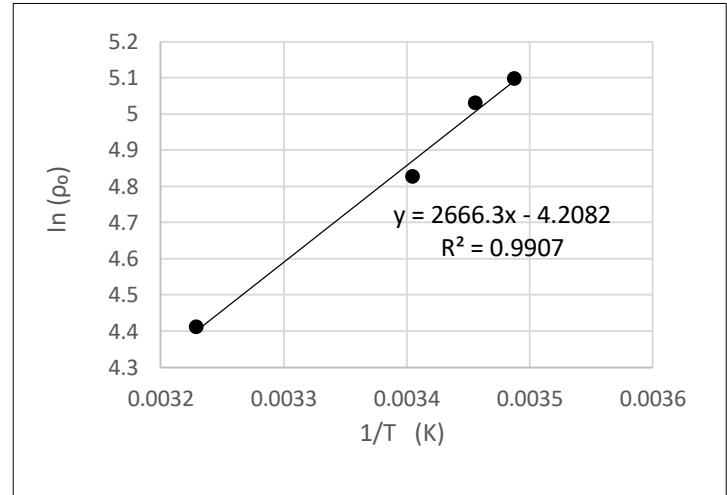
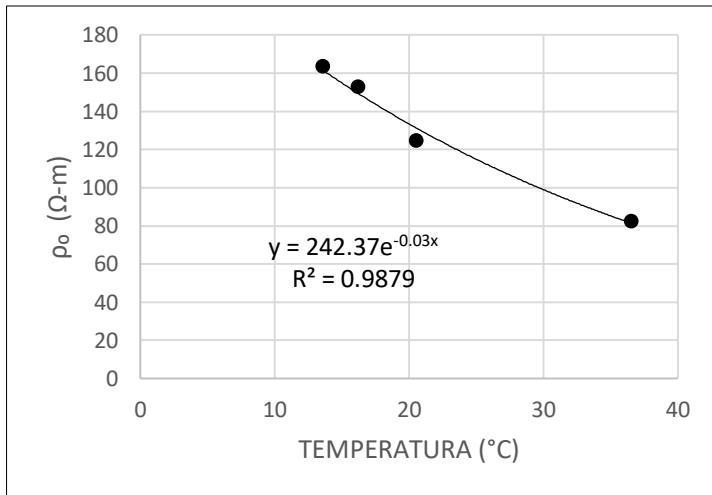


Gráfica 5.17. Obtención del coeficiente de temperatura -cilindro 1, 96 días.

"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"

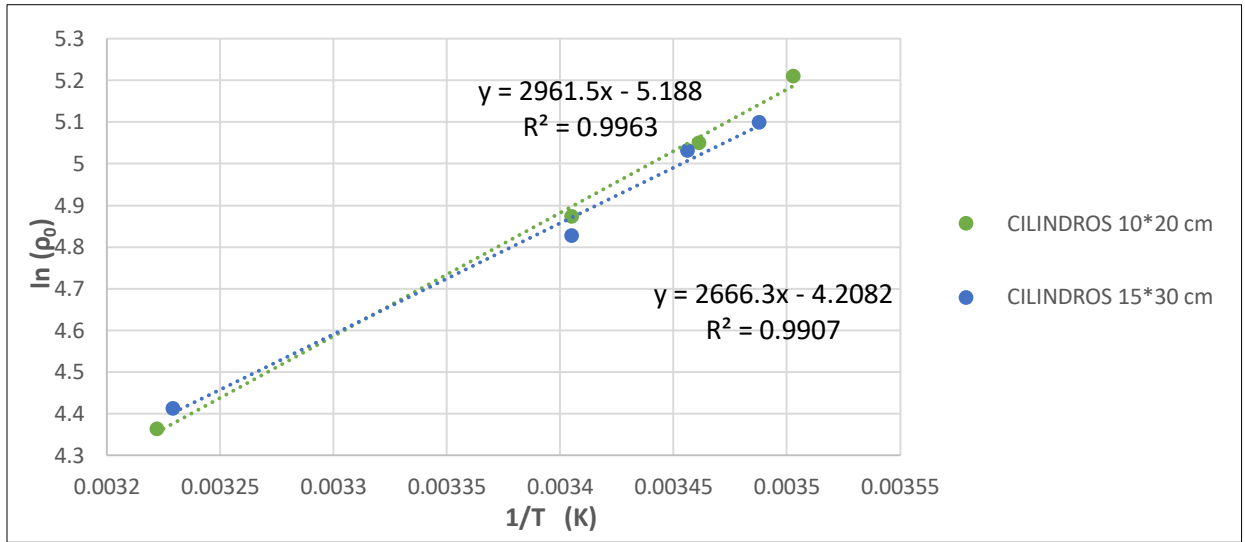
Tabla 5.37. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura- cilindro 2, 96 días.

CILINDRO 2								
Temperatura (°C)	ρ_0 (Ω -m)	Temperatura (K)	$\ln(\rho)$	1/T (K)	Pendiente α (K)	ρ_{ref} (Ω -m)	T_{ref} (K)	ρ_{ref} (k Ω -cm)
13.57	163.95	286.72	5.10	0.0035	266.30	121.83	296.15	12.18
16.20	153.15	289.35	5.03	0.0035	266.30	123.95	296.15	12.39
20.53	124.68	293.68	4.83	0.0034	266.30	115.77	296.15	11.58
36.53	82.47	309.68	4.41	0.0032	266.30	122.21	296.15	12.22



Gráfica 5.18. Obtención del coeficiente de temperatura-cilindro 2, mezcla 96 días.

Se realizó una gráfica comparativa con los dos especímenes de diferentes dimensiones para contrastar los resultados, la cual se muestra a continuación.



Gráfica 5.19. Gráfica comparativa con los dos especímenes de diferentes dimensiones.

En la gráfica se puede observar una diferencia mínima en la REH, lo cual nos permite descartar que nuestros datos sean afectados por el factor forma.

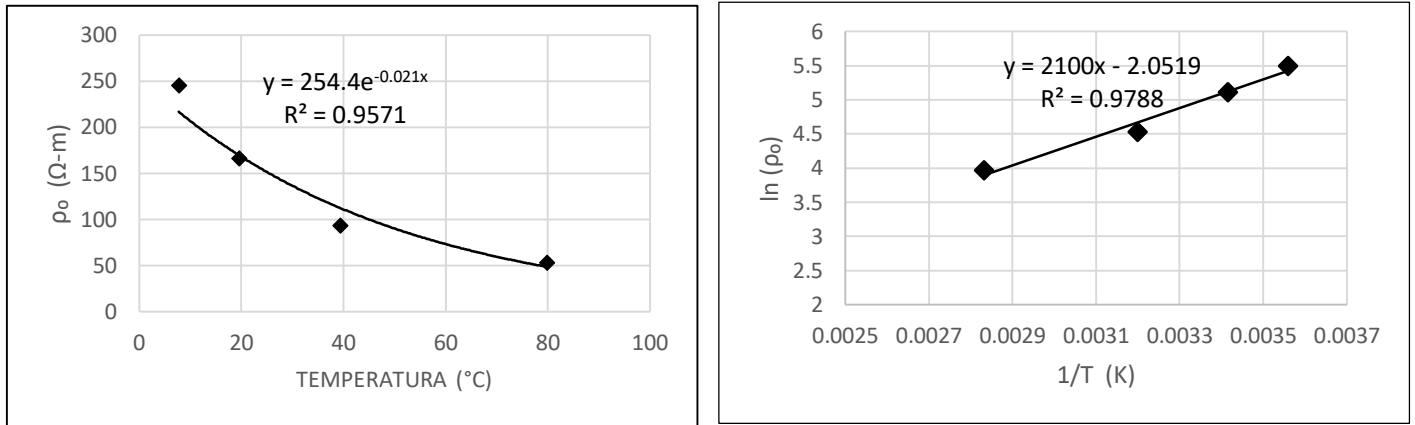
En seguida se obtuvieron los valores del coeficiente de temperatura para las edades restantes.

MUESTRAS DE TESTIGOS 121 DIAS

Tabla 5.38. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura-cilindro 1, 121 días.

CILINDRO 1								
Temperatura (°C)	ρ_0 (Ω -m)	Temperatura (K)	$\ln(\rho)$	$1/T$ (K)	Pendiente α (K)	ρ_{ref} (Ω -m)	T_{ref} (K)	ρ_{ref} ($k\Omega$ -cm)
7.73	244.86	280.88	5.50	0.0036	2100.00	296.15	166.55	16.65
19.57	166.06	292.72	5.11	0.0034	2100.00	296.15	152.81	15.28
39.33	93.13	312.48	4.53	0.0032	2100.00	296.15	134.91	13.49
79.87	52.75	353.02	3.97	0.0028	2100.00	296.15	165.31	16.53

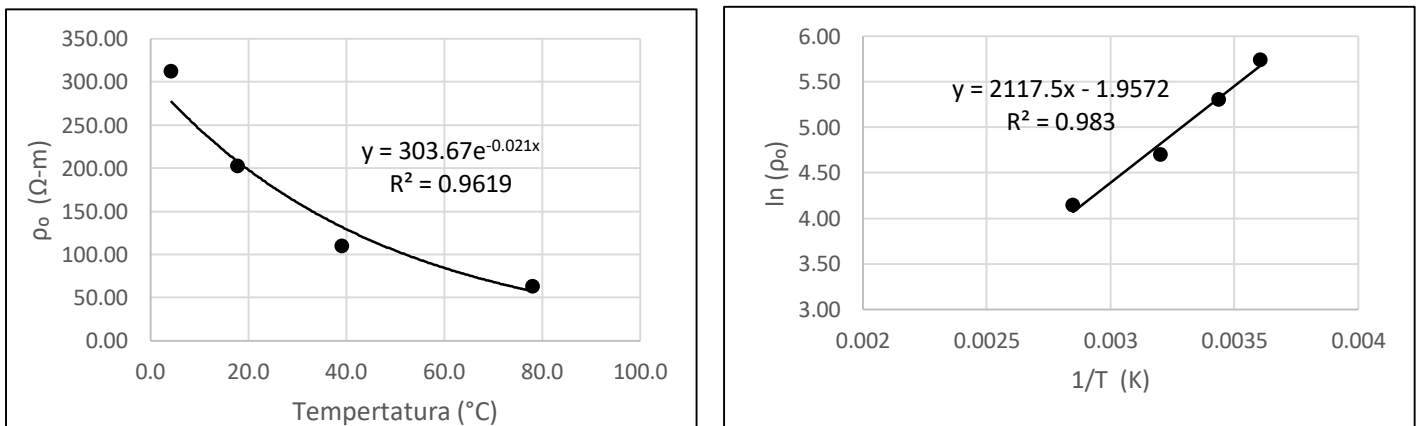
"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"



Gráfica 5.20. Obtención del coeficiente de temperatura-cilindro 1, 121 días.

Tabla 5.39. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura- cilindro 2, 121 días.

CILINDRO 2								
Temperatura ($^{\circ}$ C)	ρ_0 (Ω -m)	Temperatura (K)	$\ln(\rho)$	$1/T$ (K)	Pendiente α (K)	ρ_{ref} (Ω -m)	T_{ref} (K)	ρ_{ref} (k Ω -cm)
4.27	311.88	277.42	5.74	0.0036	2117.50	296.15	192.44	19.24
17.87	201.96	291.02	5.31	0.0034	2117.50	296.15	178.03	17.80
39.07	109.92	312.22	4.70	0.0032	2117.50	296.15	158.81	15.88
78.00	62.91	351.15	4.14	0.0028	2117.50	296.15	192.78	19.28

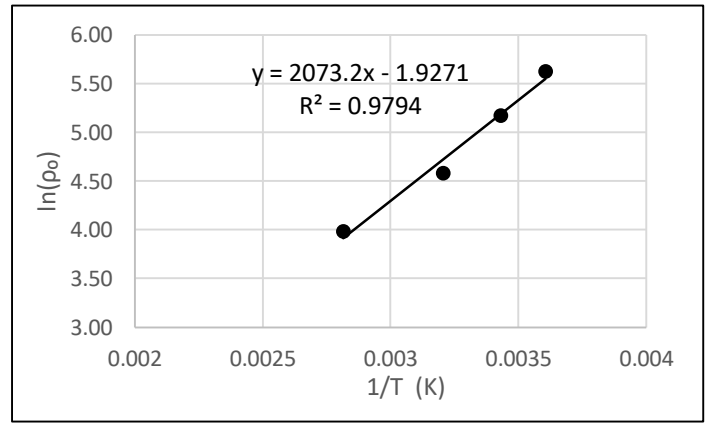
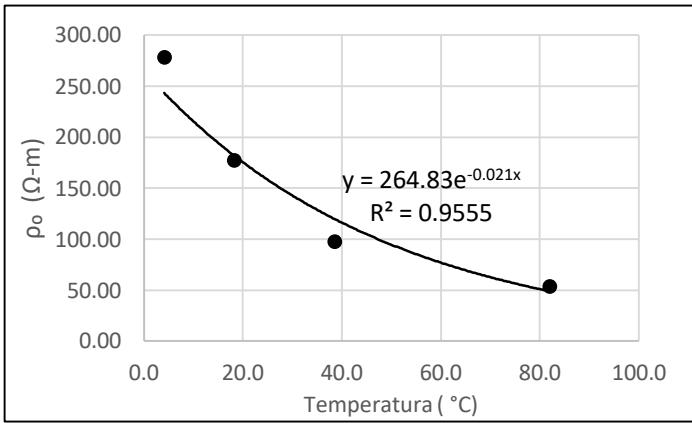


Gráfica 5.21. Obtención del coeficiente de temperatura-cilindro 2, 121 días.

"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"

Tabla 5.40. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura- cilindro 3, 121 días.

CILINDRO 3								
Temperatura (°C)	ρ_0 (Ω -m)	Temperatura (K)	$\ln(\rho)$	1/T (K)	Pendiente α (K)	ρ_{ref} (Ω -m)	T_{ref} (K)	ρ_{ref} (k Ω -cm)
4.13	278.21	277.28	5.63	0.0036	2073.20	296.15	172.78	17.28
18.23	177.01	291.38	5.18	0.0034	2073.20	296.15	157.86	15.79
38.63	97.68	311.78	4.58	0.0032	2073.20	296.15	138.76	13.88
81.97	53.76	355.12	3.98	0.0028	2073.20	296.15	171.90	17.19



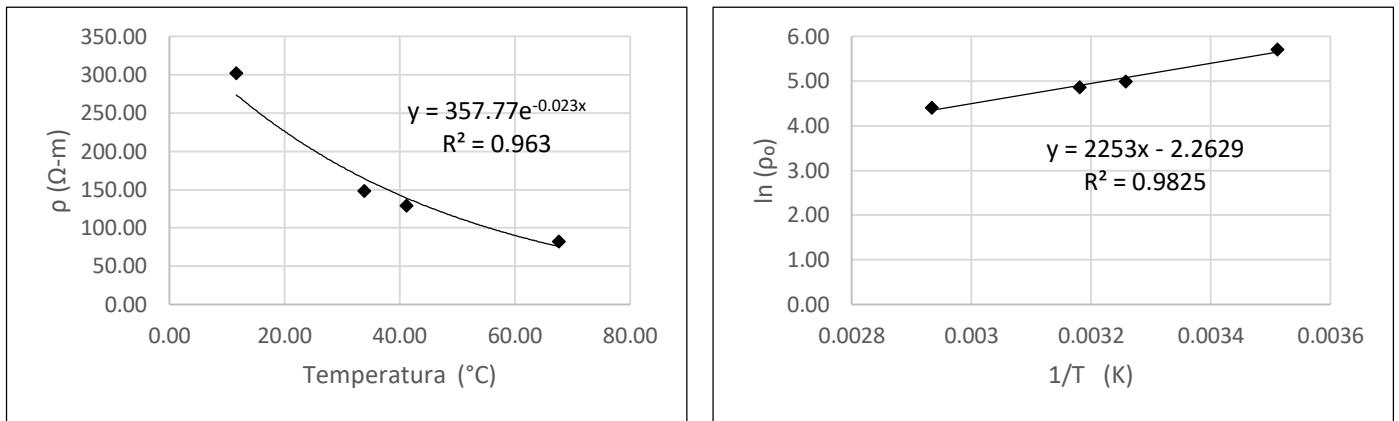
Gráfica 5.22. Obtención del coeficiente de temperatura -cilindro 3, 121 días.

MUESTRAS DE TESTIGOS 168 DIAS

Tabla 5.41. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura-cilindro 1, 168 días.

CILINDRO 1								
Temperatura (°C)	ρ_0 (Ω -m)	Temperatura (K)	$\ln(\rho)$	1/T (K)	Pendiente α (K)	ρ_{ref} (Ω -m)	T_{ref} (K)	ρ_{ref} (k Ω -cm)
11.60	302.32	284.75	5.71	0.0035	2253	296.15	222.94	22.29
33.80	148.23	306.95	5.00	0.0033	2253	296.15	193.73	19.37
41.20	129.16	314.35	4.86	0.0032	2253	296.15	200.64	20.06
67.63	82.05	340.78	4.41	0.0029	2253	296.15	222.25	22.22

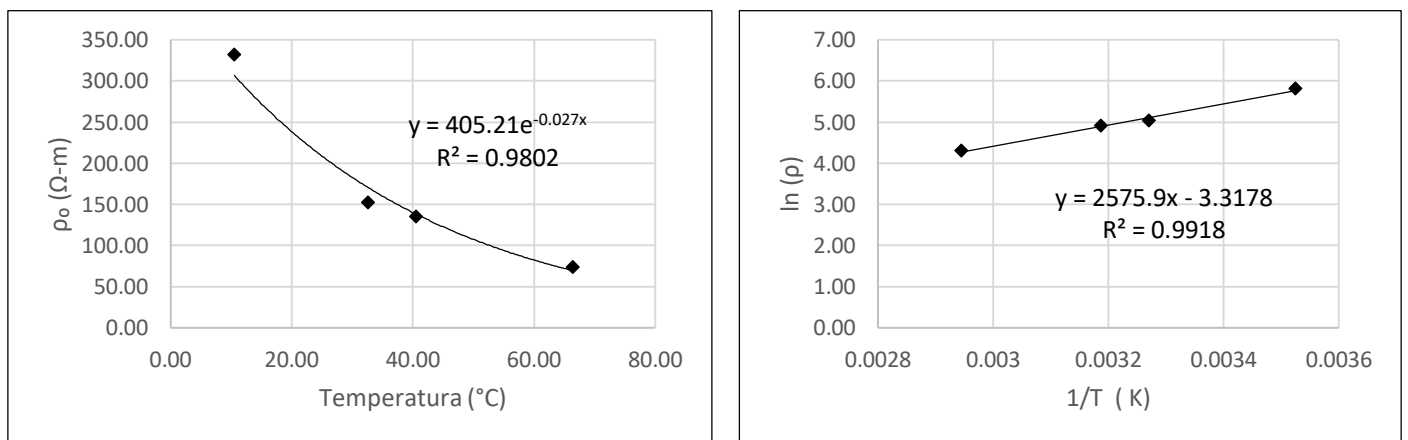
"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"



Gráfica 5.23. Obtención del coeficiente de temperatura- cilindro 1, 168 días.

Tabla 5.42. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura-cilindro 2, 168 días.

CILINDRO 2								
Temperatura (°C)	ρ_0 (Ω-m)	Temperatura (K)	$\ln(\rho)$	1/T (K)	Pendiente α (K)	ρ_{ref} (Ω-m)	T_{ref} (K)	ρ_{ref} (kΩ-cm)
10.50	331.74	283.65	5.80	0.0035	2575.90	296.15	226.12	22.61
32.57	152.30	305.72	5.03	0.0033	2575.90	296.15	199.94	19.99
40.53	135.08	313.68	4.91	0.0032	2575.90	296.15	219.65	21.97
66.40	73.50	339.55	4.30	0.0029	2575.90	296.15	223.41	22.34

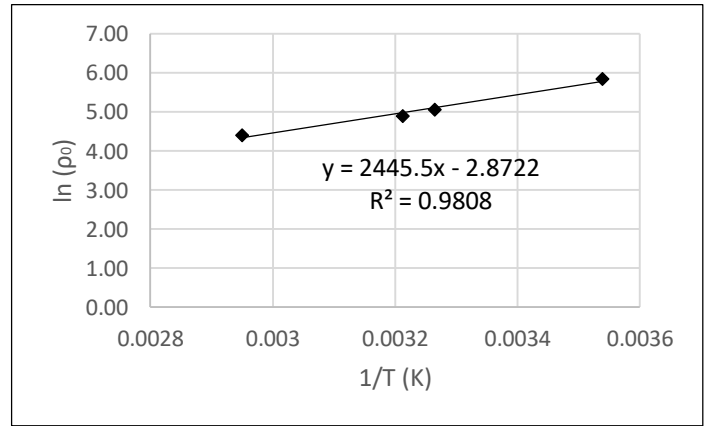
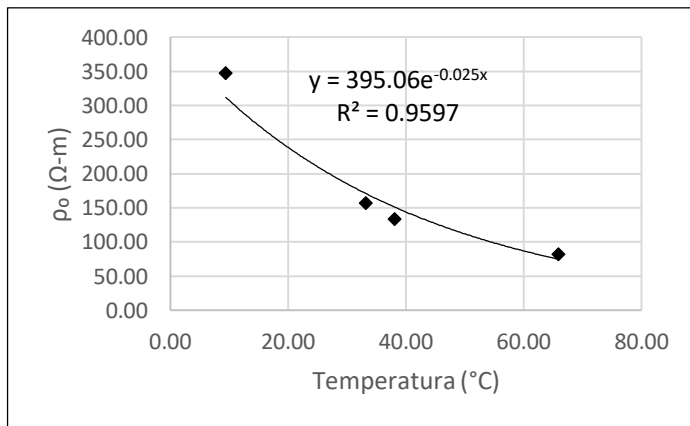


Gráfica 5.24. Obtención del coeficiente de temperatura- cilindro 2, 168 días.

"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"

Tabla 5.43. Obtención de datos para obtener el coeficiente de temperatura-cilindro 3, 168 días.

CILINDRO 3								
Temperatura (°C)	ρ_0 (Ω -m)	Temperatura (K)	$\ln(\rho)$	1/T (K)	Pendiente α (K)	ρ_{ref} (Ω -m)	T_{ref} (K)	ρ_{ref} (k Ω -cm)
9.43	347.09	282.58	5.85	0.0035	2445.50	296.15	233.49	23.35
33.17	157.34	306.32	5.06	0.0033	2445.50	296.15	206.95	20.70
38.13	133.74	311.28	4.90	0.0032	2445.50	296.15	199.81	19.98
65.90	82.60	339.05	4.41	0.0029	2445.50	296.15	234.84	23.48



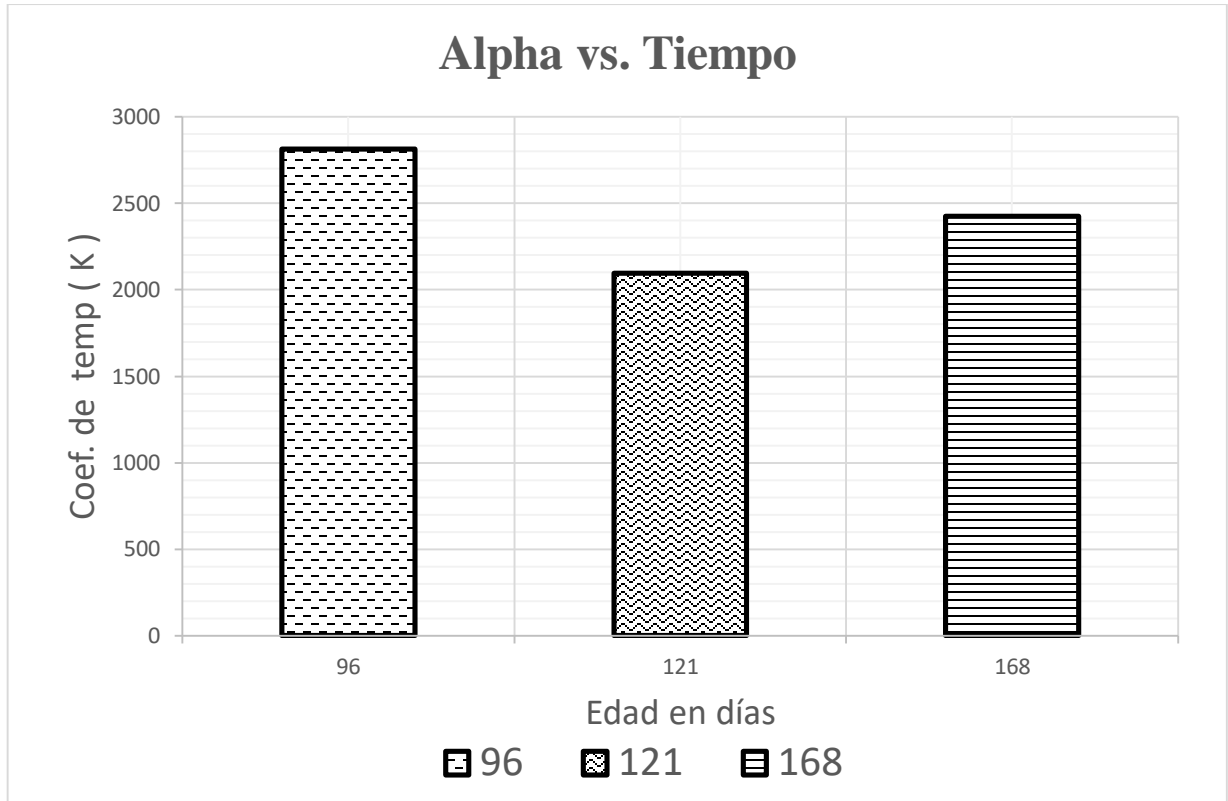
Gráfica 5.25. Obtención del coeficiente de temperatura-cilindro 3, 168 días.

Se procede a obtener un promedio de los valores del coeficiente de temperatura para cada edad, teniendo como resultado los siguientes datos:

Tabla 5.44. Valores promedio del coeficiente de temperatura a diferentes edades.

Edad (días)	Valor promedio del coeficiente de temperatura (K)
96	2813.9
121	2096.90
168	2424.80

Graficamos los resultados anteriores para relacionar el comportamiento del coeficiente de temperatura con las diferentes edades.



Gráfica 5.26. Valores promedio del coeficiente de temperatura a diferentes edades.

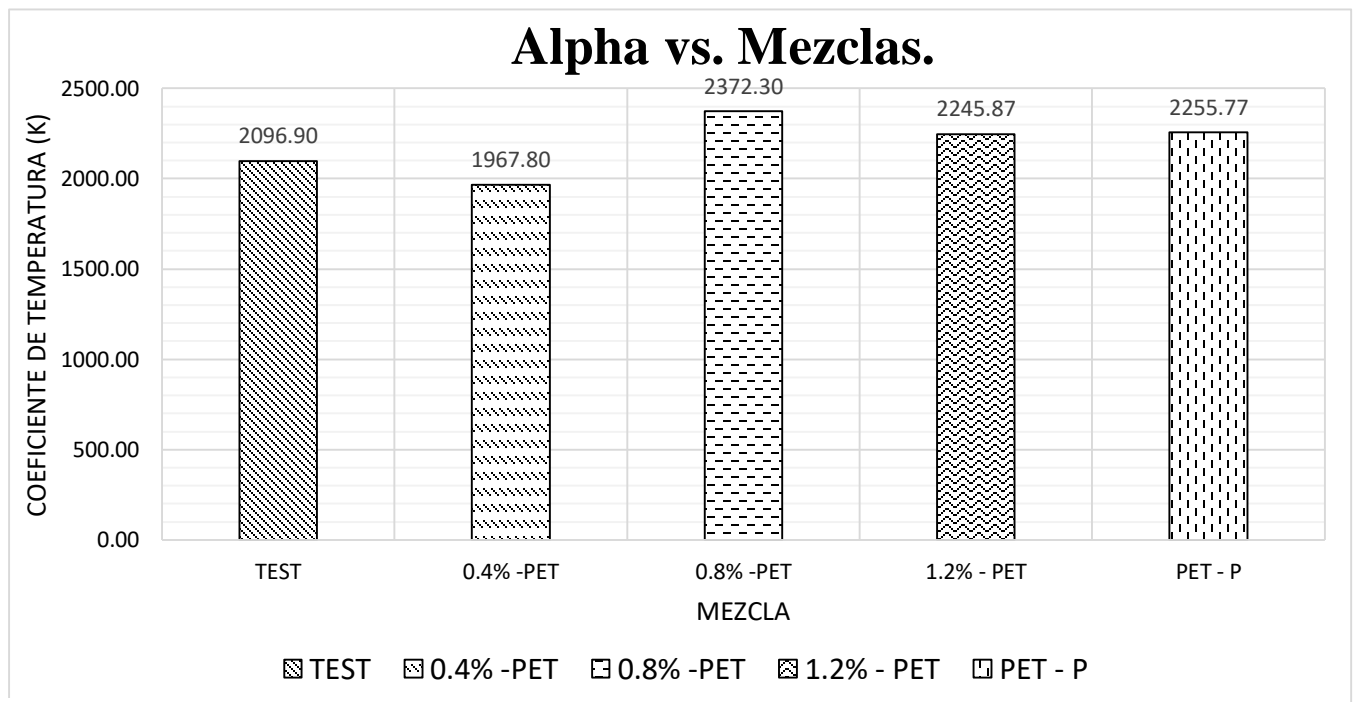
De la *gráfica 5.26* se busca analizar el comportamiento que tiene el coeficiente de temperatura al paso del tiempo. Contemplando que ciertos datos comenzaron a ser considerados a partir de los 96 días, se espera que se observe una tendencia respecto al comportamiento del coeficiente de temperatura al paso del tiempo, es decir, ¿Qué pasa con el valor del coeficiente de temperatura?, ¿Se mantiene constante, incrementa o disminuye su valor a lo largo del tiempo?

Sin embargo, no es posible obtener una deducción del comportamiento del coeficiente de temperatura en función del tiempo, ya que no se cuenta con los datos de resistividad a diferentes temperaturas a las edades de 7, 14, 28 y 60 días.

5.5.2.3 Comportamiento del coeficiente de temperatura (α) en función del tipo de mezcla.

Se realizaron una serie de pruebas como las descritas en el apartado 5.5.2.1, las cuales fueron aplicadas para una misma edad, variando el tipo de mezcla empleadas en la investigación. Teniendo como resultados los datos mostrados a continuación:

EDAD: 121 días.	
MEZCLA	Coefficiente de temperatura (K)
TEST	2096.90
0.4% -PET	1967.80
0.8% -PET	2372.30
1.2% - PET	2245.87
PET - P	2255.77



En la *gráfica 5.27* se puede observar que la mezcla que presenta un menor valor del coeficiente de temperatura es la mezcla “0.4%-PET”.

Cálculo del tiempo de iniciación con base en los resultados de resistividad eléctrica húmeda.

Se entiende como vida útil, el periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento. ("DURAR", 1998)

Es así que Tuutti (Tuutti, 1982) estableció su conocido modelo el cual se muestra en la *Figura 5.2*.

Este modelo está desarrollado específicamente para el caso de la corrosión de armadura de refuerzo en el concreto. En el modelo se distinguen dos periodos:

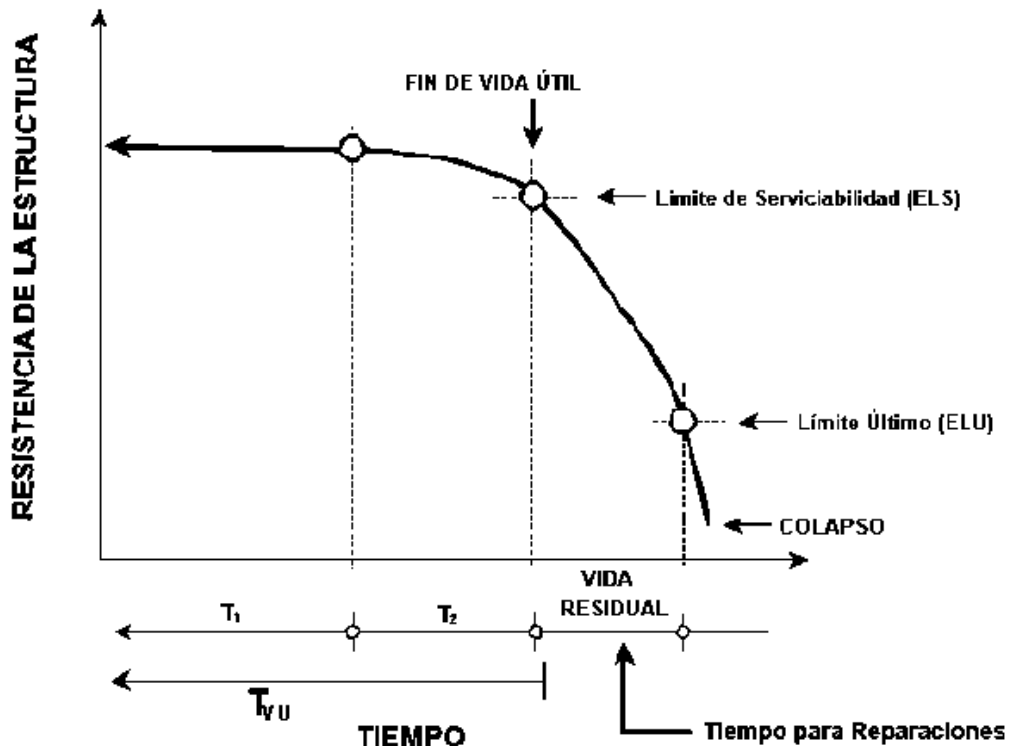


Figura 5.3. Modelo de durabilidad. (Andrés A. Torres Acosta, Miguel Martínez Madrid, 2001)

Este modelo está desarrollado específicamente para el caso de la corrosión de armadura de refuerzo en el concreto. En el modelo se distinguen dos periodos:

El **tiempo de iniciación (t_i)** o periodo de iniciación, es el tiempo que tarda el ion cloruro o la carbonatación en atravesar el espesor de recubriendo hasta llegar a la superficie del acero de refuerzo, dando lugar al tiempo de propagación.

El **tiempo de propagación (t_p)** o periodo de propagación sucede cuando el ion cloruro ya se encuentra en la superficie del acero y se presenta un fenómeno llamado “fenómeno de corrosión”, el cual es mayoritariamente presentado en los materiales que tienen contenido de hierro, comenzando así una reacción química (óxido), por lo tanto, el área transversal de la varilla va aumentando por el óxido generado alrededor de ésta, ocasionando esfuerzos internos que hacen que se presenten fisuras en el recubrimiento, cuando éstas fisuras llegan al exterior con un espesor de 0.1mm, se dice entonces que se ha llegado al final del tiempo de propagación. Este se define como el periodo en el que la armadura se corroe libremente hasta que llega a un grado de deterioro inaceptable desde el punto de vista de la seguridad y funcionalidad.

Una vez finalizado el tiempo de propagación, comienza la vida residual del concreto, donde, si no se le da mantenimiento, puede haber delaminaciones hasta terminar completamente con el acero de refuerzo.

Lo que nos ocupa en la presente investigación es alargar el tiempo de iniciación, el cual está en función del ambiente, entre más agresivo sea este, nos encontramos con concentraciones mayores de sales e iones cloruro. El tiempo de iniciación se encuentra también influenciado por el tipo de cemento, es decir, si este tiene puzolanas, adiciones como humo de sílice, recordando que estas propiedades nos ayudan a reducir la permeabilidad, disminuyendo la porosidad de la matriz cementicia, esto nos ayuda a alargar la vida útil del concreto. Otra propiedad

importante es la relación agua-cemento, ya que entre menor sea la relación agua-cemento, mayor será la durabilidad de nuestra estructura de concreto.

CÁLCULO DEL TIEMPO DE INICIACIÓN (TI) MEDIANTE LOS VALORES DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA HÚMEDA

El modelo de Tuutti representa la base en la cual se apoyan la mayoría de los modelos de durabilidad, este considera que la vida útil de una estructura de concreto reforzado es igual a la suma de dos periodos de tiempo, un periodo de iniciación y un periodo de propagación (*Tuutti, 1982*).

$$\text{Tiempo de vida útil} = \text{Tiempo de iniciación} + \text{tiempo de propagación}$$

En este capítulo se va a determinar el tiempo de iniciación de cada una de las cinco mezclas para establecer cuál de ellas presenta un mejor tiempo de iniciación y por lo tanto desempeña un mejor desempeño en términos de durabilidad.

Para que los valores de resistividad eléctrica húmeda puedan ser empleados en el cálculo de la vida útil de una estructura de concreto reforzado, se deben tener en cuenta dos aspectos muy importantes ("*DURAR*", 1998)

1. La resistividad manifiesta la porosidad del concreto y la tortuosidad de los poros capilares, siempre y cuando, el concreto se encuentre totalmente saturado.
2. La resistividad varía con el grado de saturación del concreto, el valor mínimo de resistividad se alcanza cuando el grado de saturación es el máximo, el valor máximo de resistividad se alcanza cuando el concreto se encuentra parcialmente húmedo. ("*DURAR*", 1998)

3. Se debe tener en cuenta a temperatura a la cual se ejecuta la prueba de resistividad eléctrica húmeda ya que estos valores varían en función de la temperatura.

Debido a lo anterior, el cálculo de la vida útil se basa en valores de resistividad obtenidos a partir de especímenes de concreto en condiciones de saturación, ya que ésta representa la condición más crítica.

La expresión que permite el cálculo del tiempo de iniciación del concreto en función de la resistividad eléctrica húmeda es la siguiente: (PNE83994-2, 2016)

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ef,0} \frac{t_n^q}{t_0}}{F_{exp,cl}} r_{b,cl}$$

Donde:

X_{cl} = profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros, en *cm*.

$F_{exp,cl}$ = factor de exposición ambiental, $\Omega\text{-cm}^3/\text{año}$.

$\rho_{ef,0}$ = resistividad efectiva obtenida a los 28 días de curado en cámara húmeda a una humedad relativa superior al 95% y 20 + 2°C de temperatura, en $\Omega\text{-cm}$.

$r_{b,cl}$ = factor de retardo.

t_i = tiempo de iniciación, en *años*.

t_n = última edad que se mide la resistividad efectiva.

t_0 = edad de 28 días en la que se toma el valor de resistividad.

q = factor edad.

FACTOR DE EXPOSICIÓN AMBIENTAL. ($F_{exp,cl}$)

Este depende del clima y de la cantidad de cloruros. Dicho factor considera el grado de agresividad ambiental al que estará expuesto el concreto.

Para la obtención de la exposición ambiental, por medio de las investigaciones hechas por la doctora Carmen Andrade (PNE83994-2, 2016) en donde propone diferentes clases de exposición con su valor de factor de exposición ($F_{exp,cl}$) en la que se puede observar que, conforme se incrementa el valor del factor de exposición se vuelve más agresivo el ambiente, es decir, existe una mayor concentración de ion cloruro.

Los valores de $F_{exp,cl}$ que pueden ser utilizados en función de la agresividad ambiental son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.45. Valores del factor de exposición ambiental en función de la clase de ambiente (PNE83994-2, 2016)

FACTOR DE EXPOSICIÓN AMBIENTAL ($F_{exp,cl}$)	
CLASE DE EXPOSICIÓN	$F_{exp,cl}$. ($\Omega\text{-cm}^3/\text{año}$)
XS1-IIIa aéreo (>500 m de la costa)	5000
XS2-IIIa aéreo (<500 m de la costa)	10000
XS2-IIIb	17000
XS3- IIIc	25000

La clase de exposición ambiental propuesto para la presente investigación fue un XS1-IIIa aéreo (>500 m de la costa), el cual tiene un factor de exposición ambiental de 5000 ($\Omega\text{-cm}^3/\text{año}$).

FACTOR DE RETARDO DEL CONCRETO ($r_{b,cl}$)

Se define como la capacidad que tiene la matriz cementicia para retener iones cloruro por medio de las fases hidratadas del cemento las cuales reaccionan con los iones cloruros permitiendo que llegue una cantidad menor a la superficie del acero de refuerzo, con este valor medimos la capacidad que tiene la matriz cementicia para retener iones cloruro. En la Tabla 5.9 se presentan los valores propuestos para el valor de retardo.

Tabla 5.46. Valores simplificados del factor de retardo (PNE83994-2, 2016)

TIPO DE CEMENTO	FACTOR DE RETARDO ($r_{b, cl}$)
TIPO I	1.30
TIPO II y III/A	1.50
TIPO III/B, III/C y IV	2.00

Para la presente investigación se hizo uso de un cemento tipo II con un factor de retardo de 1.5.

FACTOR EDAD (q).

El valor del factor edad “q” representa la pendiente de la recta en escala logarítmica de manera física representa el proceso de hidratación del concreto (conservado en estado húmedo). El valor de “q” hace referencia al exponente al que se eleva un rango de edades entre las que se desea calcular el aumento de resistividad con el tiempo.

Para obtener el valor del factor edad “q” (PNE83994-2, 2016) desarrolló una secuencia ordenada de pasos, los cuales se presentan a continuación:

1. Se obtienen los valores inversos de la Resistividad Eléctrica Húmeda (conductividad) a la edad de 28 días (t_o) y a la última edad que se midió la resistividad efectiva (t_n), (121 días).

2. Se grafican ambos valores en escala logarítmica, colocando en el eje de las ordenadas los valores de conductividad y en el eje de las abscisas el tiempo t_o y t_n , obteniendo una línea de tendencia potencial y añadiendo su ecuación en el gráfico, el valor absoluto del exponente se tomará como el factor edad “q”.

A continuación, se presentan los valores de REH así como su valor inverso (conductividad) a los 7, 14, 28, 60, 90 y 121 días.

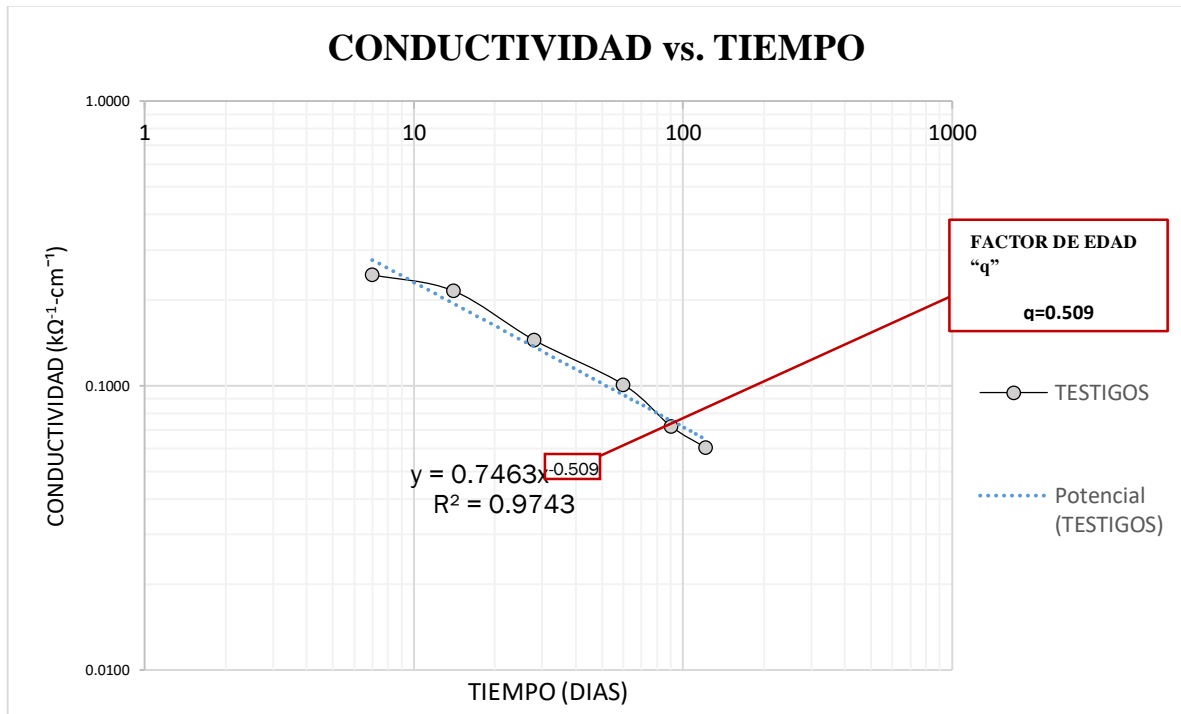
Tabla 5.47. Valores de REH clasificado por edades y mezclas. Fuente: Propia.

Número	Mezcla	ρ (k Ω -cm)					
		7	14	28	60	90	121
1	TESTIGOS	4.07	4.64	6.92	9.92	13.90	16.52
2	0.40%	3.50	4.75	6.74	10.47	12.84	15.67
3	0.80%	3.98	4.64	7.06	9.90	13.64	18.16
4	1.20%	3.91	5.18	6.69	12.12	14.44	18.78
5	0.8% PP	3.55	4.15	6.48	11.21	13.71	17.89

Tabla 5.48. Valores de conductividad clasificado por edades y mezclas. Fuente: Propia.

Número	Mezcla	CONDUCTIVIDAD (K Ω^{-1} -cm $^{-1}$)					
		7	14	28	60	90	121
1	TESTIGOS	0.246	0.216	0.145	0.101	0.072	0.061
2	0.40%	0.285	0.211	0.148	0.096	0.078	0.064
3	0.80%	0.251	0.216	0.142	0.101	0.073	0.055
4	1.20%	0.256	0.193	0.150	0.082	0.069	0.053
5	0.8% PP	0.282	0.241	0.154	0.089	0.073	0.056

Graficamos los datos de la mezcla testigo obteniendo como resultado las *Gráfica 5.11.* y *5.12.* Obtenemos el valor del factor edad “q”, el cual representa la pendiente de la recta en escala logarítmica.

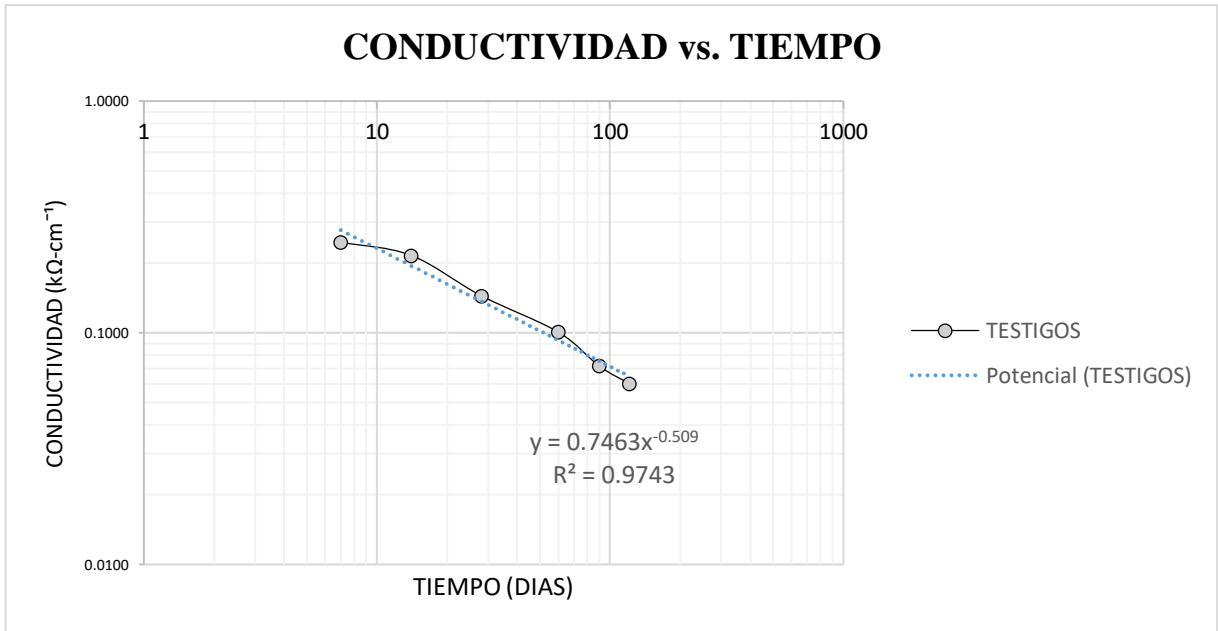


Gráfica 5.28 Valores de conductividad en los tiempos t_0 , t_n y factor edad “q” (escala logarítmica).

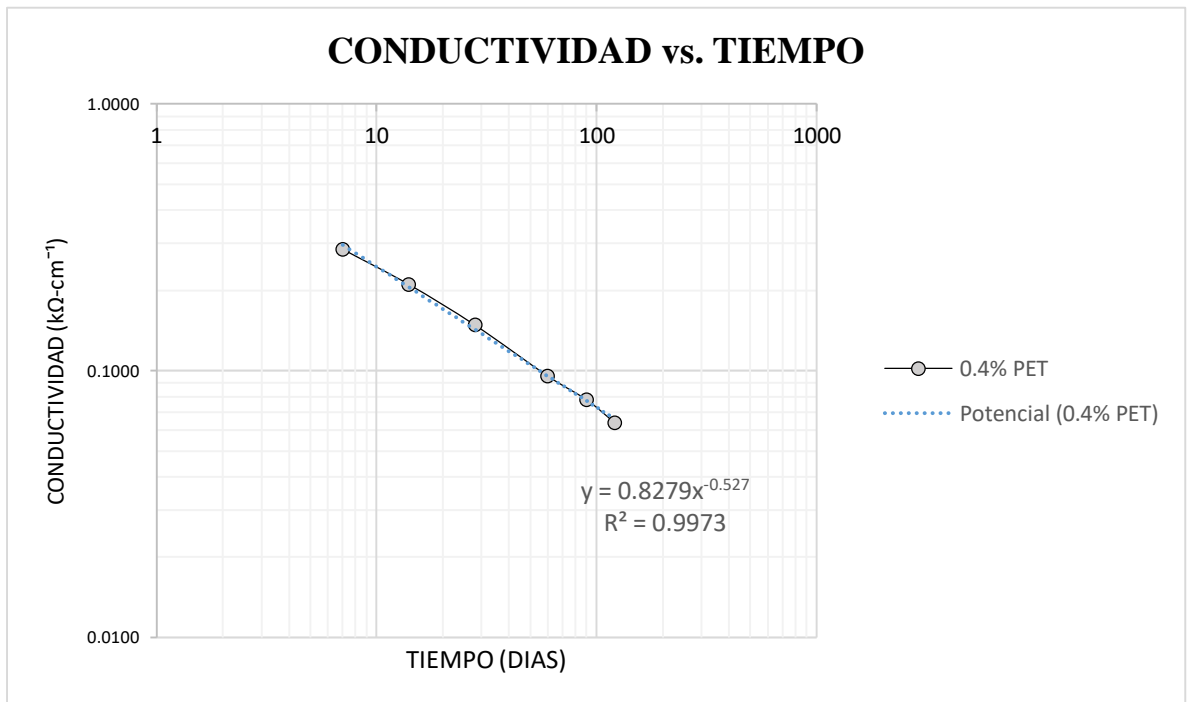
Realizamos éste proceso para las cinco mezclas de concreto en estudio, obteniendo el factor de edad y su correspondiente gráfica, las cuales se muestran a continuación:

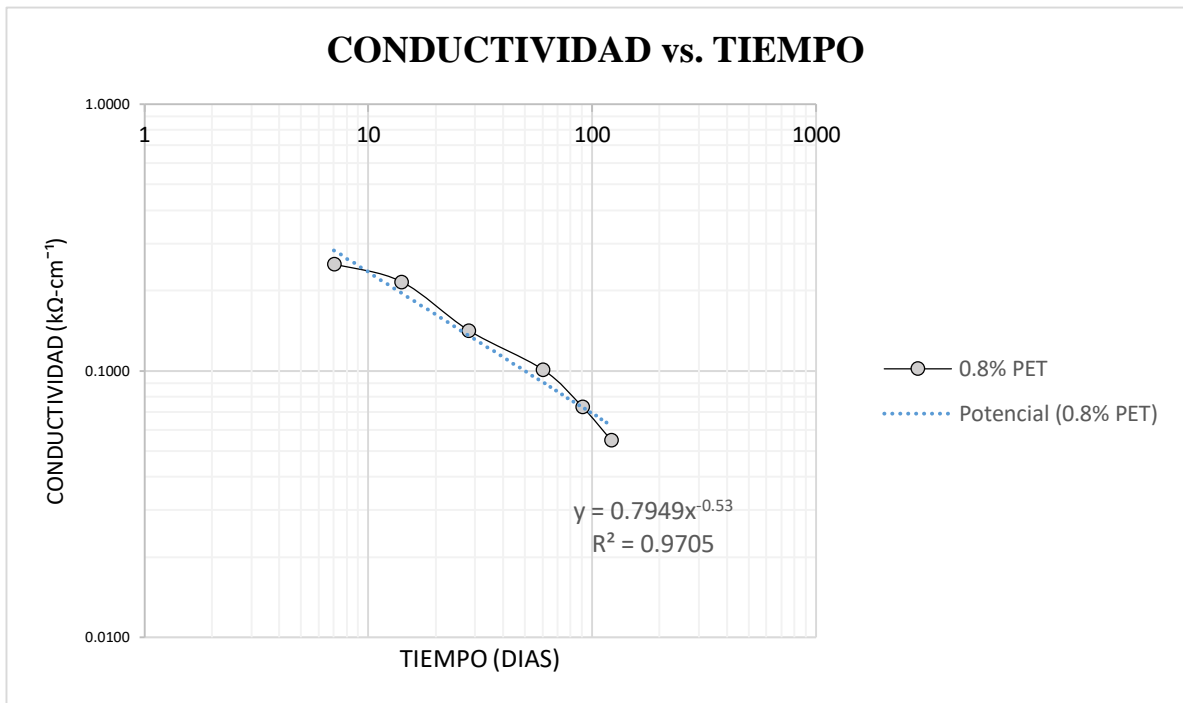
“Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno”

Gráfica 5.29. Valores de conductividad vs. tiempo para la mezcla testigo.

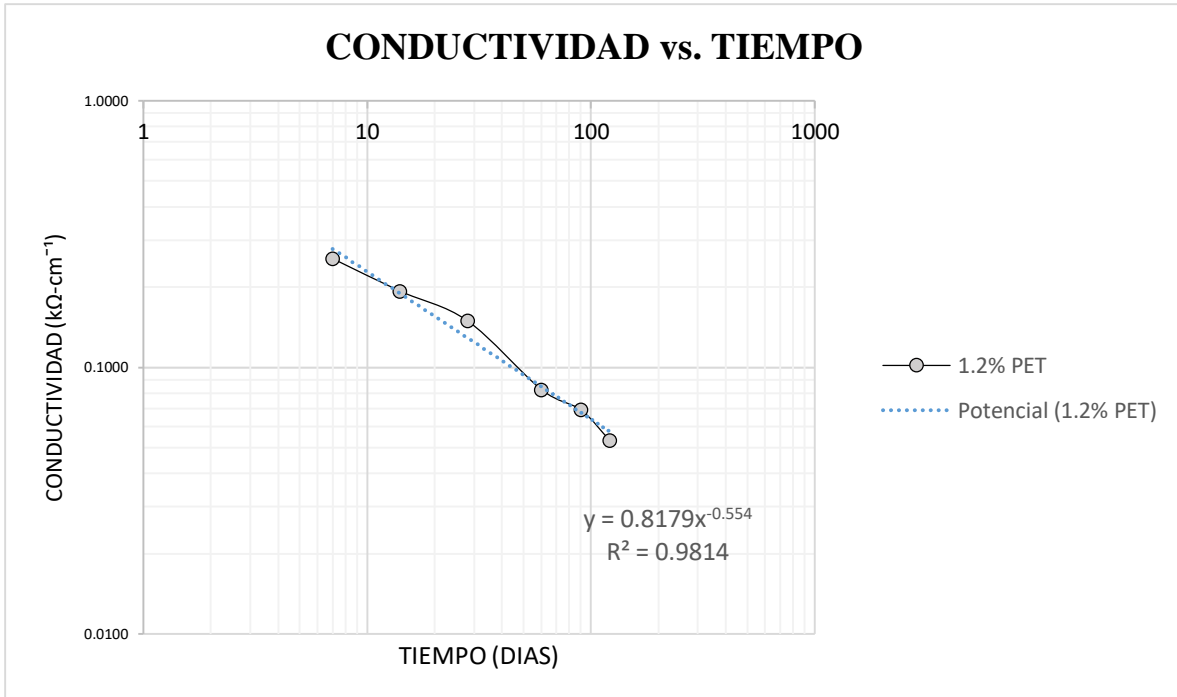


Gráfica 5.30. Valores de conductividad vs. Tiempo para la mezcla 0.4% PET.

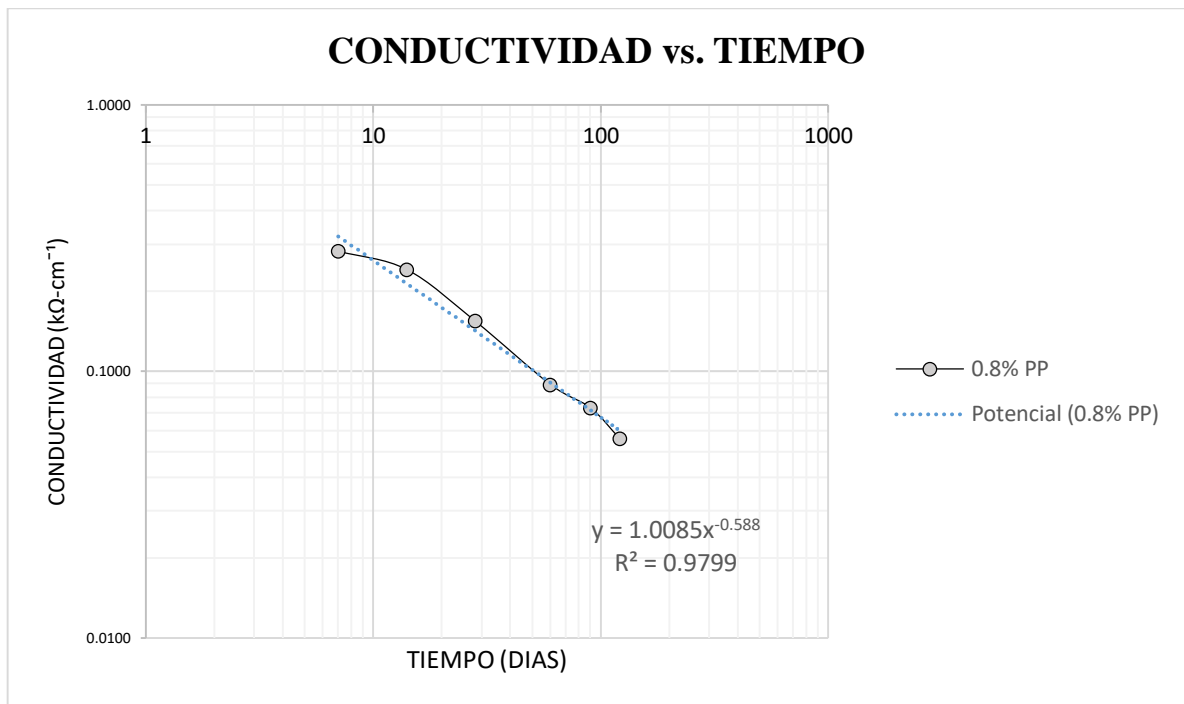




Gráfica 5.32. Valores de conductividad vs. tiempo para la mezcla 0.8%-PET.



Gráfica 5.31. Valores de conductividad vs. Tiempo para la mezcla 1.2%.PET.



Gráfica 5.33. Valores de conductividad vs. Tiempo para la mezcla 0.8%-pp.

En la siguiente tabla se muestran los valores de la conductividad obtenidos a partir de la ecuación que se genera del ajuste potencial:

Tabla 5.49. Valores de la conductividad obtenidos a partir de la ecuación que se genera del ajuste potencial.

Número	Mezcla	Ecuación	Valor absoluto de q
1	TESTIGOS	$0.7463x^{-0.509}$	0.509
2	0.40%	$0.8279x^{-0.527}$	0.527
3	0.80%	$0.7949x^{-0.53}$	0.53
4	1.2%	$0.8179x^{-0.554}$	0.554
5	0.8% PP	$1.0085x^{-0.588}$	0.588

"Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno"

Proponemos un espesor de recubrimiento de 5 cm para el cálculo del tiempo de iniciación (t_i) y con los valores de resistividad eléctrica húmeda, tenemos como resultado los siguientes datos:

Tabla 5.50. Conjunto de datos para realizar el cálculo de tiempo de iniciación.

Número	Mezcla	Espesor de recubrimiento (cm)	Valor de resistividad a 28 días (Ω -cm)	Última medida de resistividad en días (t_n)	Edad de 28 días	Factor de edad q	Factor de exposición ($\Omega\text{cm}^3/\text{año}$)	Factor de retardo r_b
		X_{cl}^2	$\rho_{ef,0}$	t_n	t_o	q	$F_{exp,cl}$	$r_{b,cl}$
1	TESTIGOS	5	6916.41	121	28	0.509	5000	1.5
2	0.40%	5	6744.09	121	28	0.527	5000	1.5
3	0.80%	5	7060.69	121	28	0.53	5000	1.5
4	1.2%	5	6685.44	121	28	0.554	5000	1.5
5	0.8% PP	5	6483.14	121	28	0.588	5000	1.5

Aplicando la fórmula para el cálculo del tiempo de iniciación (t_i) mediante los valores de resistividad eléctrica húmeda, obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 5.51. Resultados de tiempo de iniciación para las mezclas. (días)

NÚMERO	MUESTRA	TIEMPO DE INICIACIÓN (años)
1	TESTIGOS	109.3
2	0.40%	109.4
3	0.80%	115.0
4	1.20%	112.8
5	0.8% PP	115.0

Podemos observar que las mezclas con un mayor tiempo de iniciación fueron las mezclas 3 y 5, presentando un tiempo de iniciación de 115 años.

CAPÍTULO 6 . CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES.

6.1 CONCLUSIONES.

El presente trabajo nos ha dejado una buena dosis de aprendizaje, tanto en lo personal como en la formación profesional, lo cual pudiera señalarse como una primera conclusión que nos acompañará siempre.

Nos es grato, al término de ésta investigación, poder concluir que es posible mejorar la calidad del concreto en cuanto a su durabilidad con el uso de fibras PET, un material de uso muy común y con grandes beneficios en su reutilización.

En vista de la atención que ha generado el tema de la proliferación de PET en el aspecto social-ambiental, podemos decir que nuestra propuesta responde como una posible alternativa al uso de un material que está preocupando en lo referente al cuidado del medio.

Para la obtención de nuestras fibras PET, en cuanto al cortado y rayado, tuvimos que elaborar métodos y dispositivos propios que, para nuestros fines, nos fueron de gran utilidad, sin embargo, creemos que es pertinente sugerir el pensar en crear mejores aparatos de producción de fibras para futuras investigaciones, incluso para una producción a nivel industrial-empresarial.

Como resultado de nuestras pruebas en laboratorio, podemos afirmar que:

En los valores de resistencia a la compresión, todas las mezclas cumplieron con el 85% de la resistencia de diseño a los 28 días, las mezclas Testigo y 0.4%-PET superan el valor de diseño. A los 60 días todas las mezclas adicionadas con fibras de PET y Polipropileno superaron el f'_c de diseño, así como la mezcla testigo. Por lo que se puede concluir que la adición de fibras incrementa la resistencia a la compresión.

En la prueba de tensión indirecta obtuvimos que, a los 28 días todas las mezclas se encontraron dentro de los valores entre 0.4 y 0.7 veces la raíz cuadrada del f_c de diseño. La mezcla que tuvo una mejor respuesta a la prueba de tensión indirecta, fue la mezcla número dos, “0.4% PET”, con un valor de 3.1679 MPa a la edad de 28 días. Por lo cual podemos concluir que nuestro concreto cumple con la resistencia diseñada.

En cambio, en los resultados de porosidad, la mezcla 0.8%-PET tiene el mayor porcentaje de porosidad efectiva, convirtiéndolo en la mezcla menos conveniente en cuanto a porosidad con un 3.48%, sin embargo, la mezcla que mejor comportamiento resultó fue la 0.8% -PP, concluyendo que las fibras como adición al concreto sí mejoran las características de ésta en cuanto a porosidad.

Para la prueba de resistividad eléctrica húmeda es difícil concluir cual fue la mezcla que mejor comportamiento tuvo, ya que las correcciones por temperatura se realizaron únicamente a las edades de 96, 121 y 168 días, sin contar con los datos de REH corregidos por temperatura a las edades de 7, 14 y 28 días. Sin embargo, una de las mayores aportaciones de la presente investigación fue verificar que, efectivamente, la variación de temperatura afecta los valores de resistividad eléctrica húmeda, quedando como sugerencia que la temperatura se mantenga controlada por medio de una pila de curado, en caso de no ser posible, tomar las temperaturas al espécimen del concreto e integrarlo como un paso más en el procedimiento para la prueba de REH.

Las mezclas que resultaron con mejor tiempo de iniciación (vida útil) fueron las mezclas “0.8%-PET” y “0.8%-PP”, presentando un tiempo de iniciación de 115 años, muy buen valor dejando claro que los parámetros con los que fueron calculados no tuvieron una corrección por temperatura.

6.2 FUTURAS INVESTIGACIONES.

Existe una investigación previa realizada por el Instituto Mexicano del Transporte el cual presenta otro procedimiento experimental de corrección por temperatura, este consiste en obtener un valor del coeficiente de temperatura a lo largo de un intervalo de tiempo, en cambio el método implementado en esta investigación consistió en obtener un valor del coeficiente de temperatura por edad. Es por ello que resulta necesario realizar una comparación entre el método utilizado en la presente investigación y el método implementado por el IMT, analizando que tan efectivo es el método del IMT.

Es necesario también analizar la influencia que tiene el cambio de temperatura con las lecturas de REH en el proceso de curado del concreto. ¿Qué pasa cuando curamos un concreto (28 días misma mezcla) en agua fría y en agua caliente, dejando que se aclimaten antes de tomar su lectura de REH y porosidad? ¿Tienen la misma porosidad? ¿Tienen los mismos valores de REH?

Analizar el comportamiento del coeficiente de temperatura a edades tempranas, para poder establecer una tendencia del comportamiento del coeficiente de temperatura a lo largo del tiempo.

Hablando del tiempo de iniciación, sería necesario hacer más experimentación contemplando la corrección por temperatura para obtener datos más confiables de éste.

CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA

- "DURAR", R. I. (1998). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (Tercera Edición ed.)*. CYTED. CYTED.
- 211, A. C. (2002). *Diseño de mezclas de Concreto* .
- Amador Montaña, G. E. (2003). *Proceso de elaboración del cemento*. Sonora, México.: Universidad de Sonora .División de ingeniería .
- Andrés A. Torres Acosta, Miguel Martínez Madrid. (2001). *DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO CON CRITERIOS DE DURABILIDAD*. Sanfandila, Qro,.
- ARTURO CRISTÁN FRÍAS, I. I. (2003). *La situación de los envases de plástico en México*. Ciudad de México: Gaceta Ecológica.
- ASTM-C-128. (2004). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. E.E.U.
- ASTM-C-150. (2016). *Standard Specification for Portland Cement*. . ASTM.
- ASTM-C-266. (2015). *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles*.
- ASTM-C-40. (2004). *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*.
- ASTM-C-70. (2003). *Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate*.
- Carmen Andrade, P. H. (2000). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de horigón armado*. DURAR RED Iberoamericana XV.B.
- DELTA, T. (s.f.). *TEX DELTA NONWVENS FABRICS*. Obtenido de <https://texdelta.com/fibra-de-polipropileno-para-la-construccion/>
- Fernández, J. A. (2014). *Efecto en las propiedades en tensión de un material compuesto base cemento reforzado con fibra de PET reciclado*. Chihuahua, Chihuahua.: Centro de investigación en materiales avanzados S.C. POSGRADO.
- Greenpeace México - Laboratorio de Biodiversidad Arrecifal y Conservación, U. (2020). *Impacto de la contaminación por plástico en áreas naturales protegidas Mexicanas*. . México.
- Hernán Cortes, A. A. (1990). *COMO CONQUISTE A LOS AZTECAS*. MEXICO, D.F.: DIANA.

- Juárez, A. R. (2019). *Ley de Ohm*. Ciudad de México: Laboratorio de Electricidad y Magnetismo, UAM-Azacapotzalco.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Chicago, EE.UU: Portland Cement Association, PCA.
- MARÍA ALEJANDRA RIAÑO BOLAÑOS, C. C. (2019). *INFLUENCIA DE FIBRAS TIPO PET EN LAS CARACTERÍSTICAS DE RESISTENCIA Y DURABILIDAD DEL MORTERO DE CEMENTO HIDRÁULICO*. BOGOTA D.C.: UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA, Facultad de Ingeniería Civil.
- MEXICO A TRAVES DE LOS SIGLOS. (1981). MEXICO, D.F.: EDITORIAL CUMBRE S.A.
- Montiel, H. P. (s.f.). *Electricidad. Física*. .
- 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 Edificación, S.C.
- NMX-C-059-ONNCE. (2013). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN - CEMENTANTES HIDRÁULICOS- DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO DE CEMENTANTES HIDRÁULICOS (MÉTODO VICAT)*. MÉXICO: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación,S.C.
- NMX-C-073-ONNCE. (2004). *Industria de la Construcción- Agregados-Masa Volumétrica-Método de Prueba*. Méxcio: ONNCE.
- NMX-C-073-ONNCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-MASA VOLUMÉTRICA-MÉTODO DE PRUEBA*. México: ONNCE.
- NMX-C-077-ONNCE-2019. (2019). *Industria de la Construcción- Agregados para Concreto-Análisis Granulométrico- Método de Ensayo*. ONNCE.
- NMX-C-083-ONNCE. (2014). *Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes-Método de Ensayo*. ONNCE.
- NMX-C-083-ONNCE. (2014). *Industria de la Construcción-Determinación de la resistencia a compresión*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.
- NMX-C-088-ONNCE. (1997). *Industria de la construcción-Agregados-Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino*. México: ONNCE.
- NMX-C-109-ONNCE. (2013). *NMX-C-109-ONNCE. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Cabeceo de Especímenes*. . CDMX: ONNCE.

- NMX-C-111-ONNCCE. (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 Edificación, S.C.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agua para Concreto- Especificaciones*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-155-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Dosificado en Masa Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-156-ONNCCE-2010. (2010). *Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico- Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco*. ONNCCE.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2016). *Industria de la Construcción-Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-159-ONNCCE-2016. (2016). *Industria de la Construcción-Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-164-ONNCCE-2014. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso*. ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO FINO-METODO DE PRUEBA*. México: ONNCCE.
- NMX-C-170-ONNCCE. (1997). *Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo, al Tamaño Requerido para las Pruebas*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-414-ONNCCE-2017. (2017). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos- Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-504-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción-Determinación de la Absorción Capilar en Concreto Hidráulico-Método de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-504-ONNCCE-2015. (2015). *Industria de la Construcción-Determinación de la Absorción Capilar en Concreto Hidráulico-Método de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-514-ONNCCE-2019. (2019). *Industria de la Construcción-Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico-Especificaciones y Método de Ensayo*. ONNCCE.

“Comportamiento físico mecánico en mezclas de concreto modificados con fibras
PET y Polipropileno”

- NMX-C-530-ONNCCE. (2018). *Industria de la Construcción - Durabilidad - Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Criterios y Especificaciones*. ONNCCE.
- NMX-C-530-ONNCCE-2018. (2018). *Industria de la Construcción - Durabilidad - Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Criterios y Especificaciones*. ONNCCE.
- ONNCCE, N. 1. (2013). *Industria de la Construcción- Concreto - Elaboración y curado de Especímenes en el Laboratorio*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- Palapa, C. R. (2013). *EL PET COMO SISTEMA ALTERNATIVO PARA LA CONSTRUCCION DE MUROS EN LA VIVIENDA*. CDMX: Universidad Autónoma Metropolitana.
- PNE83994-2. (2016). *Durabilidad del hormigón*.
- RED DURAR (Durabilidad de la armadura). (2000). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. México: CYTED.
- Sanjuán Barbudo, M. Á. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*. Universidad de Alicante. Departamento de Construcciones Arquitectónicas.
- SEGOVIA, J. A. (2018). *“MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA ESTRUCTURAS LOCALIZADAS EN SUELOS SALINOS*. Morelia.
- TRANSPORTE, I. M. (2019). *Efecto de la temperatura de prueba y la resistividad eléctrica húmeda en cilindros de concreto*. Sanfandila, Qro.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*.