



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Que para obtener el grado académico de:

INGENIERA CIVIL

Presenta la tesis titulada:

PET: UN ACERCAMIENTO A LA REDUCCIÓN DEL USO DE GEOMATERIALES EN EL CONCRETO

Presenta:

Michelle Montserrat Hernández Pablo

Directora de tesis:

Elia Mercedes Alonso Guzmán

Codirector interno:

Cipriano Bernabé Reyes

Codirector externo:

Raúl Pável Ruíz Torres



Morelia, Michoacán a octubre de 2022.



DEDICATORIAS

A mi mancuerna de por vida, mi madre **Dalinda Pablo** quién siempre ha confiado en mi desde el momento cero. Por el infinito apoyo que me ha brindado y demostrarme que el amor incondicional existe, la vida nunca me alcanzará para agradecerte tanto. Te amo con todo el corazón mi cómplice.

A mi tía **Alma Leticia** por su confianza en mí, el gran apoyo que me ha dado y la seguridad que siempre me ha inculcado. Gracias por cuidarme siempre desde la libertad. Te amo.

Sin ustedes no sería ni la mitad de quién soy.

Gracias por siempre dejarme ser.

A mi ángel más grande, mi abuelito **Francisco Pablo**. Sé que me acompañas siempre desde donde quiera que estes. Te quiero y extraño siempre.

A mi mejor amiga **Karla**, por estar conmigo en todo momento y su apoyo incondicional, por siempre el ying y yang.

A **Lizbeth**, por su amistad sincera y el compartir la experiencia universitaria a mi lado. Gracias por hacer de los jueves un día divertido.

A **Francisco H.** sé que también me cuidas desde arriba. Gracias.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por abrirme sus puertas y hacer de mí una profesional.

Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil. Por el gran apoyo y colaboración de su personal para la elaboración de esta tesis.

Al **M.I Cipriano Bernabé** por el apoyo incondicional que me ha brindado en todos los aspectos. La confianza, tiempo y conocimiento que ha compartido conmigo.

A la **M.I Sandra Arguello** por todos los consejos y el gran apoyo académico que nunca se negó a darme.

Agradezco a la vida por haberme hecho coincidir con ustedes y brindarme su amistad y el estar en cada paso del proceso.

A la **Dra. Elia** por ofrecerme siempre el crecer académicamente y compartir su experiencia y conocimiento conmigo.

A mi padrino **M. I Esteban Brito** por la confianza, el apoyo y el abrirme siempre las puertas de su empresa.

Siempre estaré agradecida.

A toda mi familia:

Mi abuelita **Elvira Erape**, por siempre recibirme con una sonrisa y despedirme con su bendición que siempre me cuida.

A toda la fam. **Pablos Pablo** por el cariño, la confianza y apoyo que siempre me han dado en todo momento.

A los hnos. **Pablo Erape**, en especial a mis tíos **Adonis, Hereida, Vladimir** y **Cecilia**. Que me han apoyado en este camino desde la distancia.



A mis incondicionales, **Baldemarsito** y **Dieguito**. Gracias por su amistad y hermandad, así como todos las risas y momentos de complicidad compartidos en estos años. La carrera fue un camino más fácil gracias a ustedes.

Al team **ajolotitos** y **sección 08** por tantos momentos felices y las horas extras en la facultad.

Al servicio social del Laboratorio de Materiales al darme su ayuda en este proceso y por las amistades que se formaron en el proceso.



ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIAS	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE GRÁFICOS	vii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
JUSTIFICACIÓN	i
HIPÓTESIS	iii
OBJETIVOS	iii
OBJETIVO GENERAL	iii
OBJETIVOS PARTICULARES	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	2
2.1 Componentes del Concreto Hidráulico	2
2.1.1 Cemento	2
2.1.1.1 Tipos de cemento	2
2.1.2 Agregados pétreos	4
2.1.3 Agua	4
2.1.4 Tipos de Concreto	5
2.2 PET	5
2.2.1 Usos del PET en la Industria de la Construcción	8
2.2.2 Uso de PET como agregados	10
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	12
3.1 Caracterización de Materiales	12
3.1.1 Agua de mezclado	12
3.1.2 Cemento	12
3.1.3 Densidad	13
3.1.3.1 Densidad relativa del agregado fino	13
3.1.3.2 Densidad relativa del agregado grueso	15
	iv



3.1.4	Masas Volumétricas	16
3.1.5	Humedad de absorción	19
3.1.5.1	Humedad de absorción en agregados gruesos	19
3.1.5.2	Humedad de absorción en agregados finos	21
3.1.6	Granulometría en agregados gruesos y finos	22
3.1.7	Obtención del PET como sustituto del agregado grueso	29
3.2	Diseño de mezcla por el método del ACI	32
3.2.1	Revenimiento	33
3.2.2	Elección del tamaño máximo del agregado	33
3.2.3	Contenido de agua y aire	34
3.2.4	Relación agua/cemento	35
3.2.5	Cantidad de cemento	36
3.2.6	Volumen del agregado grueso	36
3.2.7	Agregado fino	37
3.2.8	Corrección por humedad	37
3.3	Pruebas al concreto fresco	38
3.3.1	Revenimiento	38
3.3.2	Masa Unitaria	39
3.3.3	pH	41
3.3.4	Temperatura	42
3.4	Elaboración de especímenes	42
3.4.1	Curado de especímenes	48
3.4.2	Cabeceo de especímenes	50
3.7	Pruebas destructivas	51
3.7.1	Compresión Simple: cilindros 10cmx20cm	52
3.7.2	Flexión en Vigas: 15cmx15cmx60cm	53
3.7.3	Módulo de Elasticidad	55
3.7.4	Tensión por Compresión Diametral	57
3.8	Pruebas No destructivas	59
3.8.1	Resistividad eléctrica	59
3.8.2	Velocidad de Pulso Ultrasónico	62
3.8.3	Frecuencia de Resonancia	63
4.	RESULTADOS	65
4.1	Caracterización de Materiales	65



4.1.1	Agua de mezclado	65
4.1.2	Cemento	66
4.1.3	Densidad	66
4.1.4	Masas Volumétricas	67
4.1.5	Absorción	67
4.1.6	Granulometría en agregados gruesos y finos	67
4.2	Diseño de mezcla por el método del ACI	69
4.3	Pruebas al concreto fresco	70
4.3.1	Revenimiento	70
4.3.2	Masa Unitaria	70
4.3.3	pH	71
4.3.4	Temperatura	71
4.4	Pruebas destructivas	71
4.4.1	Compresión Simple: cilindros 10cmx20cm	71
4.4.2	Flexión en Vigas	73
4.4.3	Módulo de Elasticidad	76
4.4.4	Tensión por Compresión Diametral	78
4.5	Pruebas No destructivas	81
4.5.1	Resistividad eléctrica	81
4.5.2	Velocidad de Pulso Ultrasónico	84
4.5.3	Frecuencia de Resonancia	86
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	88
6.	CONCLUSIONES	91
7.	REFERENCIAS	92



ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Análisis granulométrico de la arena usada en la investigación.	68
Gráfico 2. Análisis granulométrico de la grava usada en la investigación.....	68
Gráfico 3. Masas volumétricas del concreto en estado fresco.....	70
Gráfico 4. Resultados del esfuerzo a compresión en mezcla Testigo.	71
Gráfico 5. Resultado del esfuerzo a compresión en la mezcla con sustitución de PET-15%. 72	
Gráfico 6. Resultado del esfuerzo a compresión en la mezcla con sustitución de PET-30%. 73	
Gráfico 7. Resultados de Flexión en Vigas para la mezcla Testigo.	73
Gráfico 8. Resultado de flexión en vigas de la mezcla con sustitución de PET-15%.	74
Gráfico 9. Resultado de flexión en vigas de la mezcla con sustitución de PET-30%.	75
Gráfico 10. Módulos de elasticidad de especímenes	77
Gráfico 11. Resultados comparativos de módulos de elasticidad a 28 y 60 días para todas las mezclas.	77
Gráfico 12. Resultados de tensión indirecta de la mezcla Testigo.....	78
Gráfico 13. Resultados de tensión indirecta para la mezcla con sustitución de PET-15%.....	79
Gráfico 14. Resultados de tensión indirecta para la mezcla con sustitución de PET-30%.....	80
Gráfico 15. Resultados de resistividad eléctrica de la mezcla Testigo.	82
Gráfico 16. Resultado de resistividad eléctrica de la mezcla con sustitución de PET-15%. ..	83
Gráfico 17. Resultado de resistividad eléctrica de la mezcla con sustitución de PET-30%. ..	83
Gráfico 18. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico de la mezcla Testigo.	84
Gráfico 19. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico de la mezcla con sustitución PET-15%.	85
Gráfico 20. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico de la mezcla con sustitución PET-30%.	85
Gráfico 21. Resultados de frecuencia de resonancia para la mezcla Testigo.....	86
Gráfico 22. Resultados de frecuencia de resonancia de la mezcla con sustitución PET-15%.	86
Gráfico 23. Resultados de frecuencia de resonancia de la mezcla con sustitución PET-30%.	87
Gráfico 24 Relación entre el esfuerzo a compresión y Resistividad eléctrica de la mezcla testigo.....	88
Gráfico 25 Relación entre el esfuerzo a compresión y Resistividad eléctrica de la mezcla con PET15%.	89



Gráfico 26 Relación entre el esfuerzo a compresión y Resistividad eléctrica de la mezcla con PET30%. 89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Empleo de “Ladribotellas”. (Plastics Technology México, 2017) 8

Ilustración 2. Detalle de paneles de PET aligerado. (Plastics Technology México, 2017) 9

Ilustración 3. Ladrillos de PET. (Rte de México, 2020) 9

Ilustración 4. Bulto de Cemento gris, marca Tolteca. (CEMEX, 2022) 12

Ilustración 5. Agregado grueso en picnómetro 14

Ilustración 6 Cálculo del volumen del PET para la prueba de densidad. 16

Ilustración 7. Obtención de la masa del agregado grueso en la prueba de MVSS y MVSV. . 18

Ilustración 8. Masa del agregado enrasado y siendo pesado. Fuente propia 18

Ilustración 9. Masa volumétrica del PET. 19

Ilustración 10. Material saturado y secado superficialmente. 20

Ilustración 11. Secado del material grueso. 21

Ilustración 12. Material fino en la parrilla en proceso de secado. 22

Ilustración 13. Tendido de arena para tomar la muestra. 23

Ilustración 14. Material fino a través de mallas para granulometría..... 24

Ilustración 15. Material grueso retenido en mallas. 27

Ilustración 16. PET en el proceso de cortado en láminas..... 30

Ilustración 17. Medición de temperatura del PET en estado líquido. 30

Ilustración 18. Temperatura del PET endurecido. 31

Ilustración 19. Forma “bruta” del PET de espesores aproximados a $5\text{ cm} \pm 2\text{ cm}$ 31

Ilustración 20. Pesaje del PET en estado sólido fuera del molde. 31

Ilustración 21. Cribado del PET por malla $\frac{3}{4}$ de pulgada..... 32

Ilustración 22. Tendido del PET a utilizar en la mezcla. 32

Ilustración 23. a) Equipo de prueba para el revenimiento. b) Lectura de revenimiento..... 38

Ilustración 24. Determinación de la masa unitaria del concreto fresco. 41

Ilustración 25. Determinación del pH de la mezcla de concreto. 42

Ilustración 26. Termómetro de carátula..... 42



Ilustración 27. Mezcla de concreto en la revolvedora.....	43
Ilustración 28. Vaciado de la mezcla en los moldes para su varillado.	44
Ilustración 29. Varillado para la compactación de la mezcla.	45
Ilustración 30. Golpes contra el piso en moldes prismáticos.	46
Ilustración 31. Golpes en el molde para la eliminación de burbujas de aire.	46
Ilustración 32. Enrasamiento de los especímenes.	47
Ilustración 33. Especímenes cubiertos para conservar la humedad.....	47
Ilustración 34. Descimbrado de especímenes.....	48
Ilustración 35. Espécimen TM.....	48
Ilustración 36. Espécimen MPET-15%.....	49
Ilustración 37. Espécimen MPET-30%.....	49
Ilustración 38. Diferentes especímenes de mezclas en la pila de curado.....	50
Ilustración 39. Realización del cabeceo de especímenes. (Fuente propia)	51
Ilustración 40. Aplicación de la carga axial a cilindros de concreto.	52
Ilustración 41. Especificaciones de la prueba a flexión (NMX-C-191-ONNCCE, 2004).	54
Ilustración 42. Desarrollo de la prueba de flexión en vigas en estudio.	55
Ilustración 43. Esquema del ensayo de módulo de elasticidad con un micrómetro.	56
Ilustración 44. Colocación del cilindro en la máquina universal de pruebas.	56
Ilustración 45. Espécimen colocado en la máquina universal.....	58
Ilustración 46. Montaje del espécimen para el método directo.	60
Ilustración 47. Realización de la prueba a los cilindros de concreto.....	60
Ilustración 48. Montaje del espécimen para medir resistividad real por el método directo.....	61
Ilustración 49. Prueba de VPU en cilindros de concreto.....	63
Ilustración 50. Frecuencia de resonancia en vigas de concreto.	65
Ilustración 51. Resultado de flexión de mezcla testigo.	74
Ilustración 52. Viga a flexión con 15% de PET en sustitución.	75
Ilustración 53. Resultado de viga a flexión de 30% con PET.....	76
Ilustración 54. Cilindro abierto de mezcla testigo.	78
Ilustración 55. Cilindro abierto con mezcla MPET-15%.....	79
Ilustración 56. Cilindro abierto con mezcla MPET-30%.....	80



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentajes de reciclaje de plástico en México 2019. (Plastics Technology México, 2021)	i
Tabla 2. Destinos de la producción del plástico en México. (Forbes Staff, 2021)	ii
Tabla 3. Clasificación del cemento por sus componentes. (NMX-C-414-ONNCCE, 2017).....	2
Tabla 4. Clasificación del cemento por su resistencia a la compresión. (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)	3
Tabla 5. Clasificación del cemento por sus características especiales. (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)	3
Tabla 6. Clasificación del cemento de acuerdo a la ASTM. (ASTM C150, 2022)	3
Tabla 7. Datos técnicos del PET. (Richardson & Lokensgard, 1999)	6
Tabla 8. Resistencia del PET a diferentes sustancias químicas. (Richardson & Lokensgard, 1999)	7
Tabla 9. Especificaciones mecánicas del cemento CPC 30RS Tolteca. (CEMEX, 2022).....	13
Tabla 10. Especificaciones físicas del cemento CPC30 RS Tolteca. (CEMEX, 2022).....	13
Tabla 11. Llenado del análisis granulométrico del agregado fino	24
Tabla 12. Límites de granulometría para agregado fino según (NMX-C-111-ONNCCE, 2018) y (ASTM C33-03, 2010)	26
Tabla 13. Llenado del análisis granulométrico del material grueso	27
Tabla 14. Límites granulométricos del agregado grueso. (NMX-C-111-ONNCCE, 2018).....	28
Tabla 15. Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción. (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1989)	33
Tabla 16. Tamaño máximo nominal según tipo de construcción. (Niño Hernández, 2010) ...	33
Tabla 17. Agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y TMG.....	34
Tabla 18. Relación agua/cemento y resistencia a la compresión del concreto. (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1989)	35
Tabla 19. Relaciones agua/cemento máximas permisibles para concreto sujeto a exposiciones severas. (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1989)	35
Tabla 20. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto. (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1989).....	36
Tabla 21. Cálculo tentativo del peso del concreto fresco. (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1989)	37
Tabla 22. Número de capas requeridas para la realización de los especímenes. (NMX-C-159-ONNCCE, 2016)	44
Tabla 23. Especificaciones de varillado por capa de mezcla. (NMX-C-159-ONNCCE, 2016).....	44



Tabla 24. Análisis del agua empleado en las mezclas.	65
Tabla 25. Propiedades físicas y químicas. (CEMEX, 2015)	66
Tabla 26. Cálculo de densidad del PET.	66
Tabla 27. Resumen del cálculo de las masas volumétricas	67
Tabla 28 Resultados de Humedad de Absorción en Agregados	67
Tabla 29. Datos iniciales del proporcionamiento.	69
Tabla 30. Datos de los agregados y materiales.	69
Tabla 31. Resumen de datos del proporcionamiento para 1 m ³	69
Tabla 32. Criterios para inferir el riesgo por corrosión seg'un la calidad del concreto evaluada con la prueba de resistividad eléctrica de la normativa mexicana NMX-C-514.....	81
Tabla 33 Criterio de durabilidad, clasificación de resultados de la VPU.	84



JUSTIFICACIÓN

La problemática ambiental en la actualidad es de suma importancia, por lo que es necesario que desde todas las disciplinas se esté en constante búsqueda de posibles soluciones ambientales.

El PET es el plástico más utilizado alrededor del mundo debido a su practicidad para almacenar bebidas de la industria alimentaria o industrial. Sin embargo, la producción siempre está en aumento y el reciclaje no ha sido lo suficientemente fuerte para contrarrestar los efectos de contaminación que produce su producción.

En México la comercialización del PET se contabiliza en 30 mil millones de botellas y garrafones de PET, de los cuales solo se llega a reutilizar o reciclar un 5%. (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2018)

Lo que nos deja con más del 80% de producción de botellas de PET que sigue sin algún tratamiento de reciclaje. Mismo que suele terminar en basureros o rellenos sanitarios donde su proceso de degradación es de cientos de años o simplemente también los podemos encontrar en calles, carreteras, bosques, ríos, lagos o mares.

Durante el año 2019 según la Asociación Nacional de Industrias de Plástico (ANIPAC), el total de toneladas recicladas fue de 1,913,710 en México. Los plásticos que se reciclaron se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Porcentajes de reciclaje de plástico en México 2019. (Plastics Technology México, 2021)

Tipo de plástico	Cantidad reciclada (%)	Cantidad reciclada (ton)
Polietileno	51.2	979,819
PET	22.1	422,292
Polipropileno	18.2	348,295
PVC	2.1	40,187
Poliestireno	1.8	34,446
Otros	4.6	88,030



Cerca de 7 millones de toneladas de plástico fueron producidas en México durante el 2020, dirigidas a diversas industrias. Aunque la mayoría son destinados para la producción de productos de vida corta, tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Destinos de la producción del plástico en México. (Forbes Staff, 2021)

Sector destino	Cantidad de plástico (%)	Cantidad de plástico (ton)
Empaque, envase y embalaje	47	3,290,000
Consumo general	21	1,470,000
Construcción	12	840,000
Electrónica	7	490,000
Automotriz	6	420,000
Agrícola	3	210,000
Médico	2	140,000
Otros	2	140,000

Es por eso que se ha buscado que aquellas botellas que no logran llegar al proceso de reciclaje sean utilizadas en volumen con aplicación en la industria de la construcción. En este caso como un material suplementario del concreto.

Buscando que se aminore el impacto ambiental a manera de reducción del uso de bancos de materiales y siendo una fuente de reciclaje del PET.



HIPÓTESIS

La sustitución parcial de agregado grueso por partículas de PET generadas a partir de tratamiento térmico y mecánico provee al concreto de propiedades físicas y mecánicas similares a las de un concreto elaborado convencionalmente.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un concreto hidráulico base cemento portland utilizando como material alternativo el PET de los envases, tratado bajo procedimientos térmicos y mecánicos, con el objetivo de reducir la cantidad de plásticos en el ambiente a la vez que se mantengan las propiedades físicas y mecánicas del concreto endurecido.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Diseñar por el método del ACI una mezcla de concreto con sustitución parcial de agregado grueso por PET reciclado.
- Evaluar las propiedades físicas de la mezcla en estado plástico, que consisten en la fluidez y las masas volumétricas.
- Comparar los resultados, entre mezclas con PET y mezcla control, de las pruebas destructivas y no destructivas realizadas a los especímenes de concreto endurecido.
- Analizar la pertinencia del uso de PET en las mezclas de concreto hidráulico considerando los resultados finales de las pruebas realizadas en laboratorio.



RESUMEN

El plástico es uno de los materiales con mayor presencia a nivel global dejando a un lado la sustentabilidad en su producción y distribución. La mayoría de los plásticos desperdiciados son conformados por el Tereftalato de polietileno (PET), pues su principal uso es en las botellas de un solo uso y como contenedor de líquidos. Por eso la reutilización y reciclaje de materiales de desecho, y su aplicación en la industria de la construcción ha sido motivo de estudio en los recientes años. Este estudio presenta la implementación de botellas de PET como agregado grueso en la mezcla de concreto hidráulico como sustitución parcial del agregado natural triturado. El agregado de PET es el resultado de un proceso térmico al que se sometieron las botellas de plástico (PET) para después ser triturados para la obtención de diversos tamaños aptos para considerarse como reemplazo de la grava natural. Una serie de especímenes de concreto fueron elaborados para la realización de esta experimentación, con una resistencia a la compresión ($f'c$) de 250 kg/cm². Los especímenes elaborados fueron vigas de 15cm x 15cm x 60cm y cilindros de 10 cm x 20cm, para 3 mezclas con 0%, 15% y 30% de sustitución del agregado natural por PET. Para evaluar las propiedades de trabajabilidad, densidad, resistencia a la compresión, módulos de elasticidad, resistencia a flexión, tensión indirecta como pruebas destructivas y de igual manera las no destructivas. Los resultados experimentales obtenidos son comparados con los criterios establecidos en las Normas Mexicanas y Americanas vigentes. Las mezclas con mayor cantidad de sustitución por PET (30%) tuvieron un comportamiento mecánico menos favorable, sin embargo, en la prueba de resistividad eléctrica presentaron resultados convenientes. Esto se atribuye a la superficie lisa de los agregados, a su baja densidad y a la propiedad aislante. Favorablemente se tienen masas volumétricas menores en las mezclas con una mayor cantidad de PET.

Palabras Clave: Concreto, PET, Mezclas Ecológicas, Pruebas destructivas, Pruebas No Destructivas.



ABSTRACT

The plastic is one of the materials with greater presence worldwide leaving aside the sustainability in its production and distribution. Most of the wasted plastics are made of poly ethylene terephthalate (PET), since its main use is in single-use bottles and as a liquid container. That is why the reuse and recycling of waste materials, and their applications in the construction industry, has been a reason for study in recent years. This study examines the implementation of PET bottles as coarse aggregates in the hydraulic concrete mixture as a partial replacement for the crushed natural aggregate. The PET aggregate is the result of a thermal process to which the plastic bottles (PET) were subjected and then crushed to obtain various sizes suitable to be considered as a replacement for natural gravel. A series of concrete specimens were prepared for the realization of this experiment, with a compressive strength of 250 kgf/cm². The specimens made were 15cm x 15cm x 60 cm for the beams and 10cm x 20cm for the cylinders, for mixtures with 0%, 15% and 30% replacement of the natural aggregate with PET. To evaluate the properties of workability, density, compressive strength, elastic modulus, flexural strength, diametral compression as destructive test and also non-destructive ones. The experimental results obtained were compared with the established criteria in the current Mexican and American Standards. The mixtures with the highest amount of PET substitution (30%) have a less favorable mechanical behavior, however in the electrical resistivity test they presented appropriate results. This is attributed to the smooth surface of the aggregates, their low density and the insulating property. Favorably the unit weight was lower for the highest amount of PET in the mixture.

Keywords: Concrete, PET, Ecologic mixtures, Destructive tests, Non-destructive tests.



1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo muestra una posibilidad a la implementación de un material alternativo en las mezclas de concreto con el que se busca el poder reemplazar a los agregados naturales, específicamente los agregados gruesos que comúnmente se conocen como grava en el concreto. Reduciendo así la explotación de los bancos de materiales, que son recursos naturales no renovables. Ayudando a la sustentabilidad en la producción de concreto.

El nuevo material a implementar es el resultado del procedimiento de reciclaje de botellas de PET, con un tratamiento térmico.

La aplicación del PET en el concreto es la finalidad de la implementación de este material, es por eso que se necesita evaluar de manera precisa el comportamiento del mismo ante las sollicitaciones mecánicas, los esfuerzos y usos que puede llegar a tener en la industria de la construcción.

Para obtener un parámetro que nos ayude a tener control de los nuevos datos generados con la implementación del nuevo material, se realizó una mezcla sin ningún cambio, es decir, hecha con los materiales y agregados comunes del concreto. Y aquellas con el nuevo material de PET.

Para las siguientes mezclas experimentales se optó por implementar el material de PET en sustituciones parciales del agregado grueso, con dos cantidades propuestas. Iniciando con la sustitución del 15% de la grava natural del total necesitado para la mezcla y un 30% implementado de la misma manera.

Teniendo así dos mezclas que se compararán con la mezcla que no lleva alguna adición o sustitución. Por esta razón es fundamental la realización de pruebas en un laboratorio de materiales que servirán para determinar el comportamiento mecánico y físico de cada una de las mezclas. Proponiendo sus posibles usos ante la diversidad de entornos.



2. MARCO TEÓRICO

2.1 Componentes del Concreto Hidráulico

“El concreto es un material inorgánico finamente pulverizado que, al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava asbesto u otros materiales, tiene la capacidad de fraguar y endurecer incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante su hidratación y que una vez endurecido, desarrolla su resistencia y conserva su estabilidad”. (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)

2.1.1 Cemento

En la elaboración de cementos existen diversos tipos de acuerdo a sus componentes (Tabla 3), que nos ofrecen ciertas características especiales (Tabla 5) con un fin en específico para darle mejor calidad o la finalidad esperada de nuestra mezcla según el uso que se le pretenda dar ya que se propone un a resistencia ($f'c$). Todos estos tipos de cemento pueden ser clasificados de acuerdo a sus diversas características, por lo que encontramos los siguientes de acuerdo a la (NMX-C-414-ONNCCE, 2017).

2.1.1.1 Tipos de cemento

- **Por sus componentes.**

Tabla 3. Clasificación del cemento por sus componentes. (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)

TIPO	DENOMINACIÓN
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CPE G	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno



- **Por su resistencia a la compresión**

Tabla 4. Clasificación del cemento por su resistencia a la compresión. (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)

TIPO	EDAD DE PRUEBA	RESISTENCIA MÍNIMA	RESISTENCIA MÁXIMA
20	28 días	20 (N/mm ²)	40 (N/mm ²)
30 y 30R		30 (N/mm ²)	50 (N/mm ²)
40 y 40R		40 (N/mm ²)	-

- **Por sus características especiales**

Tabla 5. Clasificación del cemento por sus características especiales. (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)

NOMENCLATURA	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES
RS	Resistente a los Sulfatos
BTRA	Baja Reactividad Alcalina Agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

De acuerdo a la *American Society for Testing Materials* están designados 8 tipos de cementos con respecto a la Norma Americana (ASTM C150, 2022) que se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Clasificación del cemento de acuerdo a la ASTM. (ASTM C150, 2022)

Tipo I	Normal
Tipo IA	Normal con aire incluido
Tipo II	Moderada resistencia a los sulfatos
Tipo IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido
Tipo III	Alta resistencia inicial (alta resistencia temprana)
Tipo IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido



Tipo IV	Bajo calor de hidratación
Tipo V	Alta resistencia a los sulfatos

2.1.2 Agregados pétreos

Los agregados son materiales de naturaleza pétreo que pueden proceder de minas, de bancos de extracción, de la trituración de elementos de concreto o también resultantes de un proceso industrial que, al ser mezclados con cementantes, permiten según el caso la elaboración de concretos y morteros (NMX-C-111-ONNCCE, 2018)

Como es bien conocido los materiales pétreos agregan la parte de volumen dentro de la mezcla pues ocupan la mayor parte, es por eso que el comportamiento de ellos influye directamente en el comportamiento del concreto.

Según el tamaño de los agregados se pueden clasificar en dos grupos:

- **Agregados finos:** Conocidos como arena o rocas trituradas con tamaños menores a 5 mm.
- **Agregados gruesos:** Son las gravas o rocas trituradas con partículas mayores a los 5 mm.

2.1.3 Agua

El agua en una mezcla de concreto es fundamental para su elaboración, ya que reacciona con el cemento al hidratarse. Está relacionado directamente con las características de diseño, pues nos determinará la trabajabilidad de la mezcla y así mismo la resistencia que tendrá.

Se busca que el agua empleada en la realización de la mezcla sea lo más pura posible, es decir que no contenga demasiados contaminantes o sales. La norma (NMX-C-122-ONNCCE, 2019) nos establece dichos límites para que se pueda emplear en la elaboración de la mezcla y posteriormente en el proceso de curado del concreto.



2.1.4 Tipos de Concreto

A parte del concreto convencional existen aquellos que tienen dosificaciones diferentes en el diseño o cuentan con materiales extras en su elaboración.

- Concreto premezclado

Es el concreto que se dosifica en planta, en donde los ingredientes del concreto pasan por una selección de calidad exigente y las dosificaciones se realizan en peso, el mezclado se puede realizar en la misma planta o también en camiones mezcladores y es transportado a obra. (Guevara Díaz, 2014)

- Concreto de fraguado rápido

Este tipo de concretos necesita la implementación de aditivos a la mezcla que aporten los factores que hagan que el proceso de fraguado sea en menor tiempo al convencional.

- Concretos reforzados con fibras

Modifica las propiedades mecánicas del concreto con la finalidad de que su resistencia sea mayor a las deformaciones.

Existen diversas fibras para emplearse como lo son de vidrio, acero, PET, Bagazo de caña de azúcar etc.

2.2 PET

Su denominación técnica es polietileno tereftalato o politereftalato de etileno y forma parte del grupo de los termoplásticos.

El PET (como comúnmente se conoce en tereftalato de polietileno) pertenece al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres. Fue descubierto por los científicos británicos Whinfield y Dickson, en el año 1941, quienes lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras.

Históricamente su país estaba en plena guerra y existía una apremiante necesidad de buscar sustitutos para el algodón proveniente de Egipto. Recién a partir de 1946 se lo empezó a utilizar industrialmente como fibra y su uso textil ha proseguido hasta el presente. En 1952 se lo comenzó a emplear en forma de film para el embasamiento de alimentos. Pero la aplicación



que le significó su principal mercado fue en envases rígidos, a partir de 1976 (Repositorio Institucional de la Universidad ESPE, 2011).

Desde ese entonces se ha convertido en uno de los materiales plásticos más utilizados, en la actualidad es destinado especialmente para la fabricación de envases, por lo que su producción está en constante aumento.

En su composición química, encontramos que es un tipo de poliéster. Obtenido en la policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol.

Dentro de sus características se encuentran las siguientes (ACROPLÁSTICOS, 2022):

- Ligero
- Cristalino, con admisión a cargas de colorantes
- Resistencia química
- Resistente y flexible

El PET ha sido estudiado obteniendo los datos técnicos, que son mostrados en la tabla 7.

Tabla 7. Datos técnicos del PET. (Richardson & Lokensgard, 1999)

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm ³	1.34 – 1.39
Resistencia a la tensión	MPa	59 – 72
Resistencia a la compresión	MPa	76 – 128
Resistencia al impacto	J/mm	0.01 – 0.04
Dureza	---	Rockwell M94 – M101
Dilatación térmica	10 ⁻⁴ / °C	15.2 – 24
Resistencia al calor	°C	80 – 120
Resistencia dieléctrica	V/mm	13780 – 15750
Constante dieléctrica (60 Hz)	---	3.65
Absorción de agua (24 h)	%	0.02
Velocidad de combustión	Mm/min	Consumo lento
Efecto luz solar	---	Se decolora ligeramente
Calidad de mecanizado	---	Excelente
Calidad óptica	---	Transparente a opaco
Temperatura de fusión	°C	244 - 254

Así como la capacidad de resistencia química en la tabla 8.



Tabla 8. Resistencia del PET a diferentes sustancias químicas. (Richardson & Lokensgard, 1999)

Alcoholes	
Metanol	Muy resistente
Étanol	Muy resistente
Glicerina	Muy resistente
Alcohol bencílico	Resistente
Disolventes	
Éter	Muy resistente
Acetona	No resistente
Ácidos	
Ácido clorhídrico	Resistente
Ácido nítrico	Muy resistente
Ácido sulfúrico	No resistente
Sales	
Carbonatos alcalinos	Muy resistente
Cianuros	Muy resistente
Fluoruros	Muy resistente
Sustancias varias	
Cloro	Muy resistente
Agua	Muy resistente
Peróxido de hidrógeno	Muy resistente
Oxígeno	Muy resistente

Es importante mencionar que el PET puede ser reciclado, es un proceso en el cual se separa, se limpia, se lleva a un proceso de trituración y nuevamente a ser lavado.

Ya que se encuentra el plástico resultante se somete a temperatura y presión para obtener la materia prima de PET y poder utilizarlo en un nuevo producto.

El PET puede ser reciclado múltiples veces, pero para uso alimentario solo se permite un primer nivel de reciclaje, ya que se ha pasado este nivel se utiliza para otros productos (Ecoologic, 2022).

- Fibra, fibra de relleno textil,
- Correas



- Botellas y envases para usos no alimentarios como detergentes y productos fitosanitarios.

Si no se realiza un proceso de reciclaje del PET este puede tardar entre 500 a 600 años en degradarse por completo.

2.2.1 Usos del PET en la Industria de la Construcción

El PET se ha convertido en uno de los materiales más usados en la sociedad actual, lo que lo hace de fácil acceso y de difícil reciclado. Es por eso que se ha buscado la manera de implementarlo en una de las industrias más importantes de México y de todo el mundo: La construcción.

A través de la investigación y experimentación se han logrado este tipo de usos a través de los años en México y alrededor del mundo.

- **Casas de PET**

Con el uso de botellas de PET, la Asociación Vivienda Emergentes (Viem) construyó casas de manera segura, ecológica y sustentable. La idea principal se desarrolló con la finalidad de ayudar a todos los afectados por el sismo del mes de septiembre en el año 2017. Se le dio el nombre de “Ladribotellas” pues se rellenan las botellas con arena, grava, caucho o con los escombros de construcciones que fueron demolidas después del sismo.



Ilustración 1. Empleo de “Ladribotellas”. (Plastics Technology México, 2017)



- **Paneles de PET aligerado**

Son sistemas parecidos a los paneles tipo W, que tienen la cuadrícula convencional y varillas horizontales. Para ser empleados como muros de carga, teniendo en el núcleo el PET vacío. Una losa también se puede elaborar con dichos paneles.



Ilustración 2. Detalle de paneles de PET aligerado.
(Plastics Technology México, 2017)

- **Ladrillos de PET**

Son ladrillos de plástico que están compuestos de un 80% de arena y 20% de plástico. Dichos ladrillos son calentados a 200°C para crear una masa resistente, siendo tan sólido como un bloque normal pero aligerado. Después de enfriarse toma esta forma gracias a un molde.



Ilustración 3. Ladrillos de PET. (Rte de México, 2020)



2.2.2 Uso de PET como agregados

La reutilización de materiales de desperdicio como lo es el plástico, vidrio y más en la elaboración de mezclas de concreto ha sido estudiado en los años pasado, en busca de reducción de costos e impacto ambiental.

- **PET como agregado fino**

Kangavar et al. han realizado investigaciones prácticas de la implementación del PET como reemplazo del agregado fino en las mezclas de concreto, donde se han encontrado resultados para las diferentes proporciones en la mezcla (Kangavar, Lokuge, Manalo, Karunasena, & Frigione, 2022). Los resultados experimentales arrojan lo siguiente:

- El concreto con 10% y 30% de reemplazo, resiste un esfuerzo a la compresión de 32 MPa.
- El concreto con 50% de sustitución, resiste 25.7 MPa. Es decir, un concreto aligerado de acuerdo a la norma australiana.

- **Hojuelas de PET**

En busca de una implementación del PET efectiva en la mezcla de concreto, Ávila Córdoba et al., optaron por el uso de hojuelas de plástico en diferentes tamaños y proporciones para añadir a la mezcla (Ávila Córdoba , Martínez-Barrera, Barrera Díaz , Ureña Nuñez , & Loza Yañez, 2013). Obteniendo los siguientes resultados:

- A mayor concentración y tamaño de partículas de PET en la mezcla, el Módulo de Young disminuye.
- El máximo esfuerzo a compresión a 28 días fue con la adición de partículas de 0.5 mm en un volumen de 2.5%.

- **PET como agregado grueso**

Así como se han mostrado resultados del PET incluido en la mezcla como agregado fino, Nursyamsi y Berkat buscaron utilizarlo como agregado grueso (Nursyamsi & Berkat Zebua, 2017). Así es que usaron un tamaño de grava de 3-4 cm como agregado grueso obteniendo el siguiente comportamiento:



- El esfuerzo a compresión máximo obtenido fue de 16.57 MPa con un módulo de finura de 7.
- Encontraron que la forma del PET puede afectar su adición a la pasta de cemento, y en consecuencia dañar su comportamiento.



3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Caracterización de Materiales

La caracterización de materiales es el procedimiento que constituye una serie de pruebas que permiten identificar las propiedades de cada uno. El objetivo es conocer la mayor cantidad de datos para que nos den certeza de implementar o descalificar su incorporación en las mezclas de concreto hidráulico.

3.1.1 Agua de mezclado

El agua de mezclado para emplear en una mezcla de concreto hidráulico debe cumplir con parámetros indicadores de su calidad, los cuales al ser los deseados nos permitirán hacer uso de ella.

El agua fue analizada por el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Los resultados mostrados en la tabla 24, concluyendo que el agua es apropiada para la elaboración de las mezclas necesarias. (NMX-C-122-ONNCCE, 2019)

3.1.2 Cemento

El cemento que se utilizó para la realización de todas las mezclas fue cemento portland compuesto (CPC) 30R RS EXTRA marca Tolteca.



Ilustración 4. Bulto de Cemento gris, marca Tolteca. (CEMEX, 2022)



La empresa CEMEX otorga información acerca de especificaciones mecánicas (Tabla 9) y físicas (Tabla 10).

Tabla 9. Especificaciones mecánicas del cemento CPC 30RS Tolteca. (CEMEX, 2022)

Especificaciones mecánicas	Método de prueba	Resultado	Condición del resultado
Resistencia a compresión a 3 días	NMX-C-061	20 N/mm ²	Valor mínimo esperado
Resistencia a compresión a 28 días	NMX-C-061	30 N/mm ²	Valor mínimo esperado

Tabla 10. Especificaciones físicas del cemento CPC30 RS Tolteca. (CEMEX, 2022)

Especificaciones físicas	Método de prueba	Resultado	Condición del resultado
Tiempo de fraguado inicial	NMX-C-059	45 minutos	Valor mínimo esperado
Tiempo de fraguado final	NMX-C-059	600 minutos	Valor mínimo esperado

3.1.3 Densidad

La densidad de la arena es una propiedad física que permite determinar las cantidades volumétricas de los agregados en la mezcla de concreto. A continuación, se muestran los procedimientos para el cálculo de las densidades de los agregados y del PET.

3.1.3.1 Densidad relativa del agregado fino

La Norma Mexicana (NMX-C-165-ONNCCE, 2020) describe el método de ensayo para la determinación de la densidad. Esta Norma Mexicana es aplicable a los agregados finos de un tamaño máximo de 4,75 mm (malla No 4).

Equipo:

- Muestra representativa. (1 kg aproximadamente)
- Charola metálica o recipiente.



- Espátula o agitador.
- Parrilla eléctrica o fuente de calor.
- Vidrio.
- Balanza o báscula con aproximación al décimo de gramo.
- Molde tronco cónico.
- Pisón
- Probeta
- Frasco.

Procedimiento:

- 1 Se pone a saturar la arena en una charola durante 24 horas
- 2 En la probeta se coloca un volumen de agua conocido, registrándolo como volumen inicial (V_i)
- 3 Se pesa una muestra de arena superficialmente seca anotando este valor como peso de la arena (M_a), aproximadamente de 300 gramos.
- 4 Se coloca la arena dentro de la probeta, en donde se agita la probeta para expulsar el aire



Ilustración 5. Agregado grueso en picnómetro

El cálculo necesario es el siguiente:

$$DA = \frac{M_a}{V_f - V_i}$$

Dónde:



DA = Densidad de la arena en gr/cm³.

Ma = Masa de la arena saturada y superficialmente seca en gramos.

Vf-Vi = Volumen colocado dentro de la probeta en cm³.

3.1.3.2 Densidad relativa del agregado grueso

La norma (NMX-C-164-ONNCCE, 2014) establece que es aplicable a los agregados con tamaño máximo de hasta 76 mm (3 “), descrita en la misma utilizando método del picnómetro tipo sifón.

Equipo:

- Balanza o báscula
- Parrilla de gas
- Recipiente
- Picnómetro
- Fuente directa de calor
- Probeta graduada.

Procedimiento $D_{r,SSS}$

1. Se llena el picnómetro con agua permitiendo que el agua fluya por el sifón hasta que deje de gotear.
2. Se determina la masa de la muestra saturada superficialmente seca $M_{ag,SSS}$.
3. Se tapa la salida del sifón y se introduce la muestra evitando que arrastre burbujas de aire.
4. Cuando la superficie libre del agua quede en reposo, destapar el sifón y recibir el agua en una probeta graduada V_a .

El cálculo de la densidad relativa en muestra saturada superficialmente seca ($D_{r,SSS}$) se calcula

$$D_{r,SSS} = \frac{D_{ag}}{D_a} = \frac{\frac{M_{ag,SSS}}{V_a}}{\frac{M_a}{V_a}} = \frac{M_{ag,SSS}}{M_a}$$



Donde:

$D_{r,sss}$ es la densidad relativa saturada y superficialmente seca (adimensional).

$M_{ag,sss}$ es la masa de la muestra saturada superficialmente seca en aire, en kg.

M_a es la masa del volumen del agua, en kg.

Densidad del PET

Se realizó el mismo procedimiento descrito para el agregado grueso natural.



Ilustración 6 Cálculo del volumen del PET para la prueba de densidad.

3.1.4 Masas Volumétricas

La masa volumétrica se define como la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen ocupado por el material en un recipiente especificado. Los procedimientos de prueba para la masa volumétrica compactada (MVSV) y suelta (MVSS) se especifican en la norma mexicana (NMX-C-073-ONNCCE, 2014).

Material y equipo

- Balanza o báscula
- Horno o fuente indirecta de calor
- Placa de vidrio



- Varilla (diámetro 5/8', extremo semiesférico)
- Recipiente
- Enrasador (regla metálica)
- Equipo de uso general (pala, cucharón metálico de un litro de capacidad mínima)

Procedimiento MVSV

Se aplica para agregados con tamaño máximo nominal de 40 mm o menor.

1. Se llena una tercera parte del volumen del recipiente y la superficie se nivela con los dedos.
2. Se compacta con la varilla dándole 25 penetraciones distribuidas de manera uniforme. La fuerza será la suficiente para compactar sin triturar las partículas del agregado.
3. Se agrega material hasta las dos terceras partes de su volumen y se compacta nuevamente con la misma cantidad de penetraciones.
4. Se llena totalmente el recipiente sobrepasando el borde superior, compactando con 25 penetraciones.
5. El enrase, cuándo se trate de agregado fino se hace con el trazado mediante una operación de corte horizontal.
6. Cuando se trate de agregado grueso el enrase se hace visualmente quitando y poniendo partículas.

Procedimiento MVSS

Se aplica para agregados que tengan un tamaño máximo nominal de 100 mm o menor.

1. Se llena el recipiente hasta que el material sobrepase el borde sin derramarse, utilizando una pala o cucharón, dejando caer el agregado de una altura no mayor de 50 mm sobre el borde del recipiente.



a) Agregado grueso



b) Agregado fino

Ilustración 7. Obtención de la masa del agregado grueso en la prueba de MVSS y MVSV.

2. Se distribuye de manera uniforme en toda el área para evitar la segregación.
3. El enrase se hace de la misma forma que para el procedimiento de masa volumétrica compactada.



a) Agregado grueso



b) Agregado fino

Ilustración 8. Masa del agregado enrasado y siendo pesado. Fuente propia



Ilustración 9. Masa volumétrica del PET.

Cálculo

$$MV = \frac{Ms}{V}$$

Donde:

MV es la masa volumétrica en kg/m^3 .

Ms es la masa seca del agregado (kg)

V es el volumen del recipiente (m^3)

3.1.5 Humedad de absorción

3.1.5.1 Humedad de absorción en agregados gruesos

Con la realización de esta prueba se logra determinar la capacidad máxima de absorción de una grava expresándola en porcentaje respecto a su peso seco, de acuerdo a la (NMX-C-165-ONNCCE, 2020)

El procedimiento de prueba se sigue de acuerdo a la norma, de forma siguiente:

Equipo:

- Muestra de grava aproximadamente 1 kg.
- Franela Charola metálicas



- Parrilla eléctrica.
- Espátula.
- Vidrio.
- Mallas #3/4" y #3/8"
- Balanza o báscula con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento:

1. La muestra se criba a través de las mallas 3/4" y 3/8" y del material que pasa la 3/4 y se retiene en 3/8 se pone a saturar en una charola una muestra de 0.5 a 1.0 kilogramo durante 24 horas.
2. Con una franela se seca superficialmente una muestra de grava de aproximadamente 300 gramos, (Mh) masa saturada y superficialmente seca.



Ilustración 10. Material saturado y secado superficialmente.

3. Se coloca el material en una charola para secarlo, para verificar que se haya eliminado completamente la humedad se coloca el vidrio sobre el material y si no empaña o se forman gotas de agua se retira, se deja enfriar un poco. Para poder registrarlo como masa seca (Ms).



Ilustración 11. Secado del material grueso.

Cálculo:

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

3.1.5.2 Humedad de absorción en agregados finos

Se realizó el procedimiento de prueba de acuerdo a la norma (NMX-C-165-ONNCCE, 2020)

Equipo:

- Muestra de grava aproximadamente 1 kg.
- Franela
- Charola metálicas
- Parrilla eléctrica.
- Espátula.
- Vidrio.
- Mallas #3/4" y #3/8"
- Balanza o báscula con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento.



- La muestra es cribada a través de las mallas 3/4" y 3/8" y del material que pasa la 3/4 y se retiene en 3/8.
- Se pone a saturar en una charola una muestra de 0.5 a 1.0 kilogramo durante 24 horas.
- Se seca superficialmente una muestra de grava de aproximadamente 300 gramos con una franela anotando este valor como (Mh) masa saturada y superficialmente seca.
- El material se coloca en una charola para secarlo en la parrilla, para saber cuándo se ha eliminado completamente la humedad se coloca el vidrio sobre el material y si no empaña o se forman gotas de agua se retira, se deja enfriar un poco y se procede a pesarlo registrándolo como masa seca (Ms).



Ilustración 12. Material fino en la parrilla en proceso de secado.

Cálculos:

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

3.1.6 Granulometría en agregados gruesos y finos

Por definición la granulometría es la medición de los granos y el cálculo de la abundancia de material correspondiente a los tamaños previstos por una escala granulométrica con fines de analizar sus propiedades mecánicas.



Esta prueba se realizó siguiendo la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018).

Material y equipo:

- Juego de mallas #4, #8, #16, #30, #50, #100 y #200 con su tapa.
- Báscula con aproximación al décimo de gramo.
- Charolas.
- Espátulas.
- Parrilla eléctrica.
- Cepillas de cerdas de alambre.
- Bolsas u hojas para su separación



Ilustración 13. Tendido de arena para tomar la muestra.

Procedimiento (agregado fino):

1. Se toma el agregado fino y se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 600 gramos.
2. Se seca la muestra a una temperatura constante de 110 ± 5 °C y cuando el material este seco y frío, se toman 500 gramos.
3. Se colocan las mallas en orden decreciente (No.4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola), se vierte la muestra de 500 gramos en la malla superior y se tapa.



4. Se agitan las mallas ya sea en forma manual o con algún equipo mecánico por un periodo suficiente que, una vez terminado el cribado, no más del 1% en masa del material retenido en cualquier malla individual, pase por ella durante un minuto de cribado continuo a mano.
5. Finalmente se determina y registra la masa retenida en cada malla vertiendo su contenido en la balanza, considerando que las partículas que hayan quedado atoradas en cada retícula forman parte del material retenido de la malla correspondiente.
6. La masa total del material después del cribado se debe comparar con la masa original al inicio de la prueba. Si las cantidades difieren en más de un 0.3%, basado en la masa de la muestra seca inicial, los resultados no deben ser utilizados con fines de aceptación.



Ilustración 14. Material fino a través de mallas para granulometría.

Cálculo y registro:

Tabla 11. Llenado del análisis granulométrico del agregado fino



Malla No.	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
4	M4	$R_4 = \frac{M_4}{\sum MRT} * 100$	A4= R4	%P4= 100 -A4
8	M8	$R_8 = \frac{M_8}{\sum MRT} * 100$	A8= A4+R8	%P8 = 100 - A8
16	M16	$R_{16} = \frac{M_{16}}{\sum MRT} * 100$	A16= A8+R16	%P16 = 100 - A16
30	M30	$R_{30} = \frac{M_{30}}{\sum MRT} * 100$	A30= A16+R30	%P30 = 100 -A30
50	M50	$R_{50} = \frac{M_{50}}{\sum MRT} * 100$	A50= A30+R50	%P50 = 100 -A50
100	M100	$R_{100} = \frac{M_{100}}{\sum MRT} * 100$	A100= A50+R100	%P100 =100- A100
200	M200	$R_{200} = \frac{M_{200}}{\sum MRT} * 100$	A200= A100+R200	%P200 = 100 -A200
Charola	MCH	$R_{CH} = \frac{M_{CH}}{\sum MRT} * 100$	ACH= A200+RCH	%PCH = 100 - ACH
Suma	$\Sigma (M_4 \dots M_{CH}) = \Sigma (MRT)$	$\Sigma (R_4 \dots R_{CH}) = 100\%$	$\Sigma (A_4 \dots A_{CH}) = 100\%$	$\Sigma (\%P_4 \dots \%P_{CH}) = 100\%$

El módulo de finura del material se calcula como:

$$MF = \frac{\sum \%Retenido \text{ de malla } 100 \text{ a la } 8}{100}$$



Existen límites en la granulometría para el material que nos establecen parámetros para aceptar, rechazar o modificar el agregado fino, como lo establece la normativa mexicana NMX-C-111.

Tabla 12. Límites de granulometría para agregado fino según (NMX-C-111-ONNCCE, 2018) y (ASTM C33-03, 2010)

Malla	NMX-C-111-ONNCCE- 2004	ASTM-C-33-03
mm (N°)	%Que pasa	%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

Para la obtención de la granulometría del agregado grueso, se sigue el procedimiento descrito en la norma (NMX-C-077-ONNCCE, 2019).

Equipo y material.

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

Procedimiento (agregado grueso):

1. Se seca la muestra a una temperatura constante de 110 ± 5 °C y cuando el material este seco y frío, se hace el cuarteo para obtener una muestra de aproximadamente la capacidad del recipiente con el que se hizo la prueba de masas volumétricas.
2. Se trabaja individualmente cada malla y se usan charolas rectangulares, procediendo de la siguiente forma.



- Se coloca la muestra inicial y se agita la malla con ambas manos verificando el movimiento de todas las partículas. Cuando ya no pase material, el retenido en la malla se coloca en la siguiente charola, para continuar con el proceso de la malla siguiente, ilustración 15.



Ilustración 15. Material grueso retenido en mallas.

- Se determina en la balanza y se registra, la masa retenida en cada malla, hasta llegar a la malla No. 4
3. La masa total del material después del cribado se debe verificar con la masa original al inicio de la prueba.

Cálculo y registro:

Tabla 13. Llenado del análisis granulométrico del material grueso

Malla No.	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
2"	M2	$R 2 = \frac{M2}{\sum MRT} * 100$	A2= R2	%P2= A2-100
1 1/2"	M1 1/2	$R 1 \frac{1}{2} = \frac{M1 \frac{1}{2}}{\sum MRT} * 100$	A1 1/2= A2+R1 1/2	%P1 1/2 = A1 1/2-100



1"	M1	$R1 = \frac{M1}{\sum MRT} * 100$	A1= A1 ½+R1	%P1 = A1-100
¾"	M ¾	$R¾ = \frac{M¾}{\sum MRT} * 100$	A¾= A1+R¾	%P¾ = A¾-100
½"	M ½	$R½ = \frac{M½}{\sum MRT} * 100$	A½= A¾+R½	%P½ =100 - A½
3/8"	M 3/8	$R3/8 = \frac{M3/8}{\sum MRT} * 100$	A3/8= A½+R3/8	%P3/8 = 100 - A3/8
¼"	M ¼	$R¼ = \frac{M¼}{\sum MRT} * 100$	A¼= A3/8+R¼	%P¼ = 100 - A¼
Nº 4	M4	$R4 = \frac{M4}{\sum MRT} * 100$	A4= A¼+ R4	%P4 = 100 – A4
Pasa N.º 4	MP4	$RP4 = \frac{MP4}{\sum MRT} * 100$	AP4= A4+ RP4	% PP4 = 100- AP4
Suma	Σ (M2 ... MPA) = (MRT)	Σ (R2... RP4) =100%	Σ (A2 ... AP4) =100%	Σ (%P2 ... %PPA) =100%

Existen limitaciones para cada una de las mallas dentro de la granulometría del agregado grueso, que los determina la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018).

Tabla 14. Límites granulométricos del agregado grueso. (NMX-C-111-ONNCCE, 2018)

Tamaño Nominal	1.18 (Nº 16)	2.36 (Nº 8)	4.75 (Nº 4)	9.5 (3/8")	12.5 (½")	19 (3/4")	25 (1")	37.5 (1½")	50 (2")	63 (2½")	75 (3")	90 (3½")	100 (4")
3 ½" a 1 ½"	-	-	-	-	-	0 a 5	-	0 a 15	-	25 a 60	-	90 a 100	100
2 ½" a 1 ½"	-	-	-	-	-	0 a 5	-	0 a 15	35 a 70	90 a 100	100	-	-
2" a 1"	-	-	-	-	0 a 5	-	0 a 15	35 a 70	90 a 100	100	-	-	-



2" a N° 4	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	-	0 a 5	-	-
1 ½" a ¾"	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-
1 ½" a N° 4	-	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-
1" a ½"	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-	-
1" a 3/8"	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	-	-
1" a N°4	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
¾" a 3/8"	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	-	-
¾" a N° 4	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-
½" a N° 4	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-
3/8" a N° 8	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

3.1.7 Obtención del PET como sustituto del agregado grueso

La materia prima para la realización del proceso fueron botellas de PET destinadas a ser un residuo.

Algunas botellas tenían demasiada presencia de material orgánico por lo que se decidió lavarlas o enjuagarlas un poco para retirarlo de las botellas.

Ya que se tenían limpias las botellas se procedió a realizar cortes para facilitar el proceso de fundición creando un tipo de láminas sin ningún tamaño en específico, ilustración 16.



Ilustración 16. PET en el proceso de cortado en láminas.

Se procedió a llevar las láminas al proceso de fundición que aproximadamente llegaban a temperaturas de entre 240°C a 250°C con la capacidad de seguir fundiendo las láminas del PET.



Ilustración 17. Medición de temperatura del PET en estado líquido.

El PET fundido cuando se enfriaba tomaba la forma del molde y tomaba una coloración azul claro por los colores de botellas de PET utilizadas. La temperatura a la que se consolidaba era de 184.2°C aproximadamente, ilustración 18.



Ilustración 18. Temperatura del PET endurecido.



Ilustración 19. Forma “bruta” del PET de espesores aproximados a $5 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$.

Ya que se tenía la forma bruta del PET, se procedió a fragmentar en tamaños más pequeños de PET para ir pesando el material, ilustración 20.



Ilustración 20. Pesaje del PET en estado sólido fuera del molde.

Finalmente se trituraron manualmente para que quedaran del tamaño adecuado para que pasara por la malla $\frac{3}{4}$ de pulgada y fuera de manera correcta su implementación en la mezcla.



Ya que no se realizó una granulometría completa (por la ausencia de algunos tamaños) solo se buscó que no excediera el tamaño máximo del agregado.



Ilustración 21. Cribado del PET por malla $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Finalmente se obtuvo la cantidad de grava hecha con PET para la realización de las 2 mezclas, según las cantidades de diseño, incorporándose como sustitución de la grava natural triturada en los porcentajes de 15% y 30%, ilustración 22.



Ilustración 22. Tendido del PET a utilizar en la mezcla.

3.2 Diseño de mezcla por el método del ACI



En el ámbito de la construcción en México se han logrado emplear diversos métodos para la realización del diseño de mezclas de concreto hidráulico normal. La mayoría de los métodos de dosificación se basan en la determinación del contenido de los agregados, su combinación y el empleo de factores empíricos.

El método elegido para la realización de la mezcla fue el que provee el *American Concrete Institute* (ACI PRC-211.1, 2022).

3.2.1 Revenimiento

El primer paso es la selección de un revenimiento que nos indicará la consistencia y trabajabilidad que llegará a tener nuestra mezcla de concreto.

Tabla 15. Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción. (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1989)

Tipos de construcción	Revenimiento, cm	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y 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

*Pueden incrementarse en 2.5 cm cuando los métodos de compactación no sean mediante vibrado.

3.2.2 Elección del tamaño máximo del agregado

De acuerdo al tipo de construcción que se tenga, se buscará tener un tamaño máximo del agregado que cumpla con dichos requerimientos para ser afín a los espacios de recubrimiento y del armado. Después de haber realizado la granulometría se puede determinar el T.M. a partir de la tabla 16.

Tabla 16. Tamaño máximo nominal según tipo de construcción. (Niño Hernández, 2010)

	Tamaño máximo nominal en mm (pulgadas)



Dimensión mínima del elemento (cm)	Muros reforzados, vigas y columnas	Muros sin refuerzo	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6-15	12 (1/2") – 19 (3/4")	19 (3/4")	19 (3/4") – 25 (1")	19 (3/4") – 38 (1 1/2")
19-29	19 (3/4") – 38 (1 1/2")	38 (1 1/2")	38 (1 1/2") – 76 (3")	-
30-74	38 (1 1/2") - 76(3")	76 (3")	38 (1 1/2") – 76 (3")	76 (3")
75 o más	38 (1 1/2") – 76 (3")	152 (6")	38 (1 1/2") – 76 (3")	76 (3") – 152 (6")

3.2.3 Contenido de agua y aire

Con la elección del revenimiento requerido y conociendo el tamaño máximo de nuestro agregado se presenta una tabla en función de ambos. Además de la inclusión o no del aire en la mezcla.

Tabla 17. Agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y TMG.

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



Exposición severa.	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4	
--------------------	-----	---	---	---	-----	---	-----	---	--

3.2.4 Relación agua/cemento

Es necesario establecer una resistencia a la compresión deseada o requerida por el tipo de construcción, ya que esta será nuestra resistencia diseño a 28 días. Por lo que se proporcionan valores de agua/cemento en la mezcla, de acuerdo a la resistencia elegida.

Tabla 18. Relación agua/cemento y resistencia a la compresión del concreto. (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1989)

Relación agua/cemento por peso		
Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm ²)	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

Así mismo existen condiciones en la que nuestra estructura no se encontrará en las mejores condiciones por lo que existen relaciones agua/cemento en las que se consideras casos extraordinarios.

Tabla 19. Relaciones agua/cemento máximas permisibles para concreto sujeto a exposiciones severas. (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1989)

Tipo de estructura	Estructura continua o frecuentemente mojada y expuesta a congelación y deshielo	Estructura expuesta al agua de mar o sulfatos
Secciones esbeltas y secciones con menos de 3 cm	0.45	0.40



Todas las demás estructuras	0.50	0.45
-----------------------------	------	------

3.2.5 Cantidad de cemento

El contenido de cemento que tendrá nuestra mezcla se calcula con la cantidad de agua que se obtuvo de la tabla 18 y la relación agua/cemento. Aplicando la siguiente fórmula.

$$\text{Cemento} = \text{Cantidad de agua} / (\text{Relación a/c})$$

3.2.6 Volumen del agregado grueso

Se maneja una tabla con el volumen del agregado grueso por el volumen unitario del concreto. En relación al tamaño máximo nominal de la grava y el módulo de finura de la arena, tabla 20.

Tabla 20. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto. (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1989)

Tamaño máximo de agregado, mm	Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60
25 (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2")	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3")	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6")	0.87	0.85	0.83	0.81



3.2.7 Agregado fino

Ya que se tienen estimados los demás componentes de la mezcla del concreto se puede calcular por diferencia, considerando el peso tentativo del concreto.

En la tabla 21 se muestran las masas volumétricas que puede tener el concreto, según las características de diseño.

Tabla 21. Cálculo tentativo del peso del concreto fresco. (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1989)

Tamaño máximo de agregados, mm	Cálculo tentativo del peso del concreto, Kg/m ³	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
9.5 (3/8")	2280	2200
12.5 (1/2")	2310	2230
19 (3/4")	2345	2275
25 (1")	2380	2290
37.5 (1 1/2")	2410	2350
50 (2")	2445	2345
75 (3")	2490	2405
150 (6")	2530	2435

3.2.8 Corrección por humedad

En ocasiones, por la condición natural del material es necesario realizar un ajuste a la mezcla por la humedad de los agregados. En la que se busca que la humedad del material no afecte la cantidad de agua previamente calculada por medio del método de diseño. Por eso se hace una sencilla operación:

$$\text{Corrección} = \text{Humedad total} - \text{Absorción}$$



3.3 Pruebas al concreto fresco

3.3.1 Revenimiento

Para tamaño nominal de agregado menor de 50 mm, a las mezclas de concreto hidráulico fresco se les realiza la prueba de consistencia en término de la disminución de altura, conocido como revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE, 2010).

Material y equipo

- Molde (cónico, con 100 mm de abertura superior y 200 mm de abertura inferior).
- Varilla para compactación, 5/8" de diámetro, extremo semiesférico.
- Pala, cucharon, placa, guantes, flexómetro.

El procedimiento de prueba consiste en llenar el molde en tres capas de igual volumen, varillando cada capa con 25 penetraciones, distribuyendo de manera uniforme en toda la superficie de llenado, sin pasar la penetración más de 20 mm de la capa inferior. La última capa se llena por encima de la superficie, con el fin de mantener a nivel la mezcla después del varillado. Posteriormente se enrasa y se procede, sin quitar el peso que sujeta el molde (ilustración 23), a retirarlo en sentido vertical en un tiempo de $5 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$. Finalmente se utiliza una regla para medir el revenimiento en cm (ilustración 23). El procedimiento completo, desde el llenado del molde, debe ejecutarse en un tiempo no mayor de 2.5 min.



a)



b)

Ilustración 23. a) Equipo de prueba para el revenimiento. b) Lectura de revenimiento.



3.3.2 Masa Unitaria

La determinación de la masa unitaria del concreto fresco se realizó siguiendo el procedimiento de prueba de la norma mexicana (NMX-C-162-ONNCCE, 2000). Con este procedimiento se pretende determinar la cantidad de materia contenida en un metro cúbico de concreto fresco (Kg/m^3).

Material y equipo

- Balanza o báscula: Debe contar con una división mínima de 50 g para ejecución del ensayo y del 0.3% de la carga de verificación para obtener el factor del recipiente, desde la masa del recipiente hasta la masa del mismo lleno de agua.
- Mazo o martillo: Con cabeza de neopreno y mango de madera.
- Placa enrasadora: Una placa de acero o vidrio recta y plana. Los extremos de la placa deben ser rectos y lisos.
- Recipiente o unidad de medición: Debe emplearse un recipiente cilíndrico de metal no atacable por la pasta de cemento, estanco que conserve sus dimensiones bajo condiciones de uso. De preferencia, provisto de elementos de sujeción.
- Termómetro: De 0°C a 50°C con una división mínima de 1°C .
- Varilla para la compactación: La varilla debe ser lisa, de sección circular, y de acero, recta; cuando menos con uno de sus extremos semiesféricos del mismo diámetro.
- Materiales auxiliares: Recipiente no absorbente, franela o estopa, escoba o cepillo, cucharón, grasa, agua potable o destilada, laminilla de un espesor de 0.5 mm.

Procedimiento:

Varillado

Se debe colocar el concreto en tres capas de igual volumen, aproximadamente. De acuerdo al tamaño del molde, hay que compactar cada capa con el extremo redondeado de la varilla con 25 o 50 penetraciones (de 14 L o de 28 L, respectivamente). En la primera capa la varilla debe penetrar todo su espesor, pero sin golpear con fuerza el fondo del recipiente. Se deben distribuir las penetraciones de manera uniforme en todo el espesor de la capa. Para las dos capas superiores, la varilla debe penetrar aproximadamente 20 mm., en la capa inmediata inferior. Después de varillar cada capa para eliminar el aire contenido y las oquedades que



produce la varilla, hay que golpear las paredes alrededor del molde, el mínimo necesario, con el mazo o martillo para que el agregado grueso comience a desaparecer de la superficie y ésta tenga un aspecto relativamente liso. Un exceso de golpes, en cambio, puede producir segregación. Terminada la compactación, el recipiente no debe contener exceso o falta de concreto (IMCYC, 2012).

Enrasado

Una vez concluida la compactación, hay que colocar la placa enrasadora sobre la superficie del concreto y cubrir dos tercios de ella. Al hacer presión se avanza con movimientos de sierra hasta que la placa quede fuera del recipiente. En seguida, hay que colocar de nuevo la placa sobre la superficie del concreto cubriendo los dos tercios enrasados y presionar la placa para avanzar con movimientos de sierra hasta que se deslice fuera del recipiente por completo. Se debe tomar el excedente que queda de la lechada en el borde del recipiente para llenar las posibles oquedades que tenga la superficie. Por último, se da el mínimo de pasadas inclinando el canto de la placa hasta dejar un terminado uniforme -evitando el sangrado del concreto-, hasta obtener un brillo acuoso y un terminado liso en la superficie del concreto.

Determinación de la masa

Después de enrasar se limpia todo el exceso de concreto adherido en el exterior del recipiente y se determina la masa del concreto cuidando que la báscula se encuentre nivelada y fuera de corrientes de aire, ilustración 24.



Ilustración 24. Determinación de la masa unitaria del concreto fresco.

Cálculo

El cálculo se realizará como se indica en la siguiente fórmula:

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

Donde:

Mv es la masa volumétrica en kg/m^3

M es la masa del concreto fresco contenido en el recipiente en kg

V es el volumen del recipiente que contiene al concreto, en m^3

3.3.3 pH

La determinación del pH se realizó utilizando tiras de papel reactivas con los indicadores en la escala de 0 a 14. En la ilustración 25 se muestra el resultado de la obtención de la muestra. Debido a que las mezclas se realizaron solo con sustitución de material inerte sin modificación alguna en las cantidades de cemento, se consideran resultados similares en las diferentes mezclas elaboradas.



Ilustración 25. Determinación del pH de la mezcla de concreto.

3.3.4 Temperatura

La temperatura de la mezcla, al momento del colado de los especímenes, se determinó con un termómetro de carátula como el que se muestra en la ilustración 26.



Ilustración 26. Termómetro de carátula.

3.4 Elaboración de especímenes

La elaboración de los especímenes se realizó bajo las especificaciones de la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2016) en la que se menciona que “los moldes y los accesorios para elaborar



los especímenes de concreto deben ser de acero, fierro fundido, u otro material no absorbente y no reactivo con el concreto de cemento Portland u otros cementantes hidráulicos”.

Se realizó una cuantificación de la cantidad necesaria de especímenes para evitar desperdicio, donde los factores a considerar fueron:

- La cantidad de pruebas destructivas.
- Las edades a realizar pruebas a los especímenes.

Por lo que se elaboraron 21 cilindros de dimensiones 10 cm x 20 cm y 6 vigas de dimensiones 15cm x 15cm x 60cm para cada una de las mezclas.

Distribuidos de la siguiente manera por cada mezcla:

- 12 cilindros de 10 cm x 20 cm para prueba de resistencia a la compresión.
- 6 vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm para la prueba de flexión.
- 6 cilindros de 10 cm x 20 cm para la realización de módulos de elasticidad.
- 3 cilindros de 10 cm x 20 cm para la prueba de tensión indirecta.

La cantidad de mezclas de concreto realizadas fueron 3, cada una por separado denominadas: Mezcla Testigo, Mezcla con 15% de PET y Mezcla con 30% de PET. La elaboración de las mezclas se realizó con revolvedora con capacidad de 1 bulto de 50 kg, considerando los tiempos de mezclado no menores de 1.5 minutos conforme a la norma NMX-C-403-1999.



Ilustración 27. Mezcla de concreto en la revolvedora.

Teniendo lista la mezcla de concreto se procedió a colocarla en una carretilla para facilitar el proceso, vaciándola en los moldes previamente engrasados y atornillados correctamente.



El número de capas en las que se realizara depende de la dimensión y tipo de espécimen que se realiza. Para nuestro caso fueron los siguientes en la tabla 22.

Tabla 22. Número de capas requeridas para la realización de los especímenes. (NMX-C-159-ONNCCE, 2016)

Tipo y tamaño de espécimen	Número de capas a colocar en el molde
Cilindros de 10 cm x 20 cm	2
Vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm	2



Ilustración 28. Vaciado de la mezcla en los moldes para su varillado.

Entre cada capa que se vierte en el molde de cilindro o viga es necesario un varillado que funciona como un vibrado para la mezcla creando así la compactación necesaria.

Existen especificaciones de la cantidad de penetraciones que debe tener la capa y el tipo de varilla a usar. Se muestran en la tabla 23.

Todas las penetraciones de distribuyeron de manera uniforme en todo el molde, teniendo como permisible el penetrar 2 cm dentro de la capa inferior.

Tabla 23. Especificaciones de varillado por capa de mezcla. (NMX-C-159-ONNCCE, 2016)



Tipo y tamaño de espécimen	Diámetro de varilla, mm	Número de penetraciones por capa
Cilindros de 10 cm x 20 cm	10 ± 2	25
Vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm	16 ± 2	Una por cada 14 cm^2 de superficie (65)



Ilustración 29. Varillado para la compactación de la mezcla.

Adicionalmente al varillado en cada capa para la realización de las vigas se golpeaba cada extremo del molde, dejándolo caer contra el piso a una mínima distancia. Con la finalidad de eliminar la cantidad de vacíos en el molde.



Ilustración 30. Golpes contra el piso en moldes prismáticos.

En los cilindros, al ser vertida la última capa del concreto y recibir el procedimiento de varillado se realizan unos pequeños golpes con ayuda de un mazo de goma, dando un aproximado de dos golpes a 2 lados opuestos del molde.



Ilustración 31. Golpes en el molde para la eliminación de burbujas de aire.



Finalizado los procesos, es necesario realizar un enrasamiento de la superficie de los especímenes, haciendo pasar un enrasador de metal por toda la última capa y orillas del molde con la finalidad de obtener una superficie lo más uniforme y plana posible.



Ilustración 32. Enrasamiento de los especímenes.

Es importante la cantidad de agua que presenta nuestra mezcla y que se mantenga en la medida posible la cantidad aportada por el diseño realizado. Por eso es que se optó por colocar una envoltura plástica adherente para que mantuviera la humedad propia, durante las horas que permanecerán en el molde.



Ilustración 33. Especímenes cubiertos para conservar la humedad.



De acuerdo a la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2016) establece que se deben desmoldar los especímenes en un tiempo de 20 a 48 horas después de su elaboración.



Ilustración 34. Descimbrado de especímenes.

3.4.1 Curado de especímenes

Los especímenes desmoldados fueron etiquetados con nomenclaturas especiales con la finalidad de que su identificación fuera más sencilla a la hora de sacarlos de la pila para realizar las pruebas correspondientes a la edad de curado.

Las nomenclaturas elegidas fueron:

- Mezcla testigo: TM

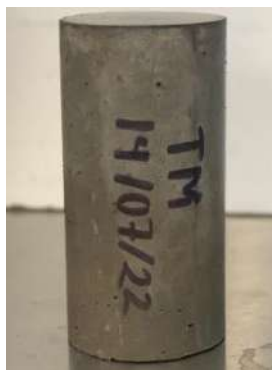


Ilustración 35. Espécimen TM.



- Mezcla con sustitución del 15% de PET: MPET-15%



Ilustración 36. Espécimen MPET-15%.

- Mezcla con 30% de PET: MPET-30%



Ilustración 37. Espécimen MPET-30%.

Es importante que el curado de los especímenes sea constante durante el tiempo en que llegue la edad prueba de cada uno de ellos. En la ilustración 38 se muestra el curado de los especímenes por inmersión.



Ilustración 38. Diferentes especímenes de mezclas en la pila de curado.

3.4.2 Cabeceo de especímenes

El procedimiento de cabeceo en los especímenes se realizó siguiendo la norma mexicana (NMX-C-109-ONNCCE, 2013). La finalidad de la realización de este procedimiento es obtener una planicidad en sus bases y poder realizar la prueba de resistencia a compresión en los especímenes cilíndricos de concreto y poder contar con resultados confiables.

Procedimiento:

1. Se prepara el mortero de azufre para su empleo calentándolo a $140\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$). Se recomienda colocar en los recipientes para el fundido la cantidad necesaria de mortero azufre para los especímenes por cabecear en esa etapa, y antes de volverse a llenar se elimina el material sobrante verificando que el material reusado no tenga más de 10 usos, siempre y cuando se garantice que se cumple con lo indicado en la normativa.
2. El mortero de azufre debe estar seco en el momento que se coloque en el recipiente para el fundido ya que la humedad puede producir espuma. Por la misma razón el mortero de azufre fundido debe mantenerse alejado de cualquier humedad.
3. El plato y los dispositivos para el cabeceo, deben ser calentados ligeramente antes de ser empleados para disminuir la velocidad de endurecimiento y permitir la formación



de capas delgadas. Inmediatamente antes de vaciar cada capa, se aceita ligeramente el plato de cabeceo y se agita el mortero de azufre fundido, ilustración 39.



Ilustración 39. Realización del cabeceo de especímenes. (Fuente propia)

4. Las bases de los especímenes curados en forma húmeda deben estar suficientemente secas en el momento del cabeceo, para evitar que dentro de las capas se formen burbujas de vapor o bolsas de espuma de diámetro mayor de 6 mm.
5. Para asegurarse que la capa se ha adherido a la superficie del espécimen, la base de este no debe ser aceitada antes de la aplicación de la capa.
6. Los especímenes curados por vía húmeda deben ser mantenidos en condiciones húmedas durante el tiempo transcurrido entre el terminado del cabeceo y el momento de la prueba, regresándolos al almacenamiento húmedo o protegiéndolos con una manta o material similar húmedos para evitar la evaporación.
7. Los especímenes cabeceados no se ensayarán hasta que el mortero de azufre haya desarrollado la resistencia requerida.

3.7 Pruebas destructivas



3.7.1 Compresión Simple: cilindros 10cmx20cm

Para la compresión de los cilindros de 10cmx20cm se utilizó la máquina universal Forney, con capacidad de 150 ton. Después de sacarlas del contenedor de curado, las probetas fueron preparadas colocando azufre en las superficies para garantizar la aplicación de las cargas de manera uniforme. La resistencia a la compresión se determina con el promedio de 2 especímenes como mínimo.

La carga se aplica a una velocidad uniforme y continua sin producir impacto, ni pérdida de carga. La velocidad de aplicación de carga se considerará dentro del intervalo de 2.55 kgf/cm²/s \pm 0.51 kgf/cm²/s (NMX-C-083-ONNCCE, 2014). En la ilustración 40 se observa la aplicación de la carga por medio de la máquina universal Forney.



Ilustración 40. Aplicación de la carga axial a cilindros de concreto.

El cálculo del esfuerzo a compresión del concreto (f'_c) se realiza con la ecuación 1

$$f'_c = \frac{F}{A} \quad [1]$$

Donde:

f'_c es el esfuerzo a compresión en kgf/cm².



F es la carga aplicada en kgf.

A es el área de aplicación de carga en cm^2 .

3.7.2 Flexión en Vigas: 15cmx15cmx60cm

El procedimiento para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro conforme a la norma mexicana (NMX-C-191-ONNCCE, 2004).

El resultado de la prueba es el módulo de ruptura (MR), el cual se define como el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensaye a la flexión de una viga.

Material y equipo

- Máquina de prueba. La máquina de prueba debe cumplir con lo establecido en la norma NMX-C-0-83-ONNCCE.
- Materiales auxiliares: Franela o tela de yute; marcadores de tinta indeleble y crayones de cera; tiras de cuero de un espesor uniforme de 5 mm a 7 mm, con un ancho de 25 mm a 50 mm, y que cubren todo lo ancho del espécimen. Escuadra, regla y lija de agua de grano fino.
- Dispositivo de aplicación de carga: Se debe utilizar un dispositivo capaz de aplicar cargas en los tercios del claro de prueba de tal modo que las fuerzas sean perpendiculares a las caras horizontales de la viga y se distribuyan y apliquen uniformemente en todo lo ancho. Este dispositivo debe ser capaz de mantener fija la distancia entre los puntos de carga y los puntos de apoyo del espécimen con una tolerancia de ± 2 mm; además, las reacciones deben ser paralelas a la dirección de las fuerzas aplicadas durante el tiempo que dure la prueba. La relación de la distancia del punto de aplicación de cada una de las cargas a la reacción más cercana dividida entre la altura de la viga, no debe ser menor de uno. Los bloques para la aplicación de la carga y de apoyo de la viga deben ser de acero del mismo ancho o mayor que el de la viga con una altura que no exceda de 65 mm, medida a partir del centro de giro. La sección de cada uno de los bloques que entran en contacto con la viga, debe ser cilíndricos con las superficies endurecidas, teniendo en cuenta que la línea de contacto de estas superficies no debe variar en más de 0,05 mm, con relación a un plano



tangente a las mismas. El radio de curvatura de estas superficies debe tener como centro el eje del rodillo del apoyo o el centro de la rótula. La superficie curva de cada bloque de aplicación de carga debe ser la correspondiente a un sector cilíndrico de cuando menos 0,785 radianes (45°). Los bloques de aplicación de carga deben mantenerse alineados en posición vertical, por medio de mecanismos de presión que pueden ser tornillos con resorte que los mantengan en contacto con los rodillos o rótulas de acero. Puede suprimirse el rodillo y la rótula de acero de los bloques de apoyo, cuando el bloque de apoyo de la máquina de prueba sea de asiento esférico, siempre que en los bloques de aplicación de la carga se use un rodillo y una rótula de acero pivoteada, ilustración 41.

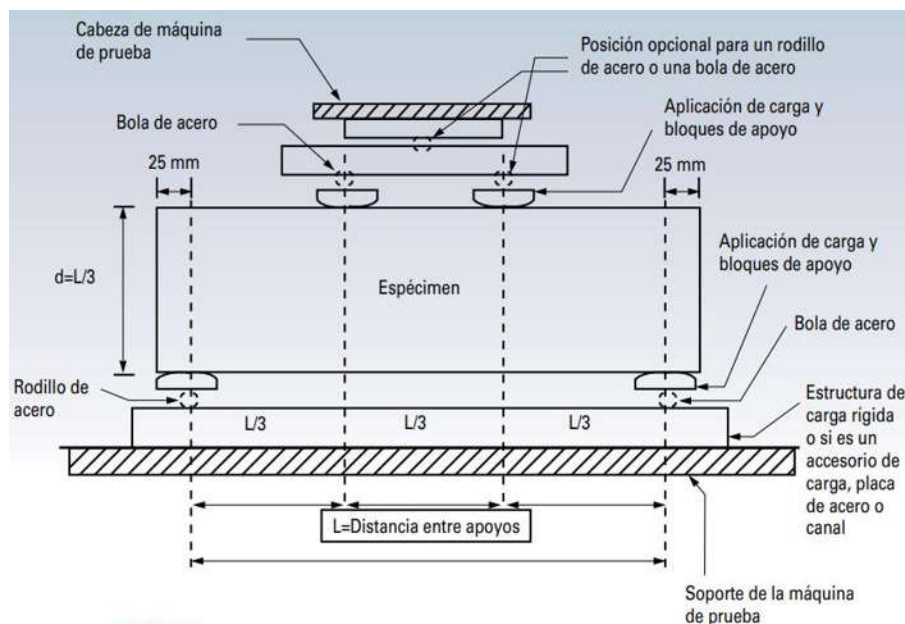


Ilustración 41. Especificaciones de la prueba a flexión (NMX-C-191-ONNCCE, 2004).

En la ilustración 42 se muestra la falla que presentó una de las vigas en estudio al aplicarle carga en el tercio medio de su longitud.



Ilustración 42. Desarrollo de la prueba de flexión en vigas en estudio.

3.7.3 Módulo de Elasticidad

Según la norma mexicana NMX-C-128 define al módulo de elasticidad como el parámetro que establece la relación entre esfuerzo y deformación del concreto en un ensayo de carga axial en compresión, en el intervalo comprendido entre 50 millonésimas de deformación unitaria y 40% de su resistencia máxima. Determinándose como la pendiente de la secante definida por los puntos sobre la curva esfuerzo deformación (NMX-C-128-ONNCCE, 2013).

Los especímenes cilíndricos se elaboraron y curaron de acuerdo con los procedimientos descritos en la norma mexicana NMX-C-159. Debe evitarse la pérdida de humedad desde el momento que se retira del curado hasta la realización de la prueba (NMX-C-159-ONNCCE, 2016).

Procedimiento de prueba

1. Se colocan los especímenes con el deformímetro, y se centra antes de la aplicación de la carga.

En la ilustración 43 se muestra el esquema de colocación de los anillos metálicos y el deformímetro para la obtención de las deformaciones.

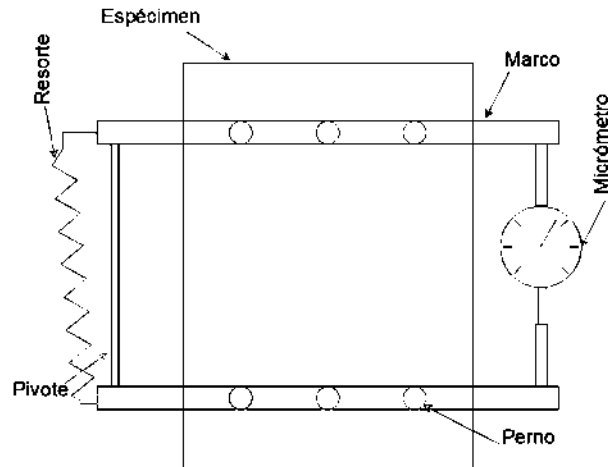


Ilustración 43. Esquema del ensayo de módulo de elasticidad con un micrómetro.

2. Se coloca la carátula de los indicadores en cero.
3. Se aplica una precarga para estabilizar la lectura de los micrómetros entre el 10% y 15% del esfuerzo máximo obtenido del promedio de los dos especímenes ensayados a compresión.

En la ilustración 44 se observa la colocación del espécimen en la prensa.



Ilustración 44. Colocación del cilindro en la máquina universal de pruebas.



4. Se aplica una segunda precarga hasta la misma carga que el anterior, registrando cargas y deformaciones cada tonelada hasta 5 toneladas, después a cada 5 toneladas.
5. Aplicar la carga de ensayo registrando deformaciones a cada tonelada hasta una carga de 5 toneladas.
6. Las deformaciones deben ser registradas cada 5 toneladas hasta llegar al 60% del esfuerzo máximo.

Cálculo

Una vez que se tienen las lecturas de deformación asociadas al esfuerzo, se utiliza la siguiente expresión para calcular el módulo de elasticidad estático

$$E = \frac{S_2 - S_1}{e_2 - 0.000050}$$

Donde:

E es el módulo de elasticidad estático, en MPa (kgf/cm^2).

S_1 es el esfuerzo a 50 millonésimas de formación

S_2 es el esfuerzo correspondiente al 40% el esfuerzo máximo

e_2 es la deformación al 40% del esfuerzo máximo

3.7.4 Tensión por Compresión Diametral

El objetivo de esta prueba consiste en determinar la resistencia a la tensión por compresión diametral en especímenes cilíndricos de concreto, esta norma se rige bajo la normativa. (NMX-C-163-ONNCCE-2019, 2019)

Equipo:

- Máquina de prueba.
- Placa o barra de carga complementaria.
- Tiras para la distribución de la carga.
- Dispositivo para trazar líneas diametrales.

Procedimiento



Se determina el diámetro del espécimen de prueba con una aproximación de 0,5 mm, se calcula con el promedio de tres diámetros, medidos cerca de los extremos, al centro del espécimen y contenidos dentro del plano que incluye las líneas marcadas en los extremos.

Se determina la longitud del espécimen con aproximación de 1 mm, con el promedio de por lo menos dos medidas de longitud tomadas en el plano que contienen las líneas marcadas en los extremos.

Se centra una de las tiras de carga sobre el bloque inferior. Se coloca el espécimen sobre la tira y se alinea en tal forma, que las líneas marcadas en los extremos del cilindro coincidan con el plano vertical del eje de carga. Se coloca la segunda tira de carga longitudinalmente sobre el cilindro, centrándolo con relación a las líneas marcadas en los extremos del mismo ilustrado en la imagen inferior. Se acomoda el conjunto para asegurar que se cumplan las condiciones anteriores.

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 0,490 MPa a 1,475 MPa (5 kgf/cm² a 15 kgf/cm²) por minuto hasta la falla del espécimen.

Para cilindros de 150 mm por 300 mm, el rango de esfuerzos de tensión corresponde a una carga aplicada aproximadamente entre 34 kN y 104 kN (3467 kgf y 10 605 kgf) por minuto.



Ilustración 45. Especimen colocado en la máquina universal.



Se registra la carga máxima aplicada, indicada por la máquina de prueba en el momento de la falla.

Se deben observar, la forma de falla y la apariencia interna del concreto.

El resultado de dos cilindros hermanos no deberá diferir en más de 14 % del promedio, en condiciones de repetibilidad.

Cálculos

$$T = \frac{2 P}{\pi L d}$$

Donde:

T = Resistencia a la tensión por compresión diametral, en MPa (kgf/cm^2).

P = Carga máxima aplicada en kN (kgf)

L = Longitud en cm

d = Diámetro en cm

3.8 Pruebas No destructivas

3.8.1 Resistividad eléctrica

El procedimiento seguido se resume en los siguientes números:

1. Se determinaron las dimensiones de la muestra:
2. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
3. Se monta la muestra en el equipo Nilsson, como se muestra en la ilustración 46.

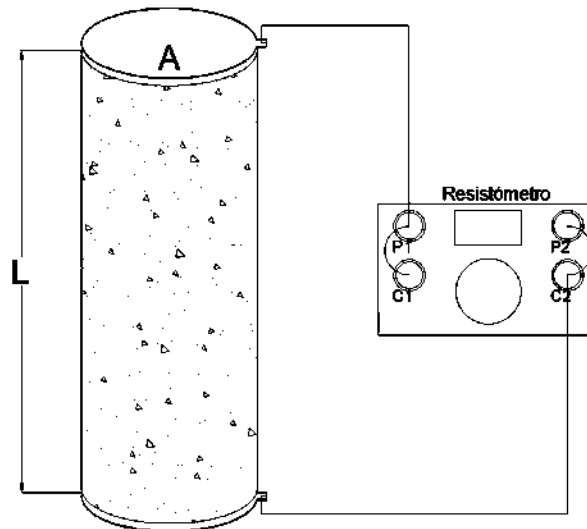


Ilustración 46. Montaje del espécimen para el método directo.

4. Se colocan las caras laterales del espécimen entre dos placas de material metálico y entre esponjas húmedas para garantizar la uniformidad en el contacto, ilustración 47.



Ilustración 47. Realización de la prueba a los cilindros de concreto.

5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el espécimen a una corriente dada, (I) y voltaje (E), ilustración 48.

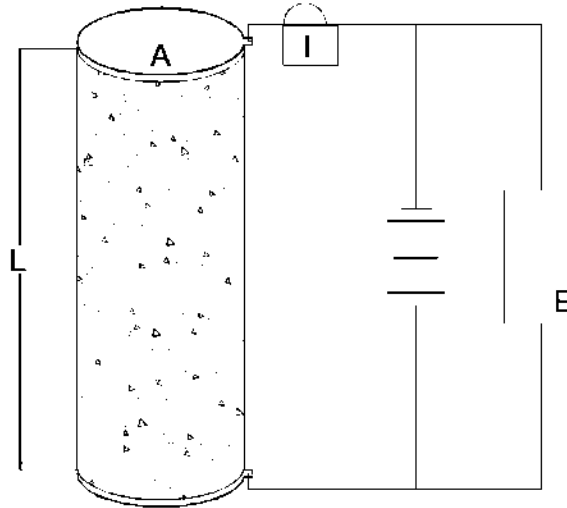


Ilustración 48. Montaje del espécimen para medir resistividad real por el método directo.

La resistencia eléctrica (R_e) estará dada por la ecuación 3.

$$R_e = \frac{E}{I} \quad [3]$$

Donde:

R_e = Resistencia eléctrica, ohm, con aproximación a una décima.

E=Tensión o diferencia de potencial eléctrico, volt, con aproximación de una décima.

I = Corriente aplicada, amperio, aproximación una décima.

Para el cálculo de resistividad se utilizó la fórmula [4] (ASTM-G57, 2012; CYTED-DURAR, 1998; NMX-C-514, 2016)

$$k = \left[\frac{A}{L} \right] \quad \rho = R_e k \quad [4]$$

Dónde:

ρ = Resistividad eléctrica en ohm-cm u ohm-m, aproximación de una décima.

R_e = Resistencia eléctrica que el equipo proporciona, en $K\Omega$



k = Constante de celda en cm o m.

A = Área de la sección transversal del espécimen, en cm^2 o m^2 , con aproximación a dos décimas.

L = Longitud del espécimen, en cm o m, con aproximación a dos décimas.

3.8.2 Velocidad de Pulso Ultrasónico

La velocidad de pulso ultrasónico se midió en especímenes saturados, usando un equipo de sistema digital para ensayos ultrasónicos, modelo V-Meter MK IV TM marca NDT - JAMES INSTRUMENTS.

La Norma Mexicana (NMX-C-275-ONNCCE, 2020) establece que la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto para ondas longitudinales en la modalidad de una inspección emisor-revisor.

Procedimiento de prueba

1. Determinación de las dimensiones de las probetas.
2. Conexión de los transductores al aparato de pulso ultrasónico, mediante los cables coaxiales.
3. Calibración del equipo con la opción que se ejecuta desde la pantalla, determinando los rangos normales de operación de forma automática.
4. Se aplicó gel en los transductores y las caras del espécimen para garantizar contacto entre las superficies.
5. Se introdujo en el equipo el dato de distancia en línea recta medida de centro a centro de las caras de los transductores, ilustración 50.



Ilustración 49. Prueba de VPU en cilindros de concreto.

6. Se obtiene como resultado el valor de VPU.

Para el cálculo de VPU se utiliza la ecuación 5 con base al manual (CYTED-DURAR, 1998), siempre y cuando el equipo no genere el resultado de forma directa.

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (5)$$

Donde:

V = velocidad de pulso ultrasónico en m/s.

L = longitud del espécimen en m.

Δt = gradiente de tiempo en s.

3.8.3 Frecuencia de Resonancia

La finalidad de la prueba es el determinar las frecuencias fundamentales de manera transversal, longitudinal y torsional de prismas y cilindros de concreto, buscando calcular el



módulo dinámico de elasticidad de Young, el módulo dinámico de rigidez y la relación dinámica de Poisson.

La Norma Mexicana (NMX-C-089-ONNCCE, 2019) establece que “su objetivo es detectar cambios significativos en los módulos dinámicos de elasticidad en especímenes de laboratorio, o de campo, que se sometan a la exposición de intemperismo u otros tipos de influencias potencialmente causantes de deterioro.”

Equipo:

- Circuito impulsor.
- Circuito captador o detector
- Soporte del espécimen.

Procedimiento:

1. Se pesa y se mide la longitud del espécimen a ensayar, cada medida se hará dos veces y se sacará un promedio la cual no diferirá de $\pm 1.0\%$
- Procedimiento de frecuencia longitudinal
2. Se coloca el espécimen en el soporte de tal manera, que pueda vibrar sin restricciones significativas en los dos sentidos longitudinales. La posición del espécimen es aquella que la fuerza impulsora sea normal y al centro de la superficie de un extremo.
 3. Se coloca la unidad captadora contra una superficie del espécimen de tal manera, que actúe en la dirección de la vibración.
 4. Se hace que el espécimen comience a vibrar a frecuencias variables (ilustración 51) ; al mismo tiempo se observa la indicación de la salida amplificada del captador.
 5. Se registra la frecuencia de la vibración del espécimen de prueba que resulte en una indicación máxima que tenga un pico bien definido sobre el indicador y en la cual la



observación de los puntos nodales indica la vibración longitudinal fundamental, es decir, una frecuencia longitudinal fundamental.

Para la vibración longitudinal fundamental hay un nodo en el centro de la longitud del espécimen. Las vibraciones son máximas en los extremos.



Ilustración 50. Frecuencia de resonancia en vigas de concreto.

4. RESULTADOS

4.1 Caracterización de Materiales

4.1.1 Agua de mezclado

En la tabla 24 se muestran los resultados obtenidos del análisis del agua utilizada en la preparación de las mezclas de concreto.

Tabla 24. Análisis del agua empleado en las mezclas.

Muestra:		Agua potable de la Red de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo		
Sitio de muestreo:		Laboratorio de Materiales		
Norma de referencia:		(NMX-C-122-ONNCCE, 2019)		
Parámetro	Resultado	Límite Permisible ((NMX-C-122, 2018))	Unidades	Método Utilizado
pH	7.86	>6	U pH	NMX-AA-008-SCFI-2000



Temperatura	29.8	-----	°C	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad eléctrica	456	-----	μs/cm	NMX-AA-093-SCFI-2000
Sólidos Disueltos Totales	352	3500	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
Oxígeno Disuelto	3.37	-----	mg/L	NMX-AA-012-SCFI-2001
Sulfatos	5	3000	mg/L	NMX-AA-074-1981
Cloruros	13.36	400	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001
Dureza Cálcica	21	-----	mg/L CaCO ₃	Volumétrico
Sales de Magnesio	5	100	mg/L	Volumétrico

4.1.2 Cemento

Las especificaciones del cemento se obtuvieron de la ficha técnica del producto, por el fabricante, tabla 25.

Tabla 25. Propiedades físicas y químicas. (CEMEX, 2015)

Estado físico:	Sólido
Color:	Blanco o gris
pH (en agua):	12-13
Densidad relativa:	2.7 a 3.15
Solubilidad en agua:	0.1 a 1%
Olor:	Sin olor especial

4.1.3 Densidad

Los resultados de la densidad del PET se muestran en la tabla 26. El promedio de la densidad es de 1.24 g/cm³, inferior a la densidad del agregado natural triturado.

Tabla 26. Cálculo de densidad del PET.

Densidad PET			
Masa (g)	V Inicial (cm ³)	V final (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
272.3	490	710	1.24



4.1.4 Masas Volumétricas

Las masas volumétricas de los agregados se registran en la tabla 27.

Tabla 27. Resumen del cálculo de las masas volumétricas

Agregado	MVSV
Arena	1250
Grava	1670

4.1.5 Absorción

Los resultados de absorción de la arena y la grava se muestran en la tabla 28.

Tabla 28 Resultados de Humedad de Absorción en Agregados

Agregado	Humedad de Absorción
Arena	10.54%
Grava	2.61%

4.1.6 Granulometría en agregados gruesos y finos

Los resultados de las granulometrías realizadas a las arenas y a las gravas se muestran en los gráficos 1 y 2 respectivamente. Se observa que la distribución de las partículas de arena se encuentra dentro de los límites establecidos en la normativa mexicana (NMX-C-111-ONNCCE, 2018).

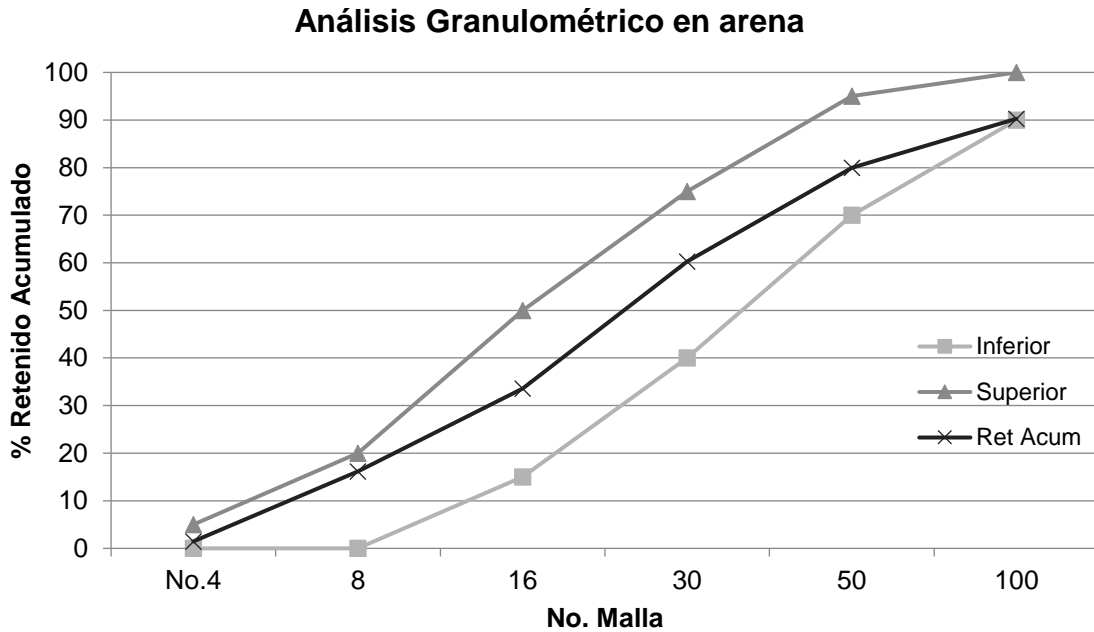


Gráfico 1. Análisis granulométrico de la arena usada en la investigación.

El análisis granulométrico de las gravas usadas en la elaboración de las mezclas se muestra en la gráfica 2. Los tamaños de las partículas de grava se encuentran dentro de los límites establecidos en la norma NMX-C-111.

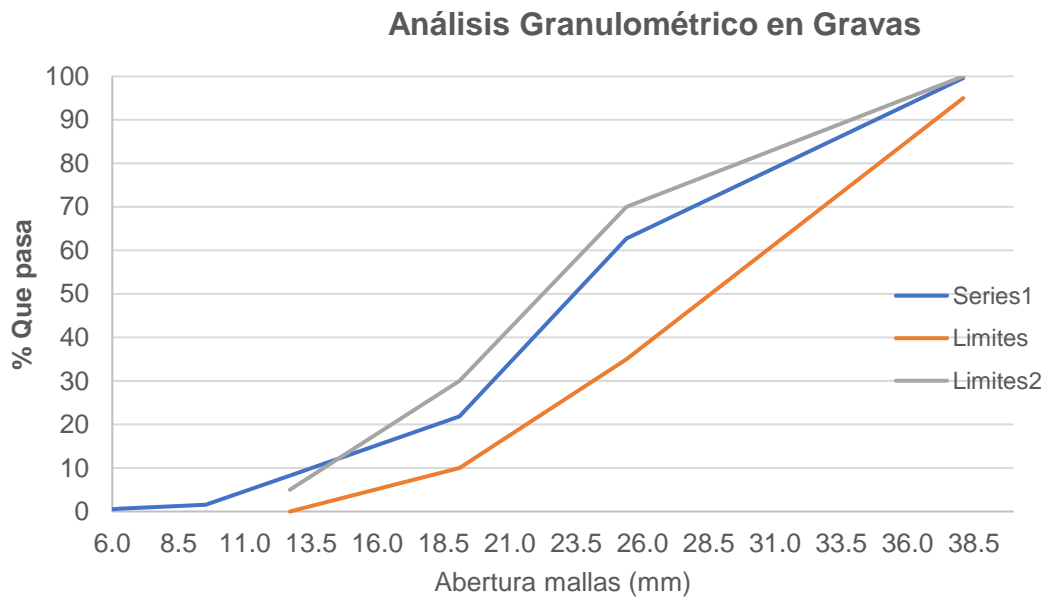


Gráfico 2. Análisis granulométrico de la grava usada en la investigación.



4.2 Diseño de mezcla por el método del ACI

Para el diseño de mezcla se realizaron los pasos del apartado 3.2 . Los datos elegidos para la experimentación fueron:

- $F'c = 250 \text{ kgf/cm}^2$
- Módulo de finura de 3.3
- Revenimiento de 15 cm.

El proporcionamiento para 1 m^3 se muestra en la tabla 31 y los datos iniciales en la tabla 29 y 30.

Tabla 29. Datos iniciales del proporcionamiento.

Agua	216	216 lt	216 kg
Aire	2.0%	20 lt	----

Tabla 30. Datos de los agregados y materiales.

DATOS	DENSIDAD	MVSV (kg/m^3)	Humedad de absorción
Arena	2.20	1250	10.54%
Grava	2.74	1670	2.61%
Cemento	3.05	----	----
PET	1.24	----	----

El resumen de datos generales del proporcionamiento se encuentra en la tabla 31.

Tabla 31. Resumen de datos del proporcionamiento para 1 m^3 .

DATOS	PESO (kg)
Cemento	354.1
Agua	216.0
Grava	968.6
Arena	647.68
Aire	0.00



4.3 Pruebas al concreto fresco

4.3.1 Revenimiento

Los resultados del revenimiento para las mezclas Testigo, PET15% y PET30% son 18cm, 19cm y 18cm respectivamente, se cumple de acuerdo con lo especificado en la norma (NMX-C-156-ONNCCE, 2010) del parámetro de revenimiento de proyecto ± 3.5 cm. Es necesario mencionar que se agregó el total de agua de diseño para cada una de las mezclas. El revenimiento de la mezcla se reducía conforme avanzaba el tiempo en cuestión de 5 y 10 minutos.

Una vez colocada la mezcla en los moldes se observó una pérdida de agua de amasado, lo que puede deberse a un exceso de agua en la mezcla. Este exceso de agua puede estar presente debido a que los agregados no absorben de inmediato el agua que se agrega por corrección de absorción.

4.3.2 Masa Unitaria

La densidad del PET utilizado es de 1.24 g/cm^3 , esto significa que al sustituir agregado natural (con densidad de 2.7 g/cm^3) la masa unitaria del concreto se reduce, ya que las sustituciones se realizaron en proporción de volumen. En la gráfica 3 se pueden observar los resultados de las masas volumétricas de las diferentes mezclas. La mezcla control presenta una masa unitaria de 2225 kg/m^3 . Las mezclas con sustitución de PET en 15% y 30% son 5.4% y 8.3% más ligeras que la masa unitaria de la mezcla control.

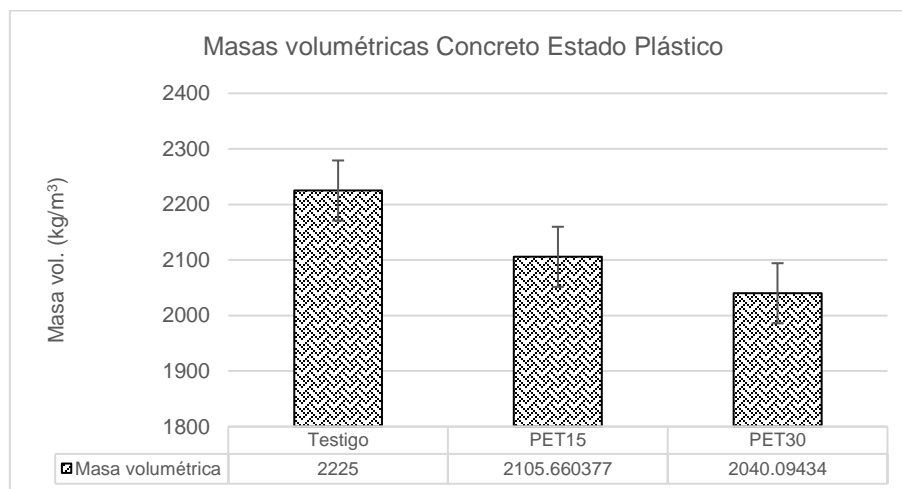


Gráfico 3. Masas volumétricas del concreto en estado fresco.



4.3.3 pH

Los valores de pH obtenidos con las tiras de papel-indicador se mantuvieron entre 12 y 13 para las muestras tomadas en diferentes mezclas. Esto indica que la alcalinidad se mantiene.

4.3.4 Temperatura

La temperatura ambiente promedio en el área de trabajo donde se elaboraron las mezclas fue de 23 °C. La temperatura promedio del concreto al momento de realizar los especímenes fue de 29 °C.

4.4 Pruebas destructivas

4.4.1 Compresión Simple: cilindros 10cmx20cm

Los resultados del esfuerzo a compresión para la mezcla control muestran un incremento en la resistencia después de los 28 días de edad. El incremento en la resistencia de 28 a 60 días es del 8%. Se observa que de 45 a 60 días la resistencia no presenta una mayor variación, con una tendencia a mantenerse, gráfico 4. La resistencia de diseño fue de 250 kgf/cm². A los 28 días la resistencia alcanzada en pruebas fue del 90 % de la resistencia de diseño. A los 60 días la resistencia representa el 97% de la resistencia de diseño.

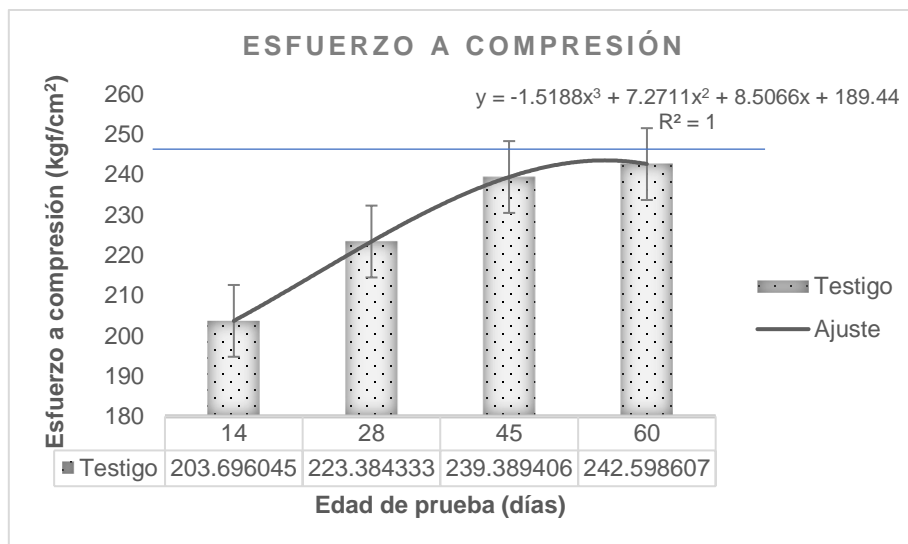


Gráfico 4. Resultados del esfuerzo a compresión en mezcla Testigo.



En la gráfica 5 se observan valores de resistencia a la compresión de la mezcla de concreto con sustitución del PET de 15%. A la edad de 28 días la resistencia alcanzada es del 73% de la resistencia de proyecto, sin embargo, al igual que para las otras mezclas, la resistencia se incrementó a la edad de 60 días, donde la resistencia obtenida representa el 91.4% de la resistencia de proyecto. Para esta mezcla la resistencia se incrementó un 20.4% de 28 a 60 días.

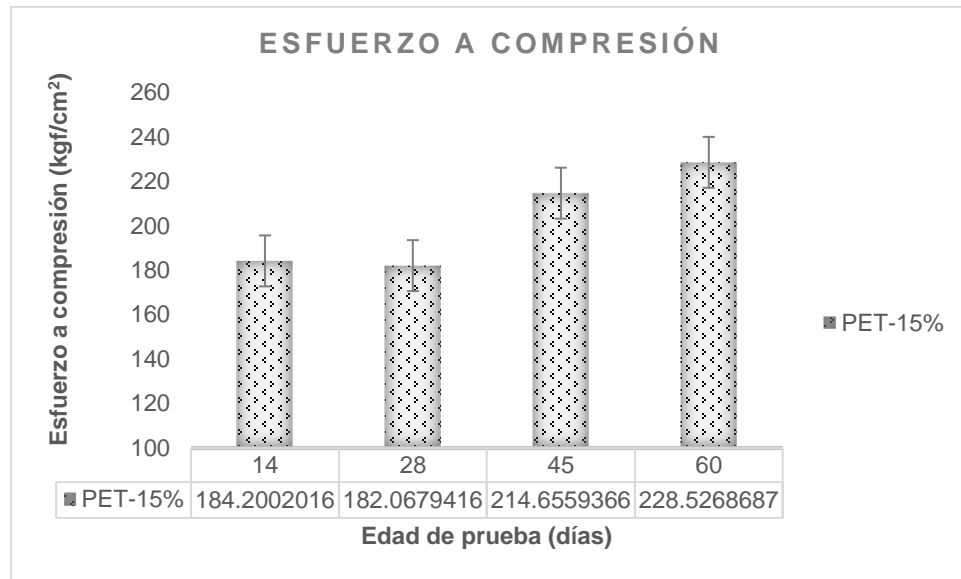


Gráfico 5. Resultado del esfuerzo a compresión en la mezcla con sustitución de PET-15%.

Las resistencias alcanzadas por los cilindros de concreto con PET 30%, presentan un comportamiento similar en las tendencias a los 28 días, en donde se muestra una similitud en el esfuerzo alcanzado a la edad de 14 días. Sin embargo, a la edad de 45 y 60 días los esfuerzos incrementaron. A la edad de 28 días las resistencias representaron un 66% de la resistencia de diseño, mientras que a los 60 días el porcentaje fue de 78.2%, gráfico 6.

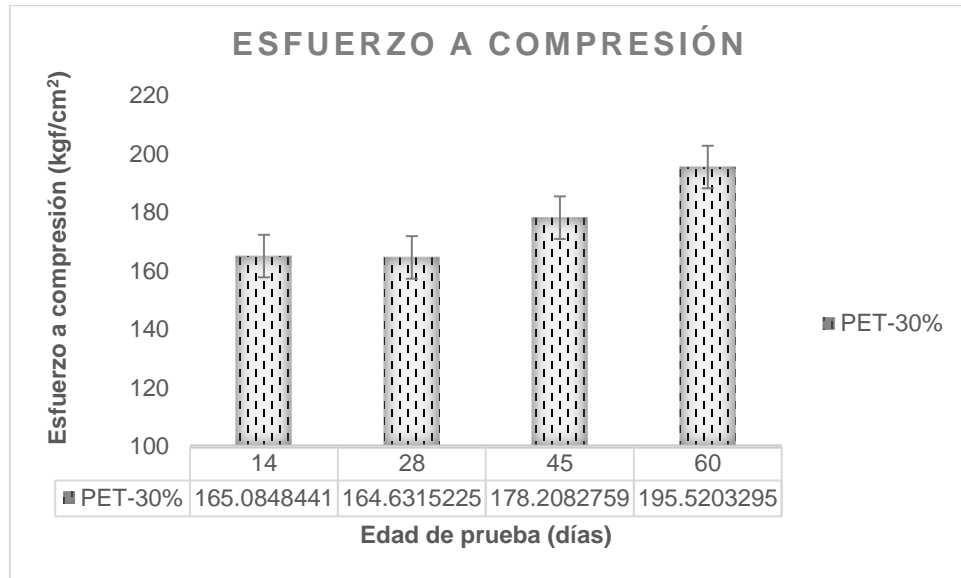


Gráfico 6. Resultado del esfuerzo a compresión en la mezcla con sustitución de PET-30%.

4.4.2 Flexión en Vigas

En el gráfico se muestran los resultados de la prueba a flexión a la que se sometieron las vigas de concreto testigo. Se observa un incremento gradual de la resistencia, de 36 kgf/cm² (28 días) a 41.2 kgf/cm² (60 días), lo que representa un incremento del 14.6%.

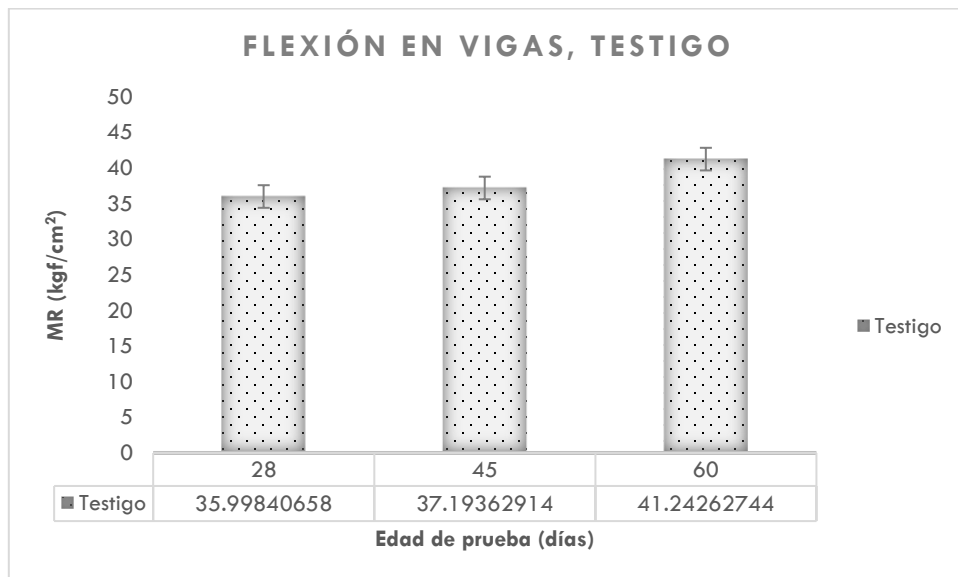


Gráfico 7. Resultados de Flexión en Vigas para la mezcla Testigo.



La ilustración 52 muestra las partículas de agregado grueso que fallaron y que se desprendieron de la mezcla. La distribución de las partículas, tanto de agregado natural como de PET se percibe homogénea.



Ilustración 51. Resultado de flexión de mezcla testigo.

Los resultados de la flexión en vigas (MR) para la mezcla PET15% se muestran en el gráfico 8. Los valores de MR entre las edades de 28 a 60 días se mantienen sin una variación considerable.

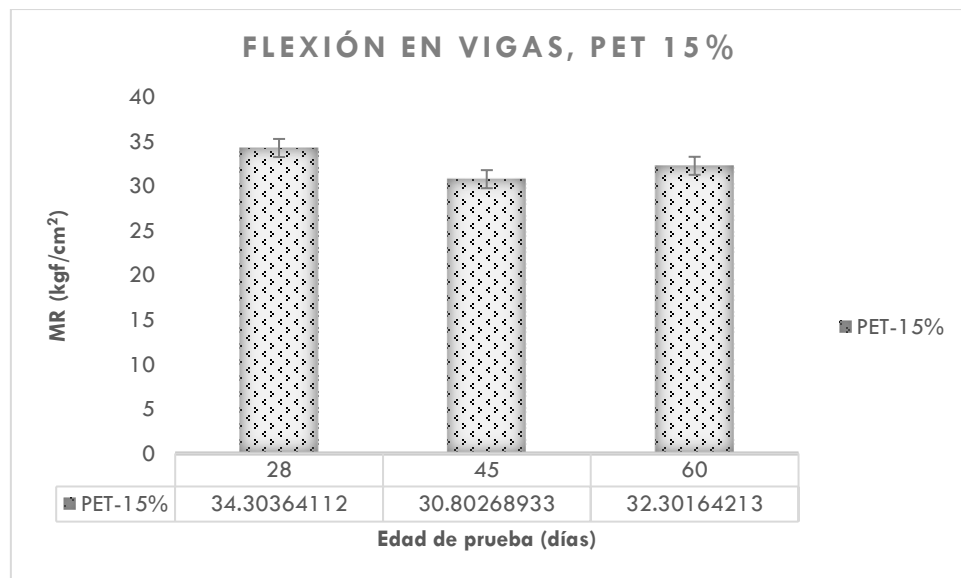


Gráfico 8. Resultado de flexión en vigas de la mezcla con sustitución de PET-15%.



La ilustración 53 muestra el resultado de una viga a flexión, con la distribución de los agregados naturales de manera homogénea, mientras que el agregado de PET con una sustitución del 15% se distribuyó en una zona específica de la mezcla. Si se considera la implementación de un revenimiento menor, este puede llegar a facilitar el manejo del agregado de PET en la mezcla.



Ilustración 52. Viga a flexión con 15% de PET en sustitución.

A la edad de 28 días el MR en la mezcla de concreto de PET30% fue de 33.72 kgf/cm². Los valores se redujeron a la edad de 60 días en un 20%, tal como se muestra en el gráfico 9.

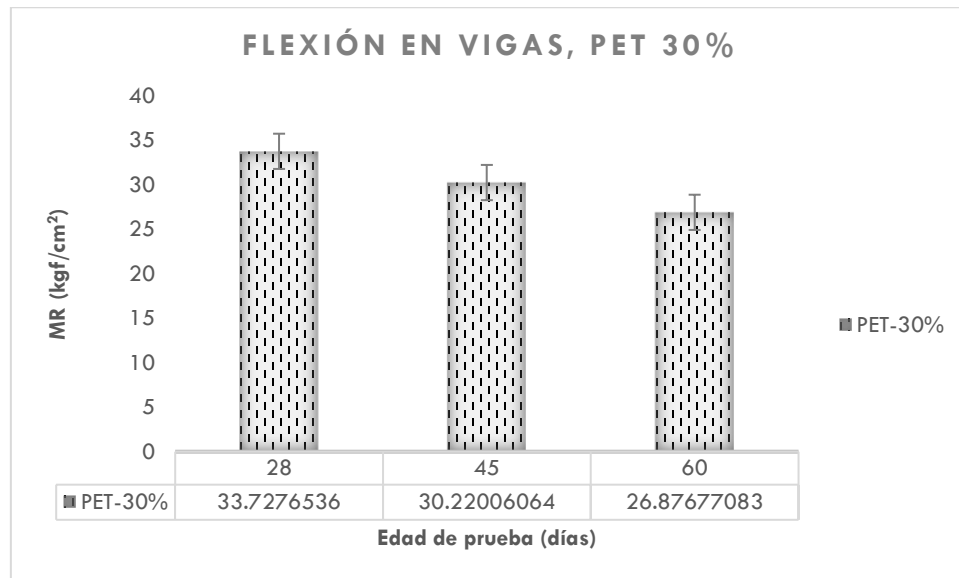


Gráfico 9. Resultado de flexión en vigas de la mezcla con sustitución de PET-30%.



La ilustración 54 muestra las secciones de falla de las vigas sometidas a flexión. Para las mezclas con PET30% se observa una distribución agrupada en la cara de colado, debido a la densidad menor del PET.



Ilustración 53. Resultado de viga a flexión de 30% con PET.

4.4.3 Módulo de Elasticidad

Las gráficas de esfuerzo-deformación para cada una de las mezclas se muestran en el gráfico 10. Los grupos de mezclas se pueden identificar fácilmente, ya que las mezclas testigo presentan una pendiente más pronunciada, lo que indica un mayor valor de módulo elástico (E); las mezclas con PET 15% presentaron un valor menor de E que el testigo y las mezclas con 30% de PET fueron las de más bajo valor de E.

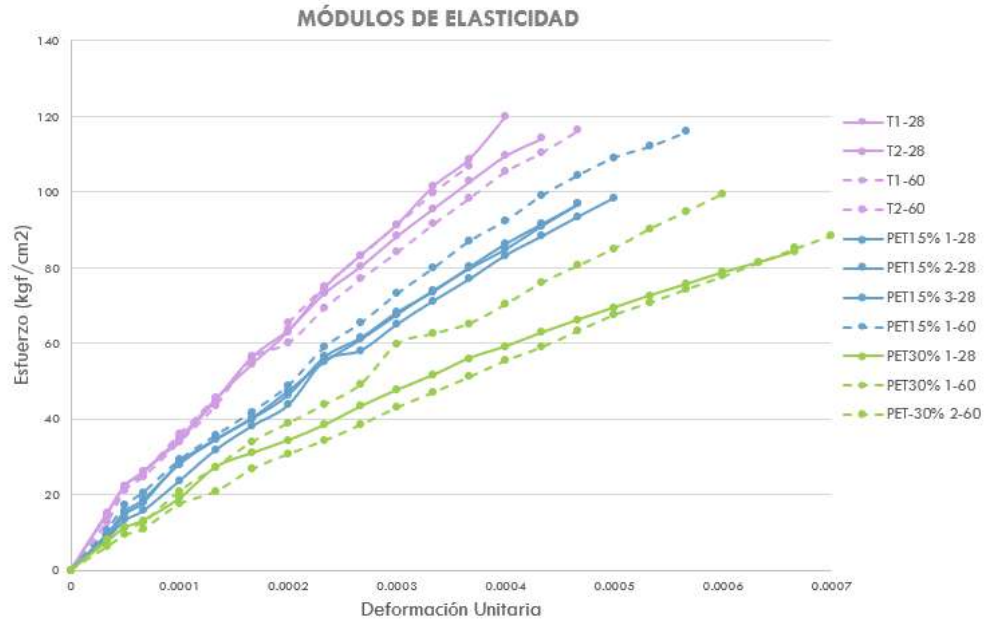


Gráfico 10. Módulos de elasticidad de especímenes

En el gráfico 11 se presenta un resumen de los resultados de módulos de elasticidad. Los resultados corresponden a las pendientes observadas en las gráficas esfuerzo-deformación. Se observa que los módulos de elasticidad se muestran dispersos en las mezclas de concreto con PET. En la mezcla testigo los resultados se muestran muy similares en las edades de prueba, con valores menos dispersos.

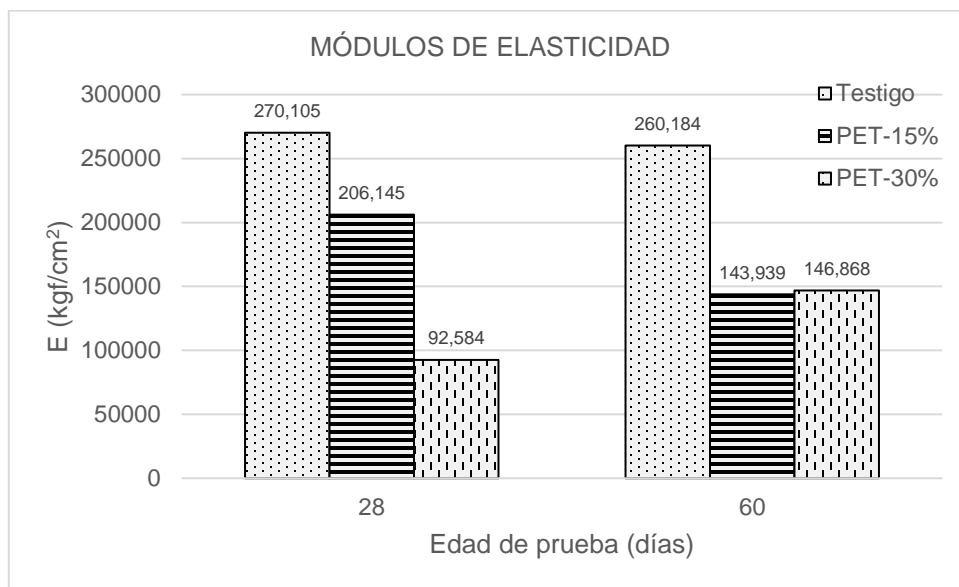


Gráfico 11. Resultados comparativos de módulos de elasticidad a 28 y 60 días para todas las mezclas.



4.4.4 Tensión por Compresión Diametral

La tensión indirecta por medio de la compresión diametral en los cilindros de la mezcla Testigo se muestran en el gráfico 12. El resultado a 60 días es mayor que el obtenido a los 28 días, indicando claramente un incremento de resistencia observado también en los resultados de la prueba a compresión.

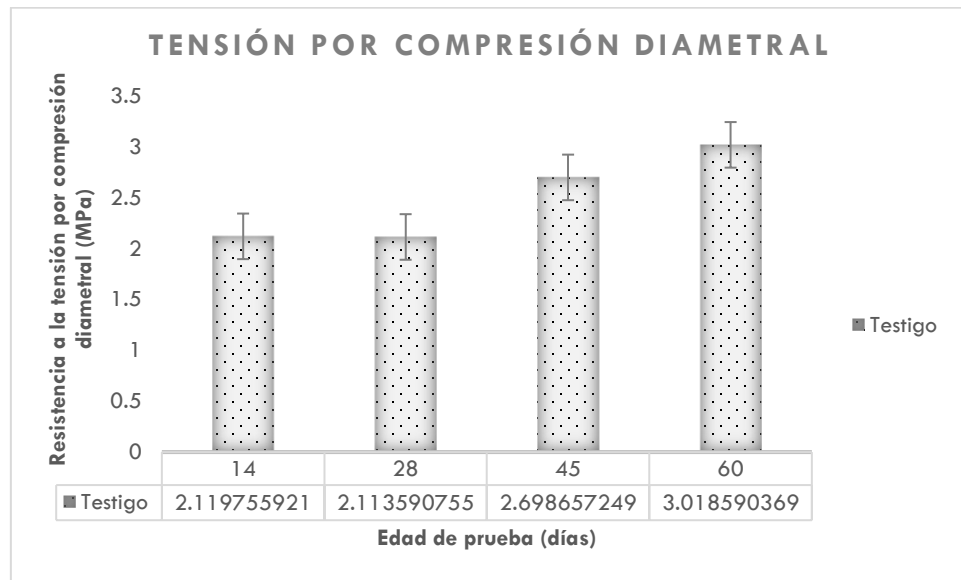


Gráfico 12. Resultados de tensión indirecta de la mezcla Testigo.

En la ilustración 55 se observa la forma de la falla longitudinal obtenida después de la aplicación de la carga. La falla es uniforme en todo el material.



Ilustración 54. Cilindro abierto de mezcla testigo.



En el gráfico 13 se plasman los resultados de la compresión diametral en la mezcla con sustitución de PET de 15%. A los 28 días se presentó el mayor valor de tensión indirecta. A la edad de 60 días la resistencia se ve disminuida, muy probablemente por una mala distribución del PET en el espécimen.

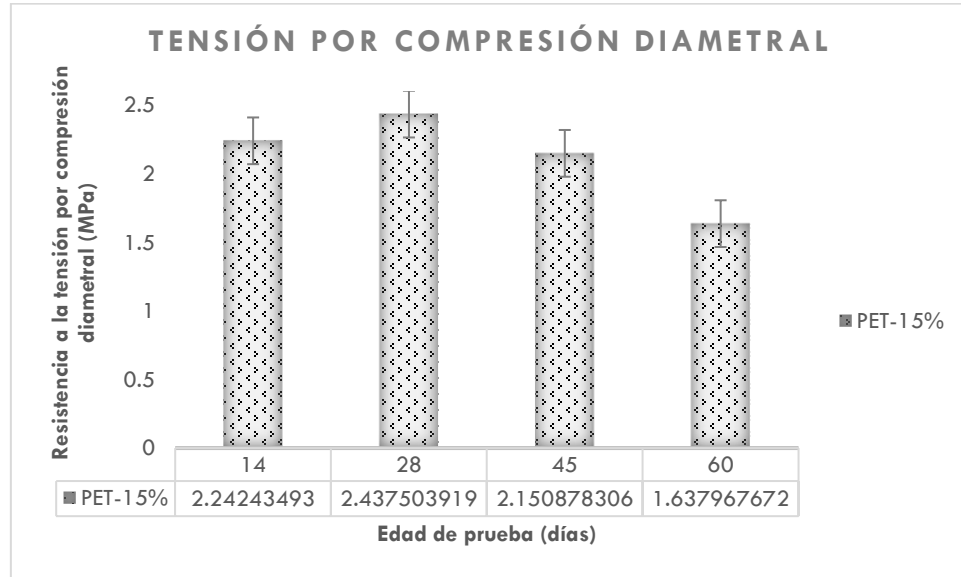


Gráfico 13. Resultados de tensión indirecta para la mezcla con sustitución de PET-15%.

La ilustración 56 es el resultado de la tensión indirecta del cilindro de la mezcla con sustitución de un 15% de PET, los agregados naturales se ven distribuidos de manera correcta, sin embargo, las partículas de PET se encuentran distribuidas de manera no uniforme.



Ilustración 55. Cilindro abierto con mezcla MPET-15%.



Los resultados de la tensión por compresión diametral para la mezcla con PET 30% se muestran en el gráfico 14. Los valores incrementan de 14 a 60 días. Entre las edades de 45 y 60 días los esfuerzos se mantienen.

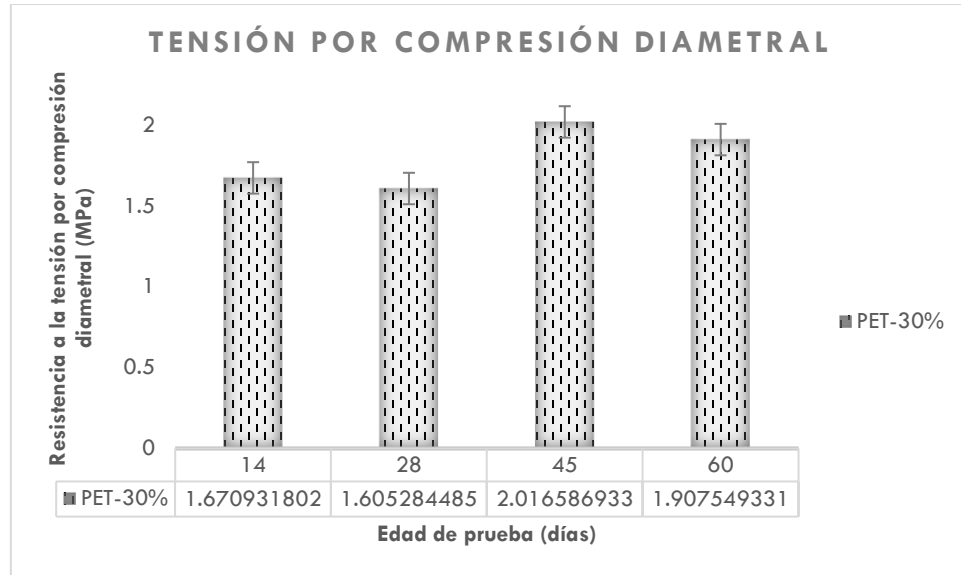


Gráfico 14. Resultados de tensión indirecta para la mezcla con sustitución de PET-30%.

La ilustración 57 muestra la fractura de la tensión indirecta del cilindro de la mezcla con sustitución de 30% de PET, los agregados naturales están distribuidos al igual que los de PET.



Ilustración 56. Cilindro abierto con mezcla MPET-30%.



4.5 Pruebas No destructivas

4.5.1 Resistividad eléctrica

Los resultados de resistividad eléctrica son evaluados bajo los parámetros de la normativa mexicana (NMX-C-514, 2016), los cuales se especifican en la tabla 32. Se observa que los criterios hacen referencia a la probabilidad de corrosión que tiene el acero de refuerzo de una estructura de concreto, vinculada de manera directa a la calidad del concreto.

Tabla 32. Criterios para inferir el riesgo por corrosión según la calidad del concreto evaluada con la prueba de resistividad eléctrica de la normativa mexicana NMX-C-514

Resistividad Eléctrica	Probabilidad de Corrosión
>100-200 kΩ.cm	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o del nivel de carbonatación. No existe distinción entre acero en estado activo o pasivo.
50 a 200 kΩ.cm	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son bajas.
10 a 50 kΩ.cm	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo, sea rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
<10 kΩ.cm	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo, sea extremadamente rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy altas en concretos carbonatados o con cloruros. La resistividad no es el parámetro que controla el proceso de corrosión. El valor de la velocidad de corrosión obtenido con la NMX-C-501-ONNCCE refleja la cota superior de la velocidad de corrosión en ese concreto para un determinado contenido de cloruros o nivel de carbonatación.



En la mezcla testigo los valores de resistividad del concreto son menores de 10 kΩ.cm, indicando una porosidad interconectada excesiva (gráfico 15). Se observa, al igual que en los resultados de resistencia a la compresión, un incremento de la propiedad física a la edad de 60 días.

Al proyectar la línea de ajuste a los resultados obtenidos a las edades de 14, 28, 45 y 60 días, se observa un ajuste lineal, comprobado con el coeficiente de correlación de 0.997.

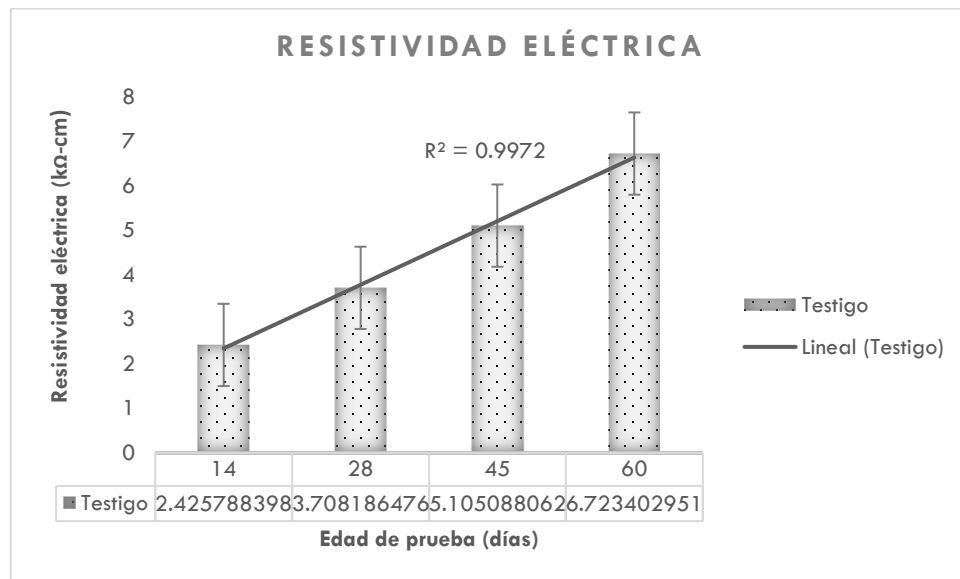


Gráfico 15. Resultados de resistividad eléctrica de la mezcla Testigo.

La resistividad eléctrica para las mezclas de concreto con PET 15% muestran resistividades eléctricas inferiores a la mezcla testigo, inferiores a 10 kΩ.cm, gráfico 16.

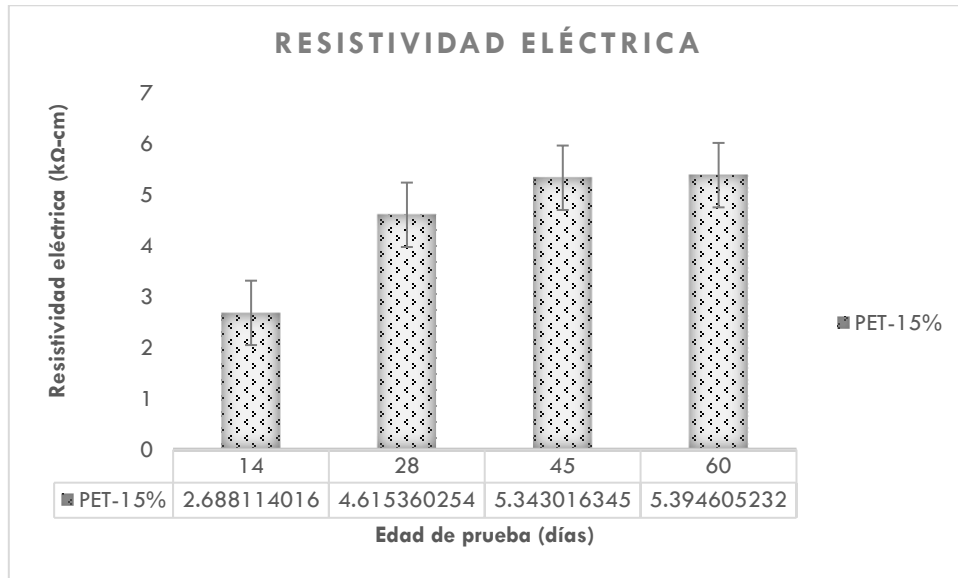


Gráfico 16. Resultado de resistividad eléctrica de la mezcla con sustitución de PET-15%.

Para la mezcla con una sustitución de 30% de PET las resistividades se mantuvieron por debajo de 10 kΩ.cm, sin embargo, presentaron valores superiores a los de la mezcla testigo. Esto puede significar que el PET inhibe el paso de la corriente. (gráfico 17)

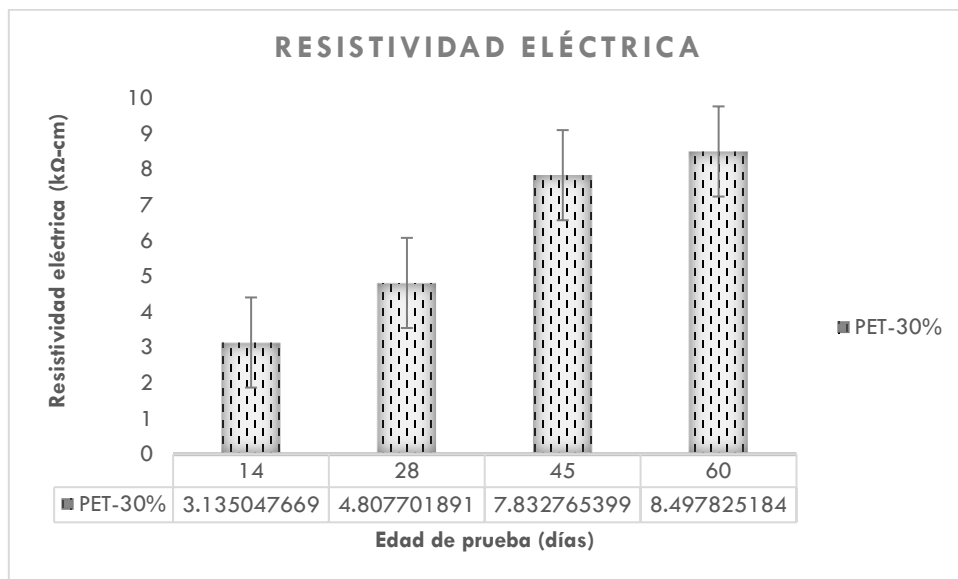


Gráfico 17. Resultado de resistividad eléctrica de la mezcla con sustitución de PET-30%.



4.5.2 Velocidad de Pulso Ultrasónico

Los resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico serán evaluados conforme al criterio establecido por la norma NMX-C-530, según la tabla 33.

Tabla 33 Criterio de durabilidad, clasificación de resultados de la VPU.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (m/s)	Clasificación del concreto (NMX-C-530-0NNCCE, 2018)
$V > 4575$	Excelente
$4575 > V > 3660$	Bueno
$3660 > V > 3050$	Cuestionable
$3050 > V > 2135$	Pobre
$V < 2135$	Muy Pobre

Las velocidades de pulso ultrasónico se mantienen constantes para las edades en cada mezcla. Las diferencias se observan cuando se agrega PET en las diferentes proporciones. En el gráfico 18 se muestran los resultados de VPU para la mezcla control, los cuales en promedio rondan una velocidad de 4200 m/s.

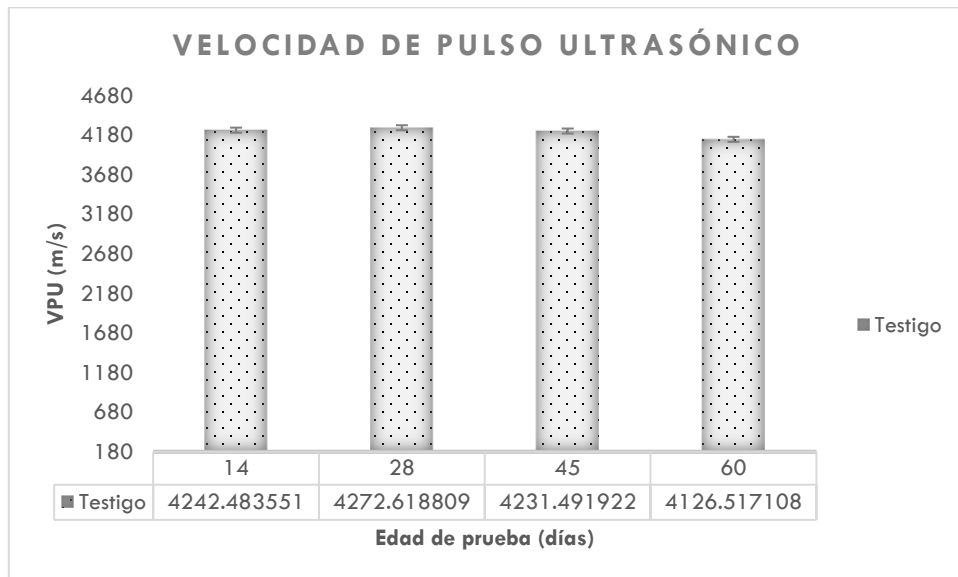


Gráfico 18. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico de la mezcla Testigo.

Para la mezcla PET 15% los valores de VPU se redujeron respecto de la mezcla control. Con valores que rondan los 4100 m/s, gráfico 19.

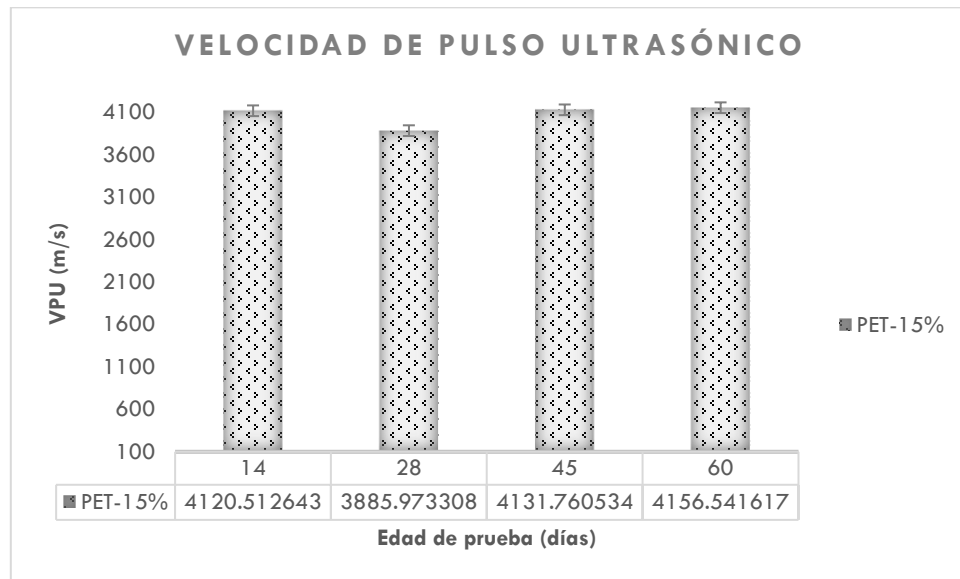


Gráfico 19. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico de la mezcla con sustitución PET-15%.

Para la mezcla con PET 30% la velocidad de pulso ultrasónico tiene valores promedio de 3900 m/s, lo que representa un 92.85% de la velocidad de pulso de la muestra testigo, ilustración 20.

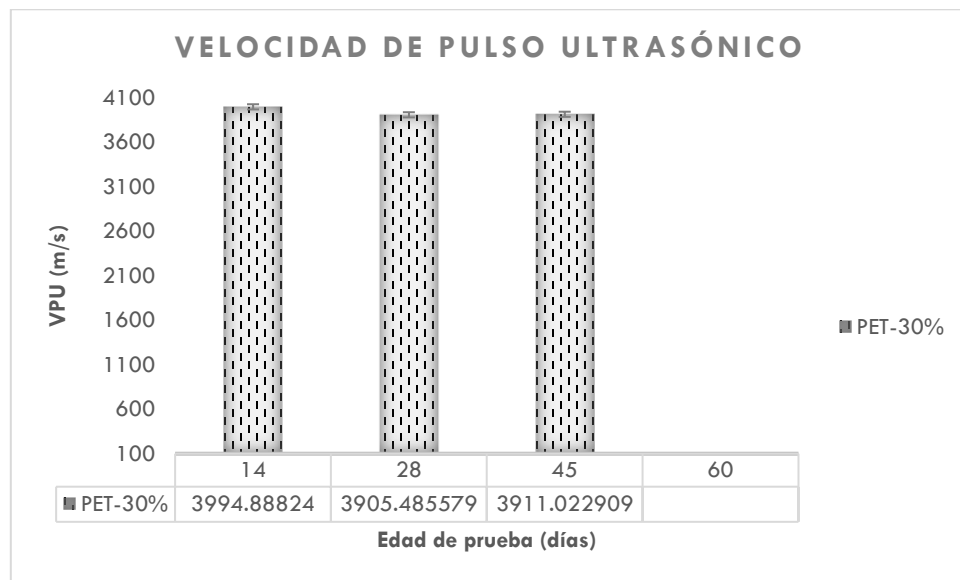


Gráfico 20. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico de la mezcla con sustitución PET-30%.



4.5.3 Frecuencia de Resonancia

Los resultados de la prueba de frecuencia de resonancia realizada a las vigas de concreto testigo y PET15% se presentan en los gráficos 21 y 22 respectivamente.

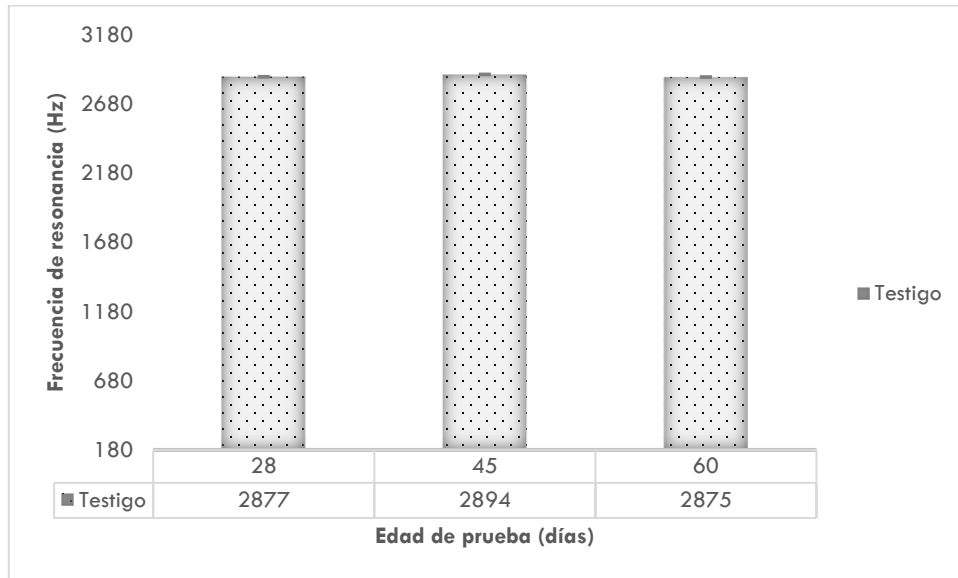


Gráfico 21. Resultados de frecuencia de resonancia para la mezcla Testigo.

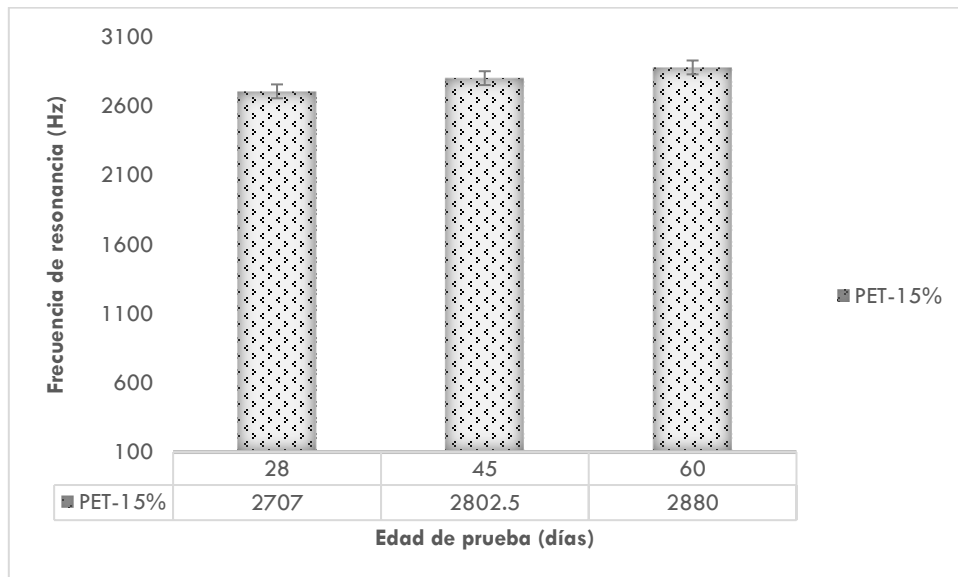


Gráfico 22. Resultados de frecuencia de resonancia de la mezcla con sustitución PET-15%.



EL gráfico 23 muestra los valores de frecuencia de resonancia del concreto con la sustitución de PET de 30%. Los valores son inferiores a los de las mezclas control y mezcla PET 15%.

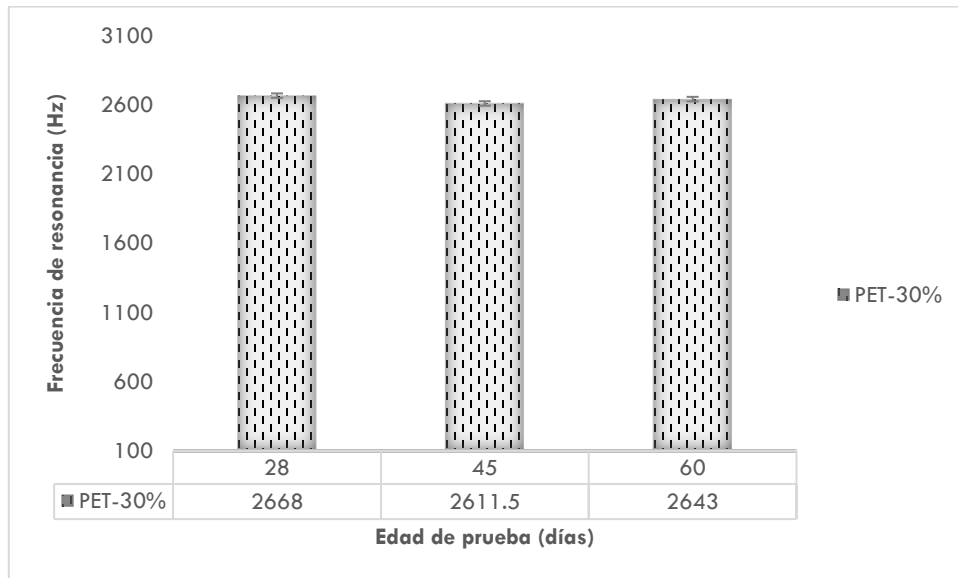


Gráfico 23. Resultados de frecuencia de resonancia de la mezcla con sustitución PET-30%.



5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las resistencias a compresión obtenidas en las mezclas con PET para ambos porcentajes presentaron una meseta de resistencia entre las edades de 14 y 28 días. Sin embargo, la resistencia incrementó a los 45 y 60 días, lo que indica que existe una menor fuerza de adhesión entre las partículas de PET y la pasta de cemento que la que existe entre la pasta y el agregado natural.

En la correlación entre resistividad eléctrica y esfuerzo a compresión se observa una buena correlación, con factor de 0.89. El comportamiento es típico de una mezcla convencional, al incrementar la resistividad en función del esfuerzo. Se observa en el gráfico 24 que a partir de una resistencia máxima alcanzada, esta se mantiene, mientras la resistividad sigue incrementándose.

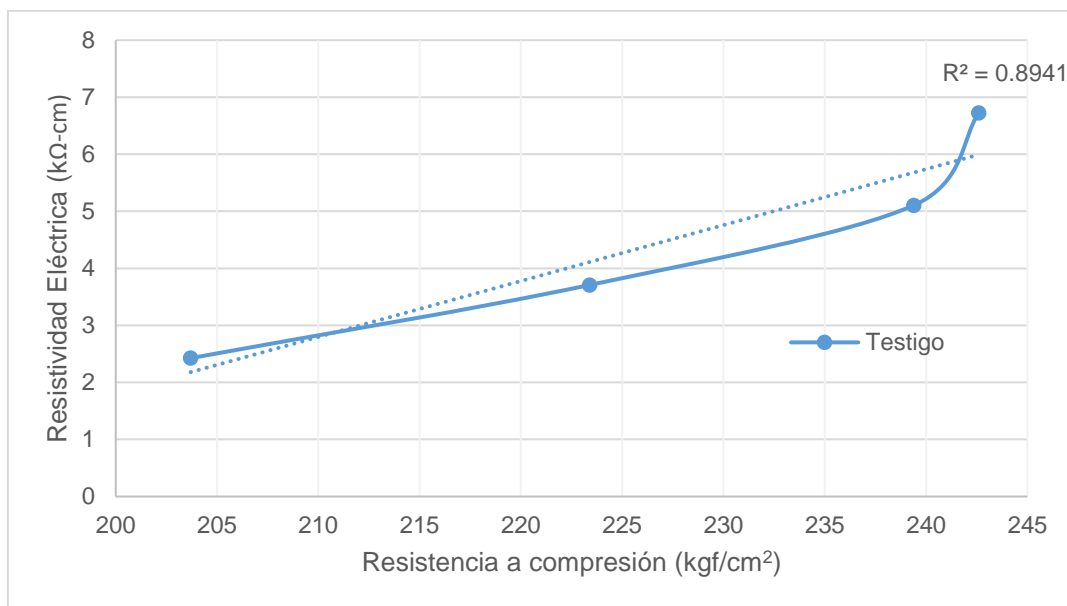


Gráfico 24 Relación entre el esfuerzo a compresión y Resistividad eléctrica de la mezcla testigo.

En los gráficos 25 se observan diferencias en la correlación, ya que los coeficientes son menores para las mezclas que contienen PET. A las edades iniciales de 14 y 28 las resistencias a compresión se mantienen, sin embargo, la resistividad eléctrica se incrementa.

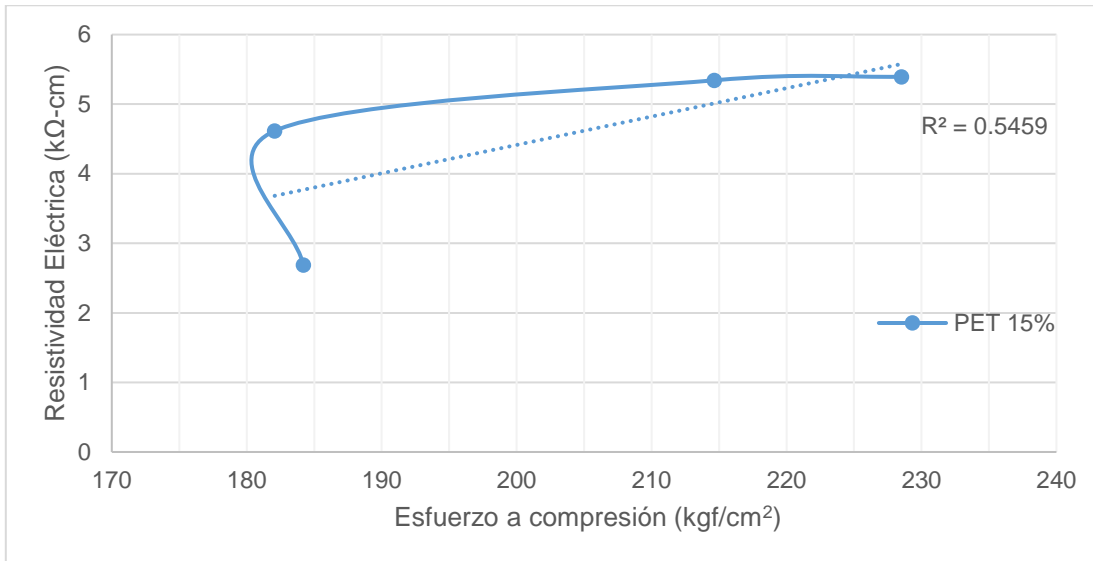


Gráfico 25 Relación entre el esfuerzo a compresión y Resistividad eléctrica de la mezcla con PET15%.

El coeficiente de correlación entre resistividad eléctrica y compresión de la mezcla PET 30% es de 0.78, mejor resultado que la mezcla con PET 15%. (Gráfico 26).

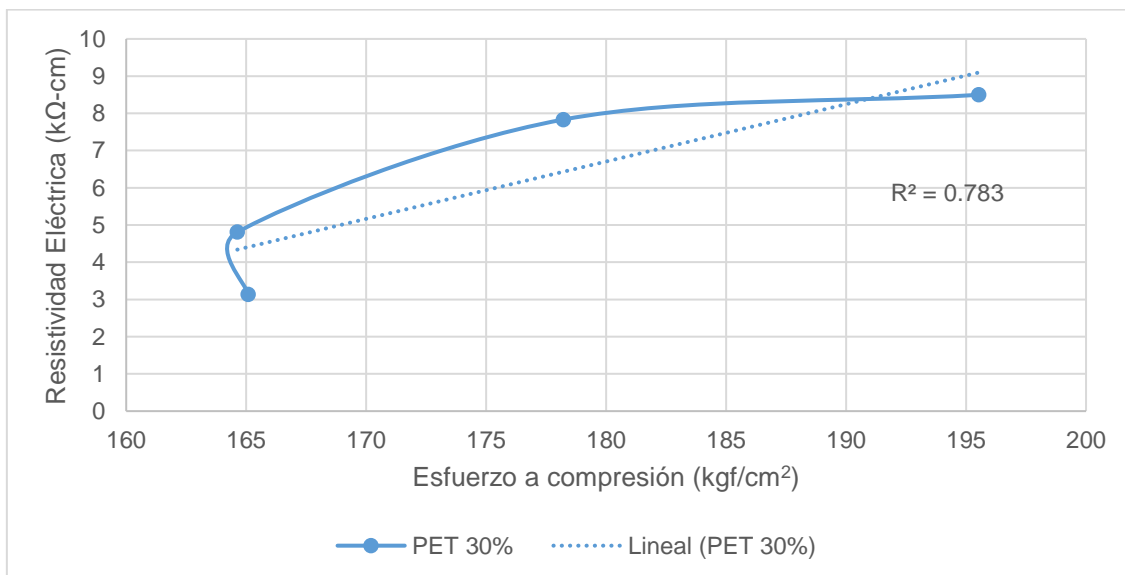


Gráfico 26 Relación entre el esfuerzo a compresión y Resistividad eléctrica de la mezcla con PET30%.

Los resultados de la sustitución de agregado grueso por PET sugieren que una pequeña cantidad de PET puede no presentar una buena distribución en el elemento de concreto, permitiendo una distribución de esfuerzos no uniforme y por consiguiente fallas diferenciales.



Los resultados de frecuencia de resonancia mostrados en el presente trabajo son una parte del avance en dicha prueba. En lo subsecuente, los resultados se introducirán dentro de la evaluación de módulos de elasticidad dinámico.



6. CONCLUSIONES

Es muy probable que el empleo de concreto base cemento Portland como material de construcción permanezca por mucho tiempo. Desafortunadamente el incremento de materiales plásticos como desechos son una realidad que tiene que ver con el incremento del consumo de productos envasados. Aun cuando se están desarrollando estrategias de reciclaje, es necesario que se contribuya, desde la disciplina que nos corresponde, con propuestas metodológicas que mitiguen el impacto de desechos no degradables. El empleo de concretos hidráulicos con modificaciones en su composición se puede considerar siempre y cuando se tenga el sustento que proporciona la experimentación. De la transformación realizada al PET para la elaboración de los concretos de esta experimentación, por medio de tratamiento térmico y mecánico, se entiende que la preparación de los materiales requiere un consumo de energía.

Los resultados obtenidos en esta tesis pueden considerarse como un referente del posible uso que se le puede dar a concretos con sustitución de 15% y 30% de PET, haciendo énfasis en los límites permitidos en cada una de las sollicitaciones mecánicas a las que se han expuesto. Las propiedades físicas son un aspecto importante a considerar, ya que su evaluación permitirá conocer los criterios de durabilidad y, por lo tanto, los ambientes de exposición en los que puede resultar viable su uso.

Finalmente, podemos concluir que trabajar con PET reciclado es una contribución que puede continuar con la búsqueda de mejoras en los procedimientos de preparación del material y en los diseños. Adicionalmente se pueden realizar diseños con la inclusión de otros materiales para mejorar las reacciones químicas y, por ende, mejora de las propiedades físicas y mecánicas.



7. REFERENCIAS

- ACI PRC-211.1. (2022). *Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete-Guide*. Farmington Hills, Michigan, U.S.: American Concrete Institute. Obtenido de www.concrete.org
- ACROPLÁSTICOS. (2022). *Acroplásticos Plásticos, Química, Petróquímica, Cauchos, Pinturas, Tintas, Fibras*. Obtenido de <https://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-pre/opm-bus-pref/36-opc-fag-pre4><https://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-pre/opm-bus-pref/36-opc-fag-pre4>
- ASTM C150. (2022). *Standard Specification for Portland Cement*. doi:10.1520/C0150_C0150M-22
- ASTM C33-03. (2010). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. doi:10.1520/C0033-03
- ASTM-G57. (2012). *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method*.
- Ávila Córdoba , L., Martínez-Barrera, G., Barrera Díaz , C., Ureña Nuñez , F., & Loza Yañez, A. (2013). Effects on Mechanical Properties of Recycled PET in Cement-Based Composites. *International Journal of Polymer Science*. doi:10.1155/2013/763276
- CEMEX. (2015). *Cemento Portland*. Hoja de datos de seguridad.
- CEMEX. (2022). *Cemex Mexico*. Recuperado el 2022, de Cemento CEMEX EXTRA: <https://www.cemexmexico.com/productos/cemento/cemex-extra-old>
- CYTED-DURAR. (1998). En *Red Temática XV. Durabilidad de la Armadura, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado* (SEGUNDA ed., pág. 128).
- Ecoologic. (2022). *Reciclaje del PET*. Obtenido de Ecoologic : <https://www.ecoologic.com/reciclaje-de-pet>
- Forbes Staff. (27 de 08 de 2021). *Forbes México*. Obtenido de Consumo de resinas en México supera 6 millones de toneladas en 2020: Anipac: <https://www.forbes.com.mx/consumo-de-resinas-en-mexico-supera-6-millones-de-toneladas-en-2020-anipac/>
- Guevara Díaz, D. D. (2014). *Resistencia y costo del concreto premezclado y del concreto hecho al pie de obra, en función al volumen de vaciado*. Perú.
- IMCYC. (2012). *Industria de la Construcción Concreto hidráulico-Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico*. México. Obtenido de <http://www.imcyc.com/revistacyt/octubre2012/problemas.pdf>
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (1989). *Práctica para dosificar concreto normal, concreto pesado y concreto masivo*. México, DF: Limusa. Obtenido de <http://catalogo.fi.uba.ar/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=592>



- Instituto Mexicano del Plástico Industrial. (28 de Septiembre de 2018). *Importancia de la Industria del Plástico*. (C. Once, Editor) Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=QVDuvsCHGoE>
- Kangavar, M. E., Lokuge, W., Manalo, A., Karunasena, W., & Frigione, M. (2022). Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement. *Case Studies in Construction Materials* (16). doi:10.1016/j.cscm.2022.e00934
- Niño Hernández, J. R. (2010). *Tecnología del concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas. Tomo 1* (3 ed.). Bogotá, D.C., Colombia: ASOCRETO.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción. Agregados. Masa Volumétrica. Método de prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-077-ONNCCE. (2019). *Industria de la Construcción-Agregados para Concreto-Análisis Granulométrico-Método de Ensayo*. Ciudad de México.
- NMX-C-083-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes-Método de Ensayo*. México: ONNCCE.
- NMX-C-089-ONNCCE. (2019). *Determinación de las frecuencias fundamentales, transversal, longitudinal y torcional de especímenes de concreto -Especificaciones y métodos de ensayo-*. Ciudad de México: ONNCCE.
- NMX-C-109-ONNCCE;. (2013). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Cabeceo de Especímenes*. CDMX.
- NMX-C-111-ONNCCE. (2018). *Industria de la Construcción-Agregados para concreto hidráulico-Especificaciones y métodos de ensayo*. CDMX.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2019). *Industria de la Construcción-Agua para concreto-Especificaciones*. CDMX.
- NMX-C-128-ONNCCE. (2013). *Industria de la construcción-Concreto sometido a compresión-Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson*. México: ONNCCE.
- NMX-C-156-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico-Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco*. México: ONNCCE.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2016). *Industria de la construcción-Concreto-Elaboración y curado de especímenes de ensayo*. CDMX.
- NMX-C-162-ONNCCE. (2000). *Industria de la Construcción-Concreto hidráulico-Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico*. México.: ONNCCE.
- NMX-C-163-ONNCCE-2019. (2019). *Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-164-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción-Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso*. México: ONNCCE.



- NMX-C-165-ONNCCE. (2020). *Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Fino - Método de Ensayo*. México: ONNCCE.
- NMX-C-191-ONNCCE. (2004). *Determinación de la resistencia a la flexión del concreto*. México: ONNCCE.
- NMX-C-275-ONNCCE. (2020). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO HIDRÁULICO-DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO A TRAVÉS DEL CONCRETO-MÉTODO DE ENSAYO*. Ciudad de México.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2017). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Ensayo*. CDMX.
- NMX-C-514. (2016). *Industria de la Construcción - Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico- Especificaciones y Métodos de Ensayo*. Mexico: ONNCCE.
- NMX-C-514. (2016). *Industria de la Construcción - Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico- Especificaciones y Métodos de Ensayo*. Mexico: ONNCCE.
- NMX-C-530-ONNCCE. (2018). *Industria de la Construcción – Durabilidad – Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado – Criterios y Especificaciones*.
- Nursyamsi , & Berkat Zebua, W. S. (2017). The influence of pet plastic waste gradations as coarse aggregate towards compressive strength of light concrete . *Procedia Engineering* (171), 614-619. doi:10.1016/j.proeng.2017.01.394
- Plastics Technology México. (04 de 12 de 2017). *Plastics Technology México. Fuente de informacion líder para la industria del plástico*. Obtenido de <https://www.pt-mexico.com/noticias/post/casas-de-pet-una-oportunidad-para-m%C3%A9xico-luego-del-sismo>
- Plastics Technology México. (20 de 05 de 2021). *Fuente de información líder para la industria del plástico*. Obtenido de <https://www.pt-mexico.com/noticias/post/mexico-recicla-19-millones-de-toneladas-de-plasticos-al-ano-revela-estudio-de-anipac>
- Repositorio Institucional de la Universidad ESPE. (30 de 05 de 2011). *Tecnología de los Plásticos*. Obtenido de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>
- Richardson, & Lokensgard. (1999). *Industria del plástico: Plástico Industrial*. Paraninfo.
- Rte de México. (12 de 10 de 2020). *LADRILLOS DE PLASTICO RECICLADO EN MEXICO*. Obtenido de <https://rte.mx/ladrillos-de-plastico-reciclado-en-mexico>