

# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA  
CIVIL



Tesis profesional

“Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno”

---

Para obtener el título de:

**Ingeniero Civil**

Presenta:

**Fabricio Ali Hernández Ferreyra**

Director:

**Dr. Wilfrido Martínez Molina**

Co – Directores:

**Codirector Interno: M. en C. Judith Alejandra Velázquez Pérez**

**Codirector Externo: Ing. Ramsés Pineda Cárdenas**

Morelia Mich. Noviembre de 2021

## RESUMEN

Las mezclas de concreto hidráulico que se usan en pavimentos rígidos, se diseñan mediante el criterio de resistencia a la flexión o Módulo de Ruptura. Las fibras adicionadas a las mezclas de concreto hidráulico ayudan a mejorar las características del concreto; en esta investigación se utilizaron dos tipos de fibras una a base de residuos de PET implementada en este trabajo, mientras que la otra fue una fibra comercial de polipropileno. Se evaluaron los materiales pétreos para el diseño de la mezcla de concreto hidráulico, se utilizaron dos tipos de agregado fino, de los cuales una fue arena blanca del banco de material de “El Coro”, pero al no dar los resultados deseados para el diseño, por el módulo de finura, se decidió hacer una mezcla de 50% de arena blanca con 50% de arena negra del banco de materiales “San Bernabé” y cumplir así la normatividad.

Se realizaron 5 mezclas una testigo y 4 adicionando a la mezcla fibras en diferentes porcentajes, fueron 0.4%-PET, 0.8%-PET, 1.2%-PET y PET-P. Las cuales fueron ensayadas en estado fresco, así como ya en su estado endurecido, dichas pruebas fueron no destructivas como por ejemplo resistividad eléctrica, así como pruebas destructivas; entre éstas flexión estática en el caso de vigas, mientras que en el caso de cilindros fue a compresión. Evaluando las vigas a 2 edades de 28 y 90 días, mientras que en cilindros las edades de ensayo fueron, 7, 14, 28, 60 y 90 días. Las mezclas de concreto adicionadas con macrofibras de PET al ser ensayadas, registraron mejores más altos y mejores resultados en las pruebas destructivas en edades tardías.

A compresión a 28 días la mayoría de los especímenes llegaron a la edad de diseño compresión de 330 kg/cm<sup>2</sup>, pero en vigas ninguna llegó al MR de diseño; sin embargo, a los 90 días las vigas a flexión obtuvieron más altas resistencias de MR, relativamente, mejor que los cilindros a compresión.

Palabra Clave: concreto hidráulico, Modulo de Ruptura, Fibras de PET, fibras de polipropileno

### **ABSTRACT**

The hydraulic concrete mixtures, used in rigid pavements, are designed using the criterion of obtaining their Flexural Strength or Modulus of Rupture (MR). The fibers added to hydraulic concrete mixes help to improve the characteristics of the concrete; in this research, two types of fibers were used: one based on PET waste and the other was a commercial polypropylene fiber. The stone materials were evaluated for the design of the hydraulic concrete mix. Two types of fine aggregate were used: white sand from the "El Coro" material bank, but since it did not give the desired results for the design, due to the Fineness Module, a mixture of 50% white sand with 50% black sand was made, this one from the "San Bernabé" material bank, in order to comply with the regulations.

A total of 5 mixtures were made: one control and 4 adding to the mixture fibers in different percentages, which were 0.4%-PET, 0.8%-PET, 1.2%-PET and PET-P, which were tested in fresh state, as well as in hardened state, such tests were non-destructive as for example Electrical Resistivity RE, as well as destructive tests; among these static bending, in the case of beams, while in the case of cylinders it was compression. Beams were evaluated at two ages: 28 and 90 days, while cylinders were tested at 7, 14, 28, 60 and 90 days. The concrete mixtures added with PET macrofibers, when tested, registered higher and better results in the destructive tests at late ages.

At 28 days compression, most of the specimens reached the design age compression  $f_c$  of 330 kg/cm<sup>2</sup>, but in beams none reached the design RM; however, at 90 days the flexural beams obtained higher RM strengths, relatively, than the compression cylinders.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

### **DEDICATORIAS**

A mi madre Elena Xóchitl Hernández Ferreyra por ser el motor en mi vida, ya que no me alcanzarían todas las palabras para describirte y agradecerte todo lo que has hecho por mi tanto felicitarme por mis logros como ser la persona que más me ha apoyado en mis fracasos para levantarme de ellos y levantarme con más fuerza.

A mi abuela María Elena Ferreira González y por siempre brindarme cariño desde el primer día en que nací, apoyarme en cada logro y cada oportunidad durante mi camino tanto profesional como personal, ser guía de mi vida y siempre creer en mi en cada momento.

A mis hermanos Emily y José Luis por ser mi motor de todos los días, de brindarme su amor, confianza y tranquilidad al estar con ustedes ya que todos los momentos que he pasado con ustedes no los cambiaría por nada.

A mi abuelo Agustín Hernández Campos que en paz descanse por tratarme con un hijo más de él, brindarme el cariño de un padre, aconsejarme y brindarme todo su amor en todo momento, el ejemplo de siempre apoyar a todos sin esperar nada a cambio, el esforzarse siempre al máximo y nunca darte por vencido aun cuando las cosas no sean sencillas, por ser siempre mi ejemplo a seguir ya que todo lo que hizo por mí nunca voy a terminar de agradecerle.

### **AGRADECIMIENTOS**

Le dio gracias a Dios por brindarme vida, salud y personas que me han acompañado en todos mis estudios.

A mi director de Tesis el Dr. Wilfrido Martínez Molina por brindarme su apoyo desde el inicio de la carrera, brindarme todo lo necesario para poder hacer esta investigación y por confiar en mí para realizar este trabajo.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Facultad de Ingeniería Civil por brindarme las herramientas para poder realizar este trabajo de tesis.

Al Laboratorio de Materiales y a los maestros Noel Díaz González, Judith Alejandra Velázquez Pérez, Sandra del Carmen Arguello Hernández y al Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán por aconsejarme en cada mejora y duda en el proyecto.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Al ingeniero Ramsés Pineda Cárdenas por todo el apoyo laboral, por cualquier duda que tenía de este trabajo y del ámbito laboral.

A mi novia Diana Laura Charco Ángel por apoyarme en mis pruebas y motivarme cuando más necesitaba ánimos.

A los amigos que hice en laboratorio Marco Miguel Granados Ceras, Arturo Mendoza, Ana Daniela Martínez, Oswaldo Castolo, Melissa Ruiz Mendoza, Miguel Contreras Flota, Uriel Espino González, Luis Alberto González Luna que me apoyaron en la realización de pruebas, como en cada plática, risas y todos los momentos agradables que pasé con ellos y todas las personas en el laboratorio. Así tanto el Técnico Mtro. Jesús Zauno Zamudio por todo el apoyo desde el primer día que estuve en laboratorio. Además, a todas las personas que me apoyaron en el laboratorio desde que inicié esta aventura de investigación.

A mis amigos de generación de la Facultad Michel Alberto Ayala Hernández, Martin Fraga Melchor, José Armando Garcilazo Silva, Omar Alejandro Matías González, Andrea Paulina Herrera Gómez, Martha Doraly Colín Venegas, Josué Elvira Ramírez, por todos los momentos de risas, de apoyo en la entrega de trabajos, como en cualquier duda que pude tener en el trascurso de la carrera.

A mis compañeros y amigos de Labingco S.A de C.V. En especial a David Aguilar Reyes y Jesús Acosta Ávila por el apoyo en algunas pruebas de este trabajo de investigación, así como en dudas en resultados y en algunas pruebas de esta Tesis.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	II
ABSTRACT .....	III
DEDICATORIAS.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	VI
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
JUSTIFICACIÓN.....	XIII
OBJETIVOS .....	XIII
OBJETIVO GENERAL.....	XIII
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	3
2.1. ANTECEDENTES .....	3
2.2. CEMENTO PORTLAND .....	4
2.2.1 CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO.....	5
2.2.2 PROPIEDADES DEL CEMENTO PORTLAND .....	6
2.2.3 CEMENTO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN.....	7
2.3. AGREGADOS PÉTREOS (ARENA Y GRAVA) .....	8
2.3.1 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS .....	8
2.3.2 AGREGADOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN .....	10
2.4. AGUA .....	10
2.4.1 ESPECIFICACIONES DEL AGUA EN LA CONSTRUCCIÓN.....	10
2.4.2 EL AGUA UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN .....	11
2.5. CONCRETO HIDRÁULICO .....	13

## Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

2.5.1 TIPOS DE CONCRETOS HIDRÁULICOS .....	13
2.5.2 MÓDULO DE RUPTURA .....	14
2.6. PAVIMENTOS .....	14
2.6.1 PAVIMENTO RÍGIDO .....	14
2.6.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS .....	15
2.7. FIBRAS COMO ADICIÓN AL CONCRETO .....	17
2.7.1 CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS .....	18
2.7.2 POLIETILENO TEREFALATO (PET) .....	21
2.7.2.1 RECICLAJE DEL PET. ....	22
2.7.2.2 FIBRAS DE PET .....	23
2.7.3 FIBRAS DE POLIPROPILENO DE ALTA DENSIDAD .....	23
3. METODOLOGÍA .....	25
3.1. CARACTERIZACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES .....	25
3.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND .....	25
3.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS ARENAS .....	31
3.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS GRAVAS .....	60
3.1.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS DE PET .....	76
3.1.4.1 ELABORACIÓN DE LAS FIBRAS DE PET .....	77
3.1.5 DISEÑO DE LA MEZCLA .....	79
3.2. ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO .....	86
3.2.1 MUESTREO DE CONCRETO FRESCO .....	86
3.2.2 REVENIMIENTO .....	87
3.2.3 POTENCIAL DE HIDRÓGENO .....	89
3.2.4 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES .....	90
3.2.5 DESMOLDE Y CURADO DE ESPECÍMENES .....	92
3.3. ENSAYOS AL CONCRETO ENDURECIDO .....	94
3.3.1 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS .....	94

3.3.2 PRUEBAS DESTRUCTIVAS .....	96
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	102
4.1. ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO.....	102
4.1.1 REVENIMIENTO .....	102
4.1.2 POTENCIAL DE HIDRÓGENO .....	102
4.2 ENSAYOS AL CONCRETO ENDURECIDO.....	103
4.2.1 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.....	103
4.2.2 PRUEBAS DESTRUCTIVAS .....	106
4.2.3 CORRELACIONES .....	108
5 CONCLUSIONES .....	113
6 BIBLIOGRAFÍA.....	115
7 ANEXOS .....	121

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Calor de Hidratación en los compuestos de Clinker. Fuente: (Grupo Argos, 2020) .....	7
Ilustración 2. Consistencia normal del cemento. Fuente: Elaboración propia .....	27
Ilustración 3 Tiempos de fraguado del cemento. Fuente: Elaboración propia. ....	28
Ilustración 4 Densidad del Cemento. Fuente: Elaboración propia .....	30
Ilustración 5. Banco de material “El Coro”. Fuente: Google maps .....	32
Ilustración 6. Banco de materia “San Bernabé”. Fuente: Google Maps .....	32
Ilustración 7 Cuarteo de Arena Negra. Fuente: Elaboración propia. ....	35
Ilustración 8 Cuarteo de Arena Combinada. Fuente: Elaboración propia .....	35
Ilustración 9 MVSS de la arena negra. Fuente: Elaboración propia. ....	37
Ilustración 10 MVSS de la arena combinada. Fuente: elaboración propia. ....	37
Ilustración 11 MVSV de la arena Negra. Fuente: Elaboración propia.....	39
Ilustración 12 MVSV de la arena combinada. Fuente: Elaboración propia.....	39
Ilustración 13 Humedad de Absorción de la arena Negra. Fuente: Elaboración propia .....	43

## Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Ilustración 14 Humedad de absorción de la arena Blanca. Fuente: Elaboración propia .....	43
Ilustración 15 Densidad de la arena negra. Fuente Elaboración propia .....	46
Ilustración 16 Densidad de la arena combinada. Fuente: elaboración propia .....	46
Ilustración 17 Colocación de mallas en el Raf tap. Fuente: elaboración propia. ....	50
Ilustración 18 Granulometría de la arena. Fuente: Elaboración propia .....	50
Ilustración 19 Curva granulométrica en arenas. ....	51
Ilustración 20 Curva granulométrica de la arena blanca. ....	53
Ilustración 21 Curva granulométrica de la arena negra. ....	54
Ilustración 22 Curva granulométrica de la arena combinada. ....	54
Ilustración 23 Adición de la sosa caustica. Fuente: Elaboración propia. ....	56
Ilustración 24 Colorimetría de la arena. Fuente: Elaboración propia .....	56
Ilustración 25 Adición de agua para la prueba de sedimentación. Fuente: Elaboración propia. ....	57
Ilustración 26 Reposo para determinar el material fino de la muestra. Fuente: Elaboración propia. ....	57
Ilustración 27 Muestra de arena en el agitador mecánico de equivalente de arena. Fuente: Elaboración propia. ....	59
Ilustración 28 Lectura de arena (L2). Fuente: Elaboración propia .....	59
Ilustración 29 Banco de material “La Roka”. Fuente: Google maps. ....	61
Ilustración 30 Cuarte de grava. Fuente: Elaboración propia. ....	62
Ilustración 31 Llenado de la MVSS. Fuente: Elaboración propia .....	63
Ilustración 32 Peso de la MVSS. Fuente: Elaboración Propia .....	63
Ilustración 33 Compactación con la varilla de la grava. Fuente: Elaboración propia. ....	65
Ilustración 34 enrasado de la grava. Fuente: Elaboración propia. ....	65
Ilustración 35 Rango de la granulometría de la grava para el diseño de concreto hidráulico. ....	71
Ilustración 36 Granulometría de la grava triturada. Fuente: Elaboración Propia. ...	72
Ilustración 37 Curva granulométrica de la grava triturada.....	73
Ilustración 38 Colocación de la grava triturada en la máquina de desgaste de los ángeles. Fuente: Elaboración propia.....	75
Ilustración 39 Desgaste de los Ángeles de grava triturada. Fuente: Elaboración propia.....	75

## Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Ilustración 40 Corte de la fibra. Fuente: Elaboración Propia.....	78
Ilustración 41 Rayado del PET. Fuente: Elaboración propia.....	79
Ilustración 42 Corte de las fibras por medio de guillotina. Fuente: Elaboración propia.....	79
Ilustración 43 Fibras cortadas y guardadas en bolsas. Fuente: Elaboración propia.....	79
Ilustración 44 Muestreo de concreto fresco. Fuente: Elaboración propia.....	87
Ilustración 45 Revenimiento de concreto fresco. Fuente: Elaboración propia. ....	89
Ilustración 46 Colocación de tira de PH en la mezcla de Concreto hidráulico fresco. Fuente Elaboración propia.....	90
<i>Ilustración 47 Elaboración de cilindros 15 x 30. Fuente: Elaboración propia. ....</i>	<i>91</i>
Ilustración 48 Elaboración de vigas de dimensiones 15 cm x 15 cm y longitud de 60 cm.. Fuente: Elaboración propia.....	92
Ilustración 49 Equipo de resistividad eléctrica. Fuente: Elaboración propia. ....	95
Ilustración 50 Resistividad eléctrica del espécimen. Fuente: Elaboración propia. ..	95
Ilustración 51 Compresión de cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de longitud. Fuente: Elaboración propia.....	98
Ilustración 52 Modulo de ruptura de la viga de 15 x 60. Fuente: Elaboración propia.....	100
Ilustración 53 Resultado de PH en la mezcla de concreto hidráulico fresco. Fuente: Elaboración propia.....	103
Ilustración 54 Promedio de resistividad eléctrica en cilindros de 30 x 15 a todas las edades de ensayo. ....	104
Ilustración 55 Promedio de resistividad eléctrica en vigas (horizontal) de 60 x 15 a todas las edades de ensayo. ....	104
Ilustración 56 Promedio de resistividad eléctrica en vigas (verticales) de 60 x 15 a todas las edades de ensayo. ....	105
Ilustración 57 Promedios de cilindros de 15 x 30 a todas las edades de ensayo. ....	106
Ilustración 58 Promedio de Módulo de Ruptura en vigas de 60 x 15 a todas las edades de ensayo. ....	107
Ilustración 59 Correlación de cilindros a compresión Vs vigas a flexión en MR. ..	108
Ilustración 60 Correlación de cilindros a compresión con vigas a flexión en f'c. ..	109
Ilustración 61 Correlación de resistividad eléctrica en cilindros y vigas a 28 y 90 días. ....	110

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Ilustración 62 Correlación de resistividad eléctrica vs compresión en cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. .... 111

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del cemento de acuerdo a la norma (ASTM-C-150, 2016).....	5
Tabla 2. Clasificación del cemento de acuerdo a la Norma (NMX-C-414-ONNCCE, 2017).....	5
Tabla 3 Especificaciones del agua de acuerdo a la Norma (NMX-C-122-ONNCCE, 2019).....	10
Tabla 4 Resultados del muestreo de calidad de agua. Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.....	11
Tabla 5 Resultados del muestro del cemento Portland. ....	31
Tabla 6. Normativa para la elaboración de especímenes de concreto según las NMX-C-ONNCCE .....	32
Tabla 7 MVSS de la arena blanca .....	37
Tabla 8 MVSS de la arena negra .....	38
Tabla 9 MVSS de la arena combinada .....	38
Tabla 10 MVSV de la arena blanca .....	40
Tabla 11 MVSV de la arena negra .....	40
Tabla 12 MVSV de la arena combinada.....	41
Tabla 13 Humedad de Absorción de la arena blanca. ....	43
Tabla 14 Humedad de Absorción de la arena negra .....	44
Tabla 15 Humedad de absorción de la arena combinada .....	44
Tabla 16 Densidad de la arena blanca.....	47
Tabla 17 Densidad de la arena negra .....	47
Tabla 18 Densidad de la arena combinada.....	47
Tabla 19 Límites granulométricos de la arena .....	48
Tabla 20 Calculo de granulometría de las arenas. ....	50
Tabla 21 Granulometría y Módulo de finura de la arena blanca. ....	51
Tabla 22 Granulometría y Módulo de finura de la arena negra. ....	52
Tabla 23 Granulometría y Módulo de finura de la arena combinada. ....	52
Tabla 24 Colorimetría de la arena blanca y negra.....	56
Tabla 25 Resultado de Sedimentación de la arena blanca y negra.....	57
Tabla 26 Equivalente de la arena blanca.....	60

## Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Tabla 27 Equivalente de la arena negra. ....	60
Tabla 28 Equivalente de la arena combinada.....	60
Tabla 29 MVSS de la grava triturada. ....	64
Tabla 30 MVSV de la grava triturada. ....	65
Tabla 31 Humedad de absorción de la grava triturada.....	67
Tabla 32 Especificaciones de tipo de absorción según: (NMX-C-164-ONNCCE, 2014).....	68
Tabla 33 Densidad de la grava triturada. ....	69
Tabla 34: Registro de datos de granulometría en grava.....	70
Tabla 35 Granulometría de la grava triturada. ....	72
Tabla 36 tipos de desgastes según (M MMP 4 04 006/18, 2018).....	74
Tabla 37 Desgaste de los Ángeles de la grava triturada. ....	76
Tabla 38 Características de los materiales. ....	80
Tabla 39 Revenimiento recomendados para diversos tipos de Construcción. ....	81
Tabla 40 Cantidad de agua para el diseño de concreto hidráulico. ....	81
Tabla 41 Relación Agua/Cemento. ....	82
Tabla 42 Volumen de agregado grueso varillado en seco, por diferentes módulos de finura.....	83
Tabla 43 Cantidad de materiales para m <sup>3</sup> .....	84
Tabla 44 Cantidad de materiales para el diseño de un m <sup>3</sup> , corregidos por la humedad de absorción.....	85
Tabla 45 Masa requerida para el diseño de m <sup>3</sup> de mezcla. ....	85
Tabla 46. (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019).....	96
Tabla 47 Revenimientos obtenidos del muestreo de concreto fresco en las mezclas elaboradas.....	102
Tabla 48 Resistividad Eléctrica de cilindros de 15 x 30 a 7 días. ....	121
Tabla 49 Resistividad Eléctrica de cilindros de 15 x 30 a 14 días. ....	121
Tabla 50 Resistividad Eléctrica de cilindros de 15 x 30 a 28 días.....	122
Tabla 51 Resistividad Eléctrica de cilindros de 15 x 30 a 60 días. ....	122
Tabla 52 Resistividad Eléctrica de cilindros de 15 x 30 a 90 días. ....	123
Tabla 53 Resistividad Eléctrica de vigas de manera vertical de 60 x 15 a 28 días. ....	123
Tabla 54 Resistividad Eléctrica de vigas de manera vertical de 60 x 15 a 90 días. ....	123

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

<i>Tabla 55 Resistividad Eléctrica de vigas de Horizontal 1 de 60 x 15 a 28 días. ...</i>	124
Tabla 56 Resistividad Eléctrica de vigas de Horizontal 1 de 60 x 15 a 28 días. ...	124
<i>Tabla 57 Resistividad Eléctrica de vigas de Horizontal 2 de 60 x 15 a 28 días. ...</i>	125
Tabla 58 Resistividad Eléctrica de vigas de Horizontal 2 de 60 x 15 a 90 días. ....	125
Tabla 59 Compresión de cilindros de 15 x 30 a 7 días. ....	126
Tabla 60 Compresión de cilindros de 15 x 30 a 14 días. ....	126
Tabla 61 Compresión de cilindros de 15 x 30 a 28 días. ....	127
Tabla 62 Compresión de cilindros de 15 x 30 a 60 días. ....	128
Tabla 63 Compresión de cilindros de 15 x 30 a 90 días. ....	128
Tabla 64 Módulo de ruptura de vigas de 15 x 60 a 28 días. ....	129
Tabla 65 Módulo de ruptura de vigas de 15 x 60 a 90 días. ....	129

## **JUSTIFICACIÓN**

Dar continuidad a la investigación del Mtro. Víctor Hugo Blancas Herrera de las mezclas con fibras de PET evaluando los Módulos de Ruptura y pruebas complementarias que puedan ser correlacionables. Además, evaluando mezclas con diferentes porcentajes de fibras de PET, comparándolas contra otras mezclas adicionadas con una fibra comercial de polipropileno más PET.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar mezclas de concreto modificadas con distintos porcentajes de PET reciclado y otra con fibras de PET más fibras de Polipropileno comercial, para ver su comportamiento respecto al MR de los especímenes.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Elaborar macro fibras de PET, con ciertas características, a partir de envases de plástico pos-consumo para ser incorporadas a mezclas de concreto convencional.
- Mejorar las características de un concreto convencional mediante la adición con fibras de PET a porcentajes de 0.4%, 0.8% y 1.2%. Así como PET más polipropileno, para obtener un concreto hidráulico resistente, durable y sostenible para aplicarlo en pavimentos.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

- Evaluar los resultados obtenidos, a partir de las pruebas estándar en el concreto, destructivas y no destructivas de los distintos porcentajes de las mezclas elaboradas y determinar la mejor evaluación de materiales empleados en mezclas respecto al comportamiento de MR y pruebas físicas destructivas

## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo forma parte de una investigación previa, enfocada en una investigación previa de fibras de PET del Maestro Víctor Blancas, pero comparando con una fibra comercial la cual sería la fibra de polipropileno. Este trabajo se ha realizado con los compañeros Diana Laura Charco Angel, Ana Daniela Martínez González, Oswaldo Castolo Montero y su servidor Fabricio Ali Hernández Ferreyra, con la finalidad de que cada uno evalué diferentes pruebas

En esta tesis evaluaremos el Módulo de Ruptura de los especímenes de las mezclas en estudio, en las cuales las vigas se ensayan a flexión para así poder determinar el MR de las muestras en estudio.

Se realizó una comparación con cilindros probándolos a compresión simple, para así poder correlacionar el Módulo de Ruptura con Compresión Simple, complementado los análisis de las pruebas destructivas con resistividad eléctrica, cuya prueba no destructiva nos ayuda a conocer la cantidad de poros interconectados de cada espécimen evaluado de las mezclas elaborados en esta investigación.

Haciendo pruebas a los agregados pétreos para que cumplieran con los parámetros para un diseño de mezcla de concreto hidráulico por el método de ACI 211.1 (American Concrete Institute), ya que la arena blanca utilizada en la anterior investigación, no daban los resultados de módulo de finura necesarios para poder hacer el diseño por ACI, así que se decidió mejorar su propiedad con una mezcla de 50% respecto a su masa total de arena negra y 50 % de arena blanca, ya que este porcentaje en las arenas fue la que tuvo mejores resultados en las pruebas de módulo de finura, para estuviera entre 2.3 y 3.1.

En el trabajo se evaluaron especímenes de 5 mezclas las cuales fueron:

- TEST
- 0.4%-PET
- 0.8%-PET
- 1.2%-PET

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

- PET-P (0.23% PET y 0.77% polipropileno)

Las anteriores todas son adiciones de fibras al concreto hidráulico teniendo una mezcla testigo, 3 diferentes porcentajes de adición de PET con un incremento de 0.4%, y una mezcla con adición de PET y polipropileno.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. ANTECEDENTES**

En la actualidad, uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción es el concreto hidráulico, el cual por sus requisitos de desempeño debe cumplir con alta resistencia a la compresión, rigidez suficiente y módulo de ruptura adecuado a diferentes edades para cumplir con los requisitos de la teoría del diseño de carreteras, con alta absorción de energía (tenacidad) y alta durabilidad, por lo cual, plantearse investigar nuevas mezclas de concreto hidráulico modificado con materiales innovadores como aditivos y fibras, que logren el propósito de convertirse en un material reciclable, mejorar sinérgicamente las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto, y con ello reducir la cantidad de residuos sólidos (reduciendo así la generación de contaminación ambiental), la protección de los recursos naturales (mediante el uso de materiales reciclados), y la reducción o beneficio de los costos de producción y mantenimiento durante la vida útil del concreto hidráulico.

La Asociación Mexicana de Concreteros Independientes (AMCI, 2021) estimó para el año 2015 un crecimiento del ocho por ciento del sector, el doble que, en 2013, impulsado por grandes proyectos de infraestructura federal y de vivienda en el país. La producción de concreto en México se ubica actualmente en 32 millones de metros cúbicos anuales, pero el potencial con la capacidad instalada podría llegar hasta los 50 millones de metros cúbicos al año (Reynosa Morales, y otros, 2017)

El uso de concreto hidráulico en la pavimentación de carreteras en la República Mexicana es una de las áreas con mayor potencial de crecimiento dentro de la industria del concreto, de ahí el valor de promocionar este tipo de pavimentos. A partir de 1993 se inició a gran escala la construcción de pavimentos rígidos nuevos. Por ese año también tuvo lugar la construcción de sobrecapas ultra delgadas de concreto hidráulico en el estado de Chihuahua y en el resto del país. Por lo tanto, la experiencia en cuanto al comportamiento de este tipo de pavimentos se ha venido mejorando en México (Asociación mexicana de ingeniería de vías terrestres (Uribe García, 2016).

Los diseñadores de pavimentos utilizan una teoría basada en la resistencia a la flexión o MR, por lo tanto, puede ser requerido el diseño de la mezcla en el

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

laboratorio, basado en los ensayos de resistencia a la flexión, o puede ser seleccionado un contenido de material cementante, basado en una experiencia pasada para obtener el Módulo de Rotura de diseño. Se utiliza también el Módulo de Rotura para el control de campo y de aceptación de los pavimentos. (Civil Geek, 2020)

Un pavimento de concreto hidráulico se considera que posee resistencia a la flexión que le permite actuar como una viga y transmite los esfuerzos sobre los puntos donde se apoya. Por lo tanto, irregularidades menores y deflexiones en las capas de soporte probablemente no se verán reflejadas en gran medida en el comportamiento o desempeño de la superficie (Castro Mondragón, Pérez Salazar, Garnica Anguas, & Hernández Domínguez, 2021).

El tereftalato de polietileno (PET) es uno de los polímeros sintéticos más explotados en la actualidad, utilizado para la producción de botellas, platos, vasos y contenedores. La posibilidad de utilizarlo en el concreto, como un agregado, ha sido documentada por varios investigadores, mostrando compatibilidad con el concreto y añadiendo resistencia a la fatiga.

El Polipropileno es ampliamente utilizado para la producción de plásticos moldeados debido a la excelente combinación de propiedades que presenta como peso ligero y resistencia al impacto (Haratun, 2003)

De acuerdo (Meza de Luna, Gurbir, Preciado Martínez, & Gutiérrez López, 2021) muestra que el concreto reforzado con fibras tiene un comportamiento lineal en la etapa inicial, hasta que alcanza su carga máxima, y luego la resistencia cae bruscamente por fisuración del concreto hidráulico, la disminución de capacidad dependerá del grado de refuerzo que pueda tener el concreto, debido a las fibras como refuerzos. Cuanto mejor sea el rendimiento, mayor será la ductilidad y el rango de carga. La experimentación muestra que la capacidad de ductilidad del concreto aumenta con el contenido de fibras.

## **2.2. CEMENTO PORTLAND**

El cemento Portland puede describir como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

minerales para formar un todo compacto. De aquí en adelante, en este trabajo, se referirá al cemento Portland, mencionándose sólo como cemento.

Para la construcción, el cemento se restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arena, ladrillos, bloques de construcción, etc. Los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer en contacto con el agua o sumergidos en ella, en virtud de su reacción química, por lo que se les da el nombre de cementos hidráulicos. (Neville, Adam, 2013)

### 2.2.1 CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO

De acuerdo a la normativa mexicana tabla 1 y la normativa norteamericana tabla 2, describen las clasificaciones del cemento Portland de acuerdo a sus características y clase de resistencia.

Tabla 1. Clasificación del cemento de acuerdo a la norma (ASTM-C-150, 2016)

Nomenclatura	Características
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 II (MH)	Moderada calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos
Tipo II (MH) A	Con aire incluido con moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos
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

Tabla 2. Clasificación del cemento de acuerdo a la Norma (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)

Tipo	Denominación	Clase Resistente	Características Especiales
------	--------------	------------------	----------------------------

<b>CPO</b>	Cemento portland ordinario	20	RS Resistencia a los sulfatos
<b>CPP</b>	Cemento portland puzolánico	30	BRA Baja reactividad álcali-agregado
<b>CPEG</b>	Cemento portland con escoria granulada de alto horno	30R	BCH Bajo calor de hidratación
<b>CPC</b>	Cemento portland compuesto	40	B Blanco
<b>CPS</b>	Cemento portland con humo de sílice	40R	
<b>CEG</b>	Cemento con escoria granulada de alto horno		

## 2.2.2 PROPIEDADES DEL CEMENTO PORTLAND

### PROPIEDADES QUÍMICAS

- Hidratación del cemento.

La reacción mediante la cual el cemento Portland se transforma en un agente de enlace, se produce en una pasta de cemento y agua, generada por los procesos químicos responsables de la formación de compuestos. En otras palabras, en presencia del agua los silicatos y aluminatos forman productos de hidratación, los cuales, con el paso del tiempo, producen una masa firme y dura que se conoce como pasta de cemento endurecida. La hidratación comienza en los granos de cemento después de cierto tiempo de estar en contacto con el agua en la superficie de las partículas de cemento, similarmente a la corrosión de un metal. Luego con el tiempo, esta superficie de reacción se mueve gradualmente más profundamente en el interior de la partícula de cemento (Portugal Barriga, 2007).

- Calor de hidratación del cemento

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

El proceso de hidratación es un proceso exotérmico, lo cual hace que los concretos al fraguar y endurecer aumenten de temperatura; este incremento es importante en concretos masivos, debido a que cuando ha ocurrido el fraguado y se inicia el descenso térmico, se origina contracción del material, que puede conducir a graves agrietamientos. Este mismo efecto es uno de los principales problemas en los concretos con bajas relaciones de agua/cemento, dado que la cantidad de cemento se incrementó y consecuentemente la temperatura del concreto también se incrementa, esta es una de las razones para el uso de adiciones reemplazando a porcentajes del concreto (Portugal Barriga, 2007).

El calor de hidratación es la cantidad de calor, en calorías por gramo de cemento deshidratado, después de una hidratación completa a una temperatura dada, Ilustración 1. El calor de hidratación depende de la composición química del cemento y es aproximadamente igual a la suma de los calores de sus componentes.

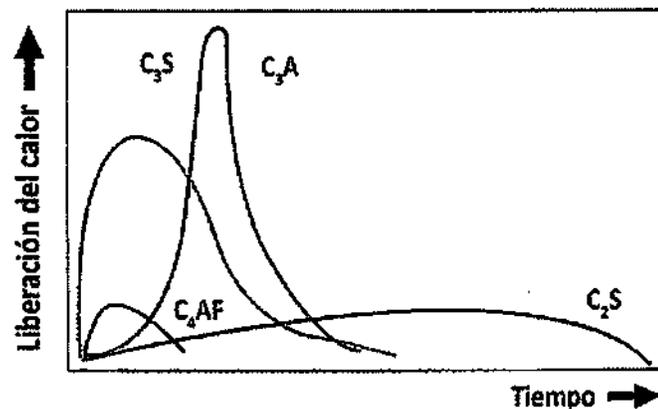


Ilustración 1 Calor de Hidratación en los compuestos de Clinker. Fuente: (Grupo Argos, 2020)

### 2.2.3 CEMENTO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN

El cemento Portland que se utilizó en la elaboración de los especímenes de concreto hidráulico fue de la marca Tolteca CPC 30R RS. Esto quiere decir que es un Cemento Portland Compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a 28 días de 30 MPa y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-ONNCCE, 2017).

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

### 2.3. AGREGADOS PÉTREOS (ARENA Y GRAVA)

Según la norma mexicana (NMX-C-111-ONNCCE, 2018), 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 la elaboración de concretos y morteros.

Los agregados le proporcionan el cuerpo al concreto, proporciona resistencia y estabilidad volumétrica, Anteriormente, los agregados fueron considerados como materiales químicamente inertes, pero ahora se ha reconocido que algunos de los agregados son químicamente activos y ciertos agregados muestran enlaces químicos en la interfaz del agregado y la pasta del cemento. (Shetty, M, 2005)

#### 2.3.1 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, aunque la variación en sus características puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte (Neville & Brooks, 2010).

#### PROPIEDADES FÍSICAS

Las propiedades físicas que más impactan en el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto son: granulometría, porosidad, masa unitaria, forma y textura de las partículas.

- **Granulometría.** Es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis de los tamices (cedazos, cribas).  
Hay muchas razones para que se especifiquen los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados, pues afectan las proporciones relativas de los agregados, como la demanda de agua y de cemento, trabajabilidad, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).
- **Porosidad.** Cuanto más poroso es, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad.
- **Densidad suelta.** Es la masa o el peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El volumen unitario es el

ocupado por los agregados y los vacíos que se generan entre las partículas de los agregados.

- **Forma y Textura.** Las partículas con textura áspera, angulares o alargadas requieren más cantidad de agua para producir concreto trabajable que los agregados lisos, redondeados y compactos. Además, requieren más cemento para mantener la misma relación agua-cemento. Las formas perjudiciales son las muy alargadas y/o escamosas ya que tendrán una influencia objetable en la trabajabilidad, los porcentajes de cemento, la resistencia y la durabilidad.

### PROPIEDADES MECÁNICAS

- **Resistencia.** El agregado grueso, en mayor medida que el fino, va a resultar relacionado con el comportamiento de las resistencias del concreto, por su aporte en tamaños de grano dentro de la masa de la mezcla. En tal sentido, una de las posibilidades de ruptura de la masa es por medio del agregado grueso. De esta manera, la resistencia de los agregados cobra importancia y se debe buscar que éste nunca falle antes que la pasta de cemento endurezca. La falla a través del agregado grueso se produce bien sea porque tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque previamente se les han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación por un inadecuado proceso de trituración.
- **Adherencia.** Es la interacción que existe en la zona de contacto agregado pasta. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto. La adherencia depende de la calidad de la pasta de cemento y en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión.
- **Dureza.** En la elaboración de concretos sometidos a elevadas tasas de desgaste por roce o abrasión, como aplicaciones en pavimentos o revestimientos de canales, la dureza del agregado grueso es una propiedad decisiva para la selección de los materiales (Neville & Brooks, 2010).

### 2.3.2 AGREGADOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN

#### 2.4. AGUA

Cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se puede implementar en mezcla de concreto. El exceso de impurezas en el agua de la mezcla no solo puede afectar a la resistencia del concreto, también puede causar corrosión del refuerzo, inestabilidad en el volumen y reducción de la durabilidad, por lo tanto, el agua usada en la mezcla de concreto hidráulico debe tener ciertos límites para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

##### 2.4.1 ESPECIFICACIONES DEL AGUA EN LA CONSTRUCCIÓN

La norma mexicana (NMX-C-122-ONNCCE, 2019) nos dice que el agua es adecuada para la mezcla de concreto si cumple con los siguientes parámetros, Tabla 3:

Tabla 3 Especificaciones del agua de acuerdo a la Norma (NMX-C-122-ONNCCE, 2019).

<b>Sales e impurezas</b>	<b>Cementos ricos en calcio</b>	<b>Cementos sulforesistentes en p.p.m</b>
	<b>Límites en p.p.m</b>	
<b>Sólidos en suspensión</b>		
<b>En aguas naturales (limos y arcillas)</b>	2000	2000
<b>En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)</b>	50000	35000
<b>Cloruros como CL</b>		
<b>Para concreto con acero de pre-esfuerzo y piezas de puentes</b>	400	600
<b>Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares</b>	700	1000
<b>Sulfato como SO<sub>4</sub></b>	3000	3500
<b>Magnesio como Mg<sup>++</sup></b>	100	150

<b>Carbonatos como CO<sub>3</sub></b>	600	600
<b>Dióxido de carbono disuelto, como CO<sub>2</sub></b>	5	3
<b>Álcalis totales como Na</b>	300	450
<b>Total, de impurezas en solución</b>	3500	4000
<b>Grasas o aceites</b>	0	0
<b>Materia orgánica (oxígeno consumo en medio ácido)</b>	150	150
<b>Valor del pH</b>	No menor de 6	No menor de 6

Los resultados muestran que el agua analizada cumple satisfactoriamente para ser utilizada en la elaboración de concreto hidráulico.

#### 2.4.2 EL AGUA UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN

Para la elaboración de los especímenes de concreto así para las pruebas a los agregados pétreos se utilizó agua de las instalaciones del laboratorio de materiales de la facultad de Ingeniería civil. El laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, de la facultad de Ingeniería civil, de la UMSNH. El agua se muestreo y analizó siguiendo los parámetros establecidos en la normativa vigente. En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4 Resultados del muestreo de calidad de agua. Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH

Parámetro/Unidades	Resultado	Límite Máximo		Método de Prueba
		NMX-C-122-ONNCCE-2004		
<b>Sólidos en suspensión (SST mg/l)</b>	1.0	200	Cumple	NMX-AA-034-SCFI-2001
<b>Sólidos totales (ST mg/l)</b>	436.0			NMX-AA-034-SCFI-2001
<b>Total, de impurezas en solución Sólidos disueltos totales (SDT mg/l)</b>	435.0	3500	Cumple	NMX-AA-034-SCFI-2001

<b>Cloruros Cl (mg/l)</b>	14.9	400	Cumple	NMX-AA-073-SCFI-2001
<b>Sulfatos como SO<sub>4</sub> (mg/l)</b>	10.0	3000	Cumple	NMX-AA-074-1981
<b>Dureza magnésica (mg/l CaCO<sub>3</sub>)</b>	38.3	100	Cumple	NMX-AA-072-SCFI-2001
<b>Dureza cálcica (mg/l CaCO<sub>3</sub>)</b>	27.00			NMX-AA-072-SCFI-2001
<b>Dureza total (mg/l CaCO<sub>3</sub>)</b>	65.25			NMX-AA-072-SCFI-2001
<b>Carbonatos CO<sub>3</sub> (mg/l)</b>	1.34	600	Cumple	NMX-AA-036-SCFI-2001
<b>Alcalinidad total (mg/l CaCO<sub>3</sub>)</b>	270.00	300	Cumple	NMX-AA-036-SCFI-2001
<b>Alcalinidad a la fenolftaleína (mg/l)</b>	0.67			NMX-AA-036-SCFI-2001
<b>Hidróxidos OH (mg/l)</b>	0.00			NMX-AA-036-SCFI-2001
<b>Bicarbonatos HCO<sub>3</sub> (mg/l)</b>	268.66			NMX-AA-036-SCFI-2001
<b>Grasa o aceites (mg/l)</b>	0.00	0	Cumple	NMX-AA-005-SCFI-2000
<b>Materia Orgánica como DQO (mg/l)</b>	0.00	150	Cumple	NMX-AA-030-SCFI-2001
<b>Potencial de hidrógeno (unidades pH)</b>	6.50	>6	Cumple	NMX-AA-008-SCFI-2000
<b>Conductividad eléctrica (µs/cm)</b>	442.00			Electrométrico
<b>Oxígeno disuelto (mg O<sub>2</sub>/l)</b>	3.75			Electrométrico
<b>Salinidad (%)</b>	0.20			Electrométrico
<b>Cloro total (mg/l)</b>	0.00			Comparación colorimétrica

<b>Cloro libre (mg/l)</b>	0.00	Comparación colorimétrica
<b>Temperatura de análisis (°C)</b>	21.00	NMX-AA-007-SCFI-2000

## 2.5. CONCRETO HIDRÁULICO

Es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento Portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava, creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua. Otros materiales cementantes y adiciones minerales se pueden incluir en la pasta (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

### 2.5.1 TIPOS DE CONCRETOS HIDRÁULICOS

Con base en su peso unitario el concreto se puede clasificar en tres grandes categorías. El concreto que contiene arena natural y grava o agregados de roca triturada, que pesa aproximadamente  $2,400 \text{ kg/m}^3$ , es conocido como concreto de peso normal y es el concreto más comúnmente empleado para propósitos estructurales.

Para aplicaciones en donde se desea una relación más alta de resistencia contra peso, es posible reducir el peso unitario del concreto usando ciertos agregados naturales que tienen una densidad de masa más baja. El término concreto ligero se utiliza para un concreto que pesa menos de  $1,800 \text{ kg/m}^3$ .

Por otra parte, el concreto pesado, es un concreto producido con agregados de alta densidad y pesa en general más de  $3,200 \text{ kg/m}^3$ .

Se puede dividir el concreto en tres categorías generales basadas en su resistencia a la compresión:

- Concreto de baja resistencia: menos de 20 MPa ( $204 \text{ kgf/cm}^2$ ).
- Concreto de resistencia moderada: de 20 a 40 MPa ( $204 \text{ a } 408 \text{ kgf/cm}^2$ ).
- Concreto de alta resistencia: más de 40 MPa ( $408 \text{ kgf/cm}^2$ ). (Metha & Monteiro, 2013).

### **2.5.2 MÓDULO DE RUPTURA**

“Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión, es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello. Por esa razón el diseño considera la resistencia del concreto a la flexión por tensión o módulo de ruptura (MR), especificada normalmente a los 28 días (Inciarte Melan, 2012).

La normativa mexicana NMX-C-191-ONNCCE define al módulo de ruptura 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. El ensayo de resistencia a la flexión del concreto es útil en el diseño de pavimentos es también utilizado para el control de campo y de aceptación de los pavimentos (National Ready Mixed Concrete Association, 1998).

La resistencia a la flexión del concreto o valor del módulo de ruptura, es obtenida usando una viga con cargas concentradas en los tercios del claro. A partir de la falla del espécimen ensayado, se consideran dos tipos de fractura para determinar el módulo de ruptura del concreto” (NMX-C-191-ONNCCE-2015, 2015) como se citó en (Blancas Herrera, 2020, pág. 30).

## **2.6. PAVIMENTOS**

“Podemos definir el pavimento como la estructura constituida por una capa o conjunto de capas de materiales con determinadas propiedades comprendidas entre la subrasante o nivel superior de las terracerías y la superficie de una obra vial, cuyas funciones principales son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme y resistente a la acción de tránsito. Su función es la de transmitir adecuadamente a las capas inferiores, los esfuerzos producidos por el tránsito” (Hayasaka Reyes & Peñafiel Soto, 1996) como se citó en (Blancas Herrera, 2020, pág. 22).

### **2.6.1 PAVIMENTO RÍGIDO**

“Una de las características más importantes es la resistencia a la flexión y compresión, mientras que la mayor desventaja es que se ve afectada por los cambios de temperatura.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Los criterios deben ir enfocados al beneficio del buen funcionamiento tanto del material como de la estructura. Dichas características son:

- **Alta resistencia a la flexión y compresión:** estas dependen principalmente del material (cemento) en combinación con los agregados pétreos que la conforman.
- **Rigidez:** Es la capacidad que tienen los elementos de las estructuras de aguantar los esfuerzos sin perder su forma (deformarse) manteniendo sus uniones. (Askeland, D.R., 2016).
- **Estabilidad de la superficie de rodamiento:** Esta característica se da a partir de la ejecución correcta de las técnicas de construcción y de las normas técnicas que, para el caso de calidad de la superficie de rodamiento, nos proporcionara una superficie plana, de mayor estabilidad y seguridad en el manejo.
- **Color:** el color natural que transfiere el cemento Portland al concreto hace que éste posea una alta reflectancia a la luz, y esto representa un enorme ahorro en cuanto a iluminación y el mantenimiento del pavimento (Hayasaka Reyes & Peñafiel Soto, 1996) Como se citó en” (Blancas Herrera, 2020, págs. 25-26).

#### 2.6.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

“Los pavimentos rígidos más comunes son los siguientes:

- Pavimentos de concreto simple con juntas (Jointed Concrete Pavements, JCP): son un sistema de losas de concreto simple, unidas entre sí por juntas transversales y longitudinales. Los pavimentos son construidos sin acero de refuerzo y pueden ir con o sin barras de transferencia de cargas en las juntas (barras pasajuntas). La transferencia de carga entre losas se logra a través de la trabazón entre los agregados en el caso de no llevar pasajuntas. (Inciarte Melan, 2012) (Miranda Rebolledo, 2010).
- Pavimentos de concreto reforzado con juntas (Jointed Reinforced Concrete Pavements, JRCP): Sistema de losas de concreto armado, unidas entre sí por juntas transversales y longitudinales. Este tipo de pavimentos contienen acero de refuerzo y pasajuntas en las juntas de contracción, las cuales

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

presentan una separación mayor en comparación con las empleadas en pavimentos convencionales.

- Pavimentos de concreto con refuerzo continuo (Continuously Reinforced Concrete Pavements, CRCP): Sistema de losas de concreto armado, unidas entre sí por acero de refuerzo. Debido a su continuo contenido de acero en dirección longitudinal, estos pavimentos desarrollan fisuras transversales a intervalos muy cortos.

Existen otros tipos de pavimentos, como pueden ser:

- Pavimentos de concreto presforzado: sistema a base de losas que han sido previamente esforzadas y de esta manera no contienen juntas de construcción.
- Pavimentos de concreto con fibras o fibroso: en este tipo de losas las fibras de acero, de productos plásticos o de fibra de vidrio, distribuidos aleatoriamente, funcionan como el armado de las losas; de tal manera, que se aumenta la resistencia a la tensión y a la fatiga, fisuración controlada, resistencia al impacto, durabilidad, etc.” (Miranda Rebolledo, 2010) Como se citó en (Blancas Herrera, 2020, págs. 26-27).

### **2.6.1.2 FALLAS EN LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS**

“Una vez diseñada y colocada la superficie de rodamiento de un pavimento rígido se pueden identificar las fallas producidas durante su vida de servicio y determinar porque se han desarrollado. Primero se da a partir de la identificación del tipo, severidad y magnitud de cada falla.

Se debe tratar de determinar si el diseño del pavimento, la carga máxima soportada, el agua, la temperatura, las condiciones del clima, los materiales del pavimento o el proceso constructivo fueran las causas de la falla. Además de la inspección visual, pueden emplearse pruebas destructivas y no destructivas para determinar la condición estructural y las condiciones del material bajo la superficie del pavimento.

Lo que respecta a pavimentos rígidos y en particular a su carpeta de concreto hidráulico, se pueden presentar diferentes tipos de daño, los cuales pueden ser agrupados en cuatro categorías, dependiendo el comportamiento en el pavimento.

- Juntas.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

- Fisuras y grietas.
- Deterioro superficial.
- Otros deterioros.
- El concreto hidráulico constituye toda la superficie de rodadura de un pavimento rígido y el cual, al presentar buenas propiedades físicas y mecánicas, este tendrá una respuesta favorable a la estructura del pavimento, teniendo una buena ductilidad y mitigando además de los deterioros superficiales, las fisuras longitudinales y transversales producto de la fatiga en el pavimento.” (Askeland, D.R., 2016) Como se citó en (Blancas Herrera, 2020, págs. 34-35).

## **2.7. FIBRAS COMO ADICIÓN AL CONCRETO**

Para el uso efectivo de fibras en el concreto endurecido se deben tener contempladas las siguientes características:

- El contenido de fibras por volumen debe ser adecuado.
- Debe haber una buena adherencia entre la fibra y la matriz.
- La longitud de las fibras debe ser suficiente.
- Las fibras deben tener una alta relación de aspecto; es decir, deben ser largas con relación a su diámetro.

Debe de hacerse notar que la información publicada tiende a tratar con concentraciones con un alto volumen de fibras. Sin embargo, por razones económicas, la tendencia actual en la práctica es la de minimizar el volumen de las fibras, en cuyo caso los mejoramientos en las propiedades pueden ser marginales.

Para las cantidades de fibra típicamente usadas (menos del 1% por volumen para el acero y aproximadamente 0.1% por volumen para el polipropileno) las fibras no tendrán un efecto significativo en la resistencia o el módulo de elasticidad del compuesto. También debe de hacerse notar que las concentraciones en un alto volumen de ciertas fibras pueden hacer que el concreto fresco no tenga una buena trabajabilidad (IMCYC, 2007).

. Las fibras se añaden al concreto durante el mezclado. Los factores principales que controlan el desempeño del material compuesto son:

- Propiedades físicas de las fibras y de la matriz.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

- Resistencia de adherencia entre la fibra y la matriz.

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

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

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

### **2.7.1 CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS**

Una primera clasificación de las fibras sintéticas de acuerdo con su diámetro presenta dos grupos: microfibras y macrofibras (Antillón, 2016).

- Microfibras: Presentan una longitud que oscila entre los 12 y los 75 mm y un diámetro menor a 0.25 mm.
- Macrofibras: Su diámetro oscila entre los 0.25 mm y 1.5 mm con longitudes variables entre 13 mm y 70 mm.

### **VIDRIO**

Está disponible en longitudes continuas o en trozos. Se utilizan longitudes de fibra de hasta 35 mm en aplicaciones de rociado y las longitudes de 25 mm en aplicaciones de premezclado.

Esta fibra tiene alta resistencia a tensión (2–4 GPa) y alto módulo elástico (70–80 GPa) pero tiene características quebradizas en esfuerzo-deformación (2.5–4.8% de alargamiento a la rotura) y poca fluencia a temperatura ambiente.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Se han hecho afirmaciones en el sentido de que se ha usado exitosamente hasta 5% de fibra de vidrio por volumen en el mortero de arena-cemento sin formar bolas.

Los productos de fibra de vidrio expuestos a ambientes a la intemperie han mostrado una pérdida de resistencia y ductilidad. Las razones para esto no son claras y se especula que el ataque de los álcalis o la fragilidad de las fibras son causas posibles.

## ACERO

Típicamente las fibras de acero tienen diámetros equivalentes (con base en el área de la sección transversal) de 0.15 a 2 mm y longitudes de 7 a 75 mm. Las relaciones de aspecto generalmente varían de 20 a 100. (La relación de aspecto se define como la relación entre la longitud de la fibra y su diámetro equivalente, que es el diámetro de un círculo con un área igual al área de la sección transversal de la fibra).

Las fibras de acero tienen alta resistencia a tensión (0.5–2 GPa) y alto módulo de elasticidad (200 GPa), una característica dúctil y plástica en esfuerzo-tensión y una baja fluencia.

El concreto reforzado con fibras de acero que contiene hasta 1.5% de fibras por volumen ha sido bombeado exitosamente usando tuberías de 125 a 150 mm de diámetro. Los contenidos de fibra de acero de hasta 2% por volumen se han usado en aplicaciones de concreto lanzado utilizando tanto el proceso húmedo como el seco. Se han obtenido contenidos de fibras de acero de hasta 25% por volumen en concreto con fibras infiltradas de lechada.

Se reporta que el módulo elástico en compresión y el módulo de rigidez en torsión no son diferentes antes del agrietamiento cuando se compara con el concreto simple probado bajo condiciones similares.

También se informa que la resistencia a fatiga del concreto se ha incrementado hasta en un 70%.

## FIBRAS SINTÉTICAS

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Las fibras sintéticas son artificiales; resultan de la investigación y desarrollo en las industrias petroquímicas y textiles.

Existen dos formas físicas diferentes de fibras: la de monofilamentos, y las producidas de cintas de fibrilla. La mayoría de las aplicaciones de las fibras sintéticas están en el nivel de 0.1% por volumen. A ese nivel, se considera que la resistencia del concreto no se ve afectada y se buscan las características de control de las grietas.

Los tipos de fibras sintéticas son:

- **Acrílico:** Las fibras acrílicas han sido usadas para reemplazar la fibra de asbesto en muchos productos de concreto reforzado con fibras. También se han agregado fibras acrílicas al concreto convencional a bajos volúmenes para reducir los efectos del agrietamiento por contracción plástica.
- **Aramida:** Las fibras de aramida son dos y medias veces más resistentes que las de vidrio y cinco veces más que las de acero, por unidad de masa. Debido al costo relativamente alto de estas fibras, el concreto reforzado con fibras de aramida se ha usado principalmente como un reemplazo del asbesto en ciertas aplicaciones de alta resistencia.
- **Carbón:** Las fibras de carbón son fabricadas carbonizando materiales orgánicos adecuados en forma fibrosa a altas temperaturas y luego alineando los cristales de grafito resultantes por medio de estiramiento. Tienen alta resistencia a tensión y alto módulo de elasticidad y una característica quebradiza bajo esfuerzo-deformación. Se requiere de investigación adicional para determinar la viabilidad del concreto con fibra de carbón en una base económica. Las propiedades de resistencia al fuego de los compuestos de fibras de carbón necesitan ser evaluadas, pero ignorando el aspecto económico, las aplicaciones estructurales parecen ser prometedoras.
- **Nylon:** Las fibras de nylon son impartidas por el tipo a base de polímeros, la adición de diferentes niveles de aditivos, las condiciones de fabricación y las dimensiones de las fibras. El nylon es estable en el calor, hidrófilo, relativamente inerte y resistente a una gran variedad de materiales. Es particularmente efectivo para impartir resistencia al impacto y tenacidad a

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

flexión y para sostener e incrementar la capacidad para soportar cargas del concreto después de la primera grieta.

- **Poliéster:** Son sensibles a la temperatura y a temperaturas por encima del servicio normal sus propiedades pueden ser alteradas. Las fibras de poliéster son algo hidrófobas. Se han usado a bajos contenidos (0.1% por volumen) para controlar el agrietamiento por contracción plástica en el concreto.
- **Polietileno:** El concreto reforzado con fibras de polietileno a contenidos de entre 2 y 4% por volumen exhibe un comportamiento de flexión lineal bajo cargas de flexión hasta la primera grieta, seguido por una transferencia de carga aparente a las fibras, permitiendo un incremento en la carga hasta que las fibras se rompen.
- **Polipropileno:** El polipropileno es un polímero de hidrocarburo sintético cuya fibra está hecha usando procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del material a través de un troquel. (IMCYC, 2007).

### 2.7.2 POLIETILENO TEREFALATO (PET)

“El PET se considera un termoplástico (reciclable) de alta calidad que se identifica con el número uno o las siglas PET o PETE, rodeado por tres flechas en el fondo de los envases según el sistema de identificación de la SPI (Sociedad de Industrias de Plástico, por sus siglas en inglés).

Químicamente pertenece a la familia de los poliésteres, cuya principal característica es la presencia de enlaces tipo éster ( $-\text{CO}-\text{O}-$ ). El PET se constituye por grupos etileno y tereftalato” (Córdoba, Barrera, Barrera Díaz, Ureña Nuñez, & Loza Yañez, 2015) Como se citó en (Blancas Herrera, 2020, pág. 60).

De manera general, el Tereftalato de Polietileno es un material duro, fuerte y de dimensiones estables. Presenta buenas propiedades de barrera al oxígeno, dióxido de carbono y es la fundamental razón por la que es utilizado en botellas para agua mineral y gaseosas. El PET puede adquirir dos tipos diferentes de estructuras: el polímero amorfo (transparente – grado botella) y el semicristalino (opaco y blanco) (Ramírez Luna, 2011)

“Otras características del PET son (Quintero Blandón & Mahecha Rico, 2016):

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

- Es transparente y cristalino, aunque admite algunos colorantes.
- Es liviano, permite que una botella pese 20 veces menos que su contenido.
- Es impermeable.
- Es inerte (al contenido).
- Es resistente a esfuerzos permanentes y al desgaste, ya que presenta alta rigidez y dureza.
- Presenta una alta resistencia química y buenas propiedades térmicas: posee una indeformabilidad al calor.
- Su superficie puede ser barnizar.
- Buena estabilidad a la intemperie.
- Alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad que lo hacen muy adecuado para la fabricación de fibras.
- Es un material que puede ser reciclado.
- Es un material particularmente resistente a la biodegradación debido a su alta cristalinidad y a la naturaleza aromática de sus moléculas, por lo cual se le considera no biodegradable.
- Puede ser degradado mediante un proceso químico por el cual se modifica su estructura molecular para reutilizar el material para un nuevo producto u obtención de combustibles” (Blancas Herrera, 2020, pág. 62).

#### **2.7.2.1 RECICLAJE DEL PET.**

“La Ley General de Residuos Sólidos define el reciclaje como toda actividad que permite reaprovechar un residuo sólido mediante un proceso de transformación para cumplir su fin inicial u otros fines.

En términos técnicos el reciclaje consiste en la obtención de materiales a partir de desechos, mediante el empleo de procesos fisicoquímicos o mecánicos, donde se somete un producto ya utilizado a un tratamiento total o parcial, para obtener una materia prima o producto diferente, introduciéndolo de nuevo en el ciclo de vida útil” (Córdoba, Barrera, Barrera Díaz, Ureña Nuñez, & Loza Yañez, 2015) como se citó en (Blancas Herrera, 2020, pág. 63).

“Son muchas las experiencias de recuperación de plásticos que hace años se desarrollan tanto en México como en otros países del mundo. Por ejemplo, bolsas, mangueras, baldes, cerdas para cepillos y escobas, hilo para la industria textil,

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

láminas, útiles escolares, muebles, piezas de máquinas y vehículos, relleno asfáltico y bancos” (Santos Cortés, 2006) como se citó en (Blancas Herrera, 2020, pág. 64).

### **2.7.2.2 FIBRAS DE PET.**

“A la par con el desarrollo en la industria de los plásticos, se han fabricado una gran cantidad de fibras de polietileno, polivinilo, nylon, polipropileno, etc., que al incorporarse al concreto se consigue mejorar sus propiedades al igual que sucedía con las de acero, y además presentan ventajas como un menor peso que las fibras de acero y sobre todo la ausencia de corrosión en este tipo de fibras.

De lo anterior, queda entonces establecido que al no existir riesgo de corrosión en fibras de polímeros y al presentar una mejora sobre la resistencia a la tracción que representa la adición de fibras al concreto, se obtendrán buenos resultados sobre la retracción y una mejora en la durabilidad de concretos reforzados con este tipo de fibras.

Estudios en mezclas y compuestos han utilizado productos comerciales como el polietileno y el poliestireno, los cuales se originan del PET reciclado. También, los materiales compuestos reforzados con fibra de polímeros han sido muy atractivos debido a su facilidad de fabricación, economía y a sus propiedades mecánicas satisfactorias.

Con la adición de fibras de refuerzo a base de polímeros en una matriz de concreto se obtiene una disminución de la fisuración y un mayor control que se puede ejercer sobre la misma, conlleva así a una mejora en el comportamiento a flexión de los elementos de concreto estructural. Esta mejora experimentada se manifiesta a través de una mayor rigidez a flexión debido a la menor fisuración y, consecuentemente, a una menor deformación por flexión (flecha). Otras mejoras sobre el comportamiento a flexión es la mayor ductilidad de las estructuras de concreto reforzado con este tipo de fibras” (Quintero Blandón & Mahecha Rico, 2016) como se citó en (Blancas Herrera, 2020, págs. 67-68).

### **2.7.3 FIBRAS DE POLIPROPILENO DE ALTA DENSIDAD**

Las fibras de polipropileno son hidrófobas y por lo tanto tienen como desventajas el tener pobres características de adherencia con la matriz del cemento, un bajo punto de fusión, alta combustibilidad y un módulo de elasticidad relativamente bajo. Las

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

largas fibras de polipropileno pueden resultar difíciles de mezclar debido a su flexibilidad y a la tendencia a enrollarse alrededor de las orillas extremas de las hojas de la mezcladora.

Las fibras de polipropileno son tenaces, pero tienen baja resistencia a tensión y bajo módulo de elasticidad; tienen una característica plástica de esfuerzo-deformación. Se asegura que se han usado exitosamente contenidos de fibras de polipropileno de hasta 12% por volumen, con técnicas de fabricación de empaclado manual, pero se ha reportado que volúmenes de 0.1% de fibras de 50 mm en el concreto han causado una pérdida de revenimiento de 75 mm.

Según reportes, las fibras de polipropileno reducen la contracción no restringida, plástica y por secado del concreto a contenidos de fibra de 0.1 a 0.3 % por volumen (IMCYC, 2007).

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. CARACTERIZACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES**

##### **3.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND**

- **CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO.**

Objetivo: Obtener la cantidad de agua requerida para combinarla con una determinada masa de cemento para que sirva como referencia para efectuar las pruebas de sanidad de cemento Portland y determinación de los tiempos de fraguado

##### **Equipo:**

-Muestra representativa de cemento

-Agua limpia

-Espátulas

-Recipiente liso e impermeable.

-Aparato de Vicat.

-Balanza con aproximación de 0.1 gramos.

-Probeta graduada de 100 mililitros con aproximación de 1 mililitro.

-Placas de vidrio

-Guantes de látex.

##### **Procedimiento:**

1. Se pesan aproximadamente 600 g de cemento, se vierten sobre un recipiente de porcelana impermeable y se forma una especie de cráter con el cemento ayudados con una espátula.
2. Se fija una cantidad de agua expresada en porcentaje, respecto a la masa del cemento seco, se mide el agua en la probeta graduada y se vierte en el centro del cráter tomando el tiempo desde que se deja caer el agua.

## Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

3. Con la espátula se lleva el material de las orillas del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca (Esto debe de hacerse en un máximo de 30 segundos).
4. En otro ciclo de 30 segundos subsiguiente a los anteriores se deja reposar la mezcla para que se homogenice con la humedad.
5. Se hace el amasado de la pasta en un tiempo total de 90 segundos contados a partir de los anteriores.
  - a. En los primeros 30 segundos se mezcla perfectamente la masa con las manos, golpeando la mezcla, con la parte pesada de las manos hasta lograr una pasta uniforme y homogénea.
  - b. En los siguientes 30 segundos se forma una esfera con la pasta y se pasa de una mano a otra a una distancia aproximada de 15 centímetros, se repite por lo menos 6 veces.
  - c. En los últimos 30 segundos de los 90 segundos, descansamos la esfera de cemento en la palma de la mano, se introduce a presión por el diámetro mayor del anillo cónico del aparato de Vicat, el cual se sostiene con la otra mano llenando completamente el anillo con la pasta.
  - d. Eliminamos todo exceso de pasta. A continuación, se coloca el anillo descansando en su base mayor, sobre una placa de vidrio y se engrasa la parte superior con una espátula, debe tenerse cuidado de no comprimir la pasta.
6. Determinación de la consistencia. La pasta confinada en el anillo que descansa sobre una placa, debe de centrarse debajo de la barra B, cuyo extremo que forma un embolo se pone en contacto con la superficie de la pasta y se aprieta el tornillo sujetador después se coloca el indicador móvil F en la marca cero en la parte superior de la escala o se hace una lectura inicial.
7. Se deja caer la aguja sobre la superficie de la pasta de cemento, se dejan pasar 30s y se toma la lectura de penetración de la aguja, si la lectura es de

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

10 mm  $\pm$  1 mm, se toma esa cantidad de agua como la necesaria para obtener la consistencia normal del cemento, si la lectura no es de 10 mm  $\pm$  1 mm, se repite el procedimiento hasta conseguir la lectura deseada, Ilustración 2.



Ilustración 2. Consistencia normal del cemento. Fuente: Elaboración propia

### **Referencia:**

(NMX-C-057-ONNCCE, 2015)

- **TIEMPOS DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRÁULICO**

Este ensayo debe ser elaborado inmediatamente después de terminar el ensayo de consistencia normal, con la pasta de cemento adicionada con la porción óptima de agua.

### **Equipo:**

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

### **Procedimiento:**

**Preparación de la pasta de cemento.**

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

- 1 Siguiendo el procedimiento descrito en la preparación de consistencia normal del cemento.

#### **Moldeado de la muestra.**

- 2 Con la pasta de cemento preparada y sobre una placa de vidrio cuadrada, plana y limpia, se hace una pastilla de poco más o menos 7.5 centímetros de diámetro y 1.3 centímetros de espesor en la parte central. Para moldear, se aplanar primero la pasta de cemento sobre el vidrio, después moviendo la espátula desde los bordes hacia el centro, aplanado a continuación la parte central superior, se coloca la pastilla en el cuarto húmedo y se deja ahí, hasta el tiempo requerido para determinar del tiempo de fraguado.

#### **Determinación de los tiempos de fraguado.**

- 3 Al determinar el tiempo de fraguado, se mantienen las agujas en posición vertical y se ponen en contacto ligeramente con la superficie de la pastilla, se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado inicial cuando soporte a las agujas de Gillmore inicial (la menos pesada), sin dejar huellas apreciables.
- 4 Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado final cuando soporte la aguja de Gillmore Final (la más pesada), sin dejar huella apreciable, Ilustración 3.



Ilustración 3 Tiempos de fraguado del cemento. Fuente: Elaboración propia.

#### **Referencia:**

(ASTM-C-266, 2015)

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

La norma (NMX-C-414-ONNCCE, 2017) especifica el tiempo mínimo de fraguado 45 minutos y el máximo en 600 minutos.

- **DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO**

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

**Equipo:**

-Muestra representativa de cemento.

-Matraz de Le Chatelier.

-Balanza con aproximación de 0.1gramos.

-Reactivo: petróleo.

-Recipiente con agua.

-Termómetro.

-Embudo de cristal.

**Procedimiento:**

1. Se llena el matraz Le Chatelier con petróleo (reactivo) hasta un nivel entre 0 y 1 ml. Para eliminar el líquido adherido en las paredes superiores del matraz evitando las burbujas de aire. Se coloca el matraz dentro de un recipiente con agua a temperatura del laboratorio, girando el matraz en círculo horizontal, se deja en el agua hasta conseguir una estabilidad del líquido en el matraz.

La temperatura del agua debe mantenerse constante durante todo el ensayo, la variación no debe ser mayor a 0.2°C al momento de tomar las lecturas.

Una vez estabilizado el nivel del reactivo se toma la lectura inicial como  $L_i$ .

2. Se pesan aproximadamente 60 g de cemento y se agrega el cemento al matraz Le Chatelier muy lentamente, de manera que el cemento vaya

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

pasando al interior sin obstruirse. Se debe tener cuidado de evitar que el cemento se adhiera a las paredes interiores del cuello superior del matraz.

3. Se coloca el tapón al matraz y se elimina el aire que haya sido atrapado en las paredes del matraz al introducir el cemento en el reactivo, para lograr esto, se gira el frasco tomándolo entre las manos, en posición inclinada sobre una superficie plana.
4. Una vez finalizado el paso anterior, esperamos que se establezca nuevamente el nivel del líquido, Ilustración 4 hasta que sea la misma lectura y tomamos la lectura final como  $L_f$ .



Ilustración 4 Densidad del Cemento. Fuente: Elaboración propia

### **Cálculo:**

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

Dónde:

D = densidad del cementante hidráulico, en  $\text{g/cm}^3$ .

M = masa del cementante hidráulico, en g.

V = volumen del líquido desalojado, en  $\text{cm}^3$ .

### **Resultados:**

Tabla 5 Resultados del muestro del cemento Portland.

Cemento		
Peso del cemento	60.00 g	60.00 g
Li	0.90 cm <sup>3</sup>	0.80 cm <sup>3</sup>
Lf	20.60 cm <sup>3</sup>	20.50 cm <sup>3</sup>
Volumen	19.70 cm <sup>3</sup>	19.70 cm <sup>3</sup>
Densidad	3.05 g/cm <sup>3</sup>	3.05 g/cm <sup>3</sup>
Promedio	3.046 g/cm <sup>3</sup>	

**Referencia:**

(NMX-C-152-ONNCCE-2015, 2015)

La norma (NMX-C-152-ONNCCE-2015, 2015) indica el rango entre valores de densidad en cemento de 2.9 - 3.15 g/cm<sup>3</sup>

**3.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS ARENAS**

Material fino que pasa por la malla No. 4 (abertura de 4.75mm) y retiene en la malla No. 200 (abertura de 0.075mm) usado para la elaboración de mezclas de concreto hidráulico.

- A. Arena blanca (AB): obtenida del banco de material “El Coro” (ilustración 5), ubicado a un costado de la carretera Morelia – Zinapécuaro, antes de llegar a la localidad de José María Morelos. El material obtenido fue de tipo sedimentario o de río y el tratamiento que se le dio a dicho material fue trituración parcial y cribado.



Ilustración 5. Banco de material “El Coro”. Fuente: Google maps

- B. Arena negra (AN): Obtenida del banco de material llamado “San Bernabé” ilustración 6 ubicado en la localidad de San Bernabé a 22.2 kilómetros, en dirección Oeste, de la localidad de Morelia. El material obtenido fue volcánico y el tratamiento que se le dio a dicho material fue trituración parcial y cribado.



Ilustración 6. Banco de materia “San Bernabé”. Fuente: Google Maps

Tabla 6. Normativa para la elaboración de especímenes de concreto según las NMX-C-ONNCCE

Caracterización del agregado	Ensayo de Laboratorio	Norma NMX
------------------------------	-----------------------	-----------

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Muestro	Muestreo de agregados.	(NMX-C-030-ONNCCE, 2004)
Cuarteo	Reducción de las muestras de agregados obtenidas en campo al tamaño requerido de prueba.	(NMX-C-170-ONNCCE, 2019)
Masas volumétricas (MVSS Y MVSV)	Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica de los agregados.	(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)
Densidad y humedad de absorción	Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino.	(NMX-C-165-ONNCCE, 2014)
Desgaste de los ángeles	Determinación de la Resistencia a la Degradación por Abrasión e Impacto de Agregados Gruesos Usando la Máquina de los Ángeles	
No. De colorimetría	Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino.	(NMX-C-088-ONNCCE, 2019)
Sedimentación	Método de prueba para determinar el exceso de finos en el agregado	-

Granulometría	fino.	
	Análisis granulométrico en agregados.	(NMX-C-077-ONNCCE, 2019)

- CUARTEO EN LAS MUESTRAS DE ARENAS

“El cuarteo debe hacerse cuando el volumen es considerable y solo si se requiere una muestra más pequeña que sea representativa para su estudio”

El objetivo es obtener una muestra representativa y de tamaño adecuado para las pruebas que se hagan en la experimentación.

**Equipo:**

-Palas

-Cucharones

-Cuarteador de muestras Johnson

-Charolas grandes de lámina

Procedimiento:

Se realizaron dos métodos de muestreos.

**Método “A”. Cuarteador Mecánico de Johnson.**

**Procedimiento para divisor de muestras.**

1. Se tomó la muestra previamente puesta en una charola ancha y se vació sobre la parte superior del divisor, procurando repartirla en toda la longitud del divisor.
2. El material recibido en uno de los recipientes se elimina o se reintegra a la bolsa de donde se extrajo.
3. Si se desea una muestra más pequeña, entonces el material que ha quedado en uno de los recipientes se vierte en una charola, para posteriormente vaciar la charola sobre el divisor, se repite este proceso de

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

división y eliminación hasta lograr la muestra del tamaño que se requiera para realizar las pruebas correspondientes.

### **Método “B”. Cuarteo Manual.**

1. Procedimiento por cuarteo con palas, Ilustración 7.
2. Se coloca la muestra original sobre una superficie limpia para no contaminar el material.
3. Se mezcla el material traspaleando de un lado al otro con ayuda de la pala, tratando de homogenizar el material además de apilar el material de forma cónica (se repite este procedimiento por lo menos 3 veces).
4. Una vez terminado el paso 2 se aplana la parte superior con la cara posterior de la pala y después se divide el material en 4 partes iguales, Ilustración 8, descartando dos porciones opuestas. Si se requiere reducir la muestra aún más, se debe repetir el procedimiento mencionado.

Especificaciones.

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



Ilustración 7 Cuarteo de Arena Negra. Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 8 Cuarteo de Arena Combinada. Fuente: Elaboración propia

### **Referencia:**

(NMX-C-170-ONNCCE, 2019)

- **MASA VOLUMÉTRICA SECA Y SUELTA (MVSS)**

De acuerdo a la norma se define como masa volumétrica a la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen el ocupado por el material en un recipiente especificado y previamente tarado.

El ensayo para determinar la masa volumétrica seca y suelta se llevó a cabo siguiendo el procedimiento descrito en la norma.

**Equipo:**

-Muestra representativa de arena totalmente seca.

-Recipiente de masa y volumen conocidos.

-Varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.

-Báscula.

-Cucharón y pala.

**Procedimiento:**

1. De la prueba de cuarteo se obtuvo una muestra representativa de arena.
2. Se vacía la arena dentro del recipiente, dejándose caer a una altura de 5cm aproximadamente a partir de la arista superior del recipiente, Ilustración 9 llenándolo de forma uniformemente con el material granular hasta formar un cono.
3. Se retiró todo el exceso, enrasando con la varilla Ilustración 10, eliminado todas las partículas adheridas.
4. Se lleva a pesar la muestra.
5. A la masa total se le restó la masa del recipiente, y así obtenemos la masa de la arena.
6. La masa obtenida se le divide el volumen del recipiente para obtener MVSS de la muestra



Ilustración 9 MVSS de la arena negra. Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 10 MVSS de la arena combinada. Fuente: elaboración propia.

**Cálculos:**

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

Dónde:

MVSS: masa volumétrica suelta y seca (g/cm<sup>3</sup>)

M: masa de la arena (g)

V: volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>)

**Resultados:**

Tabla 7 MVSS de la arena blanca

Arena Blanca		
DATOS	M.V.S.S.	
Masa total	5,300.00 g	5,310.00 g
Masa del recipiente	1,840.00 g	1,840.00 g
Masa de arena	3,460.00 g	3,470.00 g
Volumen del recipiente	2,787.00 cm <sup>3</sup>	2,787.00 cm <sup>3</sup>
Masa Volumétrica	1,241.48 Kg/m <sup>3</sup>	1,245.07 Kg/m <sup>3</sup>
PROMEDIO	<b>1243.27 Kg/m<sup>3</sup></b>	

Tabla 8 MVSS de la arena negra

Arena Negra		
DATOS	M.V.S.S.	
Masa total	5,565.00 g	5,535.00 g
Masa del recipiente	1,840.00 g	1,840.00 g
Masa de arena	3,725.00 g	3,695.00 g
Volumen del recipiente	2,787.00 cm <sup>3</sup>	2,787.00 cm <sup>3</sup>
Masa Volumétrica	1,336.56 Kg/m <sup>3</sup>	1,325.80 Kg/m <sup>3</sup>
PROMEDIO	<b>1331.18 Kg/m<sup>3</sup></b>	

Tabla 9 MVSS de la arena combinada

Arena Blanca 50% Y Arena Negra 50%		
DATOS	M.V.S.S.	
Masa total	5,455.00 g	5,460.00 g
Masa del recipiente	1,890.00 g	1,890.00 g
Masa de arena	3,565.00 g	3,570.00 g
Volumen del recipiente	2,759.00 cm <sup>3</sup>	2,759.00 cm <sup>3</sup>
Masa Volumétrica	1,292.13 Kg/m <sup>3</sup>	1,293.95 Kg/m <sup>3</sup>
PROMEDIO	<b>1293.04 Kg/m<sup>3</sup></b>	

**Referencia:**

(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)

- MASA VOLUMÉTRICA SECA Y VARILLADA (MVSU)

El objetivo es determinar la masa por unidad de volumen de una arena, cuando el material presenta una compactación.

**Equipo:**

-Muestra representativa de arena totalmente seca.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

-Recipiente de masa y volumen conocidos.

-Varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.

-Báscula.

-Cucharón y pala.

### **Procedimiento:**

1. De la prueba de cuarteo se obtuvo una muestra representativa de arena.
2. Se vació la arena dentro del recipiente (Ilustración 12), dejándose caer a una altura de 5cm aproximadamente a partir de la arista superior del recipiente, llenando el recipiente en 3 capas y dando 25 compactaciones (Ilustración 11) en cada capa de arena, sin penetrar la capa inferior
3. Se retiró todo el exceso enrasando con la varilla punta de bala y limpiando todas las partículas adheridas.
4. Se lleva a pesar la muestra.
5. A la masa total se le restó la masa del recipiente, y así obtenemos la masa de la arena.
6. La masa obtenida se le divide entre el volumen del recipiente para obtener MVSV de la muestra.



Ilustración 11 MVSV de la arena Negra. Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 12 MVSV de la arena combinada. Fuente: Elaboración propia.

### **Cálculos:**

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

Fabricio Ali Hernández Ferreyra

Dónde:

MVSV: masa volumétrica suelta y varillada ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

M: masa de la arena (g)

V: volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ )

**Resultados:**

Tabla 10 MVSV de la arena blanca

Arena Blanca		
DATOS	M.V.S.V.	
Masa total	5,710.00 g	5,710.00 g
Masa del recipiente	1,840.00 g	1,840.00 g
Masa de arena	3,870.00 g	3,870.00 g
Volumen recipiente	2,787.00 $\text{cm}^3$	2,787.00 $\text{cm}^3$
Masa Volumétrico	1,388.59 $\text{Kg}/\text{m}^3$	1,388.59 $\text{Kg}/\text{m}^3$
PROMEDIO	<b>1388.59 <math>\text{Kg}/\text{m}^3</math></b>	

Tabla 11 MVSV de la arena negra

Arena Negra		
DATOS	M.V.S.V.	
Masa total	5,855.00 g	5,850.00 g
Masa del recipiente	1,840.00 g	1,840.00 g
Masa de arena	4,015.00 g	4,010.00 g
Volumen recipiente	2,787.00 $\text{cm}^3$	2,787.00 $\text{cm}^3$
Masa Volumétrica	1,440.62 $\text{Kg}/\text{m}^3$	1,438.82 $\text{Kg}/\text{m}^3$
PROMEDIO	<b>1439.72 <math>\text{Kg}/\text{m}^3</math></b>	

Tabla 12 MVSV de la arena combinada

Arena Blanca 50% Y Arena Negra 50%		
DATOS	M.V.S.V.	
Masa total	5,900.00 g	5,895.00 g
Masa del recipiente	1,890.00 g	1,890.00 g
Masa de arena	4,010.00 g	4,005.00 g
Volumen recipiente	2,759.00 cm <sup>3</sup>	2,759.00 cm <sup>3</sup>
Masa Volumétrica	1,453.43 Kg/m <sup>3</sup>	1,451.61 Kg/m <sup>3</sup>
PROMEDIO	<b>1452.52 Kg/m<sup>3</sup></b>	

**Referencia:**

(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)

La norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018) especifica la masa volumétrica compactada con varilla debe ser mayor que 1120 kg/m<sup>3</sup>.

- **HUMEDAD DE ABSORCIÓN**

La normativa (NMX-C-165-ONNCCE, 2014) define la absorción como el incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante 24 horas a temperatura ambiente; debido al agua que se introduce en los poros del material, sin incluir el agua adherida a la superficie de las partículas. Dicha absorción, se expresa como por ciento de la masa seca y es índice de la porosidad del material.

El objetivo es determinar la capacidad máxima de absorción que tiene la arena expresada en porcentaje (M MMP 4 04 006/18).

**Equipo:**

- Aproximadamente 2000 g de arena seca.
- Balanza con aproximación décimo gramo.
- Parrilla.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

-Charolas metálicas.

-Molde troncocónico.

-Pisón.

-Espátula.

-Vidrio reloj.

**Procedimiento:**

1. De una muestra aproximadamente de 2000 g se dejó saturando durante 24 horas  $\pm$  4h en agua temperatura ambiente.
2. Después de estar saturada la muestra, se secó superficialmente la muestra (Ilustración 13), por medio del método del molde troncocónico de la siguiente forma.
  - Se colocó una porción de arena en una charola, para eliminar el exceso de agua, hasta que la arena está superficialmente seca.
  - Para saber cuándo ya está superficialmente seca, se coloca el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena completamente el cono y con ayuda del pisón se dan 10 compactaciones con el peso propio del pisón, se llena nuevamente el cono y se dan 10 compactaciones más, para la tercera capa se llena el cono y se dan 3 compactaciones más y finalmente en la última capa se dan 2 compactaciones más, haciendo un total de 25 compactaciones.
  - Se retira el cono verticalmente y se observa que: si la arena mantiene la forma del cono, ésta aún contiene exceso de agua, por lo que el proceso se repite otra vez. Cuando al retirar el cono éste se disgrega deformándose parcialmente, la muestra ya alcanzó la condición de seca superficialmente, Ilustración 14.
3. Una vez alcanzada la condición de superficialmente seco, se extrae una muestra aproximada de 300g registrando este dato como superficialmente seco (Mh.).

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

4. La muestra se coloca en una charola y se coloca en la parrilla para secado rápido.
5. Para saber cuándo la muestra está totalmente seca, se coloca el espejo y observamos que no se empañe el cristal, una vez que no se empañe el vidrio, se retira del fuego, esperando a que este a temperatura ambiente y así registrar el valor de ( $M_s$ ).



Ilustración 13 Humedad de Absorción de la arena Negra. Fuente: Elaboración propia



Ilustración 14 Humedad de absorción de la arena Blanca. Fuente: Elaboración propia

Cálculos

$$A = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

Dónde:

A: humedad de absorción (%).

$M_h$ : masa saturada y superficialmente seca (g).

$M_s$ : masa seca (g).

**Resultados:**

Tabla 13 Humedad de Absorción de la arena blanca.

DATOS	Arena Blanca	
Peso Humedo	300.00 g	300.00 g

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

<b>Peso Seco</b>	285.40 g	285.60 g
<b>Humedad</b>	14.60 g	14.40 g
<b>% Abs.</b>	5.12%	5.04%
<b>Promedio</b>	5.08%	

Tabla 14 Humedad de Absorción de la arena negra

DATOS	Arena Negra	
<b>Peso Humedo</b>	320.00 g	306.50 g
<b>Peso Seco</b>	304.00 g	290.50 g
<b>Humedad</b>	16.00 g	16.00 g
<b>% Abs.</b>	5.26%	5.51%
<b>Promedio</b>	5.39%	

Tabla 15 Humedad de absorción de la arena combinada

Datos	Arena 50%B Y 50%N	
<b>Peso Humedo</b>	300.00 g	300.00 g
<b>Peso Seco</b>	284.90 g	285.10 g
<b>Humedad</b>	15.10 g	14.90 g
<b>% Abs.</b>	5.30%	5.23%
<b>Promedio</b>	5.26%	

**Referencia:**

(M MMP 4 04 006/18)

(NMX-C-165-ONNCCE, 2014)

- DENSIDAD

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

La densidad absoluta, se refiere al volumen de las partículas individuales solamente, y naturalmente, no es posible acomodar estas partículas para que no haya huecos entre ellas. Cuando el agregado se va a dosificar realmente por volumen, es necesario saber la masa de agregado que llenaría un recipiente de volumen unitario. Ésta se conoce como la densidad aparente del agregado y se usa generalmente, para convertir cantidades por masa a cantidades por volumen (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Esta prueba se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma (NMX-C-165-ONNCCE, 2014)

**Equipo:**

-Aproximadamente 2000 g de arena seca

-Balanza

-Parrilla

-Charolas metálicas

-Molde troncocónico

-Pisón

-Espátula

-Frasco de Chapman

-Probeta

**Procedimiento:**

1. De la prueba de cuarteo se extrajeron 2000 g. Aproximadamente de arena, se colocó en un recipiente y se puso a saturar por  $24h \pm 4h$ .
2. Se utilizó el procedimiento descrito en la prueba de humedad de absorción, para obtener la masa superficialmente seca.
3. Una vez que la arena alcanzo el estado de saturada y superficialmente seca, se pesaron 300g aproximadamente, registrando este dato como Mh.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

4. Se llenó con agua el frasco de Chapman hasta la marca de 0 ml, y se toma lectura como  $M_i$  en gramos.
5. Retiramos el agua hasta al nivel de 200ml y colocamos la arena dentro del frasco, Ilustración 15.
6. Se inclina el frasco 45° y se giró horizontalmente para eliminar las burbujas de aire atrapadas.
7. Después se llena con agua el frasco hasta la marca de 450 ml y se registró este dato como  $M_2$ , Ilustración 16.



Ilustración 15 Densidad de la arena negra.

Fuente Elaboración propia



Ilustración 16 Densidad de la arena combinada. Fuente: elaboración propia

### **Calculo:**

$$DA = \frac{Mh}{Mi + Mh - M2}$$

Dónde:

DA: densidad relativa.

$M_i$ : masa del frasco de Chapman lleno (g).

$M_h$ : masa de la muestra superficialmente seca (g).

$M_2$ : masa del frasco de Chapman, muestra y agua (g).

### **Resultados:**

Tabla 16 Densidad de la arena blanca

Arena Blanca		
Mi	771.40 g	748.70 g
Mh	323.60 g	300.20 g
M2	932.50 g	909.90 g
DA	1.99	2.16
Promedio	2.08	

Tabla 17 Densidad de la arena negra

Arena Negra		
Mi	775.50 g	773.50 g
Mh	300.00 g	302.00 g
M2	945.50 g	946.00 g
DA	2.31	2.33
Promedio	2.32	

Tabla 18 Densidad de la arena combinada

Arenas 50% B Y 50% N		
Mi	771.20 g	772.80 g
Mh	300.00 g	300.00 g
M2	939.50 g	940.50 g
DA	2.28	2.27
Promedio	2.27	

**Referencia:**

(M MMP 4 04 006/18)

(NMX-C-165-ONNCCE, 2014)

La norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2018) especifica valores de densidad en arena de 2.24.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

- GRANULOMETRÍA O ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN ARENA

Pasar por una serie de mallas una muestra representativa de arena, para conocer la distribución de los diámetros de las partículas y el Módulo de Finura.

Tabla 19 Límites granulométricos de la arena

No. Malla mm (pulg)	% que pasa
9.5(3/8")	100
4.75(No. 4)	95-100
2.36 (No. 8)	80-100
1.18 (No.16)	50-85
0.60 (No.30)	25-60
0.30 (No. 50)	10-30.
0.15 (No.100)	2-10.

El Módulo de Finura es de máxima importancia ya que afecta directamente en la resistencia, en el manejo de la mezcla, en la cohesión de sus agregados y sobre todo, cuando se encuentra fuera de los parámetros 2.3 a 3.1. Requiere una mayor cantidad de cemento y lo cual impactaría directamente en el costo de producción.

**Equipo:**

- Una muestra representativa de arena de aproximadamente 2000 gramos.
- Un juego de mallas con abertura cuadrada del No. 4 (4.75 mm), No. 8 (2.36 mm), No. 16 (1.18 mm), No. 30 (0.60 mm), No. 50 (0.30 mm), No. 100 (0.15 mm), No. 200 (0.075 mm) y una charola con su respectiva tapa.
- Maquina Raf-Tap.
- Una báscula con aproximación de 0.1 gramo.
- Charolas metálicas y espátulas.
- Una parrilla eléctrica.
- Cepillos de cerdas suaves y de alambre.

-Hojas de papel.

**Procedimiento:**

1. Se tomó una muestra representativa de arena de aproximadamente de 2000 gramos. Dicha muestra fue obtenida de la reducción por cuarteo anteriormente mencionada.
2. Se secó la muestra hasta masa constante a una temperatura no mayor a 110°C.
3. Cuando el material ya se encontraba seco y se dejó enfriar a temperatura ambiente, se tomaron aproximadamente 500 gramos.
4. Se colocaron el juego de mallas en orden de mayor a menor (No. 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola) y se vació la muestra de aproximadamente 500 gramos en la parte superior, para posteriormente tapar la malla de mayor abertura.
5. Una vez tapado el juego de mallas, con ayuda de la maquina agitadora (Raf-Tap) Ilustración 17, se agitó la muestra durante un tiempo aproximado de  $10 \pm 5$  minutos.
6. Se procedió a extraer el material retenido en cada una de las mallas, colocando el material en las hojas de papel, con ayuda de un cepillo de alambre se desalojó el material que se encontraba entre los espacios de las mallas del No. 4, 8, 16 y 30, mientras que las mallas del No. 50, 100 y 200 se limpiaron con cepillo de cerdas suaves.
7. Una vez realizado en procedimiento mencionado en el paso 6. Se toma lectura de la masa retenida en cada malla de la muestra y en una superficie horizontal y limpia se dejaron las muestras para observar la distribución de tamaños, Ilustración 18.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.



Ilustración 17 Colocación de mallas en el Raf tap. Fuente: elaboración propia.



Ilustración 18 Granulometría de la arena. Fuente: Elaboración propia

**Cálculos:**

Tabla 20 Calculo de granulometría de las arenas.

	(1)	(2)	(3)	(4)
<b>Malla</b>	Masa Retenida	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
4				
8				
16				
30				
50				
100				
200				
<b>CHAROLA</b>				
<b>SUMA</b>				

Masa retenida: se colocan los pesos respectivos del retenido de cada malla.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

% retenida: se calcula de la sig. Forma.

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

% acumulativo:

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

% que pasa:

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

Módulo de Finura:

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

### Gráfica granulométrica:

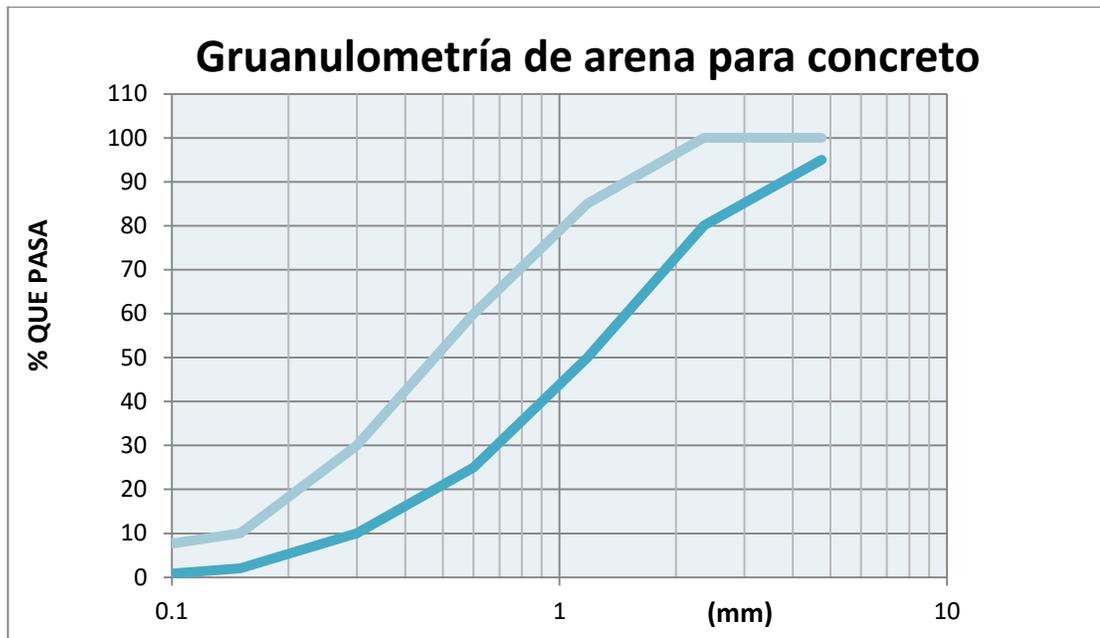


Ilustración 19 Curva granulométrica en arenas.

### Resultados:

Tabla 21 Granulometría y Módulo de finura de la arena blanca.

Arena Blanca
--------------

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

<b>Masa de la muestra</b>		500 g		
<b>Malla</b>	Masa retenida g	% retenido	% acumulado	% que pasa
<b>No. 8</b>	27.95	5.60	5.60	94.40
<b>No. 16</b>	64.50	12.92	18.52	81.48
<b>No. 30</b>	125.70	25.18	43.69	56.31
<b>No. 50</b>	138.85	27.81	71.50	28.50
<b>No. 100</b>	57.90	11.60	83.10	16.90
<b>No. 200</b>	44.10	8.83	91.93	8.07
<b>CHAROLA</b>	40.30	8.07	100.00	0
<b>Total</b>	499.30		<b>MF=</b>	2.22

Tabla 22 Granulometría y Módulo de finura de la arena negra.

<b>Arena Negra</b>				
<b>Masa de la muestra</b>		500 g		
<b>Malla</b>	Masa retenida g	% retenido	% acumulado	% que pasa
<b>8</b>	72.00	14.40	14.40	85.60
<b>16</b>	131.10	26.22	40.62	59.38
<b>30</b>	130.90	26.18	66.80	33.20
<b>50</b>	78.60	15.72	82.52	17.48
<b>100</b>	38.80	7.76	90.28	9.72
<b>200</b>	25.40	5.08	95.36	4.64
<b>CHAROLA</b>	23.20	4.64	100.00	0
<b>Total</b>	500.00		<b>MF=</b>	2.95

Tabla 23 Granulometría y Módulo de finura de la arena combinada.

<b>Granulometría en arena 50% B y 50% N</b>	
<b>Masa de la muestra</b>	300 g

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Malla	Masa retenida g	% retenido	% acumulado	% que pasa
8	43.13	14.42	14.42	85.58
16	60.40	20.20	34.62	65.38
30	68.93	23.05	57.68	42.32
50	52.00	17.39	75.07	24.93
100	32.83	10.98	86.04	13.96
200	21.40	7.16	93.20	6.80
CHAROLA	20.33	6.80	100.00	0
Total	299.02		MF=	2.67

Graficas granulométricas :

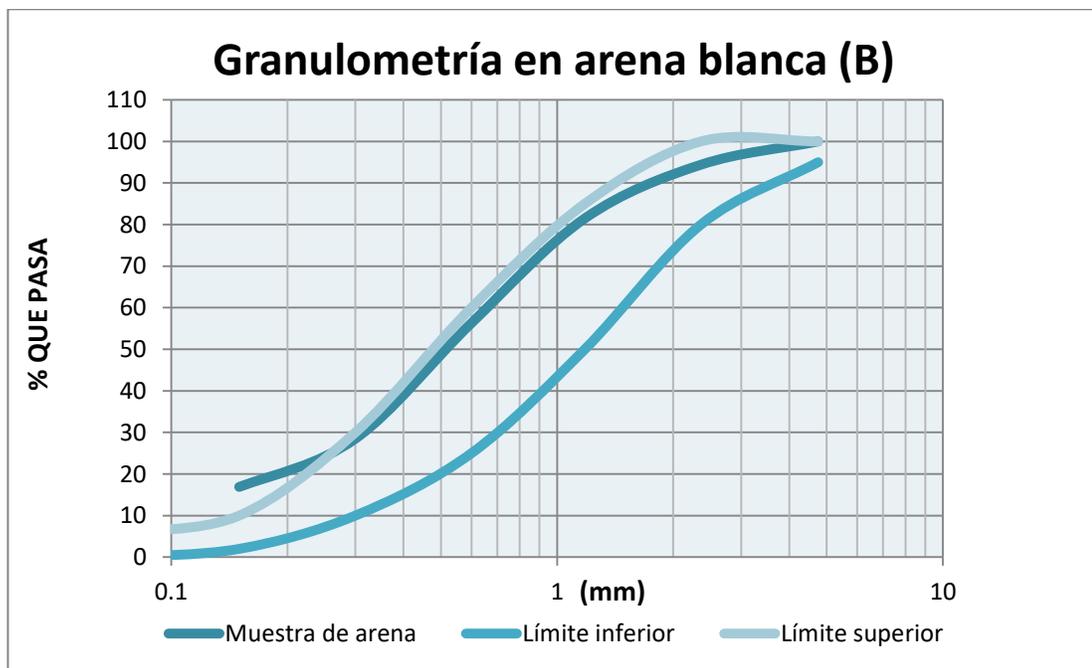


Ilustración 20 Curva granulométrica de la arena blanca.

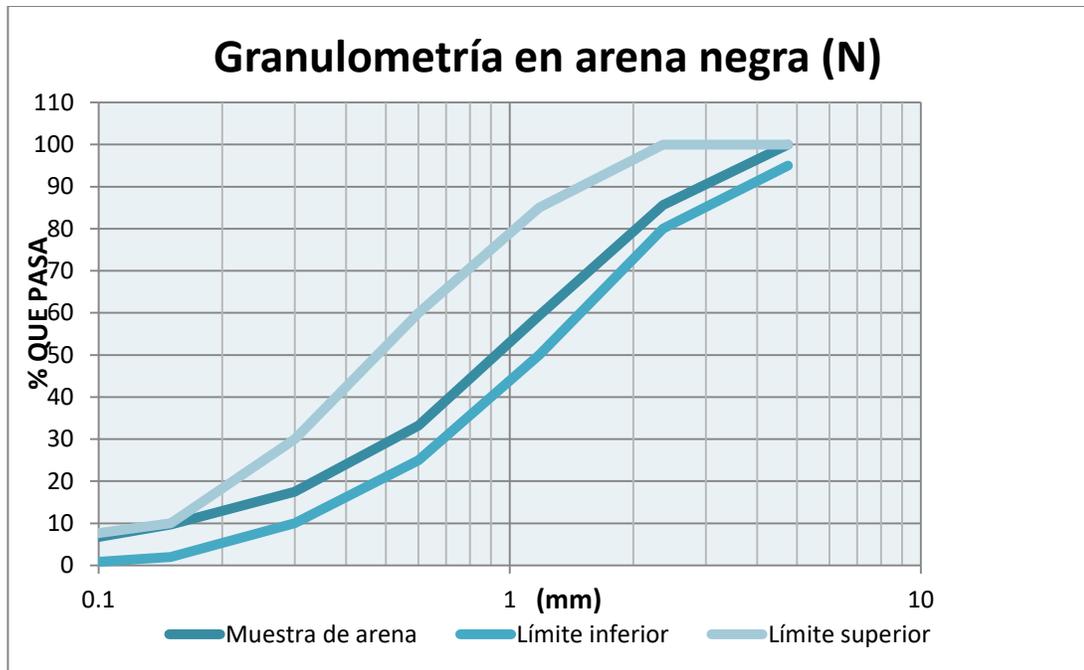


Ilustración 21 Curva granulométrica de la arena negra.

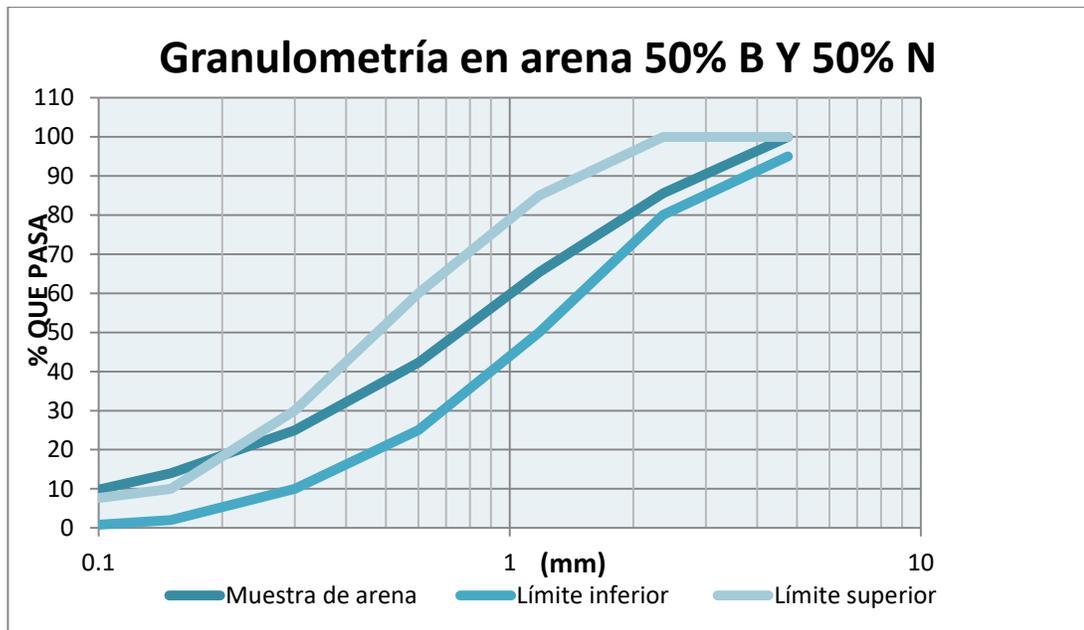


Ilustración 22 Curva granulométrica de la arena combinada.

**Referencia:**

(NMX-C-077-ONNCCE, 2019)

- COLORIMETRÍA

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

La norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018) menciona que, una vez efectuado el ensayo, la solución que presente un color más oscuro que la coloración No. 3 de la tabla colorimétrica, deben rechazarse, excepto, si se demuestra que la coloración es debida a la presencia de pequeñas cantidades de carbón, lignito o partículas semejantes.

Determinar el contenido de materia orgánica en una arena, utilizando una solución de color normal.

**Equipo:**

-Botellas iguales de vidrio incoloro (biberón) de aproximadamente 350 cm<sup>3</sup> con marcas a cada 25 cm<sup>3</sup>.

-Muestra representativa de arena.

-Solución de sosa caustica 30g por litro de agua destilada.

-Balanza con aproximación de 0.1g.

-Tabla colorimétrica.

- Espátula y charolas metálicas.

**Procedimiento:**

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente de 1000 gramos. se seca hasta tener una masa constante a una temperatura no mayor a 110°C.
2. Una vez seca la arena, la dejamos enfriar y colocamos una muestra en el frasco de biberón hasta 133 cm<sup>3</sup>.
3. Adicionamos la solución de sosa caustica (Ilustración 23) hasta la marca de 206 cm<sup>3</sup>.
4. Tapamos el frasco de biberón y agitamos durante 2 minutos aproximadamente y dejamos reposar durante 24 horas.
5. Una vez cumplidos las 24 horas, comparamos el líquido de la botella con la tabla colorimétrica Ilustración 24.



Ilustración 23 Adición de la sosa caustica.  
Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 24 Colorimetría de la arena. Fuente:  
Elaboración propia.

Tabla 24 Colorimetría de la arena blanca y negra

6.	Muestra	N. de la tabla colorimétrica
Arena blanca (B)	1-3	2
Arena negra (N)	1-2	1

### **Recomendaciones:**

Si el color es más oscuro que el color normal, podemos sospechar de exceso de materia orgánica.

Por lo que se recomienda hacer otra prueba, pero con el material lavado, si este resultado sigue siendo igual, se debe completar la prueba con un análisis químico.

### **Referencia:**

(NMX-C-088-ONNCCE, 2019)

- SEDIMENTACIÓN

Determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable para elaboración de concreto.

### **Equipo:**

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

- Frasco graduado con tres marcas (la primera a 414 ml, la segunda a los 444 ml y la tercera a los 828 ml).

- Muestra de arena seca de aproximadamente 2000 gramos.

- Agua destilada.

**Procedimiento:**

1. Se coloca arena seca dentro del frasco (Ilustración 25) hasta la marca de los 414 ml y posteriormente se coloca agua hasta la marca de 828 ml.
2. Tapamos el frasco y agitamos hasta que todo el material fino se quede suspendido en el agua.
3. Se deja reposar durante 24 horas para determinar el nivel de material fino, Ilustración 26.
4. Observamos si el material fino rebasa o no la marca de 444 ml, para poder conocer así el excedente de finos de la muestra.



Ilustración 25 Adición de agua para la prueba de sedimentación. Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 26 Reposo para determinar el material fino de la muestra. Fuente: Elaboración propia.

**Resultados:**

Tabla 25 Resultado de Sedimentación de la arena blanca y negra.

	Muestra	Resultado
Arena blanca (B)	1-3	Aceptable
Arena negra (N)	1-2	Aceptable

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

**Observaciones:**

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

Determinar las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos que contiene, empleando un procedimiento que amplifica el volumen de los materiales finos

**Equipo:**

-Probetas de Lucita o acrílico graduadas en decimo de pulgada.

-Tapón de hule.

-Tubo irrigador.

-Un tramo de manguera.

-Un pisón metálico de  $1000 \pm 5$  gramos.

-Cápsulas de  $85 \pm 5$  gramos (metálicas).

-Embudo.

-Cronómetro.

-Frasco de 3.875 litros.

-Malla N° 4.

-Solución de reserva.

-Solución de trabajo.

**Procedimiento:**

1. Se pasa la arena por la malla N° 4 y se toma una muestra de aproximadamente 500 g.

## Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

2. Se llena la cápsula y se golpea para acomodar el material y se enrasa.
3. Se vierte solución de trabajo en las probetas hasta una altura de  $4 \pm 0.1$  pulgadas usando un embudo para evitar pérdidas de material. Se deja reposar  $10 \pm 1$  minuto procurando no mover las probetas en ese tiempo.
4. Se coloca el tapón de hule, se pasa al agitador mecánico (Ilustración 27), dando 90 ciclos en 30 segundos.
5. Se vuelve a poner el tubo irrigador, se pica el material y con el mismo se baja el material que quedo en las paredes de la probeta, se llena hasta la marca de 15 y se deja reposar por 20 minutos.
6. Al término del tiempo se toma la primera lectura superior de arcilla en suspensión la cual se denominará L1.
7. Se introduce el pisón lentamente en la probeta ajustando hasta el pisón se apoye en la arena, el nivel donde se apoya en la arena se denominará L2, Ilustración 28.



Ilustración 27 Muestra de arena en el agitador mecánico de equivalente de arena.  
Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 28 Lectura de arena (L2). Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

$$E. DE ARENA = \frac{L2}{L1} \times 100$$

Dónde:

E. DE ARENA: Equivalente de arena %

L1: Lectura de arcilla

L2: Lectura de arena

**Resultados:**

Tabla 26 Equivalente de la arena blanca.

<b>Arena Blanca</b>		
	Muestra 1	Muestra 2
<b>Arcilla</b>	3.9	3.7
<b>Arena</b>	2.7	2.6
<b>Equivalente</b>	69.23%	70.27%
<b>Promedio</b>	69.75%	

Tabla 27 Equivalente de la arena negra.

<b>Arena Negra</b>		
	Muestra 1	Muestra 2
<b>Arcilla</b>	4.0	3.8
<b>Arena</b>	3.8	3.7
<b>Equivalente</b>	95.00%	97.37%
<b>Promedio</b>	96.18%	

Tabla 28 Equivalente de la arena combinada

<b>Arena Blanca 50% Y Negra 50%</b>		
	Muestra 1	Muestra 2
<b>Arcilla</b>	4.3	4.2
<b>Arena</b>	3.5	3.3
<b>Equivalente</b>	81.40%	78.57%
<b>Promedio</b>	79.98%	

**3.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS GRAVAS**

El agregado grueso utilizado en las mezclas de concreto fue obtenido del banco de material “La Roka” (Ilustración 29) que está ubicado a un costado de la carretera Morelia – Guadalajara, justo después de pasar la localidad de Cuto del Porvenir (Ilustración 28) perteneciente al municipio de Tarímbaro del estado de Michoacán.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

El tipo de propiedad es particular, el material obtenido es una roca basáltica y el tratamiento que se le da a dicho material es trituración parcial y cribado con un tamaño máximo de  $\frac{3}{4}$ " empleado para la elaboración de concreto hidráulico.



Ilustración 29 Banco de material "La Roka". Fuente: Google maps.

- CUARTEO EN GRAVAS

Para realizar el cuarteo o reducción del agregado grueso, se aplicó el método "B" o cuarteo manual según lo especificado por la normativa (NMX-C-170-ONNCCE, 2019). La metodología corresponde a la misma que se aplicó en el agregado fino.

**Equipo:**

-Muestra de grava.

-Palas.

-Escobas.

-Rastrillos.

**Procedimiento:**

Método por paleo.

1. Se coloca la muestra de grava sobre una superficie limpia y extendemos con el rastrillo sobre la superficie limpia.
2. La dejamos en el sol para quitar la humedad del material y poder a realizar las pruebas.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

3. Una vez seca, se cambia el material de un extremo a otro con ayuda de la pala, tratando de homogenizar el material además de apilar el material de forma cónica (se repite este procedimiento por lo menos 3 veces).
4. Una vez terminado el paso 2 se aplana la parte superior con la cara posterior de la pala y después se divide el material en 4 partes iguales (Ilustración 30), eliminando las dos porciones opuestas. Si se requiere reducir la muestra aún más, se debe repetir el procedimiento antes mencionado.



Ilustración 30 Cuarte de grava. Fuente: Elaboración propia.

### **Referencia:**

(NMX-C-170-ONNCCE, 2019)

- MASA VOLUMÉTRICA SECA Y SUELTA (MVSS)

La masa volumétrica de los agregados, como ya se mencionó anteriormente, es la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen ocupado por el material de un recipiente especificado (NMX-C-073-ONNCCE, 2014). El ensayo para la determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una grava consiste en conocer una masa por unidad de volumen del agregado cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre y natural.

### **Equipo:**

- Muestra representativa de grava.
- Recipiente de masa y volumen conocido.
- Varilla punta de bala.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

-Balanza.

-Cucharones.

**Procedimiento:**

1. De la prueba de cuarteo, se obtuvo una muestra representativa, se dividió en cuatro partes y se utilizó los dos cuarteos opuestos para hacer la prueba.
2. Se llena el recipiente con un cucharon (Ilustración 31), dejando caer la grava a una altura aproximada de 5 cm del borde superior del recipiente, intercalando en cada uno de los cuarteos opuestos elegidos, cuidando el acomodo de las partículas sea por caída libre, esto hasta que se llene completamente hasta formar un cono.
3. Se enraso con ayuda de la varilla punta de bala.
4. Se llevó a pesar la muestra, Ilustración 32.



Ilustración 31 Llenado de la MVSS. Fuente: Elaboración propia



Ilustración 32 Peso de la MVSS. Fuente: Elaboración Propia

Cálculos:

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

Dónde:

MVSS= Masa volumétrica suelta y seca (g/cm<sup>3</sup>).

M= Masa de la arena (g).

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

**Resultados:**

Tabla 29 MVSS de la grava triturada.

GRAVA		
Datos	M.V.S.S.	
Masa total	18,590.00 g	18,390.00 g
Masa del recipiente	2,930.00 g	2,930.00 g
Masa de arena	15,660.00 g	15,460.00 g
Volumen recipiente	10,600.00 cm <sup>3</sup>	10,600.00 cm <sup>3</sup>
Peso Volumétrico	1,477.36 Kg/m <sup>3</sup>	1,458.49 Kg/m <sup>3</sup>
Promedio	<b>1467.92 Kg/m<sup>3</sup></b>	

**Referencia:**

(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)

- MASA VOLUMÉTRICA SECA Y VARILLADA (MVSV)

Determinar la masa por unidad de volumen de un material, cuando el material presenta una compactación, para esta prueba seguimos el procedimiento de la norma (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

**Equipo:**

- Muestra representativa de grava.
- Recipiente de masa y volumen conocido.
- Varilla punta de bala.
- Balanza.
- Cucharones.

**Procedimiento:**

1. De la prueba de cuarteo, obtuvo una muestra representativa, se dividió en cuatro partes y se utilizó los dos cuarteos opuestos para hacer la prueba.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

2. Se vació la grava dentro del recipiente, dejándose caer a una altura de 5cm aproximadamente a partir de la arista superior del recipiente, intercalando en cada uno de los cuarteos opuestos que elegimos, llenando el recipiente en 3 capas y dando 25 compactaciones en cada capa de grava (Ilustración 33), cuidando no penetrar la capa inferior al dar los golpes.
3. Se retiró todo el exceso enrasando con la varilla o con la mano por comodidad, Ilustración 34.
4. Se llevó a pesar la muestra.



Ilustración 33 Compactación con la varilla de la grava. Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 34 enrasado de la grava. Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

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

Dónde:

MVSV= Masa volumétrica suelta y varillada (g/cm<sup>3</sup>).

M= Masa de la arena (g).

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

**Resultados:**

Tabla 30 MVSV de la grava triturada.

GRAVA

Datos	M.V.S.V.	
Masa total	19,720.00 g	19,800.00 g
Masa del recipiente	2,930.00 g	2,930.00 g
Masa de arena	16,790.00 g	16,870.00 g
Volumen recipiente	10,600.00 cm <sup>3</sup>	10,600.00 cm <sup>3</sup>
Masa volumétrica	1,583.96 Kg/m <sup>3</sup>	1,591.51 Kg/m <sup>3</sup>
Promedio	<b>1587.74 Kg/m<sup>3</sup></b>	

**Referencia:**

(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)

La norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018) específica la masa volumétrica compactada con varilla debe ser mayor que 1120 kg/m<sup>3</sup>.

- **HUMEDAD DE ABSORCIÓN**

La absorción es definida como el incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante un tiempo determinado a temperatura ambiente; este aumento de masa es debido al agua que se introduce en los poros del material y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas. Dicha absorción, se expresa como por ciento de la masa seca (NMX-C-164-ONNCCE, 2014)

**Equipo:**

-Muestra representativa de grava de aproximadamente 1kg.

-Franela.

-Parrilla.

-Espátulas.

-Vidrio

-Bascula con aproximación de 0.2 g.

-Mallas ¾ y 3/8".

**Procedimiento:**

1. Se pasa la muestra a través de la malla ¾ y 3/8 y de ese material obtenido se dejó saturando durante 24±4 horas.
2. Una vez pasado el tiempo de saturado, se procede a secar superficialmente con una franela una masa de aproximadamente 300g. registramos ese valor como masa saturada y superficialmente seca (Mh).
3. Se coloca el material en una charola dejándolo en la parrilla para eliminar todo exceso de agua, y para saber cuándo está completamente seco se coloca el vidrio sobre la muestra y si no se empaña o se forman pequeñas gotas de agua, el material alcanzó el estado seco y se retira de la parrilla.
4. Se deja enfriar a temperatura ambiente y se registró este dato como masa seca (Ms).

**Cálculos:**

$$A = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Dónde:

A= Humedad de absorción (%).

Mh= Masa de muestra y superficialmente seca (g).

Ms= Masa seca (g).

**Resultados:**

Tabla 31 Humedad de absorción de la grava triturada.

Datos	Gravas	
<b>Peso Húmedo</b>	307.60 g	307.00 g
<b>Peso Seco</b>	300.80 g	300.60 g
<b>Humedad</b>	6.80 g	6.40 g
<b>% Abs.</b>	2.26%	2.13%
<b>Promedio</b>	2.19%	

**Especificaciones:**

Tabla 32 Especificaciones de tipo de absorción según: (NMX-C-164-ONNCCE, 2014)

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

**Referencia:**

(NMX-C-164-ONNCCE, 2014)

- DENSIDAD

La densidad del agregado grueso, de acuerdo con la norma (NMX-C-164-ONNCCE, 2014), es la relación de la densidad del agregado saturado y superficialmente seco a la densidad del agua, equivalente a la relación de la masa del agregado saturado superficialmente seco a la masa del volumen del agua desalojada, considerando la masa de las partículas saturadas de agua y superficialmente secas y la masa de las partículas de agua que se incluyen en los poros que se encuentran dentro de las mismas.

**Equipo:**

- Muestra representativa de grava de aproximadamente 1kg.
- Franela.
- Picnómetro.
- Probeta graduada.
- Bascula con aproximación de 0.2 g.
- Mallas  $\frac{3}{4}$  y  $\frac{3}{8}$ "

**Procedimiento:**

1. Se pasa la muestra a través de la malla  $\frac{3}{4}$  y  $\frac{3}{8}$  y del material de estas mallas se pone a saturar durante  $24 \pm 4$  horas.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

2. Una vez pasado el tiempo de saturado, se procede a secar superficialmente con una franela una muestra de aproximadamente 300g. registramos ese valor como masa de la muestra (M).
3. Se coloca picnómetro en una superficie plana, se llena de agua hasta el nivel del orificio, y se procede a colocar la muestra de grava dentro.
4. Se recibe el agua desalojada en una probeta graduada durante aproximadamente 15 minutos o hasta que deje de caer.
5. El volumen de agua desalojada en la probeta corresponde al volumen (V) de las partículas de grava.

Cálculos:

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

Donde.

D= Densidad (g/cm<sup>3</sup>).

M= Masa de la grava (g).

V= Volumen de la grava (cm<sup>3</sup>).

### **Resultados:**

Tabla 33 Densidad de la grava triturada.

Gravas		
<b>Volumen Desalojado</b>	110.00 cm <sup>3</sup>	112.00 cm <sup>3</sup>
<b>Peso Húmedo</b>	300.40 g	301.80 g
<b>Densidad Relativa</b>	2.73 g/cm <sup>3</sup>	2.69 g/cm <sup>3</sup>
<b>Promedio</b>	2.713 g/cm <sup>3</sup>	

### **Referencia:**

(NMX-C-164-ONNCCE, 2014)

- GRANULOMETRÍA Y TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

El tamaño de las partículas de la muestra de grava, se determinan por medio del tamizado en mallas o cribas con unas aberturas especificadas en la norma (NMX-C-077-ONNCCE, 2019)

El tamaño máximo de agregado que se utiliza en el concreto tiene su fundamento en la economía. Comúnmente se necesita más agua y cemento para agregados de tamaño pequeño que para mayores tamaños.

El tamaño máximo de un agregado, es el menor tamaño de malla por el cual todo el agregado debe pasar.

**Equipo:**

- Muestra de grava de aproximadamente 15 kg.
- Un juego de mallas o cribas con abertura cuadrada de 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8" y No.4.
- Charolas metálicas.
- Balanza.

**Procedimiento:**

1. De la prueba de cuarteo en gravas, obtenemos una muestra de aproximadamente 15kg. Secada previamente.
2. Colocamos las mallas de mayor a menor.
3. Pasamos el material por las mallas, agitándolas con las manos, para que las partículas más pequeñas pasen a la malla siguiente, Ilustración 36.
4. Este procedimiento mencionado en el paso 3 se repite hasta terminar la muestra de grava.

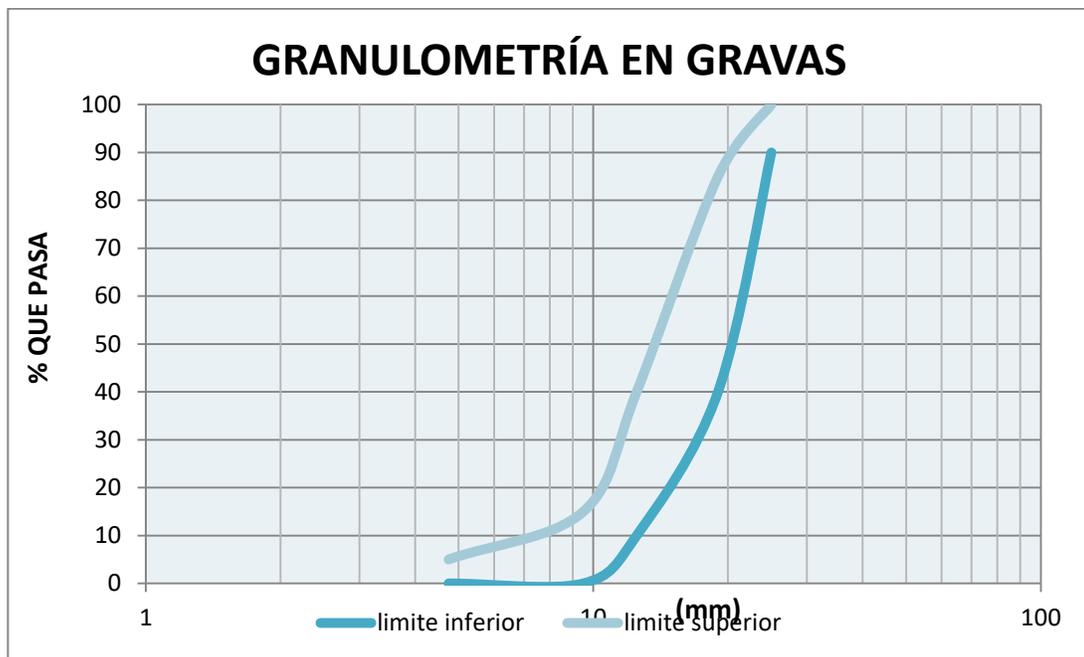
**Cálculos:**

Tabla 34: Registro de datos de granulometría en grava.

Malla	Peso Retenido Parcial (g)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado
1 1/2 "			
1 "			

3/4 "	
1/2 "	
3/8 "	
No. 4	
PASA	
No.4	
SUMAS	

**Grafica granulométrica:**



*Ilustración 35 Rango de la granulometría de la grava para el diseño de concreto hidráulico.*

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

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

2. Porcentaje acumulado se calcula de la siguiente manera:

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

3. Porcentaje de la malla que pasa:

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

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



Ilustración 36 Granulometría de la grava triturada. Fuente: Elaboración Propia.

**Resultados:**

Tabla 35 Granulometría de la grava triturada.

Muestra Promedio			
Peso de la Muestra:		15,570.00 kg	
Malla	Peso retenido Parcial	Peso retenido parcial	% Retenido Acumulado
	(g)	%	%
1 1/2 "	0.00	0.00	0.00
1 "	232.50	1.51	1.51
3/4 "	6495.00	42.13	43.64
1/2 "	6425.00	41.67	85.31
3/8 "	1487.50	9.65	94.96
No. 4	732.50	4.75	99.71
PASA No.4	45.00	0.29	100.00

<b>SUMAS</b>	<b>15,417.50</b>	100.00	---
--------------	------------------	--------	-----

**Grafica granulométrica:**

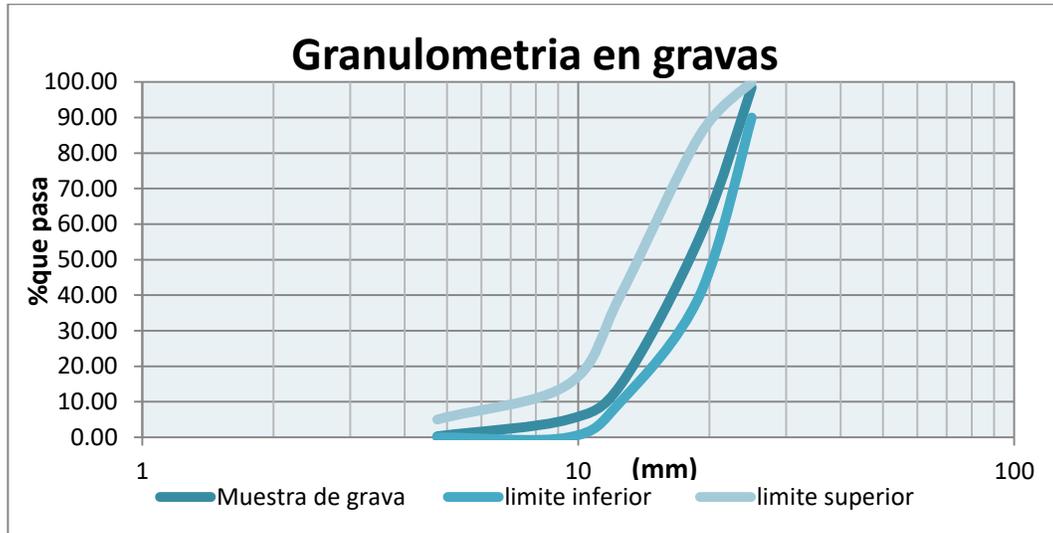


Ilustración 37 Curva granulométrica de la grava triturada

- **DESGASTE DE LOS ÁNGELES**

Objetivo: Determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas para concreto.

**Equipo:**

-Máquina de Desgaste de los Ángeles.

-Juegos de mallas  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{8}$  y N°12.

-Horno.

-Cucharón.

-Charolas.

-Agua.

-Esferas de metal.

-Báscula de 40 kg.

**Procedimiento:**

Tabla 36 tipos de desgastes según (M MMP 4 04 006/18, 2018)

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva	
	Mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	25 – 37.5	1" – 1 ½"	1250 ± 25	12	5000 ±
	19 – 25	¾" – 1"	1250 ± 25		25
	12.5 – 19	½" – ¾"	1250 ± 10		
	9.5 – 12.5	3/8" – ½"	1250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5000 ± 10		
B	12.5 – 19	½" – ¾"	2500 ± 10	11	4584 ±
	9.5 – 12.5	3/8" – ½"	2500 ± 10		25
	Masa total de la muestra de prueba		5000 ± 10		
C	6.3 – 9.5	¼" – 3/8"	2500 ± 10	8	3330 ±
	4.75 – 6.3	N°4 – ¼"	2500 ± 10		20
	Masa total de la muestra de prueba		5000 ± 10		
D	2.36 – 4.75	N°. 8 – N°4	5000 ± 10	6	2500 ±15
E	67 – 75	2 ½ "– 3"	2500 ± 25	12	5000 ±
	50 – 63	2" – 2 ½ "	2500 ± 25		25
	37.5 – 50	1 ½ "– 2"	5000 ± 25		
	Masa total de la muestra de prueba		10000 ± 10		
F	37.5 – 50	1 ½ "– 2"	5000 ± 25	12	5000 ±
	25 – 37.5	1" – 1 ½ "	5000 ± 25		25
	Masa total de la muestra de prueba		10000 ± 10		
G	25 – 37.5	1" – 1 ½ "	5000 ± 25	12	5000 ±
	19 – 25	¾" – 1"	5000 ± 25		25
	Masa total de la muestra de prueba		10000 ± 50		

## Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

1. Se criba el material de acuerdo a la granulometría obtenida tomando 3000 gramos aproximadamente de la malla que pasa  $\frac{3}{4}$  y retiene en  $\frac{1}{2}$ , y 3000 gramos de la malla que pasa  $\frac{1}{2}$  y retiene en la malla de  $\frac{3}{8}$ .
2. Se lava el material para quitar los finos que estén adheridos al material.
3. Se deja el material secando en el horno hasta que el material pierda la humedad.
4. Se pesan  $2500 \pm 10$  gramos del material que pasa  $\frac{3}{4} - \frac{1}{2}$  y  $2500 \pm 10$  gramos que pasa  $\frac{1}{2} - \frac{3}{8}$  hasta completar 5000 gramos  $\pm 10$  gramos.
5. Se obtiene la masa de la muestra  $P_i$  y se coloca el material en la máquina de desgaste de Los Ángeles (Ilustración 38) con 11 esferas de metal, hasta que la máquina de 500 revoluciones.
6. Pasado las 500 revoluciones se retira el material de la máquina, se pasa por la malla N° 12 y el material retenido de la malla se vuelve a tomar lectura como  $P_f$  Ilustración 39.



Ilustración 38 Colocación de la grava triturada en la máquina de desgaste de los ángeles. Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 39 Desgaste de los Ángeles de grava triturada. Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

$$P_u = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

Dónde:

$P_u$ : Desgaste por trituración (%)

$P_i$ : Masa inicial de la muestra de la prueba (g).

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Pf: Masa final de la muestra de la prueba (g).

### **Resultados:**

Tabla 37 Desgaste de los Ángeles de la grava triturada.

<b>Desgaste de los Ángeles</b>	
<b>Masa Inicial</b>	5000.0
<b>Masa Final</b>	4167.0
<b>Porcentaje</b>	16.66%

### **Referencia:**

(M MMP 4 04 006/18)

La norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2018) especifica valores de desgaste  $\leq$  a 40%

#### **3.1.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS DE PET**

Las fibras creadas y utilizadas en la presente investigación se clasifican dentro del grupo de las macrofibras, siendo de origen sintético, obtenidas del reciclaje mecánico de botellas de plástico de PET.

El objetivo principal de utilizar este tipo de fibras, está ligado a:

- Crear un material sustentable a partir del reciclaje de botellas de PET post-consumo.
- Mejorar la calidad del concreto hidráulico para uso en pavimentos rígidos y así: Reducir la fisuración por asentamiento (revenimiento) Reducir la fisuración por contracción plástica y por secado Disminuir la permeabilidad Incrementar la resistencia residual aportando tenacidad y ductilidad Incrementar la resistencia a la abrasión y al impacto
- Sustituir, en el mejor de los casos, el acero de refuerzo y/o la malla electrosoldada dentro de la matriz cementicia en elementos como losas y prefabricados.

Características de las fibras en estudio En la presente investigación se creó una macrofibra de origen sintético, identificada como "PR", que por sus características y geometría se denominó fibra o macrofibra de tereftalato de polietileno (PET).

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Presenta un color verde y transparente con un cuerpo en forma recta, una sección transversal rectangular y una superficie rayada para garantizar la adherencia con la matriz de concreto hidráulico.

El análisis de las dimensiones, forma y textura de las fibras se llevó a cabo en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil – UMSNH. Ilustra la apariencia de la fibra obtenida a partir del reciclaje de botella post-consumo.

Las fibras de PET, analizadas en esta, investigación una vez incorporadas al concreto confieren una serie de ventajas en el comportamiento de la mezcla de concreto, estas se presentan a continuación:

- Es un material con larga vida útil; material no biodegradable.
- Fácil de maniobrar (por su densidad característica del PET de 1.33 g/cm<sup>3</sup>).
- Fácil de colocar dentro de la mezcla de concreto hidráulico.
- Refuerzan al concreto en tres dimensiones.
- No presenta riesgo a la corrosión a diferencia de otras fibras metálicas.
- Presenta una alta resistencia química y no se deforma en presencia de temperaturas altas.
- No presentan degradación con los compuestos producidos dentro de los poros del concreto (Flores Fernández, 2014).

#### **3.1.4.1 ELABORACIÓN DE LAS FIBRAS DE PET**

Para el desarrollo de las fibras de PET, se utilizó una metodología basada en el reciclaje mecánico de plásticos, el cual consistió en destruir físicamente envases post-consumo de PET, provenientes de refrescos, hasta alcanzar hilos con un diámetro de 3.2 mm.

La producción de fibras de PET se realizó en cinco etapas distintas, las cuales se detallan a continuación:

##### **1. Recolección de botellas de PET post-consumo**

La primera etapa para la obtención de las fibras de PET, se llevó a cabo mediante una campaña de recolección de botellas de PET, creada dentro del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil-UMSNH. La campaña

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

de recolección constó de solicitar a los alumnos, maestros y trabajadores, mediante anuncios publicitarios, el no tirar a la basura todo tipo de botellas de PET que desocupaban y por la recolección de tesis que elaboramos los especímenes de concreto en esta investigación.

## 2. Selección y lavado de botellas de refresco

Las botellas recolectadas se seleccionaron de acuerdo a la forma y textura homogénea del envase. Posteriormente, a las botellas seleccionadas se les retiró las etiquetas y tapas, se lavaron con agua limpia de grifo y se dejaron secar hasta no presentar ningún líquido o material extraño dentro y fuera del envase.

## 3. Corte de las botellas de PET mediante una máquina de corte o fileteador

Para la fase de obtención de las fibras se fabricó, mediante un método económico y sustentable, una máquina de corte o fileteador práctico; construida con materiales reciclados y la cual produjo hilos de PET con un diámetro (ancho) de 3.2 mm (ilustración 40).

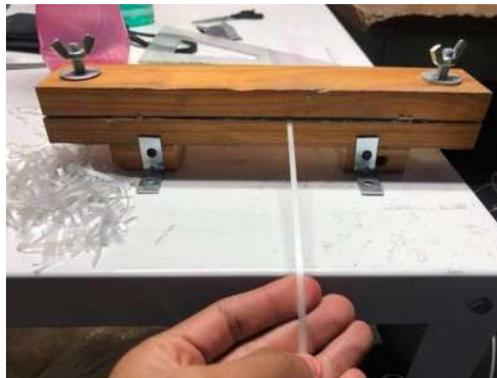


Ilustración 40 Corte de la fibra. Fuente: Elaboración Propia.

## 4. Rayado en la superficie de los hilos de PET obtenidos

Con el objetivo de obtener una buena adherencia entre el concreto y las fibras de PET, se realizó un rayado a los hilos de PET figurando una textura rugosa en la superficie del material (Ilustración 41).



Ilustración 41 Rayado del PET. Fuente: Elaboración propia.

### 5. Obtención de las fibras de PET mediante el corte manual

Las fibras de PET que se emplearon como refuerzo en las mezclas de concreto de esta investigación, fueron cortadas con ayuda de tijeras y guillotina (Ilustración 42) en segmentos de 38.1 mm de longitud y se guardaron en bolsas hasta el día que se utilizaron en la adición del concreto hidráulico (Ilustración 43) (Blancas Herrera, 2020).



Ilustración 42 Corte de las fibras por medio de guillotina. Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 43 Fibras cortadas y guardadas en bolsas. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.5 DISEÑO DE LA MEZCLA

Las mezclas de esta investigación de PET y polipropileno están basadas en una investigación del Mtro. (Blancas Herrera, 2020) . Esta experimentación fue elaborada por los compañeros Diana Laura Charco Angel, Ana Daniela Martínez González, Oswaldo Castolo Montero y Fabricio Ali Hernández Ferreyra, cada uno se enfocó a diferentes pruebas de ensayó. En este trabajo se evaluó el Modulo de Ruptura.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Para esta investigación se realizaron 5 mezclas de concreto, proporcionando la cantidad de fibra respecto a la masa del cemento:

1. Mezcla testigo (TEST)
2. Mezcla con 0.4% de PET adicionado (0.4%-PET)
3. Mezcla con 0.8% de PET adicionado (0.8%.PET)
4. Mezcla con 1.2% de PET adicionado (1.2%-PET)
5. Mezcla con 0.23% PET y 0.77% polipropileno (PET-P)

### 3.1.4.1 PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA TESTIGO

1. Se tienen las características físicas de los agregados pétreos y del cemento que se estarán implementando a la mezcla de concreto, tabla 38. Los materiales pétreos, antes de la mezcla, pasaron por un proceso de secado total, por lo que, no presentan humedad actual.

Tabla 38 Características de los materiales.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES						
MATERIAL	MVSS (kg/m <sup>3</sup> )	MVSV (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Módulo de finura	Tamaño máximo	Absorci ón (%)
GRAVA	1467.925	1587.736	2.713	-	3/4 "	2.19%
ARENA	1293.041	1452.519	2.273	2.67	-	5.26%
CEMENTO	1490.000	-	3.046	-	-	-

2. El cálculo del valor de  $f'_c$  (resistencia a compresión) del concreto a partir de la resistencia a la flexión o MR, (42 Kg/cm<sup>2</sup>).

La resistencia a compresión es una propiedad principalmente física y frecuentemente es usada en los cálculos para el diseño de puentes, edificios y otras estructuras.

La resistencia a la flexión de concretos de peso normal es normalmente de 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión en kg/cm<sup>2</sup> (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

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

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

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

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

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

$$f'c = 327.735$$

por seguridad en los cálculos se utilizará un valor de  $f'c = 330 \text{ kg/cm}^2$

3. Cálculo de cantidad de agua, proponemos un revenimiento para concreto de pavimentos y losas de 7.5 cm, tabla 39 de acuerdo al ACI 211.

Tabla 39 Revenimiento recomendados para diversos tipos de Construcción.

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

Calculamos la cantidad de agua que debe tener un metro cubico de concreto y el aire atrapado que se encuentra a la hora del mezclado. De acuerdo al revenimiento propuesto (7.5 cm) y el tamaño máximo del agregado grueso (3/4"), obtenemos de la tabla 40 la cantidad de agua requerida en el diseño y el porcentaje aire atrapado.

Tabla 40 Cantidad de agua para el diseño de concreto hidráulico.

Agua, kg. / m <sup>3</sup> de Concreto								
Revenimiento	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Concreto sin aire incluido								
De 2.5 a 5	207	199	190	179	160	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	175	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	185	178	160	---
Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin inclusión de aire (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Promedio recomendado de contenido de aire total, según el nivel de exposición (%)								

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

El concreto de esta investigación es un concreto sin aire incluido, por lo que tenemos 205 L/m<sup>3</sup> de agua y 2% de aire atrapado en el concreto.

Cálculo de volumen de aire atrapado:

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

$$\text{volumen de aire atrapado} = 20 \text{ L/m}^3$$

4. Cálculo de la relación agua-cemento por peso y la cantidad de cemento que se requiere por metro cúbico de mezcla, ingresando a la tabla 41 recomendada por el ACI 211.

Se ingresó con la resistencia a compresión de diseño a los 28 días (330 kg/cm<sup>2</sup>) y como ya se ha mencionado, la mezcla es sin aire incluido.

Tabla 41 Relación Agua/Cemento.

Resistencia a la compresión a los 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	Relación Agua/Cemento por peso	
	Concreto Sin aire incluido	Concreto Con aire incluido
420	0.41	-
350	0.48	0.4
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Para obtener la relación agua-cemento tenemos que, la resistencia a la compresión a los 28 días de diseño es de 330 kg/cm<sup>2</sup>, por lo que interpolamos los valores.

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

$$Rel. a - c = 0.51$$

Teniendo la relación agua-cemento, calculamos el contenido de cemento.

$$\text{Cantidad de cemento en peso} = \frac{\text{litros de agua (kg/m}^3\text{)}}{\text{Relación agua - cemento}}$$

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

$$\text{Cantidad de cemento en peso} = \frac{205 \text{ kg/m}^3}{0.51}$$

$$\text{Cantidad de cemento en peso} = 401.961 \text{ kg/m}^3$$

Calculamos el volumen de cemento requerido para la mezcla

$$\text{Volumen de cemento} = \frac{\text{Cantidad de cemento (kg/m}^3\text{)}}{\text{Densidad de cemento}}$$

$$\text{Volumen de cemento} = \frac{401.961 \text{ kg/m}^3}{3.05}$$

$$\text{Volumen de cemento} = 131.800 \text{ L/m}^3$$

5. Contenido de agregado grueso por volumen unitario de concreto, para esto ingresamos a la tabla mostrada a continuación, con el tamaño máximo del agregado (19 mm) y el módulo de finura (2.67), tabla 42.

Tabla 42 Volumen de agregado grueso varillado en seco, por diferentes módulos de finura.

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

Interpolamos los valores de módulo de finura, para obtener el volumen de agregado grueso varillado en seco como se muestra a continuación.

$$\text{Volumen de agregado grueso varillado en seco} = \frac{(0.62 - 0.64)(2.67 - 2.60)}{(2.80 - 2.60)} + 0.64$$

$$\text{Volumen de agregado grueso varillado en seco} = 0.633$$

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Calculamos la masa del agregado grueso para un metro cubico de mezcla, a partir del volumen de agregado varillado en seco.

$$\text{Masa de la grava} = \text{Volumen del agregado varillado en seco} \times \text{MVSV}$$

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

$$\text{Masa de la grava} = 1005.204 \text{ kg/m}^3$$

Para obtener el volumen de grava por metro cubico de mezcla se debe dividir la masa de la grava entre la densidad, como se muestra a continuación.

$$\text{Volumen de la grava} = \frac{\text{masa de la grava (kg/m}^3\text{)}}{\text{densidad}}$$

$$\text{Volumen de la grava} = \frac{1005.204 \text{ kg/m}^3}{2.713}$$

$$\text{Volumen de la grava} = 370.514 \text{ L/m}^3$$

6. Cálculo del volumen y masa del agregado fino para un metro cúbico de concreto.

$$\text{Volumen de arena} = 1000 \text{ L/m}^3 - (V_{\text{cemento}} + V_{\text{agua}} + V_{\text{aire}} + V_{\text{grava}})$$

$$\text{Volumen de arena} = 1000 - (131.80 + 205 + 20 + 370.514)$$

$$\text{Volumen de arena} = 272.686 \text{ L/m}^3$$

$$\text{Masa de la arena} = \text{Volumen de arena} \times \text{densidad}$$

$$\text{Masa de la arena} = 272.686 \text{ L/m}^3 \times 2.27$$

$$\text{Masa de la arena} = 618.997 \text{ kg/m}^3$$

A continuación, se muestra un resumen de las propiedades de los agregados (tabla 43).

Tabla 43 Cantidad de materiales para  $\text{m}^3$

Materiales	Volumen ( $\text{L/m}^3$ )	Masa total ( $\text{kg/m}^3$ )
Cemento	131.800	401.961
Arena	272.686	618.997
Grava	370.514	1005.204

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

<b>Agua</b>	205.000	205.000
<b>Aire</b>	20	-
<b>Suma</b>	1000	2231.161

7. Corrección por humedad de absorción, el porcentaje de agua que absorben los materiales, debe ser el porcentaje de agua adicional en la mezcla de concreto. A continuación, se muestran los ajustes.

Masa corregida de la arena = Masa del agregado x (1 – % de absorción)

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

$$\text{Masa corregida de la arena} = 586.438 \text{ kg/m}^3$$

Masa corregida de la grava = Masa del agregado x (1 – % de absorción)

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

$$\text{Masa corregida de la grava} = 983.190 \text{ kg/m}^3$$

Masa corregida del agua

$$= \text{Masa total del agua} + \Sigma (\text{Masa del agregado} \times \% \text{ de absorción})$$

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

$$\text{Masa corregida del agua} = 259.573 \text{ kg/m}^3$$

Las cantidades de los materiales para un metro cubico de mezcla de concreto se muestran en la tabla 44.

Tabla 44 Cantidad de materiales para el diseño de un m<sup>3</sup>, corregidos por la humedad de absorción.

<b>Materiales</b>	<b>Masa (kg)</b>
<b>Cemento</b>	401.961
<b>Agua</b>	259.573
<b>Aire</b>	0
<b>Arena</b>	586.438
<b>Grava</b>	983.19
<b>Total</b>	2231.347

### 3.1.4.2 DOSIFICACIÓN DE FIBRAS DE PET Y POLIPROPILENO

Tabla 45 Masa requerida para el diseño de m<sup>3</sup> de mezcla.

<b>Masa requerida de materiales por metro cubico de mezcla (kg/m<sup>3</sup>)</b>					
<b>Materiales</b>	TEST	0.4%-PET	0.8%-PET	1.2%-PET	PET-P

<b>Cemento</b>	401.961	401.961	401.961	401.961	401.961
<b>Agua</b>	259.573	259.573	259.573	259.573	259.573
<b>Aire</b>	0	0	0	0	0
<b>Arena</b>	586.438	586.438	586.438	586.438	586.438
<b>Grava</b>	983.19	983.19	983.19	983.19	983.19
<b>PET</b>		1.608	3.216	4.824	0.740
<b>Polipropileno</b>					2.476

### 3.2. ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO

#### 3.2.1 MUESTREO DE CONCRETO FRESCO

Establecer el método para obtener muestras representativas de concreto fresco y con el cual se realizan los ensayos para determinar el cumplimiento de los requisitos de calidad.

#### **Equipo:**

-Carretilla.

-Cucharón.

-Pala.

-Revolvedora.

#### **Procedimiento:**

1. Antes de tomar la muestra se verifica que tengamos el equipo completo para realizar la prueba de muestreo.
2. La muestra de concreto, se toma hasta que se agreguen todos los componentes (si se añaden aditivos químicos) y sea homogénea la mezcla,
3. Antes de tomar la muestra de concreto se humedece la carretilla para evitar que pierda humedad al contacto con las paredes secas.
4. Se toma la muestra interceptando con la carretilla (Ilustración 44) el flujo completo de la descarga de la mezcladora o desviando el flujo sin segregar el concreto, aproximadamente a la mitad de la descarga, Se utilizará una sola muestra representativa para los ensayos.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

5. La muestra será el volumen suficiente para realizar los ensayos programados, pudiendo en todos los casos tomar varias porciones para generar la muestra adecuada que sea representativa del lote del concreto.
6. El intervalo entre la obtención de la primera y última porción de la muestra no debe exceder de 15 minutos. Una vez obtenida la muestra se procede a protegerla muestra del sol, el viento, la lluvia y otras fuentes con la finalidad de no alterar la muestra, con la ayuda de una lona.



Ilustración 44 Muestreo de concreto fresco. Fuente: Elaboración propia.

### **Referencia:**

(NMX-C-ONNCCE-2013, 2013)

### **3.2.2 REVENIMIENTO**

El ensayo de revenimiento o asentamiento del cono de Abrams, es el método más ampliamente aceptable y utilizado para medir la consistencia del concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). La consistencia se califica dependiendo de la trabajabilidad o manejabilidad de la mezcla en los primeros 15 minutos, después de ser elaborada, midiendo el asentamiento que presenta al quitarle el cono en el que inicialmente se ha vertido dicha mezcla.

### **Equipo:**

- Molde de revenimiento.

- Varilla punta de bala de 5/8" de diámetro.

- Pala.

- Cucharón.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

-Flexómetro.

-Placa de metal de revenimiento.

**Procedimiento:**

1. Humedecer el molde; colocarlo sobre una superficie horizontal, plana, rígida y no absorbente. Mantenerlo firme en su lugar durante la acción del llenado, apoyar los pies en los estribos que tiene para ello en el molde.
2. Se llena el molde en 3 capas aproximadamente de igual volumen. La primera capa corresponde a una altura de 7 cm, la segunda capa debe llegar a una altura de aproximadamente de 15 cm y la tercera, al extremo del molde.
3. Compactar cada capa con 25 penetraciones de la varilla, introduciéndola por el extremo redondeado, distribuidos uniformemente sobre la sección de cada capa, por lo que es necesario inclinar la varilla ligeramente en la zona perimetral aproximadamente la mitad de las penetraciones se hacen cerca del perímetro, después, con la varilla vertical se avanza en espiral hacia el centro del cono.
4. Compactar la segunda capa y la superior a través de todo su espesor, de manera que la varilla penetre en cada capa anterior aproximadamente 2 cm, para el llenado de la última capa colocar un ligero excedente de concreto por encima del borde superior del molde.
5. Si a consecuencia de la compactación de la última capa, el concreto se asienta a un nivel inferior del borde superior del molde, a la décima o vigésima penetración, se agrega concreto en exceso para mantener su nivel por encima del borde del molde todo el tiempo.
6. Ya terminada la compactación de la última capa, enrasar el concreto mediante un movimiento de rodamiento de la varilla. Limpiar la superficie exterior de la base del asiento, e inmediatamente levantar el molde con cuidado.
7. La operación para levantar completamente el molde de 30 cm de su altura debe hacerse en  $5 \pm 2$  segundos, alzándose verticalmente sin movimiento lateral o torsional. La realización de esta prueba completa desde el comienzo del llenado hasta que se levanta el molde, debe hacerse sin interrupción y en un tiempo no mayor de 2.5 min.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

8. Medir inmediatamente el revenimiento (Ilustración 45), determinando el asentamiento del concreto a partir del nivel original de la base superior del molde, midiendo esta diferencia de alturas en el centro desplazado de la superficie superior del espécimen. Si alguna porción del concreto se desliza o cae hacia un lado, se desecha el ensayo y se efectúa otra con una nueva porción de la misma muestra.



Ilustración 45 Revenimiento de concreto fresco. Fuente: Elaboración propia.

### **Referencia:**

(NMX-C-156-ONNCCE, 2010)

### **3.2.3 POTENCIAL DE HIDRÓGENO**

El ensayo para la obtención del “potencial de Hidrógeno” (pH) en las mezclas de concreto en estado fresco, se realizó con ayuda de tiras indicadoras de la marca CIVEQ, fabricada por la empresa Científica Vela Quin S.A. de C.V.

Al colocar una tira indicadora sobre la mezcla fresca, se pudo conocer el valor de pH del concreto y así verificar que la mezcla se encontrará en un estado alcalino, siendo este una característica de las mezclas de concreto hidráulico.

### **Procedimiento:**

1. Se colocó una tira indicadora sobre la muestra representativa de concreto fresco, misma que la utilizada para el ensayo de revenimiento, haciendo que el lado que contiene los indicadores toque totalmente al concreto.
2. Se dejó el papel durante un tiempo alrededor de un minuto, con el propósito de que la tira indicadora nos arrojará un valor más exacto del pH (Ilustración 46).

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

3. Al retirar la tira de papel de la mezcla, se comparó el color obtenido con los valores que vienen en la tabla de referencia, haciendo coincidir los 4 colores de la tira indicadora y obteniendo un valor de pH.



Ilustración 46 Colocación de tira de PH en la mezcla de Concreto hidráulico fresco. Fuente Elaboración propia.

### **3.2.4 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES**

Establecer los pasos a seguir para elaborar y curar los especímenes de concreto.

#### **Equipo:**

- Aceite para engrasar los moldes.
- Moldes cilíndricos, de 15 cm de diámetro x 30 cm de altura.
- Moldes para vigas, de sección transversal de 15 cm x 15 cm y longitud de 60 cm.
- Varilla punta de bala de 5/8" de diámetro y 60 cm de longitud.
- Cucharón.
- Mazo de goma
- Carretilla

#### **Procedimiento:**

1. El concreto se vacía con un cucharón en los moldes, cada porción de concreto debe ser representativa de la muestra contenida, debe moverse el cucharón alrededor del borde superior del molde a medida que concreto vaya descargando para asegurar una distribución uniforme y minimizar la segregación del agregado grueso dentro del molde.

## Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

2. Debe distribuirse el concreto usando la varilla antes de iniciar la compactación, durante el colado de la capa final y añadir una cantidad de concreto tal que sobrepase y lo llene totalmente después de la compactación.
- MOLDE CILÍNDRICO 15X 30
4. Llenar en 3 capas de aproximadamente igual volumen (10 cm), compactar cada capa con 25 penetraciones con la varilla larga por el extremo redondeado, distribuir las penetraciones uniformemente en toda la sección transversal del molde, permitiendo que la varilla penetre aproximadamente 2 cm dentro de la capa inmediata inferior, Ilustración 47.
  5. Después de compactar cada capa se debe golpear ligeramente las paredes del molde con el mazo, para eliminar las oquedades producidas por la varilla.
  6. Si a consecuencia de la compactación de la última capa, el concreto se asienta a un nivel inferior del borde superior del molde, antes de la vigésima penetración, se agrega concreto en una sola ocasión para mantener su nivel por encima del borde del molde todo el tiempo.
  7. Se enraza la superficie del concreto, si no se especifica el tipo de acabado, se termina la superficie con un enrasador rígido de metal y terminarlo con acabado con el mínimo de pasadas necesarias que produzca una superficie plana y uniforme que este a nivel de las orillas del molde.



*Ilustración 47 Elaboración de cilindros 15 x 30. Fuente: Elaboración propia.*

- MOLDES PRISMÁTICOS 15X60
1. Llenar en dos capas de aproximadamente igual volumen, la primera a la mitad de la profundidad del molde, la segunda al borde superior, compactar con la varilla larga con el extremo redondeado distribuidas uniformemente

## Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

procurando que en el varillado de la segunda capa penetre 2 cm de la capa inferior, el número de compactaciones por capa es una por cada 14 cm<sup>2</sup> de superficie del espécimen (64 penetraciones).

2. Después del varillado, introducir y sacar una cuchara de albañil u otra herramienta adecuada en la zona de contacto de concreto y el molde en todo su perímetro; Al final golpear ligeramente las paredes del molde con el mazo, para eliminar las oquedades que deja la varilla.
3. Si a consecuencia de la compactación de la última capa, el concreto se asienta a un nivel inferior del borde superior del molde, antes del 80% de las penetraciones, se agrega concreto en una sola ocasión para mantener su nivel por encima del borde del molde todo el tiempo.
4. Se enrasa la superficie del concreto, si no se especifica el tipo de acabado, se termina la superficie con un enrasador rígido de metal y terminarlo con acabado con el mínimo de pasadas necesarias que produzca una superficie plana y uniforme que este a nivel de las orillas del molde, Ilustración 48.



Ilustración 48 Elaboración de vigas de dimensiones 15 cm x 15 cm y longitud de 60 cm.. Fuente: Elaboración propia.

### **Referencia:**

(NMX-C-159-ONNCCE, 2016)

### **3.2.5 DESMOLDE Y CURADO DE ESPECÍMENES**

Los especímenes de concreto endurecido, deben descimbrarse entre 20 y 48 horas después de su elaboración y almacenarse inmediatamente en una condición húmeda

### **Equipo:**

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

-Moldes cilíndricos, de 15 cm de diámetro x 30 cm de altura.

-Moldes para vigas, de sección transversal de 15 cm x 15 cm y longitud de 60 cm.

-Tanque de almacenamiento.

-Llave T.

-Espátula.

### **Procedimiento:**

1. Se descimbran los especímenes después de que termino su proceso de fraguado.
2. Se limpian los moldes.
3. Se llevan a la pileta de curado, asegurándose que la temperatura del agua sea de  $23 \pm 2$  °C.

### **Referencia:**

(NMX-C-159-ONNCCE, 2016)

- TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Se establece las condiciones de diseño y operación de los tanques de almacenamiento que se utilizan en la conservación de especímenes de ensayo de concreto.

### **Equipo:**

-Tanque de almacenamiento

-Termómetro.

-Cal.

### **Procedimiento:**

1. Verificar que se cumple con la temperatura de  $23 \pm 2$  °C.
2. El agua en el tanque de almacenamiento está saturada con cal para prevenir la lixiviación del hidróxido de calcio de los especímenes. El agua no saturada con hidróxido de calcio puede afectar los resultados.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

3. Para lograr que el agua esté saturada de hidróxido de calcio es necesario añadirle mínimo una cantidad de 3 gramos de cal por litro de agua para asegurar la saturación de hidróxido. El tanque se lava y se cambia el agua cada 12 meses aproximadamente.
4. El agua del tanque debe mezclarse en intervalos no mayores a un mes.
5. No deben usarse tanques que contengan flujo continuo de agua, lo ideal es un sistema cerrado de recirculación de agua saturada con cal.

**Referencia:**

(NMX-C-148-ONNCCE-2010, 2010)

**3.3. ENSAYOS AL CONCRETO ENDURECIDO**

**3.3.1 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS**

• **RESISTIVIDAD ELÉCTRICA**

La resistividad eléctrica húmeda es una propiedad intrínseca de cada material, depende en gran parte del grado de saturación de los poros de la mezcla de concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta, en función a las variables tales como: el tipo de cemento, la adición, la relación agua-cemento y la porosidad.

La resistividad eléctrica húmeda es solo uno de los parámetros que controla la corrosión del acero de refuerzo en el concreto, por lo tanto, no se considera como único criterio para definir el daño en la estructura.

**Equipo:**

- Especímenes de concreto de 15 cm Ø x 30 cm de espesor y vigas 15 x 15 x 60.
- Resistómetro.
- Tela absorbente de agua.
- Vernier
- Flexómetro

**Procedimiento:**

## Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

1. Extraemos las muestras de la pila de curado, las enumeramos para su identificación y obtenemos el diámetro y la longitud de cada una.
2. En una superficie plana y de un material que no conduzca electricidad. Colocamos en las bases del espécimen las telas absorbentes presionadas con las placas de metal, colocamos un peso extra en la base superior para garantizar el contacto eléctrico.
3. Instalamos el equipo como se muestra en la siguiente ilustración 49.
4. Sometemos las muestras a una corriente eléctrica y registramos la resistencia ( $R_e$ ) dada (se hace la prueba por lo menos 3 veces para verificar el resultado) (Ilustración 50).



Ilustración 49 Equipo de resistividad eléctrica. Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 50 Resistividad eléctrica del espécimen. Fuente: Elaboración propia.

### Cálculos:

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

Dónde:

$\rho$  = Resistividad eléctrica, en  $K\Omega$ -cm (ohm-m).

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

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

$L$  = Longitud del espécimen, en cm.

### Criterio de evaluación

Tabla 46. (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019)

Resistividad	Probabilidad de corrosión
>100-200 k $\Omega$ -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 y una velocidad de corrosión baja independientemente de la presencia de carbonatación.
50-100 k $\Omega$ -cm	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo y una velocidad de corrosión baja.
10-50 k $\Omega$ -cm	El concreto tiene una porosidad interconectada considerable, por lo que el transporte de agentes agresivos hacia al acero de refuerzo es alto, con una velocidad de corrosión alta en concretos carbonatados.
<10 k $\Omega$ -cm	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, por lo que permite el transporte de agentes agresivos hacia al acero de refuerzo de forma extremadamente rápida. La velocidad de corrosión es muy alta en concretos carbonatados.

**Referencia:**

(NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019)

("DURAR", 1998)

**3.3.2 PRUEBAS DESTRUCTIVAS**

- CABECEO DE ESPECIMENES CILINDRICOS

Establecer el procedimiento para cabeceo de especímenes con el fin de obtener la planicidad y perpendicularidad en sus bases de ensayo.

**Equipo:**

-Platos metálicos.

-Alineador para cabeceo de especímenes cilíndricos.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

-Recipiente para fundir azufre.

-Estopa o brocha.

-Aceite.

-Equipo de seguridad.

**Procedimiento:**

1. Una vez que los especímenes cumplieron la edad especificada para su ensayo, se sacan del tanque de almacenamiento, se miden, se pesan y se tapan con una manta húmeda.
2. Colocamos los platos en las bases guías, verificamos que estos estén bien guiados.
3. Con la ayuda de una estopa o brocha colocamos una capa de aceite para evitar que el compuesto de cabeceo se adhiera al plato de cabeceo.
4. Verter el compuesto para cabeceo sobre la superficie del plato de cabecear, levantar el cilindro por las guías sobre el plato mientras se mantiene en contacto constante con las guías de alineamientos. El extremo del cilindro debe continuar reposando en el plato para cabecear con los lados del cilindro en contacto constante con las guías de alineamiento.

**Referencia:**

(NMX-C-109-ONNCCE, 2013)

- COMPRESIÓN

Establecer los pasos para realizar el ensayo y la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

**Equipo:**

-Prensa calibrada.

-Cilindros cabeceados.

-Báscula.

-Flexómetro y vernier

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

-Libreta

-Placas cuadradas y platinas.

**Procedimiento:**

1. Se determina el diámetro y la altura del espécimen de ensayo, promediando a la medida de 2 diámetros perpendiculares entre sí a una altura media del espécimen y 2 alturas opuestas al espécimen, con aproximación de 1 mm.
2. Cabeceas los cilindros con azufre.
3. Se limpia la superficie de la placa superior e inferior de la máquina de ensayo, se limpian las bases de los especímenes de ensayo.
4. Se coloca sobre la placa inferior alineando su eje con el centro de la placa de carga con asiento esférico.
5. La carga se aplica con una velocidad continua sin producir impacto, ni pérdida de carga, Ilustración 51.



Ilustración 51 Compresión de cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de longitud. Fuente: Elaboración propia.

**Cálculos:**

$$f'c = \frac{F}{A}$$

Dónde:

f'c: es la resistencia a compresión (kgf/cm<sup>2</sup>)

F: Es la carga máxima (kgf)

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

A: Es el área del espécimen ( $\text{cm}^2$ )

**Referencia:**

(NMX-C-083-ONNCCE, 2014)

- **MÓDULO DE RUPTURA (MR)**

Establecer los pasos para realizar el ensayo y la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

**Equipo:**

-Prensa calibrada.

-Vigas de 15 cm por 15 cm y longitud de 60 cm.

-Tiras de cuero.

-Regla metálica.

-Marcadores.

-Flexómetro.

**Procedimiento:**

1. Una vez retirado del proceso de curado, se elimina el agua excedente de la superficie, se marca en las paredes de espécimen la distancia entre apoyos, esta distancia debe ser tres veces el peralte; esto se realiza, marcando el centro de la longitud total del espécimen, se traza una línea transversal y a partir de esta se miden 75 mm y 225 mm a cada extremo, en seguida con la escuadra se hace una marca transversal en el espécimen en la medición de 75 mm y otra marca en la medición de 225 mm.
2. Debe prevenirse el secado de la superficie de la viga del momento en que se retira del curado, hasta su ensaye, zonas secas de la superficie en especímenes para flexión, puede disminuir considerablemente la resistencia a la flexión.
3. Se coloca el dispositivo en la máquina de ensayo, en seguida el espécimen se voltea sobre un lado con respecto a la posición de moldeado, se centra en

## Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

los bloques de apoyo del dispositivo y a la vez centrado en el dispositivo a la placa de aplicación de carga; Se debe asegurar que se tenga contacto entre la aplicación de la carga y los bloques de apoyo con la superficie de la viga.

4. Antes de aplicar la fuerza, se verifica que la superficie de contacto con los apoyos no se aparte en un plano en más de 0.1 mm.
5. Se debe aplicar una carga uniforme, tal que el aumento de esfuerzo de las fibras extremas no exceda de 10 kgf/ cm<sup>2</sup>/ min, Ilustración 52.
6. Se determina el ancho y peralte del espécimen con un promedio de tres medidas, una al centro y dos cerca de los extremos del espécimen, aproximándolas al milímetro.
7. Localizar si la falla está dentro o fuera del tercio medio.



Ilustración 52 Modulo de ruptura de la viga de 15 x 60. Fuente: Elaboración propia

### Cálculos:

Primer tercio medio del claro de la viga:

$$MR = \frac{P * L}{b * d^2}$$

Dónde:

MR: Módulo de ruptura (Mpa)

P: Carga máxima aplicada (kgf).

L: Distancia entre apoyos (cm).

b: Ancho promedio del espécimen (cm).

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

d: Peralte promedio del espécimen (cm).

Fuera del tercio medio de la viga:

$$MR = \frac{3P*a}{b*d^2}$$

Dónde:

a: Es la distancia promedio entre línea de fractura y el apoyo más cercano de la superficie de la viga (cm).

**Referencia:**

(NMX-C-191-ONNCCE-2015, 2015)

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO

#### 4.1.1 REVENIMIENTO

Tabla 47 Revenimientos obtenidos del muestreo de concreto fresco en las mezclas elaboradas.

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

Para el caso de las cinco mezclas de concreto, se observa en la tabla 47, que los valores medidos de revenimiento se encuentran al límite superior y algunos revenimientos fueron mayores que el de la tolerancia recomendada por la norma NMX-C-156-ONNCCE respecto al revenimiento de diseño de 7.5 cm; es decir que, no todas las mezclas cumplieron con el revenimiento, presentando un exceso de agua en las mezclas, haciéndolas más fluidas, pero siendo trabajables para los fines de estudio. La trabajabilidad que se observó en las mezclas con adición de fibra fue diferente a la testigo, siendo que estas al momento de estar en contacto la pasta y la fibra, presentaban una mayor consistencia entre las partículas.

#### 4.1.2 POTENCIAL DE HIDRÓGENO

De acuerdo con los parámetros para medir el potencial de hidrogeno "pH", todas las mezclas dieron un valor de entre 11 y 13 (Ilustración 53), lo cual indica que las mezclas son de carácter alcalino.



Ilustración 53 Resultado de PH en la mezcla de concreto hidráulico fresco. Fuente: Elaboración propia

## 4.2 ENSAYOS AL CONCRETO ENDURECIDO

En este tipo de ensayos, constó en sacar un promedio de tres especímenes de cilindros y vigas por mezcla, de tal manera de encontrar un valor promedio a la edad de 7, 14, 28, 60 y 90 días en el caso de los cilindros, mientras que en el caso de las vigas solo se evaluaron a edades de 28 y 90 días. Después de la elaboración, desmolde y curado de todos los especímenes. Cada uno de los ensayos presentan los siguientes resultados.

### 4.2.1 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

#### 4.2.1.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA HÚMEDA

Los resultados referentes a esta prueba de ensayo se presentan en las ilustraciones 54, 55 y 56; los cuales fueron obtenidos a partir de someter cilindros de 15 cm  $\varnothing$  x 30 cm h y vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm en posición longitudinal y vertical.

- Cilindros 15 cm  $\varnothing$  x 30 cm h

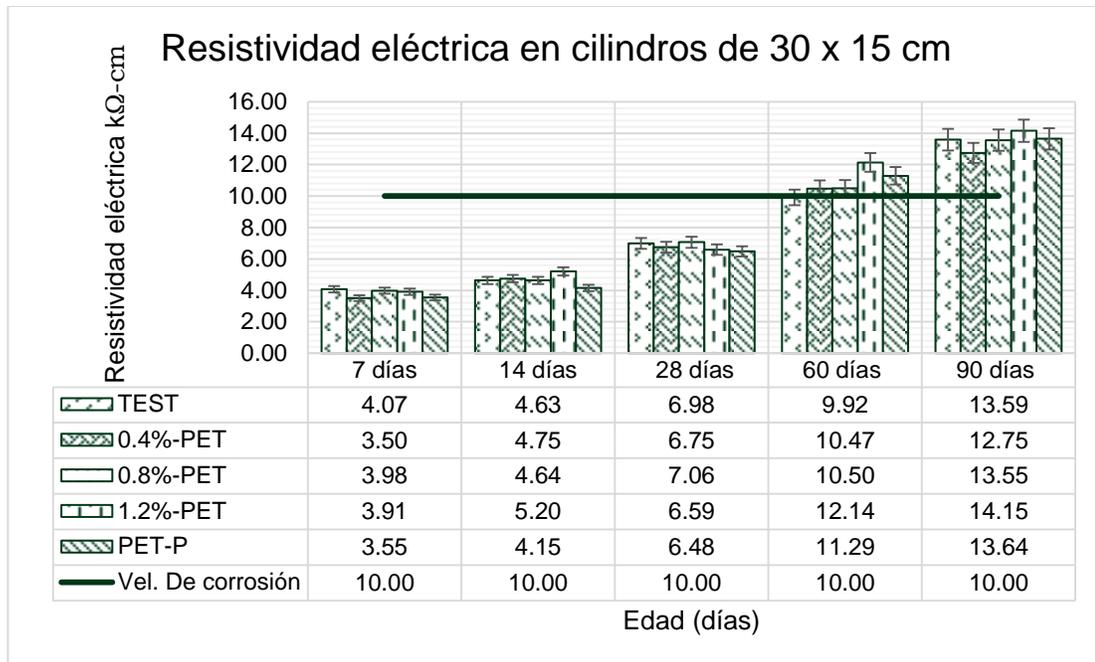


Ilustración 54 Promedio de resistividad eléctrica en cilindros de 30 x 15 a todas las edades de ensayo.

- Vigas 60 x 15 cm.

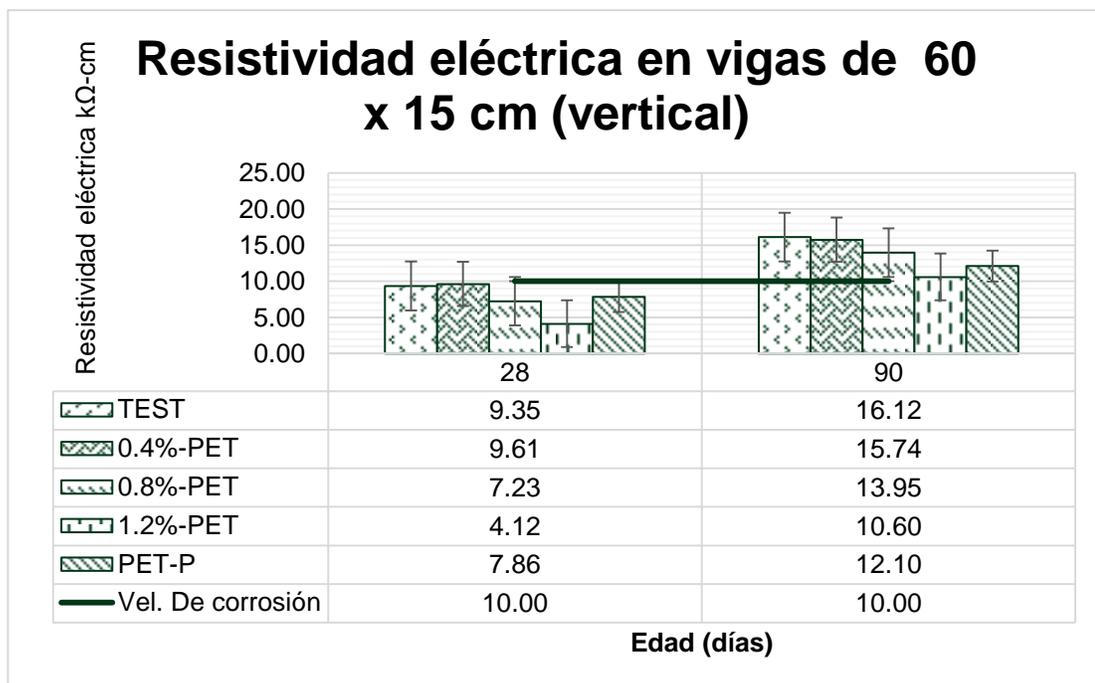


Ilustración 55 Promedio de resistividad eléctrica en vigas (horizontal) de 60 x 15 a todas las edades de ensayo.

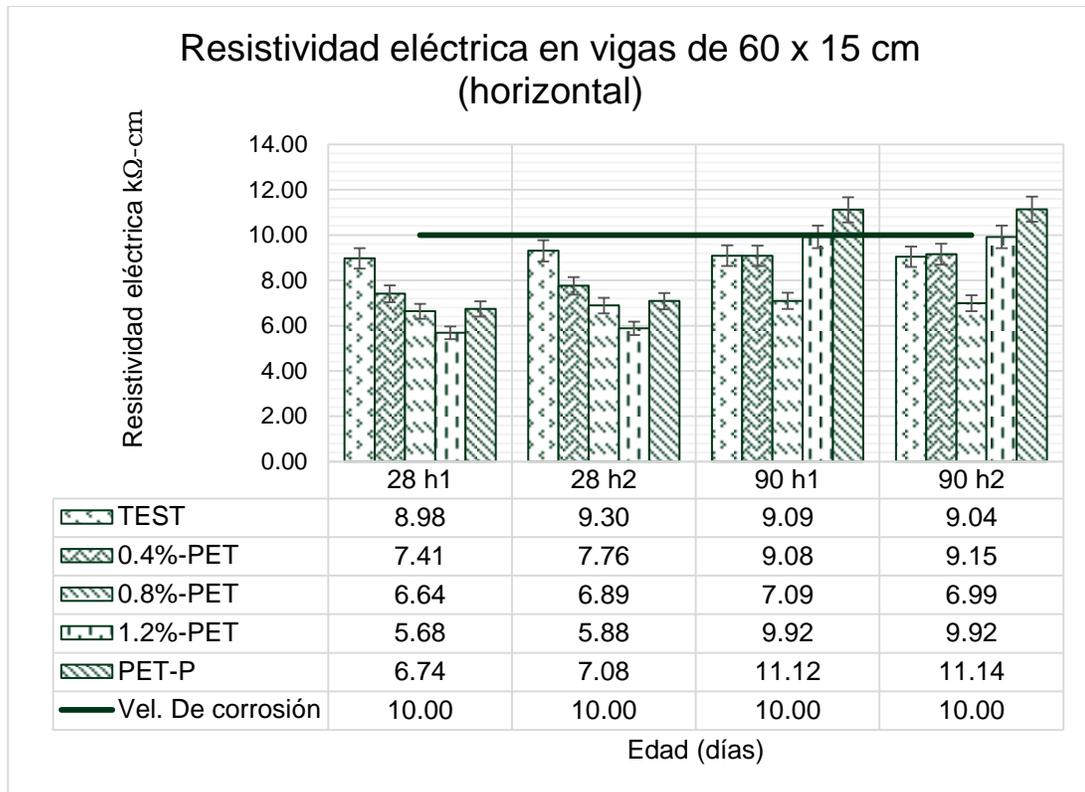


Ilustración 56 Promedio de resistividad eléctrica en vigas (verticales) de 60 x 15 a todas las edades de ensayo.

De acuerdo con lo observado en las ilustraciones del promedio de los resultados y en todas las mezclas en estudio, se presenta un incremento del valor de resistividad eléctrica al paso del tiempo, alcanzando a los 28 días de edad valores menores a 10 kΩ-cm; es decir, todas las mezclas de concreto presentan a la edad de 28 días una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos sea extremadamente acelerado, según lo especificado en la norma (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019).

Exceptuando la muestra TEST de 60 días en cilindros, todas las demás mezclas de 60 días en adelante, dieron resultados mayores de 10 kΩ-cm, mientras que las vigas analizadas de manera vertical a los 90 días superaron todas las mezclas dicho parámetro, mientras que analizadas de manera horizontal solo la muestra de PET-P fue mayor de 10 kΩ-cm.

Cabe recalcar que en vigas la mezcla de TEST de manera horizontal tuvo resultados muy parecidos de los 28 a 90 días siendo los resultados de 90 valores que se encuentran en a dentro del rango de los resultados a 28 días.

## 4.2.2 PRUEBAS DESTRUCTIVAS

### 4.2.2.1 COMPRESIÓN

La resistencia a compresión de los concretos elaborados en la presente investigación partió de un valor de diseño de 330 kg/cm<sup>2</sup> (33 MPa). Dicha resistencia, se evaluó en cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, para un periodo de ensayo de 7, 14, 28, 60 y 90 días. La ilustración 57, muestra las resistencias a compresión y el comportamiento de los diferentes especímenes de concretos respecto a las diferentes edades de la prueba de ensayo.

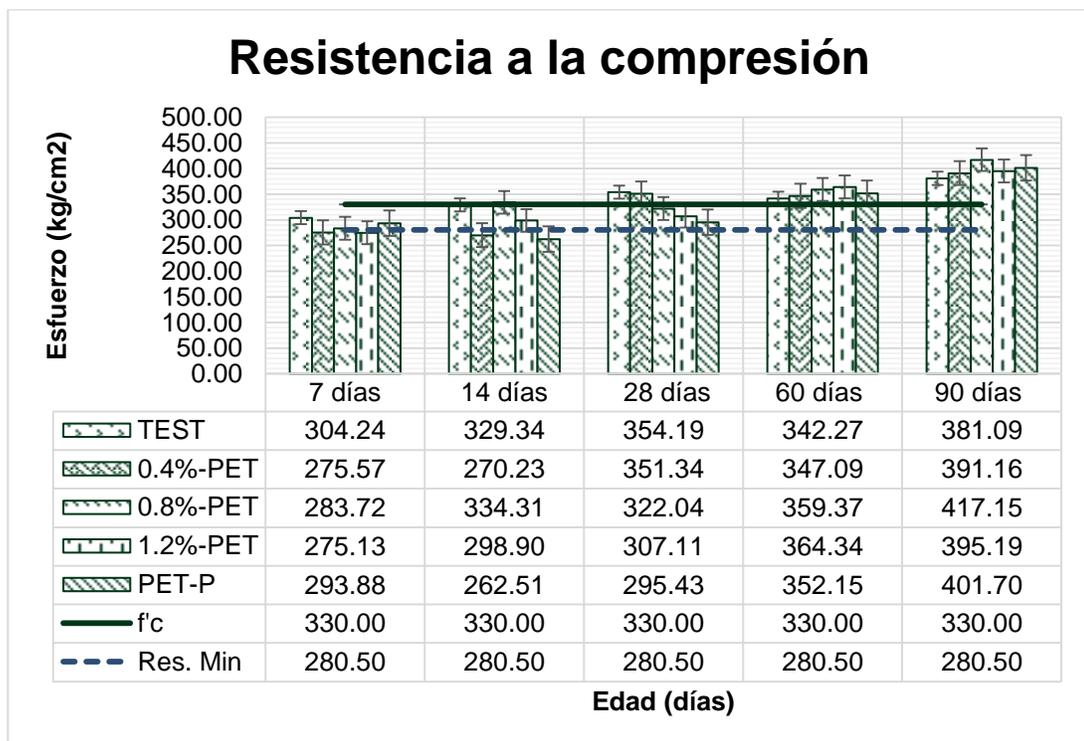


Ilustración 57 Promedios de cilindros de 15 x 30 a todas las edades de ensayo.

La única muestra que fue aumentando en cada edad de ensayo fue la de 1.2%-PET, ya que en las demás mezclas en algunas edades disminuían al pasar del tiempo.

A los 28 días la mezcla de 0.8%-PET, 1.2%-PET y PET-P no dieron los 330 kg/cm<sup>2</sup> propuestos siendo la PET-P la mezcla que tuvo peor desempeño a dicha edad, pero siguió incrementando su resistencia la mezcla, ya que a los 90 días está por debajo de la mezcla 0.8%-PET, es la de más alta resistencia, mientras que la mezcla TEST de tener los mejores resultados a 28 días, pero fue la que obtuvo el peor desempeño a las edades de 60 y 90 días

#### 4.2.2.2 MODULO DE RUPTURA (MR)

La calidad del concreto hidráulico en las losas de pavimento rígido está determinada por su módulo de ruptura o resistencia a la flexión. Los especímenes de esta investigación se evaluaron vigas de 15 cm de arista en su sección transversal por 60 cm de longitud, apoyadas en dos puntos en sus extremos y sometidas a dos cargas en el tercio medio del claro, de tal forma que se pudiera comprobar el esfuerzo a tensión por flexión de diseño de 42 kg/cm<sup>2</sup> para todas las mezclas a edades de 28 y 90 días.

De acuerdo con el gráfico de la ilustración 58, la resistencia a la flexión tomó un comportamiento diferente a lo obtenido en el ensayo de resistencia a la compresión a 28 días, pero a 90 días dieron resultados más parecidos.

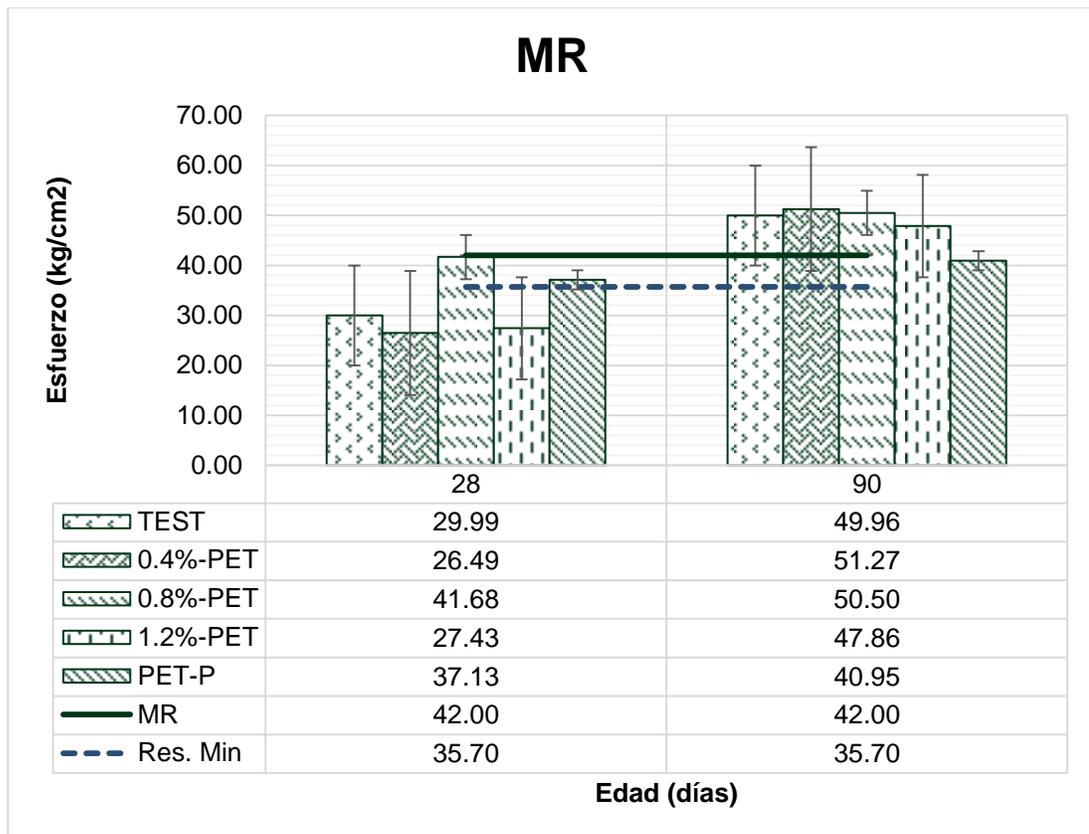


Ilustración 58 Promedio de Módulo de Ruptura en vigas de 60 x 15 a todas las edades de ensayo.

Como se muestra en la ilustración anterior ninguna de las vigas llegó a los 42 kg/cm<sup>2</sup> propuesto a 28 días, pero a los 90 días la mayoría de las vigas superaron dicho rango a excepción de los especímenes PET –P.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

La mezcla que tuvo un comportamiento constante fue la de 0.8%-PET ya que a los 28 días fue la más cercana de alcanzar los 42 kg/cm<sup>2</sup> a 28 días. Y a los 90 días fue la segunda con los mejores resultados ya que la que mejor trabajo a esta edad fue la de 0.4%-PET.

En las mezclas Test, 0.4%-PET y 1.2%-PET variaron demasiado los resultados de acuerdo a sus edades de ensayo ya que de tener valores menores que la mezcla de PET-P a 28 días, a los 90 días dieron mejores resultados que dicha muestra.

#### 4.2.3 CORRELACIONES

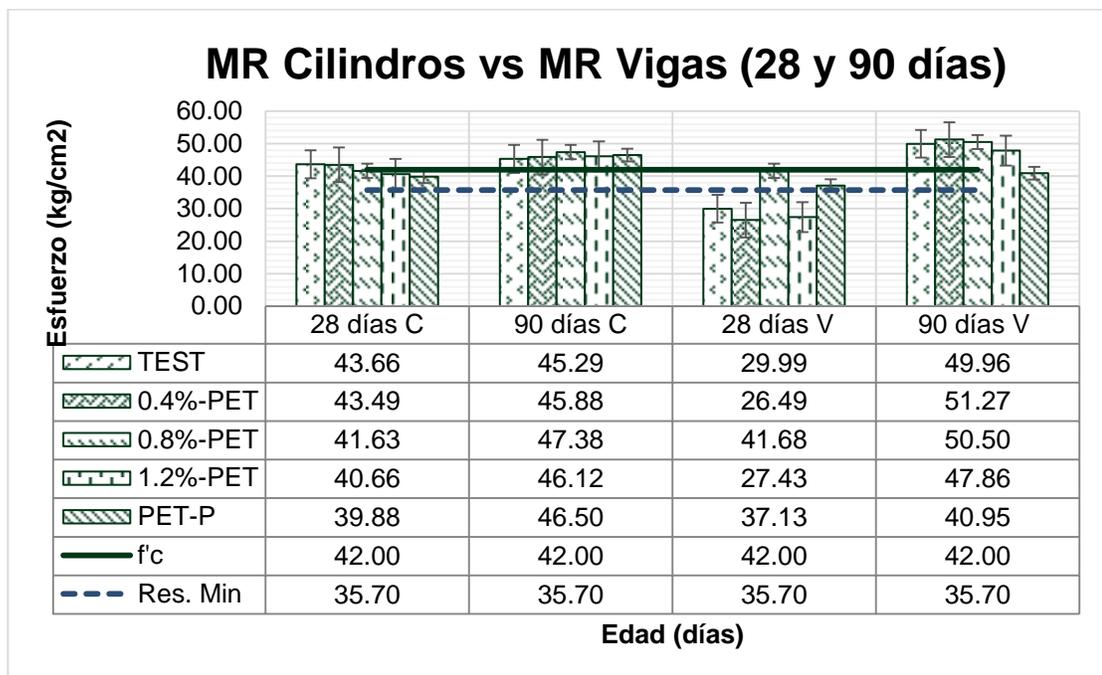


Ilustración 59 Correlación de cilindros a compresión Vs vigas a flexión en MR.

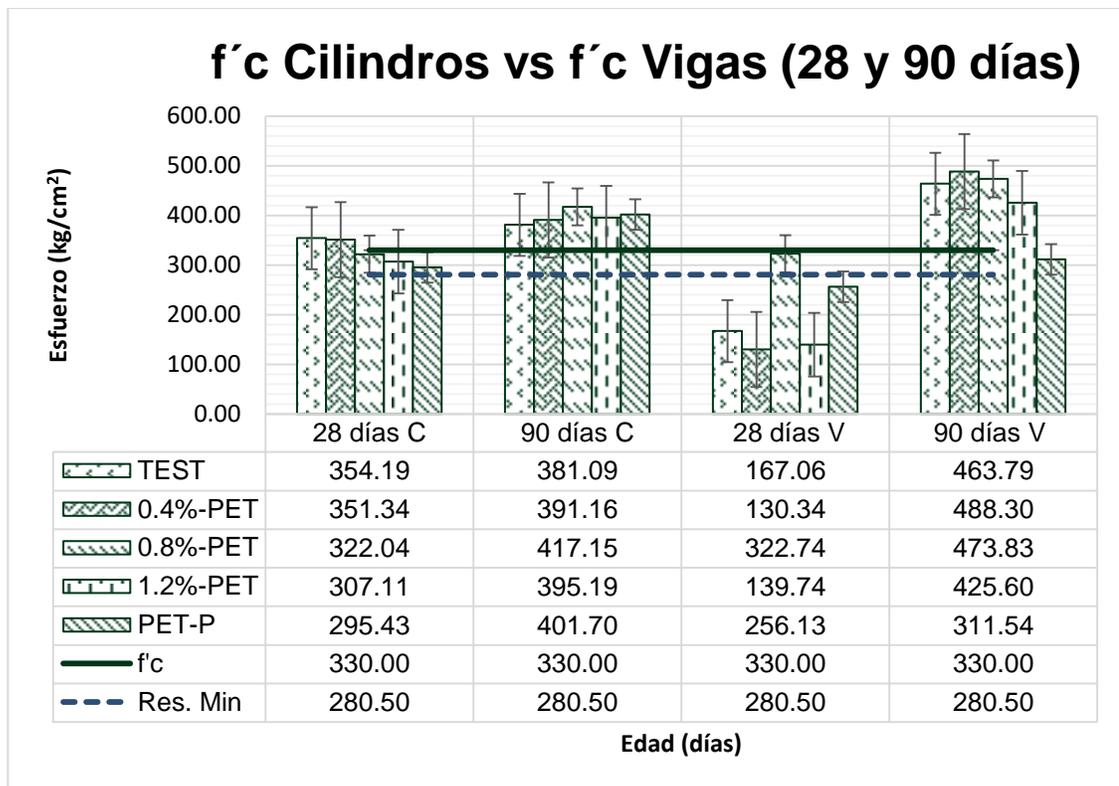


Ilustración 60 Correlación de cilindros a compresión con vigas a flexión en f'c.

Se puede observar en las ilustraciones 59 y 60, que la mezcla que mejor se comportó tanto a flexión, como en compresión fue la mezcla de 0.8%-PET ya que a 28 días los resultados fueron casi iguales a los parámetros de diseño, mientras que a 90 días tuvo un mejor comportamiento a flexión que a compresión.

La muestra testigo y 0.4% PET cumplieron con el f'c de diseño a 28 días a compresión, mientras que a flexión ninguna de las mezclas llegó al diseño, pero a 90 días tuvieron mejor comportamiento a flexión que a compresión, excepto la muestra de PET-P tuvo un bajo rendimiento a flexión ya que no llegó al MR de diseño, mientras que todos los demás especímenes superaron por bastante a 90 días el diseño de la muestra.

Los especímenes se comportaron mejor a compresión que a flexión ya que fueron resultados con menos variación tanto en mezcla, como en edades de ensayo, ya que a flexión las vigas siguieron evolucionando en su desempeño y fueron mayores que los cilindros a 90 días.

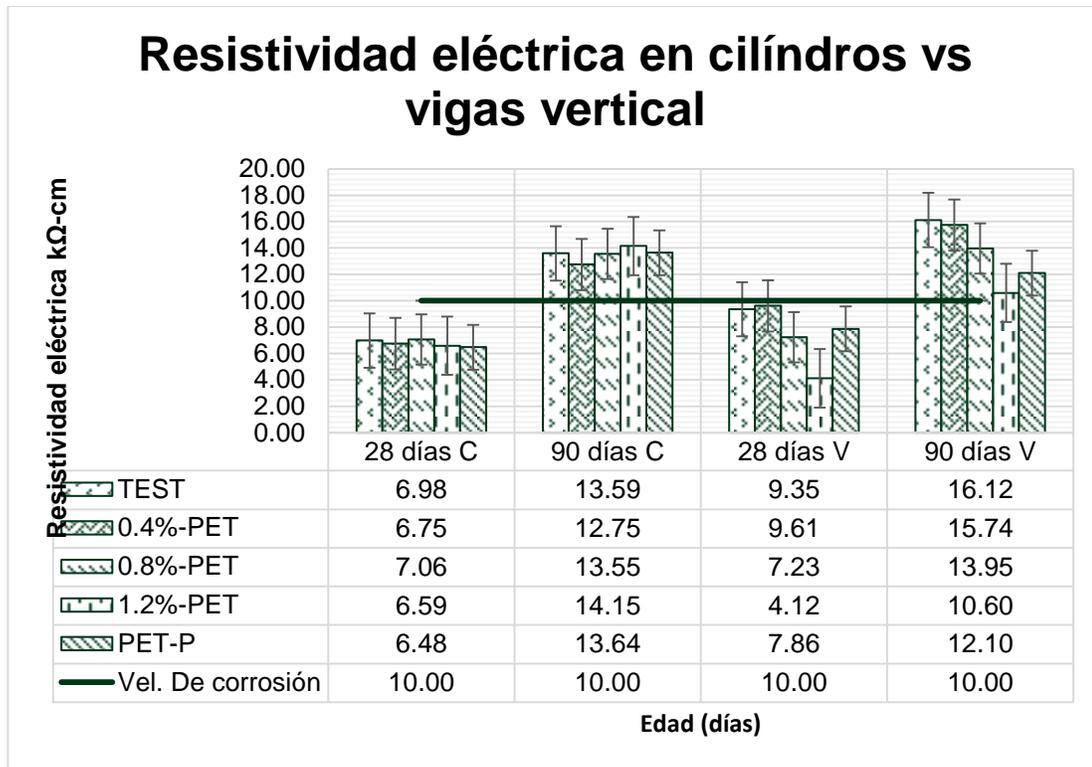


Ilustración 61 Correlación de resistividad eléctrica en cilindros y vigas a 28 y 90 días.

En cilindros tanto a 28 como a 90 días los resultados entre los especímenes de las mezclas fueron más similares que a flexión en las vigas, como se puede ver en la ilustración 61.

Al ser la Resistividad Eléctrica Húmeda una medida indirecta de la porosidad efectiva, es decir de los poros interconectados, así como de la tortuosidad, que quiere decir la facilidad con que los iones despasivantes pueden transportarse a través de la masa de concreto, en este caso la intensidad de la corriente eléctrica, se observa que la porosidad interconectada va disminuyendo conforme pasa el tiempo y el concreto se sigue hidratando, incrementando el Gel de Tobermorita (Hidrato de Silicato de Calcio). A los 28 días, la RE en vigas es mayor un 12.7% que en cilindros. Probablemente se debe a la forma en que fueron llenados los especímenes, ya que no debería haber gran variación o incremento, ya que RE es una propiedad intensiva del material y al aplicar la fórmula para calcular la Re, se toma en cuenta el factor de forma de los especímenes. Todas las vigas tienen mayor RE, excepto la mezcla 1.2%-PET, pudiendo esto deberse a la forma de colado de los especímenes, entre otros factores, como el curado.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Para el caso de los 90 días, el incremento promedio de RE de vigas sobre cilindros sólo fue del 1.5%, y se consideran los mismos factores antes mencionados. Sin embargo, también existe una disminución en la RE de las mezclas 1.2%-PET y PET-P, respecto a su propia RE a los 28 días, lo cual indicaría un aumento de su porosidad efectiva, sin tenerse una explicación clara de este motivo, ya que el MR sí se incrementó, lo que indica la evolución propia de los compuestos del cemento, respecto a su hidratación.

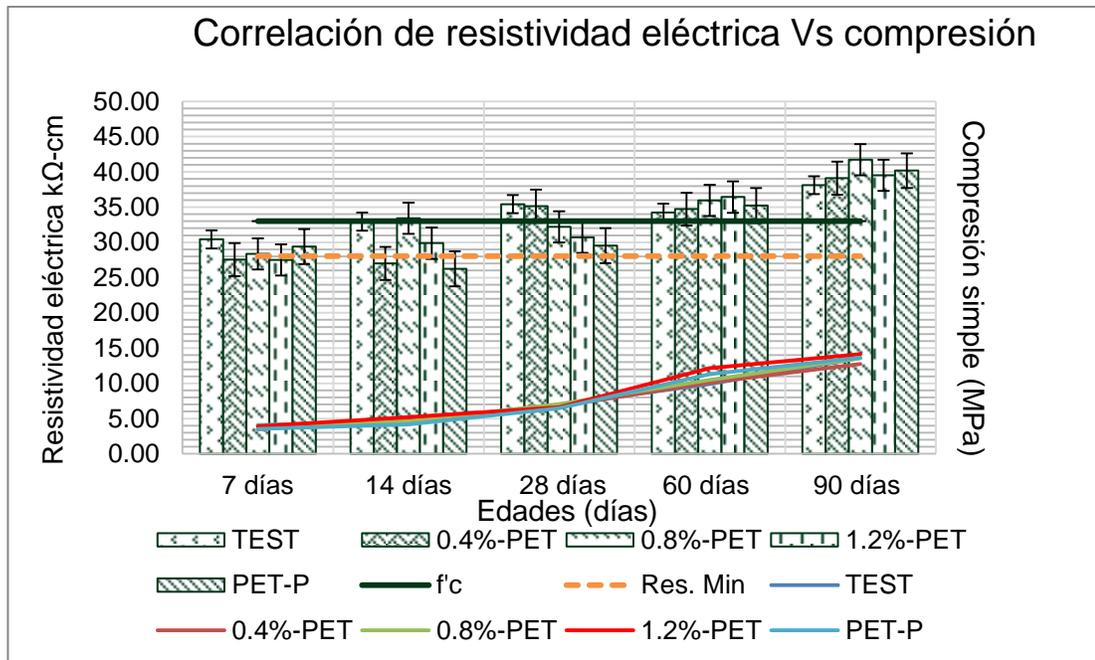


Ilustración 62 Correlación de resistividad eléctrica vs compresión en cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura.

Como se muestra en la ilustración 62 al pasar del tiempo aumenta tanto la resistividad eléctrica, como la resistencia a la compresión, teniendo ligeras variaciones en algunos especímenes de 7 a 14 días en compresión, ya que disminuyó su resistencia.

Los especímenes que obtuvieron mayor resistividad eléctrica durante las edades de ensayo fue la de 1.2%-PET, pero en compresión las mezclas fueron comportándose de diferente manera ya que a 28 días solo 2 muestras dieron resultados mayores que el  $f'c$  propuesto para dicha edad de ensayo.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Aunque cabe resaltar que a 90 días fueron las que obtuvieron los resultados más bajos a compresión. Esto nos dice, que estos especímenes no tienen tanta evolución de resistencia a compresión  $f_c$  que las demás mezclas.

## 5 CONCLUSIONES

- Los especímenes que tuvieron un comportamiento más congruente respecto a lo esperado en las pruebas de concreto endurecido tanto en destructivas, como en no destructivas, fue la, mezcla de 0.8%-PET, ya que la variación de resistividad, compresión y Módulo de ruptura fueron parecidos a los resultados esperados de  $f'c$  y RE, respectivamente.
- La mezcla de PET-P fue la que en la mayoría de las pruebas tuvo un comportamiento diferente, ya que a los 28 días tenía un mejor comportamiento a flexión, pero ya a los 90 días tuvo un mejor comportamiento a la compresión, lo mismo con la resistividad eléctrica a 28 días, que tenía resultados mayores en MR en vigas, pero en los cilindros cambió, ya que fue mayor la resistividad eléctrica.
- Las mezclas de TEST y 0.4%-PET tuvieron mejor comportamiento a compresión, aunque a 90 días aumentaron mucho sus resultados, ya que dieron más altos resultados a flexión que en compresión, respecto a los parámetros de diseño, lo que nos quiere decir que estas mezclas tardan en incrementar su resistencia a la flexión. En la resistividad eléctrica dieron valores más altos las vigas, medida esta Re de forma vertical, que en cilindros.
- En los especímenes de la mezcla 1.2%-PET la resistividad eléctrica fue muy baja por lo tanto al tener más fibras que en las demás mezclas, no hay tantos poros interconectados, mientras que en las pruebas destructivas tuvo con la mayoría de las mezclas mejor comportamiento a la compresión, pero con el pasar del tiempo tuvo mejores resultados a flexión, aunque en esta muestra de ensayo fue muy poca la diferencia a 90 días.
- Los especímenes de las mezclas dieron resultados muy variados y algunos no alcanzaron los  $330 \text{ kg/cm}^2$  de MR propuestos para este diseño, esto se puede deber a varios factores y que en la elaboración de los especímenes al ser varias personas varillándolas, así como el vibrado, las muestras se comportaron de diferente manera. Otros de los factores fue el tanque de almacenamiento ya que al no tener un calentador de agua para mantener una temperatura constante de  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  como lo dice en la norma NMX-C-ONNCCE-148, puede hacer que, al tener variaciones de temperatura den resultados muy diferentes a los que dieron en esta investigación, en el caso

particular de los cilindros nos pudieron también dar más altos resultados al mejorar el cabeceo del azufre con arena como lo hacen algunos laboratorios aquí en Morelia y también checar la planicidad como el tamaño del grosor del cabeceo como lo dice en la norma NMX-C-106-ONNCCE.

- Al tener varios operadores probando las muestras fue otro de los factores que influyeron en la variación de resultado según la norma de cilindros a compresión (NMX-C-088-ONNCCE, 2019), ya que dice que un mismo espécimen por un mismo operador debe tener una variación del 16%, pero al ser más de un operador se puede tener una variación del 19%
- La anterior norma también menciona que hay que tener una velocidad constante de  $2.55 \pm 0.51 \text{ kg/cm}^2$ , lo cual por cuestiones de otras pruebas no cumplimos con este parámetro que menciona la norma.
- Se estima que se pudo mejorar la flexión de las vigas con un tamaño máximo de agregado mayor con el que se diseñó.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- "DURAR", R. I. (1998). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (Tercera Edición ed.)*. CYTED. CYTED.
- AMCI. (2021). *Asociación Mexicana de Concreteros Independientes*. Obtenido de <http://www.amciac.org/>
- Antillón, J. (2016). *USO DE FIBRAS EN EL CONCRETO*. Construcción y tecnología del concreto.
- Askeland, D.R. (2016). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. . EEUU: Cengage Learning.
- Association, N. R. (1998). *Resistencia a la Flexión del concreto*. Silver Spring, Maryland: NRMCA.
- ASTM-C-150. (2016). *Standard Specification for Portland Cement*. . ASTM.
- ASTM-C-266. (2015). *Standard Test Method For Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles*.
- Blancas Herrera, V. H. (2020). Evaluación de mezclas de concreto modificadas con PET reciclado y adición mineral; su influencia en el módulo de ruptura y en la durabilidad de pavimentos rígidos. En V. H. Blancas Herrera, *Evaluación de mezclas de concreto modificadas con PET reciclado y adición mineral; su influencia en el módulo de ruptura y en la durabilidad de pavimentos rígidos* (págs. 22,25,26,27,30,34,35,60,62,63,64,67,68). Morelia, Michoacán: FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO.
- Castro Mondragón, F., Pérez Salazar, A., Garnica Anguas, P., & Hernández Domínguez, R. I. (2021). *Caracterización de espectros de carga en la red carretera mexicana*. Sanfandila, Qro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Civil Geek. (2020). *Civilgeeks.com*. Recuperado el 2021, de <https://civilgeeks.com/2011/03/18/resistencia-a-la-flexion-del-concreto/>

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Córdoba, Á., Barrera, M., Barrera Díaz, Ureña Nuñez, & Loza Yañez. (2015). *PET de Desecho y su uso en Concreto*. Barcelona, España: OmniaScience.

Flores Fernández, J. A. (2014). *Efecto en las propiedades en tensión de un material compuesto base cemento reforzado con fibras de PET reciclado*. Chihuahua, Chihuahua: CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS S.C. POSGRADO.

Grupo Argos. (2020). Argos. Obtenido de <https://www.360enconcreto.com/blog>

Haratun, K. (2003). *Handbook of Polypropylene and Polypropylene composites*. New York: Marcel Dekker.

Hayasaka Reyes, J., & Peñafiel Soto, F. (1996). *PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRAULICO EN CARRETERAS*. MEXICO, D.F.: INSTITUTO TECNOLOGICO DE LA CONSTRUCCIÓN, A.C.

IMCYC. (2007). Concreto Reforzado con Fibras. *El concreto en la obra, problemas, caudas y soluciones*.

IMCYC. (2015). *Pruebas de Agregados*. México: IMCyC.

Inciarte Melan, C. (2012). *Análisis Comparativo de método de diseño y construcción de pavimentos de concreto hidráulico según normas aplicadas en México, Reino Unido y España*. México: UNAM.

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Chicago, EE.UU: Portland Cement Association, PCA.

M MMP 4 04 006/18. (2018). *Resistencia a la degradación del Agregado Grueso mediante la Máquina de los Ángeles*. México: SCT.

Metha, K., & Monteiro, P. (2013). *Concreto, Estructura, Propiedades y Materiales*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.

Meza de Luna, A., Gurbir, K., Preciado Martínez, H. J., & Gutiérrez López, I. A. (2021). Desempeño a Flexión del Concreto Reforzado con Fibras Plásticas Recicladas. *Conciencia Tecnológica*(núm. 61).

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Miranda Rebolledo, R. J. (2010). *DETERIOROS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES Y RÍGIDOS*. Valdivia , Chile: Universidad Austral de Chile.

M-MMP-2-02-032. (2018). *MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES*. En *Resistencia a la Degradación del Agregado Grueso mediante la Máquina de Los Ángeles*. SCT.

Moreno, E. (2006). Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación . *Ingeniería*, 10-3, 5-12.

National Ready Mixed Concrete Association. (1998). *Resistencia a Flexión del concreto*. Silver Spring, Maryland: NRMCA.

Neville, A., & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology*. England: ISBN 978-0-273-73219-8.

Neville, Adam. (2013). *Tecnología del Concreto*. Mexico: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.

NMX-C-030-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción-Agregados-Muestreo*. ONNCCE.

NMX-C-057-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidáulcos-Determinación de la Consistencia Normal*. ONNCCE.

NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción-Agregados-Masa Volumétrica-Método de Prueba*. ONNCCE.

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*. ONNCCE.

NMX-C-083-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes-Método de Ensayo*. ONNCCE.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

NMX-C-088-ONNCCE. (2019). *Industria de la Construcción-Agregados Pétreos-Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino-Método de Ensayo*. ONNCCE.

NMX-C-109-ONNCCE. (2013). *Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico-Cabeceo de Especímenes*. ONNCCE.

NMX-C-111-ONNCCE. (2018). *Industria de la Construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE.

NMX-C-122-ONNCCE. (2019). *Industria de la Construcción - Agua para Concreto - Especificaciones*. ONNCCE.

NMX-C-148-ONNCCE-2010. (2010). *Industria de la Construcción - Cementos y Concretos Hidráulicos - Gabinetes, Cuartos Húmedos y Tanques de Almacenamiento - Condiciones de Diseño y Operación*. México: ONNCCE.

NMX-C-152-ONNCCE-2015. (2015). *Industria de la Construcción - Cemento Hidráulico - Determinación de la Densidad*. ONNCCE.

NMX-C-155-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Dosificado en Masa Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE.

NMX-C-156-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico-Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco*. ONNCCE.

NMX-C-159-ONNCCE. (2016). *Industria de la Construcción-Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo*. ONNCCE.

NMX-C-164-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso*. ONNCCE.

NMX-C-165-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Fino - Método de Ensayo*. ONNCCE.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

NMX-C-170-ONNCCE. (2019). *Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo al Tamaño Requerido para los Ensayos*. ONNCCE.

NMX-C-191-ONNCCE-2015. (2015). *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto Usando una Viga Simple con Carga en los Tercios del Claro*. México: ONNCCE.

NMX-C-414-ONNCCE. (2017). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE.

NMX-C-514-ONNCCE-2019. (2019). *Industria de la Construcción-Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico-Especificaciones y Método de Ensayo*. ONNCCE.

NMX-C-515-ONNCCE. (2016). *Industria de la Construcción-Durabilidad- Determinación de la Profundidad de Carbonatación en Concreto Hidráulico-Especificaciones y Método de Ensayo*. ONNCCE.

NMX-C-515-ONNCCE-2016. (2016). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Durabilidad - Determinación de*. ONNCCE.

NMX-C-530-ONNCCE. (2018). *Industria de la Construcción - Durabilidad - Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Criterios y Especificaciones*. ONNCCE.

NMX-C-ONNCCE-2013. (2013). *Industria de la Construcción - Concreto Fresco - Muestreo*. México: ONNCCE.

Portugal Barriga, P. (2007). *Tecnología del concreto de lato desempeño* .

Quintero Blandón, C. F., & Mahecha Rico, J. D. (2016). *PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PET RECICLADO*. Bogotá D.C.: Universidad Militae Nueva Granada.

Ramírez Luna, D. S. (2011). *Tesis Propuesta de un material compuesto con base al PET reciclado con aplicaciones en construcción*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Reynosa Morales, L. M., Olguín Coca, F. J., Guillén Trujillo, H. A., Alonso Farrera, F. A., Castro Borges, P., López González, A., y otros. (2017). Evaluación de la sustentabilidad de diferentes técnicas de producción de concreto hidráulico basado en su control de calidad. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, vol. 7(núm. 1), pp. 87-103.

Santos Cortés, L. (2006). *Contribución de fibras PP provenientes de plásticos reciclados en el agrietamiento y resistencia del concreto en pavimentos portuarios de Veracruz*. Veracruz, México: Universidad Veracruzana.

Shetty, M. (2005). *Concrete Technology Theory and Practice*. New Dheli India: Chand and Companu LTD.

Uribe García, M. A. (2016). *Geotecnia y Pavimentos*. Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres A. C

## 7 ANEXOS

Tabla 48 Resistividad Eléctrica de cilindros de 15 x 30 a 7 días.

Muestra	Edad (días)	D (cm)	L (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	Re (KΩ)	ρ (KΩ-cm)
TES	7	15.00	30.10	176.71	728	4.27
TES	7	15.00	30.00	176.71	681	4.01
TES	7	15.00	29.90	176.71	665	3.93
0.40%	7	15.00	30.40	176.71	630	3.66
0.40%	7	15.00	30.50	176.71	572	3.31
0.40%	7	15.00	30.00	176.71	600	3.53
0.80%	7	15.00	30.10	176.71	688	4.04
0.80%	7	15.00	29.05	176.71	660	4.01
0.80%	7	15.00	30.05	176.71	661	3.89
1.20%	7	15.00	30.00	176.71	680	4.01
1.20%	7	15.00	30.40	176.71	635	3.69
1.20%	7	15.00	30.00	176.71	685	4.03
P	7	15.00	29.80	176.71	560	3.32
P	7	15.00	29.90	176.71	610	3.61
P	7	15.00	30.00	176.71	630	3.71

Tabla 49 Resistividad Eléctrica de cilindros de 15 x 30 a 14 días.

Muestra	Edad (días)	D (cm)	L (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	Re (KΩ)	ρ (KΩ-cm)
TES	14	15.00	30.00	176.71	810	4.77
TES	14	15.00	29.85	176.71	748	4.43
TES	14	15.00	30.50	176.71	812	4.70
0.40%	14	15.00	30.00	176.71	815	4.80
0.40%	14	15.00	29.90	176.71	800	4.73
0.40%	14	15.00	29.90	176.71	797	4.71
0.80%	14	15.00	30.35	176.71	790	4.60
0.80%	14	15.00	30.55	176.71	805	4.66
0.80%	14	15.00	30.00	176.71	790	4.65
1.20%	14	15.00	30.40	176.71	850	4.94
1.20%	14	15.00	30.00	176.71	930	5.48
1.20%	14	15.00	30.00	176.71	880	5.18
P	14	15.00	30.00	176.71	705	4.15
P	14	15.00	29.80	176.71	660	3.91
P	14	15.00	30.00	176.71	745	4.39

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Tabla 50 Resistividad Eléctrica de cilindros de 15 x 30 a 28 días.

Muestra	Edad (días)	D (cm)	L (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	Re (KΩ)	ρ (KΩ-cm)
TES	28	15.00	29.95	176.71	1150	6.79
TES	28	15.00	29.90	176.71	1300	7.68
TES	28	15.00	30.00	176.71	1100	6.48
0.40%	28	15.00	30.10	176.71	1200	7.05
0.40%	28	15.00	30.40	176.71	1050	6.10
0.40%	28	15.00	29.90	176.71	1200	7.09
0.80%	28	15.00	29.85	176.71	1280	7.58
0.80%	28	15.00	30.00	176.71	1150	6.77
0.80%	28	15.00	29.75	176.71	1150	6.83
1.20%	28	15.00	30.10	176.71	1120	6.58
1.20%	28	15.00	30.10	176.71	1150	6.75
1.20%	28	15.00	30.20	176.71	1100	6.44
P	28	15.00	30.05	176.71	1150	6.76
P	28	15.00	30.00	176.71	1050	6.19
P	28	15.00	29.90	176.71	1100	6.50

Tabla 51 Resistividad Eléctrica de cilindros de 15 x 30 a 60 días.

Muestra	Edad (días)	D (cm)	L (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	Re (KΩ)	ρ (KΩ-cm)
TES	60	15.00	30.00	176.71	1700	10.01
TES	60	15.00	30.10	176.71	1650	9.69
TES	60	15.00	29.90	176.71	1700	10.05
0.40%	60	15.00	30.20	176.71	1800	10.53
0.40%	60	15.00	30.10	176.71	1800	10.57
0.40%	60	15.00	30.00	176.71	1750	10.31
0.80%	60	15.00	30.10	176.71	1800	10.57
0.80%	60	15.00	30.00	176.71	1800	10.60
0.80%	60	15.00	29.95	176.71	1750	10.33
1.20%	60	15.00	30.05	176.71	2000	11.76
1.20%	60	15.00	30.10	176.71	2100	12.33
1.20%	60	15.00	30.10	176.71	2100	12.33
P	60	15.00	29.90	176.71	1800	10.64
P	60	15.00	30.10	176.71	2050	12.04
P	60	15.00	30.00	176.71	1900	11.19

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Tabla 52 Resistividad Eléctrica de cilindros de 15 x 30 a 90 días.

Muestra	Edad (días)	D (cm)	L (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	Re (KΩ)	ρ (KΩ-cm)
TES	90	15.00	30.00	176.71	2100	12.37
TES	90	15.00	30.50	176.71	2500	14.48
TES	90	15.00	30.50	176.71	2400	13.91
0.40%	90	15.00	30.10	176.71	2100	12.33
0.40%	90	15.00	30.10	176.71	2500	14.68
0.40%	90	15.00	29.90	176.71	1900	11.23
0.80%	90	15.00	30.25	176.71	2400	14.02
0.80%	90	15.00	30.00	176.71	2300	13.55
0.80%	90	15.00	30.40	176.71	2250	13.08
1.20%	90	15.00	31.10	176.71	2600	14.77
1.20%	90	15.00	31.10	176.71	2800	15.91
1.20%	90	15.00	30.00	176.71	2000	11.78
P	90	15.00	30.15	176.71	2200	12.89
P	90	15.00	30.00	176.71	2200	12.96
P	90	15.00	30.50	176.71	2600	15.06

Vertical.

Tabla 53 Resistividad Eléctrica de vigas de manera vertical de 60 x 15 a 28 días.

Muestra	Edad (días)	L (cm)	Lado (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	Re (KΩ)	ρ (KΩ-cm)
TES	28	60.00	15.00	225.00	2500	9.38
TES	28	60.10	15.00	225.00	2500	9.36
TES	28	60.30	15.00	225.00	2500	9.33
0.40%	28	60.10	15.00	225.00	2550	9.55
0.40%	28	60.00	15.00	225.00	2600	9.75
0.40%	28	60.10	15.00	225.00	2550	9.55
0.80%	28	60.20	15.00	225.00	2100	7.85
0.80%	28	60.10	15.00	225.00	1950	7.30
0.80%	28	60.10	15.00	225.00	1750	6.55
1.20%	28	60.10	15.00	225.00	1100	4.12
1.20%	28	60.05	15.00	225.00	1100	4.12
1.20%	28	60.10	15.00	225.00	1100	4.12
P	28	60.00	15.00	225.00	2100	7.88
P	28	60.00	15.00	225.00	2000	7.50
P	28	60.30	15.00	225.00	2200	8.21

Tabla 54 Resistividad Eléctrica de vigas de manera vertical de 60 x 15 a 90 días.

Muestra	Edad (días)	D (cm)	L (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	Re (KΩ)	ρ (KΩ-cm)
---------	-------------	--------	--------	----------------------	---------	-----------

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

TES	90	60.00	15.00	225.00	4400	16.50
TES	90	60.00	15.00	225.00	4150	15.56
TES	90	60.10	15.00	225.00	4350	16.29
0.40%	90	60.05	15.00	225.00	4200	15.74
0.40%	90	60.00	15.00	225.00	4100	15.38
0.40%	90	60.10	15.00	225.00	4300	16.10
0.80%	90	60.20	15.00	225.00	3600	13.46
0.80%	90	60.20	15.00	225.00	3600	13.46
0.80%	90	60.20	15.00	225.00	4000	14.95
1.20%	90	60.20	15.00	225.00	2900	10.84
1.20%	90	60.20	15.00	225.00	2800	10.47
1.20%	90	60.10	15.00	225.00	2800	10.48
P	90	60.20	15.00	225.00	3100	11.59
P	90	60.00	15.00	225.00	3200	12.00
P	90	60.15	15.00	225.00	3400	12.72

Horizontal 1.

Tabla 55 Resistividad Eléctrica de vigas de Horizontal 1 de 60 x 15 a 28 días.

Muestra	Edad (días)	L (cm)	Lado (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	Re (KΩ)	ρ (KΩ-cm)
TES	28	14.90	15.00	225.00	600	9.06
TES	28	15.20	15.00	225.00	615	9.10
TES	28	15.15	15.00	225.00	590	8.76
0.40%	28	15.15	15.00	225.00	545	8.09
0.40%	28	15.10	15.00	225.00	515	7.67
0.40%	28	15.15	15.00	225.00	435	6.46
0.80%	28	15.10	15.00	225.00	505	7.52
0.80%	28	15.10	15.00	225.00	430	6.41
0.80%	28	15.05	15.00	225.00	400	5.98
1.20%	28	15.20	15.00	225.00	380	5.63
1.20%	28	15.05	15.00	225.00	395	5.91
1.20%	28	15.10	15.00	225.00	370	5.51
P	28	15.30	15.00	225.00	450	6.62
P	28	15.30	15.00	225.00	430	6.32
P	28	15.15	15.00	225.00	490	7.28

Tabla 56 Resistividad Eléctrica de vigas de Horizontal 1 de 60 x 15 a 28 días.

Muestra	Edad (días)	D (cm)	L (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	Re (KΩ)	ρ (KΩ-cm)
TES	90	15.10	15.00	225.00	595	8.87
TES	90	15.10	15.00	225.00	600	8.94
TES	90	15.10	15.00	225.00	635	9.46
0.40%	90	15.20	15.00	225.00	600	8.88

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

0.40%	90	15.30	15.00	225.00	580	8.53
0.40%	90	15.10	15.00	225.00	660	9.83
0.80%	90	15.15	15.00	225.00	545	8.09
0.80%	90	15.10	15.00	225.00	390	5.81
0.80%	90	15.10	15.00	225.00	495	7.38
1.20%	90	15.10	15.00	225.00	715	10.65
1.20%	90	15.25	15.00	225.00	640	9.44
1.20%	90	15.15	15.00	225.00	650	9.65
P	90	15.30	15.00	225.00	710	10.44
P	90	15.15	15.00	225.00	725	10.77
P	90	15.20	15.00	225.00	820	12.14

Horizontal 2.

Tabla 57 Resistividad Eléctrica de vigas de Horizontal 2 de 60 x 15 a 28 días.

Muestra	Edad (días)	L (cm)	Lado (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	Re (KΩ)	ρ (KΩ-cm)
TES	28	14.90	15.00	225.00	670	10.12
TES	28	15.20	15.00	225.00	615	9.10
TES	28	15.15	15.00	225.00	585	8.69
0.40%	28	15.15	15.00	225.00	540	8.02
0.40%	28	15.10	15.00	225.00	565	8.42
0.40%	28	15.15	15.00	225.00	460	6.83
0.80%	28	15.10	15.00	225.00	500	7.45
0.80%	28	15.10	15.00	225.00	425	6.33
0.80%	28	15.05	15.00	225.00	460	6.88
1.20%	28	15.20	15.00	225.00	380	5.63
1.20%	28	15.05	15.00	225.00	400	5.98
1.20%	28	15.10	15.00	225.00	405	6.03
P	28	15.30	15.00	225.00	470	6.91
P	28	15.30	15.00	225.00	450	6.62
P	28	15.15	15.00	225.00	520	7.72

Tabla 58 Resistividad Eléctrica de vigas de Horizontal 2 de 60 x 15 a 90 días.

Muestra	Edad (días)	D (cm)	L (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	Re (KΩ)	ρ (KΩ-cm)
TES	90	15.10	15.00	225.00	610	9.09
TES	90	15.10	15.00	225.00	590	8.79
TES	90	15.10	15.00	225.00	620	9.24
0.40%	90	15.20	15.00	225.00	615	9.10
0.40%	90	15.30	15.00	225.00	595	8.75

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

<b>0.40%</b>	<b>90</b>	15.10	15.00	225.00	645	9.61
<b>0.80%</b>	<b>90</b>	15.15	15.00	225.00	550	8.17
<b>0.80%</b>	<b>90</b>	15.10	15.00	225.00	350	5.22
<b>0.80%</b>	<b>90</b>	15.10	15.00	225.00	510	7.60
<b>1.20%</b>	<b>90</b>	15.10	15.00	225.00	730	10.88
<b>1.20%</b>	<b>90</b>	15.25	15.00	225.00	615	9.07
<b>1.20%</b>	<b>90</b>	15.15	15.00	225.00	660	9.80
<b>P</b>	<b>90</b>	15.30	15.00	225.00	720	10.59
<b>P</b>	<b>90</b>	15.15	15.00	225.00	700	10.40
<b>P</b>	<b>90</b>	15.20	15.00	225.00	840	12.43

Tabla 59 Compresión de cilindros de 15 x 30 a 7 días.

Muestra	Edad (días)	D (cm)	L (cm)	Á (cm <sup>2</sup> )	Carga	f'c	f'c
					Máxima (kgf)	(kgf/cm <sup>2</sup> )	(Mpa)
<b>TES</b>	7	15.00	30.10	176.71	52930	299.52	29.95
<b>TES</b>	7	15.00	30.00	176.71	54820	310.22	31.02
<b>TES</b>	7	15.00	29.90	176.71	53540	302.97	30.30
<b>0.40%</b>	7	15.00	30.40	176.71	54050	305.86	30.59
<b>0.40%</b>	7	15.00	30.50	176.71	47130	266.70	26.67
<b>0.40%</b>	7	15.00	30.00	176.71	44910	254.14	25.41
<b>0.80%</b>	7	15.00	30.10	176.71	51020	288.71	28.87
<b>0.80%</b>	7	15.00	29.05	176.71	50760	287.24	28.72
<b>0.80%</b>	7	15.00	30.05	176.71	48630	275.19	27.52
<b>1.20%</b>	7	15.00	30.00	176.71	48780	276.04	27.60
<b>1.20%</b>	7	15.00	30.40	176.71	50870	287.87	28.79
<b>1.20%</b>	7	15.00	30.00	176.71	46210	261.50	26.15
<b>P</b>	7	15.00	29.80	176.71	51650	292.28	29.23
<b>P</b>	7	15.00	29.90	176.71	50300	284.64	28.46
<b>P</b>	7	15.00	30.00	176.71	53850	304.73	30.47

Tabla 60 Compresión de cilindros de 15 x 30 a 14 días.

Muestra	Edad (días)	D (cm)	L (cm)	Á (cm <sup>2</sup> )	Carga	f'c	f'c
					Máxima (kgf)	(kgf/cm <sup>2</sup> )	(Mpa)
<b>TES</b>	14	15.00	30.00	176.71	55770	315.59	31.56

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

<b>TES</b>	14	15.00	29.85	176.71	59780	338.29	33.83
<b>TES</b>	14	15.00	30.50	176.71	59050	334.15	33.42
<b>0.40%</b>	14	15.00	30.00	176.71	48590	274.96	27.50
<b>0.40%</b>	14	15.00	29.90	176.71	48650	275.30	27.53
<b>0.40%</b>	14	15.00	29.90	176.71	46020	260.42	26.04
<b>0.80%</b>	14	15.00	30.35	176.71	62860	355.71	35.57
<b>0.80%</b>	14	15.00	30.55	176.71	61050	345.47	34.55
<b>0.80%</b>	14	15.00	30.00	176.71	53320	301.73	30.17
<b>1.20%</b>	14	15.00	30.40	176.71	56230	318.20	31.82
<b>1.20%</b>	14	15.00	30.00	176.71	50560	286.11	28.61
<b>1.20%</b>	14	15.00	30.00	176.71	51670	292.39	29.24
<b>P</b>	14	15.00	30.00	176.71	48990	277.23	27.72
<b>P</b>	14	15.00	29.80	176.71	45110	255.27	25.53
<b>P</b>	14	15.00	30.00	176.71	45070	255.04	25.50

Tabla 61 Compresión de cilindros de 15 x 30 a 28 días.

<b>Muestra</b>	<b>Edad (días)</b>	<b>D (cm)</b>	<b>L (cm)</b>	<b>Á (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga Máxima (kgf)</b>	<b>f'c (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>f'c (Mpa)</b>
<b>TES</b>	28	15.00	29.95	176.71	58110	328.84	32.88
<b>TES</b>	28	15.00	29.90	176.71	57620	326.06	32.61
<b>TES</b>	28	15.00	30.00	176.71	72040	407.66	40.77
<b>0.40%</b>	28	15.00	30.10	176.71	56940	322.21	32.22
<b>0.40%</b>	28	15.00	30.40	176.71	62880	355.83	35.58
<b>0.40%</b>	28	15.00	29.90	176.71	66440	375.97	37.60
<b>0.80%</b>	28	15.00	29.85	176.71	57940	327.87	32.79
<b>0.80%</b>	28	15.00	30.00	176.71	55990	316.84	31.68
<b>0.80%</b>	28	15.00	29.75	176.71	56800	321.42	32.14
<b>1.20%</b>	28	15.00	30.10	176.71	53710	303.94	30.39
<b>1.20%</b>	28	15.00	30.10	176.71	52620	297.77	29.78
<b>1.20%</b>	28	15.00	30.20	176.71	56480	319.61	31.96
<b>P</b>	28	15.00	30.05	176.71	51570	291.83	29.18
<b>P</b>	28	15.00	30.00	176.71	49800	281.81	28.18
<b>P</b>	28	15.00	29.90	176.71	55250	312.65	31.27

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

Tabla 62 Compresión de cilindros de 15 x 30 a 60 días.

Muestra	Edad (días)	D (cm)	L (cm)	Á (cm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kgf)	f'c (kgf/cm <sup>2</sup> )	f'c (Mpa)
TES	60	15.00	30.00	176.71	63200	357.64	35.76
TES	60	15.00	30.10	176.71	59310	335.63	33.56
TES	60	15.00	29.90	176.71	58940	333.53	33.35
0.40%	60	15.00	30.20	176.71	62440	353.34	35.33
0.40%	60	15.00	30.10	176.71	55130	311.97	31.20
0.40%	60	15.00	30.00	176.71	66440	375.97	37.60
0.80%	60	15.00	30.10	176.71	64390	364.37	36.44
0.80%	60	15.00	30.00	176.71	62080	351.30	35.13
0.80%	60	15.00	29.95	176.71	64050	362.45	36.24
1.20%	60	15.00	30.05	176.71	56850	321.71	32.17
1.20%	60	15.00	30.10	176.71	72410	409.76	40.98
1.20%	60	15.00	30.10	176.71	63890	361.54	36.15
P	60	15.00	29.90	176.71	62880	355.83	35.58
P	60	15.00	30.10	176.71	61290	346.83	34.68
P	60	15.00	30.00	176.71	62520	353.79	35.38

Tabla 63 Compresión de cilindros de 15 x 30 a 90 días.

Muestra	Edad (días)	D (cm)	L (cm)	Á (cm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kgf)	f'c (kgf/cm <sup>2</sup> )	f'c (Mpa)
TES	90	15.00	30.00	176.71	66460	376.09	37.61
TES	90	15.00	30.50	176.71	59310	335.63	33.56
TES	90	15.00	30.50	176.71	76260	431.54	43.15
0.40%	90	15.00	30.10	176.71	65640	371.45	37.14
0.40%	90	15.00	30.10	176.71	70480	398.84	39.88
0.40%	90	15.00	29.90	176.71	71250	403.19	40.32
0.80%	90	15.00	30.25	176.71	74030	418.92	41.89
0.80%	90	15.00	30.00	176.71	75160	425.32	42.53
0.80%	90	15.00	30.40	176.71	71960	407.21	40.72
1.20%	90	15.00	31.10	176.71	66540	376.54	37.65
1.20%	90	15.00	31.10	176.71	71020	401.89	40.19
1.20%	90	15.00	30.00	176.71	71950	407.15	40.72

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

<b>P</b>	90	15.00	30.15	176.71	69590	393.80	39.38
<b>P</b>	90	15.00	30.00	176.71	68940	390.12	39.01
<b>P</b>	90	15.00	30.50	176.71	74430	421.19	42.12

Tabla 64 Módulo de ruptura de vigas de 15 x 60 a 28 días.

Muestra	Edad (Días)	Masa (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	W <sub>máx.</sub> (T)	MR (kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>TES</b>	28	31.02	60.00	15.10	14.90	1.86	24.97
<b>TES</b>	28	31.94	60.10	15.30	15.20	2.79	35.52
<b>TES</b>	28	31.78	60.30	15.10	15.15	2.27	29.47
<b>0.40%</b>	28	31.04	60.10	15.15	15.00	1.40	18.48
<b>0.40%</b>	28	31.10	60.00	15.10	15.125	2.72	35.43
<b>0.40%</b>	28	31.05	60.10	15.15	15.25	2.00	25.54
<b>0.80%</b>	28	31.08	60.20	15.10	15.10	2.85	37.25
<b>0.80%</b>	28	31.41	60.10	15.10	15.30	3.19	40.61
<b>0.80%</b>	28	31.27	60.10	15.05	15.00	3.55	47.18
<b>1.20%</b>	28	31.47	60.10	15.10	15.20	0.96	12.38
<b>1.20%</b>	28	31.25	60.05	15.15	15.05	2.37	31.08
<b>1.20%</b>	28	31.89	60.10	15.00	15.10	2.95	38.81
<b>P</b>	28	30.43	60.00	15.05	15.30	3.07	39.21
<b>P</b>	28	31.70	60.00	15.05	15.30	2.47	31.55
<b>P</b>	28	31.70	60.30	15.25	15.15	3.16	40.63

Tabla 65 Módulo de ruptura de vigas de 15 x 60 a 90 días.

Muestra	Edad (Días)	Masa (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	W <sub>máx.</sub> (T)	MR (kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>TES</b>	90	30.86	60.00	15.20	15.10	3.48	45.18
<b>TES</b>	90	31.37	60.00	15.20	15.10	3.82	49.60
<b>TES</b>	90	30.91	60.10	15.15	15.10	4.23	55.10
<b>0.40%</b>	90	31.47	60.05	15.30	15.20	4.06	51.68
<b>0.40%</b>	90	32.09	60.00	15.40	15.30	4.45	55.55
<b>0.40%</b>	90	31.91	60.10	15.30	15.10	3.61	46.57
<b>0.80%</b>	90	31.2	60.20	15.15	15.15	3.57	46.20
<b>0.80%</b>	90	31.2	60.20	15.05	15.10	3.64	47.73

Evaluación del Módulo de ruptura del concreto con adición de PET y polipropileno.

<b>0.80%</b>	90	30.99	60.20	15.05	15.10	4.39	57.57
<b>1.20%</b>	90	31.69	60.20	15.15	15.10	3.98	51.85
<b>1.20%</b>	90	32.04	60.20	15.15	15.25	3.34	42.66
<b>1.20%</b>	90	32.15	60.10	15.10	15.15	3.78	49.08
<b>P</b>	90	31.41	60.20	15.15	15.30	3.28	41.62
<b>P</b>	90	31.01	60.00	14.90	15.15	3.33	43.82
<b>P</b>	90	31.1	60.15	15.15	15.20	2.91	37.41