

**ESTUDIO DEL EFECTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL
CONCRETO SIMPLE REFORZADO CON FIBRAS DE TEREFALATO DE
POLIETILENO (PET) Y POLIPROPILENO (PP)**



Autores:

**ANGEL ANDRÉS GARCÍA GALINDO
WILMER ANDRÉS HERNÁNDEZ SÁNCHEZ**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA, CÓRDOBA**

2017

**ESTUDIO DEL EFECTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL
CONCRETO SIMPLE REFORZADO CON FIBRAS DE TEREFALATO DE
POLIETILENO (PET) Y POLIPROPILENO (PP)**



Autores:

**ANGEL ANDRÉS GARCÍA GALINDO
WILMER ANDRÉS HERNÁNDEZ SÁNCHEZ**

Director:

ING. YAHIR ENRIQUE GONZÁLEZ DORIA, M.Sc.

Codirector:

JIMMY UNFRIED SILGADO, PhD.

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA, CÓRDOBA**

2017

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto, serán responsabilidad de los autores.

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

NOTA DE ACEPTACIÓN

YAHIR ENRIQUE GONZÁLEZ DORIA

Director

JIMMY UNFRIED SILGADO

Codirector

LUIS ARMANDO ESPITIA SANJUÁN

Jurado

DEMÓSTENES JOSÉ DURANGO ÁLVAREZ

Jurado

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios por permitirme alcanzar este objetivo y darme salud y muchas fuerzas para cumplir este sueño y esta nueva meta en mi vida. A mis padres Angel García Vitola y Esmeralda Galindo Martínez y hermanos por su apoyo incondicional y por brindarme la confianza necesaria para culminar con éxito este trabajo, a ellos gracias por concederme los mejores consejos y enseñanzas durante este proceso. Por último, a todas aquellas personas que hicieron posible hacer realidad este sueño, que Dios los colme de bendiciones.

Angel Andrés García Galindo

A Jehová por darme la oportunidad de llegar a este punto tan importante en mi proyecto de vida. Dedicado a la memoria de mi padre Félix Manuel Hernández Sáenz. A mis tíos Oscar Díaz y Esther Hernández, a mis abuelos Lelis Sánchez y Gladys Arrieta, quienes fueron de vital importancia en todo este proceso, brindándome el apoyo necesario para salir adelante en todas las situaciones que se presentaron durante el camino. A mi compañero de trabajo de gado, quien siempre fue un baluarte durante toda la carrera.

Wilmer Andrés Hernández Sánchez

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios por brindarnos la oportunidad de llegar al final de este camino y por alcanzar esta nueva etapa de nuestras vidas. A nuestros compañeros y docentes, que siempre fueron fuente de superación personal y profesional. Gracias a ellos, por brindarnos el apoyo y la confianza que siempre se necesitó en los momentos más difíciles en el ámbito académico y personal.

A nuestro director de trabajo de grado, el ingeniero Yahir González Doria, quién con su conocimiento y valioso tiempo nos brindó la mejor guía y consejos para llevar a cabo y culminar exitosamente la presente investigación.

Al ingeniero Luis Armando Espitia Sanjuán, por toda su colaboración y buena disposición que fueron de gran importancia durante todo este proceso.

A todas aquellas personas que directa o indirectamente colaboraron durante este proceso, que sin su valiosa ayuda no hubiese sido posible terminar este trabajo.

Finalmente, y no menos importante, a nuestras familias por brindarnos la oportunidad y el apoyo necesarios para obtener el título de ingeniero mecánico.

TABLA DE CONTENIDO.

	Pág.
RESUMEN.....	18
ABSTRACT.....	19
1. INTRODUCCIÓN.....	20
2. OBJETIVOS.....	23
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	24
3.1 FIBRAS.....	24
3.2 FIBRAS SINTÉTICAS.....	24
3.2.1 Fibras de Tereftalato de Polietileno (PET).....	25
3.2.2 Fibras de Polipropileno (PP).....	26
3.3 ENSAYO DE TENSIÓN.....	27
3.4 CONCRETO.....	29
3.4.1 Agregados del concreto.....	29
3.4.2 Concreto reforzado con fibras.....	32
3.4.3 Ensayo de compresión para concreto.....	37
3.4.4 Ensayo de flexión para concreto.....	38
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
4.1 OBTENCIÓN, DETERMINACIÓN DE DENSIDAD Y ENSAYO DE TENSIÓN DE LAS FIBRAS DE PET Y PP.....	40
4.1.1 Obtención de fibras de PET y PP.....	40

4.1.2. Determinación de la densidad del PET y PP.....	43
4.1.3. Ensayos de tensión en las fibras de PET y PP.....	45
4.2 ELABORACIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN Y FLEXIÓN	47
4.2.1 Materiales para la elaboración de concreto y diseño de mezcla.....	47
4.2.1 Fabricación de las probetas de concreto para ensayos de compresión y flexión	50
4.3 ANÁLISIS DE DENSIDAD A LAS PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON PET Y PP.....	53
4.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN EN PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PET Y PP.....	54
4.5 ENSAYO DE FLEXIÓN A TRES PUNTOS EN PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PET Y PP.....	56
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	59
5.1 OBTENCIÓN DE LAS FIBRAS DE PET Y PP.....	59
5.2 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL PET Y PP.....	60
5.3 ENSAYOS DE TENSIÓN DE LAS FIBRAS DE PET Y PP.....	62
5.4 CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PET Y PP.....	69
5.4.1. Análisis granulométrico de los agregados en el concreto.....	69
5.4.2. Elaboración de probetas de concreto para ensayos a compresión y a flexión.....	71
5.5 ANÁLISIS DE DENSIDAD A LAS PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PET Y PP.....	77

5.6 RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PET Y PP.....	80
5.6.1. Efecto de la adición de fibras de PET y PP en la resistencia a compresión.....	82
5.6.2. Análisis de falla en las probetas de concreto.....	88
5.7 RESISTENCIA A FLEXIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PET Y PP.....	95
5.7.1 Análisis de carga de rotura en probetas de concreto con adición de fibras de PET y PP.....	94
5.7.2 Análisis de la resistencia a la flexión de probetas de concreto con fibras de PET y PP incorporadas.....	97
5.7.3 Análisis del módulo de elasticidad en flexión de probetas de concreto con fibras de PET y PP incorporadas.....	98
5.7.4 Análisis de falla en probetas sometidas a ensayo de flexión.....	101
6. CONCLUSIONES.....	107
7. RECOMENDACIONES	110
8. BIBLIOGRAFÍA.....	111
9. ANEXOS.....	117

LISTADO DE ANEXOS

Pág.

A 1: Diagrama esfuerzo-deformación unitaria de fibras de PET.....	116
A.2: Diagrama esfuerzo-deformación unitaria de fibras de PP.....	119
A.3: Propiedades mecánicas de las muestras de PET ensayadas a tensión.....	122
A 4: Propiedades mecánicas de las muestras de PP ensayadas a tensión.....	122
A 5: Granulometría de la arena del Rio Sinú utilizada para la realización de las probetas de concreto reforzado con fibras de PET y PP.....	123
A 6: Cálculo del Tamaño Máximo Nominal de la grava del Rio Sinú utilizada para la realización de las probetas de concreto reforzado con fibras de PET y PP.....	124
A 7: Densidad de todas las probetas de concreto sometidas al ensayo de compresión.....	125
A 8: Densidad de todas las probetas de concreto sometidas al ensayo de flexión a tres puntos.....	128
A 9: Densidad promedio de las probetas sometidas a compresión a las tres edades de curado.....	131
A 10: Densidad promedio de las probetas sometidas a flexión a las tres edades de curado.....	131
A 11: Densidad promedio de todas las probetas a las tres edades de curado.....	132
A 12: Resistencia a compresión de cada una de las probetas ensayadas.....	132
A 13: Resistencia a compresión promedio para las 3 edades de curado.....	135
A 14: Curva de resistencia a compresión en función del porcentaje de fibra incorporado para 3 y 7 días de curado.....	136
A 15: Diagramas de carga-deflexión para las probetas de control a las 3 edades de curado.....	137
A 16: Diagramas de carga-deflexión para las probetas de concreto con adición de fibras de PET a las 3 edades de curado.....	137
A 17: Diagramas de carga-deflexión para las probetas de concreto con adición de fibras de PP a las 3 edades de curado.....	144

A 18: Parámetros mecánicos de las probetas sometidas a flexión a las 3 edades de curado.....	151
A 19: Parámetros mecánicos promedios de las probetas de control sometidas a flexión a las 3 edades de curado.....	154
A 20: Parámetros mecánicos promedios de las probetas con adición de fibras de PET sometidas a flexión a las 3 edades de curado.....	154
A 21: Parámetros mecánicos promedios de las probetas con adición de fibras de PP sometidas a flexión a las 3 edades de curado.....	155
A 22: Plano de herramienta de corte de fabricación propia	156

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 4.1: Cantidad total de probetas con adición de fibras de PET y PP fabricadas para ensayos de compresión y flexión.....	52
Tabla 5.1: Medición de masa para las cuatro muestras de PET.....	60
Tabla 5.2: Medición de masa para las ocho muestras de PP.....	61
Tabla 5.3: Densidades teóricas y obtenidas del PET y PP.....	62
Tabla 5.4: Propiedades de las fibras de PET y PP medidas en ensayo de tensión.....	65
Tabla 5.5: Propiedades mecánicas de las fibras de PET, PP, fibras sintéticas y naturales.....	67
Tabla 5.6: Propiedades del agregado grueso, agregado fino, cemento, y agua utilizado para la realización de probetas de concreto.....	71
Tabla 5.7: Cantidad de materiales empleados para obtener 1 m ³ de concreto con resistencia última de 2500 psi (relación agua/cemento de 0.65)	74
Tabla 5.8: Porcentajes en masa para la preparación de concreto con relación agua/cemento de 0.65.....	75
Tabla 5.9: Porcentaje de fibra incorporado respecto al porcentaje de reducción de densidad de probetas de concreto.....	78
Tabla 5.10: Resistencia a compresión a los 28 días de curado.....	80
Tabla 5.11: Porcentaje de resistencia a compresión alcanzado por las probetas con adición de fibra respecto a la resistencia de diseño a los 28 días de curado.....	84
Tabla 5.12: Tipos de fallas presentadas en probetas de concreto con adición de fibras de PET y PP.....	91

Tabla 5.13: Porcentaje de resistencia a flexión alcanzada de las probetas con adición de fibra de PET y PP respecto a las probetas de control a los 28 días de curado.....97

Tabla 5.14: Tipos de fallas presentadas en probetas de concreto con adición de fibras de PET y PP posterior al ensayo de flexión a tres puntos.....103

LISTADO DE FIGURAS

Figura 3.1: Estructura molecular del Tereftalato de Polietileno (PET).....	25
Figura 3.2: Estructura molecular del Polipropileno (PP).....	26
Figura 3.3: Curva esfuerzo-deformación unitaria correspondiente a una aleación de aluminio.....	27
Figura 3.4: Tipos de fallas comunes en probetas de concreto ensayadas a compresión...38	
Figura 3.5: a) El ensayo de flexión es utilizado con frecuencia para medir la resistencia de materiales frágiles y b) la deformación (δ) obtenida por flexión.....	39
Figura 4.1: Botellas en diferentes presentaciones utilizadas para la obtención de las fibras de PET.....	41
Figura 4.2: Dispositivo de corte de fabricación propia para obtención de fibras de PET y PP	41
Figura 4.3: Vaso desechable de 9 onzas utilizado para la obtención de fibras de PP.....	42
Figura 4.4: Micrómetro marca Mitutoyo con resolución de 0.001 mm y un rango de 0 – 25,4 mm utilizado para determinar el espesor de las muestras de PET y PP.....	42
Figura 4.5: Medición de la longitud de las fibras de PET y PP.....	43
Figura 4.6: Balanza OHAUS-Pioneer, con capacidad máxima de 210 g y resolución de 0.0001 g empleada para determinar la masa de las muestras de PET y PP.....	44
Figura 4.7: Microscopio marca OLYMPUS GX 41, dotado con una cámara digital OMAX de 9 megapíxeles y con software de adquisición de imagen TOPVIEW V3,7.....	46
Figura 4.8: Máquina universal de ensayos marca Shimadzu de 5 kN utilizada para ensayos de tensión en las fibras de PET y PP.....	46
Figura 4.9: a) Tamices bajo la Norma ASTM D136 con los que se realizó la granulometría de los agregados. b) Herramientas (palaustre, martillo de goma, y varilla de acero) utilizadas durante el desarrollo del proyecto. c) Agregados grueso y fino utilizados para la preparación de concreto.....	48

Figura 4.10: Moldes cilíndricos y prismáticos bajo la norma ASTM C31(2008) usados para la realización de las probetas de compresión y flexión.....	51
Figura 4.11: Maquina PINZUAR modelo PC 42 utilizada para los ensayos de compresión a las probetas de concreto reforzado con fibras de PET y PP.....	55
Figura 4.12: Maquina de ensayo universal marca MTS Criterion modelo 45, con capacidad máxima de carga de 300 kN.....	58
Figura 4.13: Diagrama del montaje de la probeta empleada para los ensayos de flexión a tres puntos	58
Figura 5.1: a) Dispositivo de corte empleado para la obtención de las fibras de PET. b) Herramienta de corte empleada para la obtención de fibras de PP. c) Botellas de PET empleadas para la obtención de las fibras. d) Vasos desechables de PP usados para la obtención de las fibras de PP.....	59
Figura 5.2: Graficas de esfuerzo-deformación unitaria para cinco muestras de fibras de PET y PP ensayadas a tensión.....	63
Figura 5.3: Grafica típica de esfuerzo vs deformación para materiales poliméricos de la norma ASTM D882 (2012).....	63
Figura 5.4: Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para cinco muestras de fibras de PET donde se evidencian los esfuerzos a tensión alcanzados.....	64
Figura 5.5: Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para cinco muestras de fibras de PP donde se evidencian los esfuerzos a tensión alcanzados.....	64
Figura 5.6: Valores promedios de resistencia a tensión de las fibras de PET y PP.....	65
Figura 5.7: Porcentaje de deformación promedio en fibras de PET y PP sometidas a tensión.....	66
Figura 5.8: Valores promedios del módulo de Young para las fibras de PET y PP.....	66
Figura 5.9: Probetas de PET y PP antes de ser ensayadas.....	68
Figura 5.10: Bordos de las probetas de PET y PP vistos con un aumento de 50X a través del microscopio.....	68

Figura 5.11: Granulometría del agregado fino utilizado para la realización de probetas de concreto.....	69
Figura 5.12: Granulometría del agregado grueso utilizado para la realización de probetas de concreto.....	70
Figura 5.13: Requerimientos de agua de mezclado.....	72
Figura 5.14: Curva de resistencia a compresión–relación agua/cemento.....	72
Figura 5.15: Volumen de grava por unidad de volumen de concreto.....	73
Figura 5.16: Proceso de fabricación de las probetas para ensayos de compresión. a) llenado de moldes y apisonado con varilla de acero b) golpes laterales con martillo de goma para la liberación de aire atrapado en la mezcla c) enrasado y fraguado d) proceso de curado en agua.....	76
Figura 5.17: Proceso de fabricación de probetas para ensayos de flexión. a) llenado de moldes y apisonado con varilla de acero b) golpes laterales con martillo de goma para la liberación de aire atrapado en la mezcla c) enrasado y fraguado d) proceso de curado en agua.....	76
Figura 5.18: Curvas de densidad de las probetas de concreto en función del porcentaje de fibra incorporado.....	77
Figura 5.19: Densidad de las diferentes mezclas de concreto para 28 días de curado.....	79
Figura 5.20: Valores promedio de resistencia a compresión para la muestra de control y las diferentes mezclas de concreto con adición de fibras de PET y PP para 3, 7 y 28 días de curado.....	81
Figura 5.21: Curvas de resistencia a compresión en función del porcentaje de fibra incorporado para 28 días de curado.....	82
Figura 5.22: Formas que presentan las fibras de PP y PET respectivamente.....	83
Figura 5.23: Curvas de resistencia a compresión en función de los días de curado para probetas de concreto reforzado con 0.5 % en volumen de fibra incorporada.....	84

Figura 5.24: Curvas de resistencia a compresión en función de los días de curado para probetas de concreto reforzado con 1.0 % en volumen de fibra incorporada.....	85
Figura 5.25: Curvas de resistencia a compresión en función de los días de curado para probetas de concreto reforzado con 1.5 % en volumen de fibra incorporada.....	85
Figura 5.26: Curvas de resistencia a compresión en función de los días de curado para probetas de concreto reforzado con 2.0 % en volumen de fibra incorporada.....	86
Figura 5.27: Tipos de fallas presentados en las probetas de concreto durante los ensayos de compresión. I) Falla tipo 5 presentada en las probetas de control. II) Falla no referenciada en la norma ASTM C39/C39M (2014) presentada en probeta de concreto con 1,5 % de fibra de PET. III) Falla tipo 3 presentada en probeta de concreto con 2,0 % de fibra de PP.....	88
Figura 5.28: I) Grieta generada a través de la dirección de la carga aplicada durante el ensayo. II) Detalle de la grieta presentada después de la falla.....	89
Figura 5.29: Valores promedio de carga de rotura para la muestra de control y las diferentes mezclas de concreto con adición de fibras de PET y PP a los 28 días de curado.....	95
Figura 5.30: Diagrama de carga vs porcentaje de fibra incorporado para probetas con adición de fibras de PET y PP para 28 días de curado.....	96
Figura 5.31: Valores promedio de resistencia a la flexión para la muestra de control y las diferentes mezclas de concreto con adición de fibras de PET y PP a los 28 días de curado.....	98
Figura 5.32: Valores promedio del módulo de elasticidad en flexión para la muestra de control y las diferentes mezclas de concreto con adición de fibras de PET y PP a los 28 días de curado.....	99
Figura 5.33: Valores promedio de la deflexión para las probetas de control y las diferentes mezclas de concreto con adición de fibras de PET y PP a los 28 días de curado.....	100
Figura 5.34: Probeta con adición de fibras de PET retirada de la máquina posterior al ensayo de flexión a tres puntos.....	102

RESUMEN

En este estudio, se evaluaron propiedades físicas y mecánicas de fibras de tereftalato de polietileno (PET) y polipropileno (PP), a través de determinación de la densidad y ensayos de tensión acorde a la norma ASTM D882 (2012). Encontrando que las fibras de PET presentaron una mayor relación resistencia peso que el PP. Posteriormente, se realizó un diseño de mezcla de concreto para una resistencia última de 17.23 MPa, y se adicionó fibras de PET y PP, reemplazando porcentajes en volumen de 0.5; 1.0; 1.5 y 2.0 % sobre el volumen total del agregado fino, con el fin de analizar el efecto que tiene la adición de fibras en la resistencia a compresión y parámetros mecánicos de flexión para muestras con una edad de curado de 3, 7 y 28 días, de acuerdo a las normas ASTM C39/C39M (2014) y ASTM C293(2016) respectivamente, con el propósito de compararlas con muestras sin adición de fibra. Luego de los ensayos de compresión, se encontró que a mayor porcentaje de fibra adicionada a la mezcla de concreto, la resistencia a compresión disminuía, obteniendo la menor caída de resistencia a compresión para el grupo de muestras con adición de fibra de 0.5 % de PET y 0.5 % de PP. Asimismo, después de los ensayos de flexión a tres puntos, se encontró que las muestras con 0.5 % de fibras de PET y 0.5 % de fibras de PP registraron las menores caídas en el valor de carga de rotura y módulo de elasticidad en flexión. Finalmente, se observó que la presencia de fibras en la matriz de concreto, ayuda a mantenerla unida después de ocurrida la falla.

Palabras claves: Fibras de PET, fibras de PP, ensayo de tensión, concreto reforzado, resistencia a compresión, resistencia máxima a la flexión, módulo de elasticidad en flexión.

ABSTRACT

In this study, physical and mechanical properties of polyethylene terephthalate (PET) and polipropilene (PP) fibers were evaluated, by determination of density and stress tests (tensile) according to ASTM D882 (2014), finding that PET fibers showed a greater ratio resistance weigh than PP. Therefore, a concrete mix design was made for ultimate strength of 17.23 MPa, and some PET and PP fibers were added, replacing volume percentage of 0.5; 1.0; 1.5 y 2.0 % over the total volume of the aggregate fine, in order to analyze the effect on fiber addition in compressive strength and mechanical bending parameters for concrete samples with a cure age of 3, 7 and 28 days, according to ASTM C39/C39M (2014) and ASTM C293 (2016) respectively, with the purpose of comparing them without fiber addition. After the compression tests, it was found that a higher percentage of fibers added to the concrete mix, compression resistance decreased, obtaining the slightest compression resistance drop for the group of samples with fiber addition of 0.5 % PET and 0.5 % PP. Likewise, after the bending tests to three points, it was found that samples with 0.5 % PET fibers and 0.5 % PP fibers registered the slightest drop in fracture load value and elasticity modulus in flexion. Finally, it was observed that the fibers presence in the concrete matrix, helps to keep it together after the occurred failure.

Keywords: PET fibers, PP fibers, Bending tests, reinforced concrete, compression resistance, resistance to maximum flexion, elasticity modulus in flexion.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el hombre tiende a impactar el medio ambiente debido al consumo descontrolado de recursos y productos del planeta, tal es el caso de los plásticos, gracias al estilo de vida adoptado hoy en día, estos son utilizados cotidianamente a través del consumo personal, la construcción, el transporte, las actividades productivas, o las comunicaciones. En el año 2012, la producción mundial de plásticos alcanzó un máximo de 288 millones de toneladas, donde China se mantuvo como el mayor productor, con un 24 % del total. Mientras tanto, América Latina con 7 % del total de la producción (PlasticsEurope, 2011).

En Colombia la fabricación de productos plásticos representa un 5.9 % de la producción total del sector industrial (MINCOMERCIO, 2015). La producción anual de plásticos en Colombia supera el millón de toneladas, y los principales sectores que demandan plástico en el país son envases y empaques (54 %), construcción (21 %), y la agricultura (9 %) (SIREM, 2012). En la ciudad de Montería los residuos plásticos producidos en el año 2011 fueron de 1.387 toneladas (Aluna Consultores, 2011).

El tereftalato de polietileno (PET) y el polipropileno (PP), son tipos de polímeros termoplásticos, estos son generalmente requeridos para la fabricación de envases y empaques. En Colombia esto se ve reflejado en el consumo de PET, que en el año 2015 alcanzó las 127.000 toneladas (Arias, 2015), y el consumo de PP en ese mismo año fue de 50.282 toneladas (Essentia, 2015). La deposición final de los residuos plásticos, generalmente no se les da el manejo adecuado por parte de las personas, lo que conlleva un impacto ambiental negativo sobre los ecosistemas, ya que en promedio los materiales plásticos tardan entre 100 a 1000 años en degradarse (Téllez A., 2012).

A lo largo de la historia, el sector de la construcción ha jugado un papel fundamental en el desarrollo económico y social. Uno de los principales materiales usados en este sector es el concreto, el cual consta de componentes como el cemento, agua, adiciones y áridos (grava y arena) (M.P. de la cruz, 2014). El consumo mundial de áridos se estima en 40.000 millones de toneladas al año, lo cual equivale al doble de la cantidad anual de sedimentos arrastrados por todos los ríos del mundo (PNUMA, 2014). La extracción de este recurso trae importantes repercusiones ambientales, como lo es la erosión en riberas de ríos y quebradas (Ponce, 2004). En Colombia la producción de concreto premezclado alcanzó los 4.590 metros cúbicos, y se registraron 28 millones de metros cuadrados en construcciones (DANE, 2015). El área licenciada para construcción de vivienda en Montería creció un 39.3 % (DANE, 2013), siendo este sector, la mayor fuente de empleo para esta ciudad. Todo esto plantea la posibilidad de buscar nuevos materiales alternativos para la elaboración de concreto requerido en las construcciones civiles.

Una posible alternativa de reutilización de residuos plásticos radica en la aplicación como materiales de refuerzo en el sector de la construcción de obras civiles. Es el caso de estudios que a través de los últimos años han venido realizando con materiales usados para reforzar el concreto, como Fraternali et al. (2011) quienes realizaron un estudio experimental de la conductividad térmica, la resistencia a la compresión, la primera resistencia a las fisuras y los índices de ductilidad del hormigón reforzado con fibra de PET reciclado, en los cuales los resultados mostraron una reducción en la conductividad térmica, aumento en la resistencia a compresión, resistencia a la fractura e índices de ductilidad final. Además, Figueroa (2013) realizó un estudio comparativo de la tenacidad del concreto convencional, concreto reforzado con fibras de acero y concreto reforzado con fibras de polipropileno (PP), y se observó que para muestras con fibras de acero hubo

un incremento en la resistencia a compresión, resistencia a fracción, fatiga y esfuerzo cortante, mientras que para muestras con fibras de PP presentaron un mejoramiento en los índices de ductilidad para el concreto. Igualmente, Spadea et al. (2015) investigaron la aplicación de fibras de nylon recicladas de redes de pescas usadas como material de refuerzo para morteros de concreto comparándolos con morteros no reforzados mediante ensayos de compresión, los resultados del estudio indicaron una mejora significativamente en la resistencia del concreto. Se plantea en este estudio el uso de materiales plásticos, en el concreto que se utiliza en el departamento de Córdoba, específicamente el tereftalato de polietileno (PET) y polipropileno (PP), para observar el efecto de estos en las propiedades mecánicas y reducir el peso del concreto de armado utilizado fundamentalmente en la fabricación de vigas y columnas de las diferentes edificaciones, buscando sustituir un componente específico de la mezcla como lo es la arena. Esto con el fin de reducir los impactos ambientales causados por la acumulación de los residuos plásticos (PET y PP) usados en la región.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto en las propiedades mecánicas tales como resistencia máxima a compresión, resistencia a la flexión y módulo de elasticidad en flexión del concreto simple reforzado con fibras de tereftalato de polietileno y fibras de polipropileno.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la densidad y realizar ensayos de tensión en las fibras de tereftalato de polietileno y polipropileno bajo la norma ASTM D882 (2012).
- Preparar las probetas de concreto reforzado con fibras de tereftalato de polietileno y fibras de polipropileno variando los porcentajes en volumen en la mezcla.
- Realizar ensayos de compresión y flexión a probetas de concreto reforzado con fibras de tereftalato de polietileno y fibras de polipropileno acorde a las normas ASTM C39/C39M (2014) y ASTM C293 (2016) respectivamente.

3. REVISION DE LITERATURA

3.1. FIBRAS

Las fibras se definen como filamentos finos y elongados en forma de haz, malla o trenza, de algún material natural o manufacturado, el cual pueda ser distribuido a través de una mezcla de hormigón fresco (ASTM C1116 (2010)). Las fibras debido a su forma y dimensión tienden a mejorar ciertas características y propiedades mecánicas del hormigón y morteros (Castro 2016). Además, las fibras otorgan grandes beneficios a los materiales compuestos tales como la reducción de fisuras, incremento en la resistencia, estabilidad dimensional, baja conductividad térmica, y alta resistencia a agentes químicos (Millán 2013).

Según Macaferri (2015) las fibras se pueden clasificar según la naturaleza o materia prima en las que están constituidas: Fibras inorgánicas (vidrio y metálicas), fibras orgánicas (fibras naturales tales como de coco o madera), y fibras sintéticas (polímeros).

3.2. FIBRAS SINTÉTICAS

García (2007) define las fibras sintéticas como aquellas que se obtienen por procesos químicos de polirreacción a partir de sustancias de bajo peso molecular por vía puramente sintética, es decir, in vitro. Sin intervención de la naturaleza. Estas fibras, junto con las llamadas fibras artificiales (semisintéticas o regeneradas), que se obtienen por transformación química de productos naturales fibrosos, se engloban bajo la designación general de fibras químicas.

Las fibras sintéticas son fibras artificiales que resultan de la investigación en las industrias petroquímicas y textiles. Existen dos formas diferentes de fibras sintéticas: las de multifilamentos y las producidas de cinta de fibrilla, se caracterizan por tener elevada resistencia a la tensión. Las más utilizadas para reforzar hormigones y morteros son las fibras de polipropileno (Castro 2016). La mayoría de las aplicaciones de las fibras sintéticas están en el nivel entre 0.1 – 0.2 % por volumen, la cantidad de fibras añadidas a una mezcla de hormigón se mide como un porcentaje del volumen total del material compuesto (hormigón y fibras), al existir un mayor porcentaje de fibras en la mezcla, estas tienden a "agruparse" y crean problemas de trabajabilidad (Mestanza, 2016).

3.2.1. Fibras de Tereftalato de Polietileno (PET)

El PET es un polímero termoplástico que se fabrica con derivados del petróleo, gas y aire. Este polímero tiene la cadena polimérica más rígida posible para un termoplástico con una excepcional combinación de propiedades mecánicas y térmicas. Estas características le dan al PET la posibilidad de utilizarse para aplicaciones en áreas como la eléctrica y la electrónica, y en productos como envases para bebidas, películas, cintas magnéticas, aislantes eléctricos, fibras, perfiles decorativos, tuberías y accesorios para carros, entre otros (Baldenebro 2015). La figura 3.1 muestra la estructura molecular del PET (Donini y Zanin (1999)).



Figura 3.1: Estructura molecular del Tereftalato de Polietileno (PET).

Fuente: Donini y Zanin (1999).

El polietileno ha sido producido para el concreto en forma de monofilamentos con deformaciones superficiales parecidas a verrugas. El concreto reforzado con fibras de polietileno con contenidos entre 2 y 4 % por volumen exhibe un comportamiento 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 (Macías 2009).

3.2.2. Fibras de Polipropileno (PP)

El Polipropileno (PP) pertenece al grupo de las poliolefinas, se obtiene mediante la polimerización de hidrocarburos insaturados como el propileno o propeno. Es un polímero termoplástico que a temperaturas relativamente altas 360 °C, se vuelve deformable o flexible, es parcialmente cristalino. Las fibras de polipropileno son químicamente inertes y, por tanto, cualquier químico que no destruya al concreto no tiene ningún efecto sobre la fibra, cuando más agresivo es el producto químico como: ácido sulfúrico y ácido clorhídrico, que entran en contacto con el material compuesto, el concreto se deteriorara antes que las fibras (Mestanza 2016). En la figura 3.2 se puede observar la estructura molecular del polipropileno (Kalpakjian 2008):

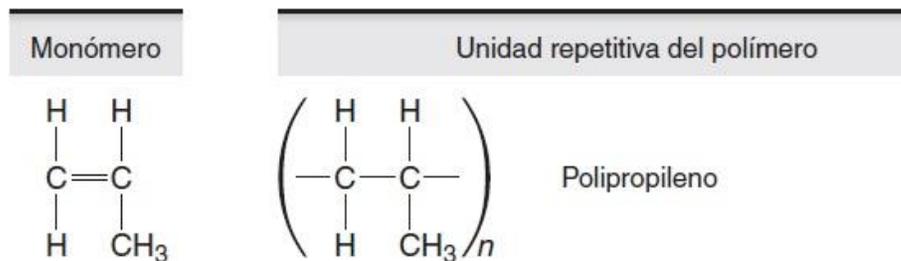


Figura 3.2: Estructura molecular del Polipropileno (PP).

Fuente: Kalpakjian 2008.

Este tipo de fibras son muy estables y presentan una superficie impermeable por lo cual no quita agua de mezclado, son livianas, y pueden ser fabricadas en diversas formas y con costos más bajos que otros tipos de fibras (Millán 2013).

3.3. ENSAYO DE TENSIÓN

El ensayo de tensión mide la resistencia de un material a una fuerza estática o de aplicación lenta, las velocidades de deformación en un ensayo de tracción son típicamente pequeñas. El procedimiento consta en tomar una muestra estandarizada y aplicarle una fuerza axial, llamada carga, que aumenta gradualmente mientras se mide la deformación del espécimen hasta llegar a la fractura (Askeland 2010). Los resultados del ensayo de tensión son registrados en la curva de esfuerzo – deformación, como se puede observar en la figura 3.3.

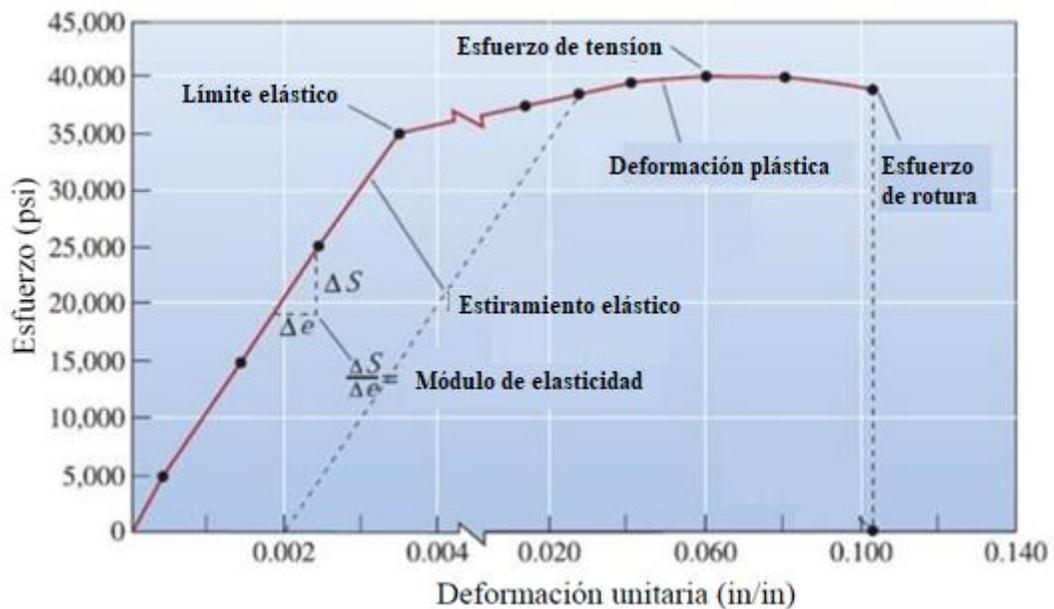


Figura 3.3: Curva esfuerzo-deformación unitaria correspondiente a una aleación de aluminio.

Fuente: Askeland 2010.

A partir de la curva esfuerzo-deformación se puede calcular las siguientes propiedades mecánicas del material ensayado (Askeland 2010):

Zona elástica: En esta zona la tensión es lineal con la deformación y cuando desaparece la carga, la probeta vuelve a su forma original sin presentar deformación permanente.

Zona plástica: Se presenta cuando la tensión aplicada es mayor que el límite elástico y al retirar la carga, la probeta presenta deformación permanente.

Esfuerzo último: Es el valor máximo del esfuerzo de ingeniería que se puede aplicar sobre el material. Este representa el punto más alto en la gráfica esfuerzo – deformación.

Esfuerzo de ruptura: Es el esfuerzo que se presenta cuando se da la fractura del material y suele ser menor que el esfuerzo último.

Módulo de elasticidad: También conocido como módulo de Young, es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la región elástica. La magnitud del módulo de elasticidad es una medida de la resistencia a la separación de los átomos contiguos, es decir, está relacionado con el valor de unión de los enlaces atómicos. La fuerza de los enlaces primarios iónico, covalente y metálico son relativamente fuertes y la de los enlaces secundarios como el Van der Waals y los puentes de hidrógeno son relativamente débiles. Un módulo de elasticidad muy alto indica una pendiente pronunciada de la zona elástica en la curva esfuerzo-deformación, indicando que se necesita mayor energía para separar los enlaces de los átomos del material.

Tenacidad: Es la energía por unidad de volumen que el material puede absorber antes de llegar a la fractura, se calcula como el área bajo la curva de esfuerzo-deformación.

Resiliencia: Es el área bajo la curva en la zona elástica y representa la energía por unidad de volumen que absorbe el material cuando se deforma elásticamente.

Ductilidad: Es la medida de la cantidad de deformación plástica que puede darse en un material antes de la fractura. La ductilidad se puede medir por porcentaje de elongación o por porcentaje de reducción de área.

La norma ASTM D882 (2012) describe el método para preparar montar y ensayar laminas plásticas delgadas con el fin de determinar las propiedades mecánicas mediante ensayos de tensión. El procedimiento para el ensayo consta en colocar el espécimen entre las mordazas de la máquina de ensayo, ajustándolas de manera que se minimice el desprendimiento del espécimen durante el ensayo, luego se aplica una fuerza axial la cual incrementa constantemente en función del tiempo hasta llegar a la fractura del espécimen, generando así la gráfica de la carga contra la deformación.

3.4. CONCRETO

El concreto puede ser definido como la mezcla de un material aglutinante (normalmente cemento Portland Hidráulico), materiales de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un sólido compacto y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos a compresión. Generalmente se utiliza en estructuras de concreto armado con acero, ya que la asociación de estos dos materiales proporciona un sólido único desde el punto de vista mecánico (ASOCRETO 2010).

3.4.1. Agregados del concreto

Los agregados son el mayor constituyente del concreto, generalmente componen más del 70 % del material en un metro cúbico de concreto y son los que hacen que este sea un material económico en el campo de la construcción. Los agregados son cualquier sustancia

sólida o partículas añadidas intencionalmente al concreto que ocupan un espacio rodeado por pasta de cemento, de tal forma, que en combinación con esta proporcionan resistencia mecánica, al mortero o concreto en estado endurecido y controlan los cambios volumétricos que normalmente tienen lugar durante el fraguado del cemento, así como los que se producen por las variaciones en el contenido de humedad de las estructuras. Se han clasificado en agregado grueso y agregado fino, fijando un valor en tamaño de 0.075 a 4.76 mm para el fino o arena y de 4.76 mm en adelante para el grueso (ASOCRETO 2010).

Agregado fino: La Norma ASTM E11 (2015) establece la gradación o clasificación granulométrica de este agregado. Por lo general, esta clasificación se complementa con el módulo de finura (MF), que es igual a la centésima parte de la suma de los porcentajes retenidos acumulados en cada una de las mallas de la serie estándar (ASTM E11 (2015)). El rango de módulo de finura (MF) adecuado para la fabricación de concreto se encuentra desde 2.30 a 3.10 según la norma ASTM C 33 (2013). La arena cuyo MF es inferior a 2.30 es perjudicial para esta aplicación, porque suele requerir mayor consumo de cemento, lo cual repercute adversamente en los cambios volumétricos y en el costo del concreto. La arena con MF mayor de 3.10 es demasiado gruesa y también se considera inadecuada, porque tiende a producir mezclas de concreto ásperas y proclives al sangrado, dejando gran contenido de aire (ASOCRETO 2010). La granulometría debe satisfacer los límites inferior y superior que se dan en la norma ASTM C33 (2013):

Agregado grueso: La granulometría del agregado grueso se hace conforme a los tamices de la Norma ASTM E11 (2015). Para este agregado hay dos factores importantes:

Tamaño máximo: El tamaño máximo es el menor tamiz por el que se pasa toda la muestra.

Tamaño máximo nominal (TMN): El tamaño máximo nominal (TMN) de un agregado, es el menor tamiz por el cual debe pasar la mayor parte del agregado, debe retener del 5 al 15 % del agregado.

El TMN se debe seleccionar teniendo en cuenta que en ningún caso debe exceder un quinto del menor de los lados del molde de la probeta, un tercio del espesor de las losas o las tres cuartas partes del espaciamiento libre entre varillas individuales de refuerzo (ASOCRETO 2010). La granulometría del agregado grueso se hace conforme a la norma ASTM C33 (2013).

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, formando un material compuesto compacto. Los cementos pueden ser clasificados de acuerdo con su resistencia mecánica, su composición (Portland, siderúrgicos y puzolánicos), por propiedades especiales como bajo calor de hidratación, resistencia a medios agresivos y rápido desarrollo de resistencia o por su utilización. El cemento Portland es ampliamente utilizado en todos los segmentos de la industria de la construcción, y es una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso (ASOCRETO 2010). La norma ASTM C150 (2015) suministra una clasificación del cemento Portland.

El agua es un ingrediente fundamental en la elaboración de concreto y mortero debido a que desempeña una función importante en estado fresco y endurecido. Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto a la cantidad para proveer una relación agua/cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero es evidente, que para usarla en el lavado de agregados (áridos), en la preparación de la mezcla o durante el curado del

concreto, no solamente su cantidad es importante, sino también su calidad química y física (ASOCRETO 2010).

3.4.2. Concreto reforzado con fibras

M. Hsie et al. (2008) estudiaron las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras híbridas de polipropileno, incluyendo cantidades entre 3 – 9 kg/m³ de monofilamentos gruesos y 0.6 kg/m³ de fibras cortas. Los resultados experimentales comparado con las propiedades del hormigón sin adición de fibras mostraron un aumento entre 14.60 – 17.31 % la resistencia a la compresión, entre un 8.88-13.35 % la resistencia a la rotura por fraccionamiento y un aumento en el módulo de ruptura entre 8.99-24.60 % del hormigón reforzado con fibras híbridas de polipropileno.

S. B. Kim et al. (2009) compararon el hormigón reforzado con fibras de tereftalato de polietileno (PET) reciclado frente al hormigón de armado con fibra de polipropileno (PP), para fracciones de volumen de fibra de 0.5 %, 0.75 % y 1.0 %. Realizaron ensayos de flexión para medir la resistencia y la capacidad de ductilidad de las muestras de hormigón reforzado con fibra de PET reciclado. Los resultados mostraron que en las muestras de hormigón reforzado con fibras de PET reciclado hubo una ligera disminución en la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad a medida que aumentaba la fracción en volumen de fibra incorporada. Los especímenes de PET reciclado y reforzados con fibra de PP mostraron reducciones de la resistencia a la compresión entre 1 – 9 % y 1 – 10 %, respectivamente, en comparación con muestras sin refuerzo de fibra. En cuanto al rendimiento de los miembros estructurales, la resistencia máxima a flexión y la ductilidad

relativa de las vigas reforzadas con fibras de PET son significativamente mayores (30 %) que las de las muestras de concreto sin refuerzo de fibra.

F. Fraternali et al. (2011) realizaron un estudio experimental de la conductividad térmica, la resistencia a la compresión, la primera resistencia a las fisuras y los índices de ductilidad del hormigón reforzado con fibra de PET reciclado (RPETFRC). Dichas fibras de PET fueron extruidas industrialmente de escamas de botellas de PET recicladas con diferentes propiedades mecánicas y perfiles, implementaron una dosis de fibra volumétrica al 1 %, se observan mejoras marcadas en la resistencia térmica, las resistencias mecánicas y la ductilidad de RPETFRC, en comparación con el concreto plano. Los resultados que encontraron fue una disminución del 18 % en la conductividad térmica, 35 % de aumento en la resistencia a la compresión, un 41 % de aumento en la primera resistencia a la fractura, y un incremento del 656 % en el índice de ductilidad final. Los autores concluyeron en que el refuerzo del hormigón a través de las fibras de PET recicladas es una técnica de refuerzo bien adaptada para nuevos análisis experimentales y un buen candidato para la experimentación estructural en los campos de los materiales.

Karahan y Atiş (2011) realizaron un estudio algunas propiedades del hormigón con inclusión de fibras de polipropileno y cenizas volantes, tales como el peso unitario, la trabajabilidad, la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, entre otras propiedades. El contenido de cenizas volantes que utilizaron en la mezcla de hormigón fue de 0 %, 15 % y 30 % en masa, y la fracción de volumen de fibra fue 0 %, 0.05 %, 0.10 % y 0.20 % en volumen. Los resultados del estudio mostraron que la adición de fibra de polipropileno y cenizas volantes reduce el peso unitario. Se evidenció que la inclusión de las cenizas volantes aumenta la trabajabilidad del hormigón, mientras que hay una disminución con la inclusión de fibra de polipropileno. Por otro lado, la resistencia a la

compresión disminuyó con el aumento del contenido de cenizas volantes. La influencia de la fibra de polipropileno no afectó la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad.

Figueroa (2013) realizó un estudio comparativo de la tenacidad del concreto convencional, concreto reforzado con fibras de acero y concreto reforzado con fibras de polipropileno, realizando ensayos de compresión, de flexión y tracción indirecta, empleando una concentración de 0.33 % de volumen para ambas fibras, encontrando que el concreto reforzado con fibras de polipropileno es capaz de presentar una mayor deformación y una carga más elevada incluso después del agrietamiento, hasta que falla la adherencia de las fibras. Para el concreto reforzado con fibras de acero se encontró que proporcionan mayor energía de fractura, produciendo un incremento en la resistencia a la compresión, a la tracción, a la fatiga y al esfuerzo cortante. Por otro lado, las fibras de polipropileno aportan resistencia al impacto y la ductilidad del hormigón mejorando su comportamiento frente a sismos y viento.

E. Rahmani et al. (2013) estudiaron el efecto en las propiedades mecánicas del hormigón, sustituyendo el 5 %, 10 % y 15 % de la arena por partículas procesadas de PET. Para ello fabricaron muestras cúbicas y cilíndricas con diferentes relaciones de agua/cemento y someténdolas a ensayos de compresión y flexión. Los resultados mostraron que para una proporción de agua/cemento constante, la trabajabilidad del hormigón fresco disminuía a medida que aumentaba la cantidad de contenido de PET en la mezcla, además, los especímenes exhibieron diferentes comportamientos en resistencia a la compresión y a la flexión, siendo el 5 % de sustitución de los agregados finos con partículas de PET, el que produjo la resistencia a la compresión óptima. De hecho, para el 5 % del contenido de PET, detectaron un 8.86 % y un 11.97 % de aumento en la resistencia a la compresión del

hormigón. Igualmente, demostraron que el hormigón con 10 % de volumen de agregados finos reemplazados con partículas de PET, tienen la misma resistencia y menor módulo de elasticidad que los especímenes de control. Por último, para los especímenes de hormigón con 15 % en contenido de PET la resistencia disminuyó entre un 15.90 % y un 18.06 %, y una reducción en el módulo de elasticidad en un 20 % y un 23 %. Concluyeron en que los residuos de botellas de PET en forma de partículas pueden ser reutilizados como agregados en la tecnología del concreto, siendo este propósito una solución medioambiental para dichos residuos.

S. Spadea et al. (2015) investigaron la aplicación de fibras de nylon recicladas de redes de pescas usadas como material de refuerzo para morteros de concreto comparándolos con morteros no reforzados mediante ensayos de compresión, los resultados del estudio indicaron que las fibras de nylon reciclado mejoran significativamente la resistencia a tracción (hasta un 35 %) y las propiedades de fractura de los morteros. Además, se observaron incrementos notables en los índices de tenacidad y en los factores de resistencia residual tanto al aumentar el porcentaje de fibras (del 1.0 % al 1.5 %) como al aumentar la longitud de la fibra de nylon reciclada incluida en la mezcla. De esta manera, concluyeron que las propiedades de dureza y ductilidad de morteros y hormigones se benefician significativamente con la adición de fibras de refuerzo recicladas a la mezcla de diseño.

Pešić et al. (2016) estudiaron las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras de polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado, a través del ensayo de siete series de muestras: una hecha de hormigón liso y, para cada uno de los dos diámetros de fibra de 0.25 y 0.40 mm, tres series con 0.40 %, 0.75 % y 1.25 % de fracción volumétrica de fibras. Aunque la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad del hormigón no

se vieron afectados, la resistencia a la tracción y el módulo de flexión aumentaron entre 3 y 14 % en presencia de fibras de HDPE. Las fibras contribuyeron principalmente proporcionando una mejor ductilidad de flexión post-craqueo y mejorando las propiedades de mantenimiento del hormigón, tales como la reducción del encogimiento por contracción plástica, la contracción por secado y la permeabilidad al agua. La durabilidad de las fibras de HDPE se evaluó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) que no mostró signos de deterioro químico en el concreto. Todos los hallazgos sugieren que las fibras de HDPE recicladas pueden ser utilizadas en la creación de una nueva cadena de valor en la industria de la construcción, al tiempo que contribuyen positivamente a su desempeño ambiental.

R. P. Borg et al. (2016) investigaron el rendimiento del hormigón reforzado con fibras de tereftalato de polietileno (PET), a partir de botellas recogidas de residuos, mediante ensayos de compresión y flexión a tres puntos. Ensayaron nueve mezclas con diferentes longitudes de fibra, de 30 y 50 mm, para tres fracciones de volumen diferentes en el hormigón, teniendo como resultado una reducción de entre 0.5 % y 8.5 % en resistencia a la compresión en comparación con la muestra de control, a medida que aumentaba el volumen de fibra en la mezcla se observó una disminución en la resistencia de los especímenes, además, las muestras que contenían fibras más cortas se comportaron ligeramente mejor en comparación con los que contenían fibras más largas. Por otro lado, los resultados de las pruebas de flexión mostraron que los hormigones que contenían fibras alcanzaron una carga de pico más alta que las muestras de control. Concluyendo en que la resistencia residual después de la fisuración dependía de la fracción de volumen de fibra, ya que con volúmenes de fibra más altos proporcionaron la mejor resistencia residual,

evaluando exitosamente la factibilidad de usar fibras de PET reciclado como refuerzo en el hormigón.

Yin et al. (2016) realizaron un estudio comparativo entre el hormigón armado de fibra de polipropileno virgen y reciclado, teniendo en cuenta la resistencia al álcali y el rendimiento de las fibras de polipropileno (PP) recicladas en los hormigones. Los resultados del estudio demostraron que la fibra de PP reciclada tuvo muy buena resistencia al álcali en el hormigón y en otros entornos alcalinos. La fibra de PP reciclado mostró un excelente comportamiento después de la fisuración en el hormigón, produciendo una ductilidad significativa, comparada con la producida por la fibra de PP virgen. Finalmente, los resultados mostraron que la fibra de PP reciclada produjo una mejor resistencia a la tracción que la fibra de PP virgen.

3.4.3. Ensayo de compresión para concreto

La norma ASTM C39/C39M (2014) establece el procedimiento y las condiciones para realizar el ensayo a compresión en probetas cilíndricas de concreto. El método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a probetas a una velocidad de 0.24 ± 0.035 MPa/s (35 ± 7 psi/s) hasta alcanzar la falla. La figura 3.4 muestra las fallas que se pueden presentar en el concreto después de ser sometido a ensayos de compresión. El criterio de falla se da cuando la carga alcanza el 95 % de la carga máxima aplicada. Se debe tomar como carga de falla el máximo de los valores encontrados en los ensayos. La resistencia a compresión en Pa (σ) de la probeta se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada en N (F_{max}) entre el área de sección transversal de la probeta en m^2 (A) (ASOCRETO 2010).

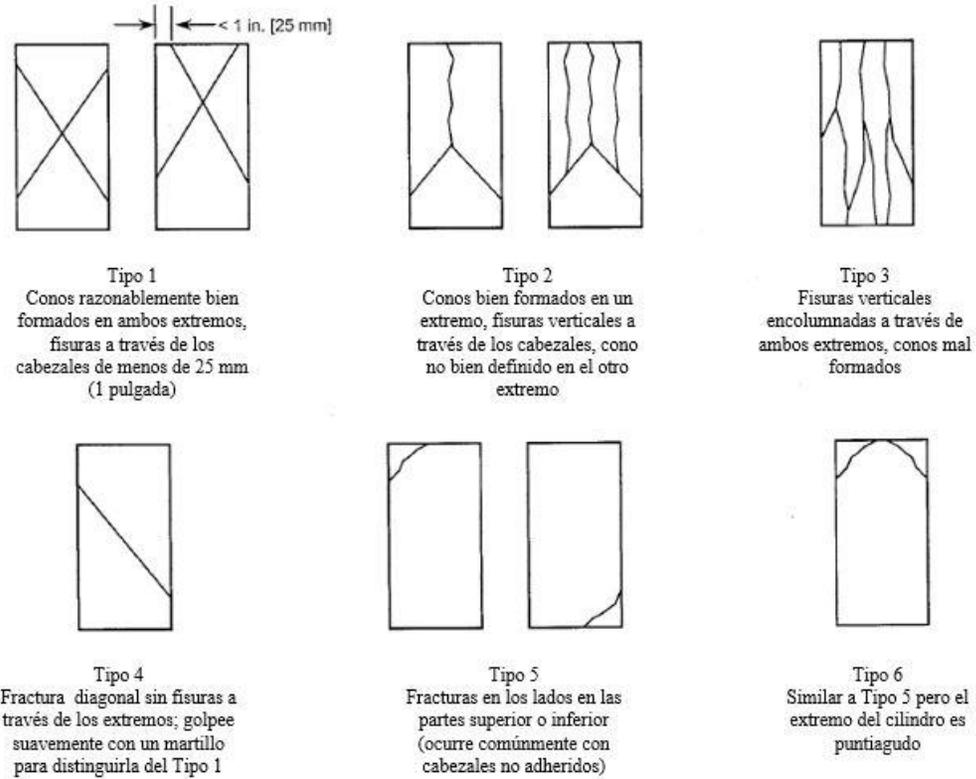


Figura 3.4: Tipos de fallas comunes en probetas de concreto ensayadas a compresión
Fuente: (Norma ASTM C39/C39M 2014)

3.4.4. Ensayo de flexión para concreto

El ensayo de flexión en probetas prismáticas (viguetas) de concreto puede realizarse conforme a la norma ASTM C293 (2016). El procedimiento de ensayo consiste en acentuar la probeta sobre dos puntos de apoyo de la máquina de ensayo, y aplicar una carga perpendicular al centro de la probeta, con una velocidad constante hasta alcanzar el punto de rotura. Se debe tomar la carga máxima alcanzada el valor registrado cuando la probeta alcanza la fractura o falla. Este método de ensayo se utiliza para determinar el módulo de rotura de los especímenes de concreto preparados y curados de acuerdo con las normas ASTM C31 (2008) y ASTM C293 (2016). Los parámetros mecánicos obtenidos

del ensayo son la resistencia a la flexión, y el módulo de elasticidad en flexión los cuales se calculan acorde a las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

$$\text{Resistencia a la flexión: } \sigma = \frac{3FL}{2wh^2} \quad (1)$$

$$\text{Módulo de elasticidad en flexión: } MR = \frac{L^3F}{4wh^3\delta} \quad (2)$$

Donde F es la carga de rotura, L la longitud entre apoyos, w es el ancho, h el alto, y (δ) se denota como la deflexión de la muestra cuando es sometida a una carga F. En la figura 3.3 se muestra el montaje y para qué fin es utilizado el ensayo de flexión. Los resultados de ensayo a flexión son registrados en la curva carga frente a la tasa de deformación, o también en la curva de esfuerzo frente a la deformación. (Askeland 2010).

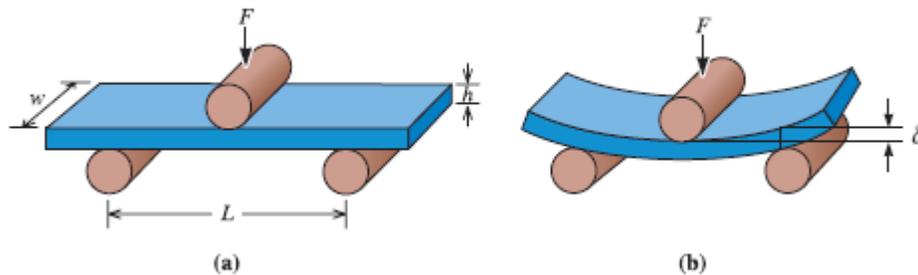


Figura 3.5: a) El ensayo de flexión es utilizado con frecuencia para medir la resistencia de materiales frágiles y b) la deformación (δ) obtenida por flexión.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente trabajo se utilizaron fibras de tereftalato de polietileno (PET) y polipropileno (PP) reciclados. Se determinó la densidad a las fibras de PET y PP, y se determinaron sus propiedades mecánicas a través de ensayos de tensión. Posteriormente, mediante ensayos mecánicos de compresión y flexión se estudió el efecto en las propiedades mecánicas del concreto tales como la resistencia a la compresión y los parámetros mecánicos, como carga de rotura, resistencia a la flexión y módulo de elasticidad en flexión, adicionando fibras en diferentes concentraciones. A continuación, se presentan los materiales y métodos utilizados en este trabajo.

4.1. OBTENCIÓN, DETERMINACIÓN DE DENSIDAD Y ENSAYO DE TENSIÓN DE LAS FIBRAS DE PET Y PP

4.1.1. Obtención de fibras de PET y PP

Inicialmente se realizó el proceso de obtención de las fibras de PET y PP requeridas para los ensayos de tensión, obteniendo 5 muestras por cada material con la finalidad de ser ensayadas. Estas muestras tendrían una dimensión de 5 mm de ancho (Foti, D 2011) y 250 mm de longitud. Con la ayuda de un micrómetro marca Mitutoyo con resolución de 0.001 mm y un rango de 0 – 25.4 mm, se determinó que el espesor de las muestras de PET y PP fueron de 0.27 mm y 0.11 mm respectivamente.

Las fibras de PET fueron obtenidas a partir de botellas plásticas suministradas por una empresa productora de bebidas gaseosas ubicada en la ciudad de Montería, las botellas

fueron desfibradas de forma manual mediante una herramienta de corte de fabricación propia. Las botellas para la obtención de las fibras se muestran en la figura 4.1.



Figura 4.1: Botellas en diferentes presentaciones utilizadas para la obtención de las fibras de PET.

Fuente: Los autores.

Las fibras del PP se obtuvieron de vasos desechables de 9 onzas, los cuales fueron recolectados en diferentes puntos de ventas de comidas rápidas ubicados en el municipio de Cereté, estos vasos fueron desfibrados manualmente a partir de un dispositivo de corte de fabricación propia, mostrado en la figura 4.2.

En la figura 4.3 se puede observar el vaso desechable empleado para la obtención de las fibras del PP.



Figura 4.2: Dispositivo de corte de fabricación propia para obtención de fibras de PET y PP.

Fuente: Los autores.



Figura 4.3: Vaso desechable de 9 onzas utilizado para la obtención de fibras del PP.
Fuente: Los autores.

En las figuras 4.4, y 4.5 se observan la medición de la longitud y el proceso realizado para determinar el espesor de las muestras de PET y PP respectivamente.



Figura 4.4: Micrómetro marca Mitutoyo con resolución de 0.001 mm y un rango de 0 – 25.4 mm utilizado para determinar el espesor de las muestras de PET y PP.
Fuente: Los autores.

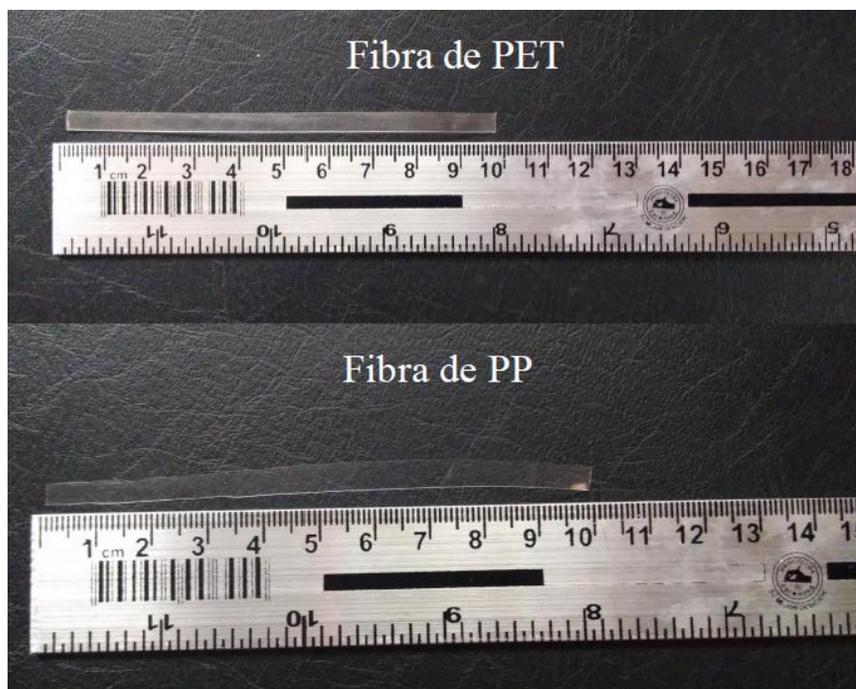


Figura 4.5. Medición de la longitud de las fibras de PET y PP.

Fuente: Los autores

4.1.2. Determinación de la densidad del PET y PP

Por otra parte, para la determinación de la densidad real del PET y PP se implementó la ecuación (4), se tomaron 4 y 8 muestras rectangulares de 50x70 mm de PET y PP respectivamente, y con un espesor medido anteriormente de 0.27 mm para el PET y de 0.11 mm para el PP, a estas muestras se les determinó la masa en una balanza OHAUS-Pioneer, con capacidad máxima de 210 g y resolución de 0.0001 g, en el laboratorio de Química General de la Universidad de Córdoba. Se determinaron ocho muestras de PP, con el fin de obtener una lectura amplia de la masa de estas, ya que se pudo observar que este material es más liviano que el PET. Posteriormente se procedió a calcular el volumen total de todas las muestras, para obtener el volumen de cada muestra se multiplicó longitud, ancho, espesor y número de muestras, como se muestra en la ecuación (3).

$$V_T = x * (l * b * h) \quad (3)$$

Donde,

x = numero de muestras

l = Longitud de la muestra

b = Ancho de la muestra

h = espesor de la muestra

$$\text{Densidad del material} = \frac{M_T}{V_T} \quad (4)$$

Donde,

M_T = masa total de las muestras

V_T = volumen total de las muestras

En la figura 4.6 se puede observar la balanza utilizada para determinar la masa de las muestras.



Figura 4.6: Balanza OHAUS-Pioneer, con capacidad máxima de 210 g y resolución de 0.0001 g empleada para determinar la masa de las muestras de PET y PP.
Fuente: Laboratorio de Química General de la Universidad de Córdoba

4.1.3. Ensayos de tensión en las fibras de PET y PP

Previo a la realización de los ensayos, se tomaron imágenes del borde de las probetas de PET y PP a través de un microscopio óptico de luz reflejada marca OLYMPUS GX 41, dotado con una cámara digital OMAX de 9 megapíxeles y con software de adquisición de imagen TOPVIEW V3,7. Esto con el fin de verificar las irregularidades producidas por el proceso de obtención, en la figura 4.7 se puede observar el microscopio utilizado.

Los ensayos de tensión en las fibras de PET y PP, se realizaron en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, en una máquina universal de ensayos marca Shimadzu con una capacidad máxima de 5 kN, con certificado de calibración No. 4625; también fue implementado un Extensómetro de contacto Ref.: SES 1000, marca Shimadzu, con certificado de calibración No. 3644, expedidos en el mes de diciembre del 2015 por el laboratorio de calibración Ingeniería de Control de Calidad División Laboratorio LTDA. – Bogotá (ICCLAB). Los ensayos de tensión en las fibras de PET y PP se realizaron bajo la norma ASTM D882 (2012) para conocer las propiedades mecánicas de esfuerzo último a tensión (σ_{ult}), esfuerzo de ruptura (σ_{rupt}), módulo de Young (E), porcentaje de deformación y tenacidad. Para el grupo de fibras de PET se implementó una celda de carga de 1 kN y las condiciones atmosféricas fueron: Humedad Relativa 69.5 % y Temperatura 17 °C. Las condiciones atmosféricas en el momento de realizar los ensayos del grupo de fibra de PP fueron: Humedad Relativa 77.8 % y Temperatura 15 °C. Se implementó una celda de carga de 50 N para el registro de los resultados. La velocidad del ensayo para ambos grupos de fibras fue de 25 mm/min acorde a lo sugerido en la norma.



Figura 4.7: Microscopio marca OLYMPUS GX 41, dotado con una cámara digital OMAX de 9 megapíxeles y con software de adquisición de imagen TOPVIEW V3,7.
Fuente: Los autores

Para calcular el esfuerzo se utilizó un área de sección transversal en un plano perpendicular al eje de la fibra. Se determinó el área de sección transversal teniendo en cuenta el ancho y espesor de las fibras de PET y PP. La figura 4.8 muestra la máquina universal de ensayos empleada para la realización del ensayo de tensión en las fibras de PET y PP.



Figura 4.8: Máquina universal de ensayos marca Shimadzu de 5 kN utilizada para ensayos de tensión en las fibras de PET y PP.
Fuente: Laboratorio de ensayos mecánicos, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

4.2. ELABORACIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN Y FLEXIÓN

4.2.1. Materiales para la elaboración de concreto y diseño de mezcla

Para la elaboración de las probetas de concreto se utilizó como agregado grueso piedra de canto rodado y como agregado fino arena natural, ambos fueron extraídos del lecho del río Sinú ubicado en el barrio Mocarí de la ciudad de Montería. Se usaron estos agregados por ser los más utilizados en la industria de la construcción en la región (UPME 2014). Se utilizó agua potable y cemento marca Ultracem Gris Tipo UG. Previo a la fabricación de las probetas de concreto, se realizó un análisis granulométrico a los agregados gruesos y finos en el laboratorio de suelos Robinson Martínez ubicado en la carrera 4 No 12ª 29 barrio Buenavista Montería bajo los lineamientos de la Norma ASTM C33 (2013). Este análisis granulométrico se efectuó para conocer el módulo de finura del agregado fino y el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso. En la figura 4.9 se muestran los tamices, herramientas y agregados utilizados en el desarrollo de este trabajo.



Figura 4.9: a) Tamices bajo la Norma ASTM D136 con los que se realizó la granulometría de los agregados. b) Herramientas (palaustre, martillo de goma, y varilla de acero) utilizadas durante el desarrollo del proyecto. c) Agregados grueso y fino utilizados para la preparación de concreto.

Fuente: Los autores.

Se realizó un diseño de mezcla para una resistencia última a compresión después de 28 días de curado de 2500 psi (17.23 MPa), resistencia sugerida para vigas, columnas y muros armados, acorde al procedimiento descrito por ASOCRETO (2010), en el cual se empleó

el asentamiento requerido para este tipo de concreto. Según la norma ASTM C33 (2013) los límites establecidos para el módulo de finura (MF) deben estar en el rango de $2.30 \leq MF \leq 3.10$. El módulo de finura está definido como el número que se obtiene al dividir por 100 la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie normalizada, comprendido desde el tamiz No. 4 (4.8 mm) hasta el tamiz No. 100 (0.15 mm). Para el tamaño máximo nominal (TMN) se establece que debe estar limitado por las dimensiones de la estructura teniendo presente que en ningún caso debe exceder a un quinto la menor dimensión entre los lados del molde de la probeta (ASOCRETO 2010). Debido a que los agregados cumplieron con las especificaciones granulométricas de la norma ASTM C33 (2013) se utilizó el método ACI 2011 para dosificar la arena y la grava. Con el asentamiento empleado y el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso se eligió la cantidad de agua de mezclado. Con la resistencia requerida de 2500 psi (175 kg/cm^2) y concreto sin contenido de aire se obtuvo la relación de agua/cemento y se calculó la cantidad de cemento.

Posteriormente, teniendo en cuenta el TMN y el módulo de finura se obtuvo interpolando la relación de volumen de agregado grueso secado en el horno por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino ($\frac{b}{b_0}$). Con los valores según las propiedades de densidad seca (MUC) y la densidad específica aparente de la grava (d_g) que se muestran en la tabla 5.10, y de acuerdo con la ecuación 5, se obtuvo el volumen de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino (b_0).

$$b_0 = \frac{MUC}{d_g} (5)$$

Luego se calculó la cantidad en volumen de grava necesaria para un metro cúbico de concreto de acuerdo con la ecuación 6.

$$B = \frac{b}{b_0} * b_0 \text{ (6)}$$

Donde,

B: Cantidad en volumen de grava para un metro cubico de concreto. [m³]

$\frac{b}{b_0}$: Volumen de agregado grueso secado en el horno por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino. [m³/m³]

MUC: Masa unitaria grava rio densidad seca. [kg/kg]

dg: densidad especifica aparente. [kg/m³]

El volumen de la arena es el complemento de la suma de los ingredientes encontrados para un metro cúbico de concreto. [m³]

Cabe resaltar que todas las cantidades encontradas son las necesarias para preparar un metro cúbico de concreto.

4.2.2. Fabricación de las probetas de concreto para ensayos de compresión y flexión

El procedimiento para la fabricación de los cilindros y viguetas de concreto se hizo acorde a la norma ASTM C31 (2008). Teniendo en cuenta el diseño de mezcla, se pesaron los agregados necesarios para llenar nueve cilindros de 150 mm de diámetro por 300 mm de alto y nueve viguetas de 150x150x500 mm, posteriormente en una superficie lisa se mezcló con una pala la arena y la grava hasta obtener una mezcla homogénea. Luego se adicionó la cantidad de cemento y el porcentaje en volumen de fibra (PP o PET) para luego realizar el proceso de mezclado. Seguidamente se añadió la cantidad de agua requerida y por último se mezcló hasta obtener una consistencia plástica.

Con aceite hidráulico usado se recubrieron internamente los moldes de acero y madera, para evitar que la mezcla se adhiriera a las paredes de estos al momento del fraguado del concreto. Para los moldes cilíndricos el llenado con la mezcla de concreto se realizó en tres capas iguales y para moldes prismáticos se llenaron en dos capas de igual volumen, por cada capa se aplicaron 25 apisonados con una varilla de acero de punta redondeada, posteriormente se golpearon 15 veces los moldes externamente con un martillo de goma para cerrar cualquier orificio dejado durante el apisonado, liberar el aire atrapado en la mezcla y lograr un asentamiento de la misma. Después de la compactación, se enrasó la superficie retirando el exceso de concreto con una llana. Luego de 24 horas se retiraron los moldes, y se sumergieron en agua para llevar a cabo el proceso de curado de 3, 7 y 28 días respectivamente. En la figura 4.10 se muestran los moldes utilizados para la fabricación de las probetas para ensayos de compresión y flexión.



Figura 4.10: Moldes cilíndricos y prismáticos bajo la norma ASTM C31(2008) usados para la realización de las probetas de compresión y flexión.

Fuente: Los autores.

Además, se elaboraron 4 tipos diferentes de probetas de concreto reforzado con fibras de PET, y 4 tipos diferentes de probetas de concreto reforzado con fibras de PP, según el porcentaje de fibra incorporada en la mezcla de concreto tanto para ensayos de compresión y flexión a tres puntos.

En la tabla 4.1 se observa las nomenclaturas asignadas para las muestras, el número total de probetas de control elaboradas, la distribución de las probetas de concreto con adición de fibras según los días de curado, el tipo de fibra incorporada, el porcentaje en volumen de fibra y la cantidad total de muestras fabricadas, tanto para ensayos de compresión como para ensayos de flexión a tres puntos respectivamente.

Tabla 4.1: Cantidad total de probetas con adición de fibras de PET y PP fabricadas para ensayos de compresión y flexión.

Nomenclatura	Porcentaje de fibra (%)	Cantidad de probetas fabricadas para 3 días de curado	Cantidad de probetas fabricadas para 7 días de curado	Cantidad de probetas fabricadas para 28 días de curado	Cantidad total de probetas fabricadas
MC-PET	0.5	3	3	3	9
MC-PET	1.0	3	3	3	9
MC-PET	1.5	3	3	3	9
MC-PET	2.0	3	3	3	9
TC	0.0	3	3	3	9
MC-PP	0.5	3	3	3	9
MC-PP	1.0	3	3	3	9
MC-PP	1.5	3	3	3	9
MC-PP	2.0	3	3	3	9
MF-PET	0.5	3	3	3	9
MF-PET	1.0	3	3	3	9
MF-PET	1.5	3	3	3	9
TF	0.0	3	3	3	9

MF-PP	2.0	3	3	3	9
MF-PP	0.5	3	3	3	9
MF-PP	1.0	3	3	3	9
No. total de probetas fabricadas para ensayos de compresión y flexión:					162

MC: Muestra de compresión, TC: Muestra de control para ensayo de compresión, MF: Muestra de flexión, TF: Muestra de control para ensayo de flexión.

Fuente: Los autores

El número total de réplicas por cada muestra de concreto, en este caso tres, se determinó teniendo en cuenta la variabilidad de datos que podían presentarse durante la realización de los ensayos.

4.3. ANÁLISIS DE DENSIDAD A LAS PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON PET Y PP

Previo a la realización de los ensayos de compresión y flexión, se efectuó un análisis de densidad a las probetas de concreto reforzadas con PET y PP comparadas con las probetas de control. Para esto se determinó la masa de cada probeta de concreto mediante la utilización de una balanza modelo YZ-601, con capacidad máxima de carga de 40 kg.

Se determinó la masa de cada una de las probetas descritas en los anexos A7 y A8.

Para determinar el volumen de las probetas de compresión y flexión se utilizaron las ecuaciones (7) y (8) respectivamente.

$$V_c = \frac{\pi}{4} D^2 h \quad (7)$$

$$V_f = b * h * l \quad (8)$$

Donde,

V_c : Volumen de probeta cilíndrica [mm³]

D : diámetro del cilindro de concreto (150 mm)

h: Altura de probeta de concreto (300 mm)

V_f: Volumen de la probeta prismática [mm³]

b: ancho de la probeta de concreto (150 mm)

l: Longitud de la probeta prismática [mm]

Posteriormente, se realizó el cálculo de la densidad del material teniendo en cuenta el volumen de cada probeta, después se procedió a realizar el análisis de comparación de las densidades de todas las probetas sin adición de fibras respecto a todas las probetas con adición de fibras, tanto para ensayos de compresión y flexión. Se empleó la ecuación (9) para determinar la densidad de las probetas.

$$\text{Densidad de la probeta} = \frac{\text{Masa de la probeta}}{\text{Volumen de la probeta (Vc ó Vf)}} \quad (9)$$

4.4. ENSAYO DE COMPRESIÓN EN PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PET Y PP

Los ensayos de compresión en probetas de concreto reforzado con fibras de PET y PP se realizaron en el laboratorio de suelos Robinson Martínez en la ciudad de Montería, en una máquina PINZUAR modelo PC 42, la cual se muestra en la figura 4.11.



Figura 4.11: Máquina PINZUAR modelo PC 42 utilizada para los ensayos de compresión a las probetas de concreto reforzado con fibras de PET y PP.

Fuente: Los autores

Los ensayos se realizaron bajo la norma ASTM C39/C39M (2014) con una velocidad de ensayo de 0.24 ± 0.035 MPa/s. Se ensayaron 3 probetas para cada una de la nomenclatura relacionada en la tabla 4.1 para los tiempos de curado de 3, 7 y 28 días respectivamente. Cuando se alcanzó la fractura en cada probeta, los ensayos fueron suspendidos, y este valor fue tomado como la carga de falla encontrada en los ensayos. La resistencia a compresión de la probeta (σ), se calculó dividiendo la carga máxima alcanzada (F_{max}) entre el área de la sección transversal de la probeta (A), como se mostró en la ecuación (10). Los resultados se analizaron teniendo en cuenta el esfuerzo último (σ) (resistencia a la compresión), el tipo de fibra incorporada, el porcentaje de fibra y el tipo de falla.

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A} \quad (10)$$

4.5. ENSAYOS DE FLEXIÓN A TRES PUNTOS EN PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PET Y PP

Los ensayos de flexión a tres puntos de las probetas se realizaron en el laboratorio de materiales y procesos de la Universidad de Córdoba, en una máquina universal de ensayos MTS Criterion modelo 45, con capacidad máxima de carga de 300 kN, la cual se observa en la figura 4.12.

Estos ensayos fueron realizados acorde a lo establecido en la norma ASTM C293 (2016), con una velocidad de ensayo de 0.1 mm/s. Se ensayaron 3 probetas para cada nomenclatura mencionada en la tabla 4.1 para los 3,7, y 28 días de curado. Cabe resaltar que la distancia entre apoyos que indica la norma debe ser de 450 mm, pero la máquina de ensayos empleada no contaba con un rango que incluyera dicha medida, por ende, se estableció una distancia entre apoyos de 340 mm, la cual se encontraba dentro del rango de la máquina.

Cada probeta fue acentuada sobre los puntos de apoyo de la máquina de ensayo, luego se realizó la medición de la distancia entre apoyos para que coincidiera con las marcadas en la probeta, después la cabeza de carga se colocó en contacto con la superficie superior del espécimen para verificar que la cabeza de carga estuviera aplicada en el centro del espécimen y de esta manera se realizará la aplicación de la carga. En la figura 4.13. se muestra el montaje descrito anteriormente.

Cuando la probeta alcanzó la fractura o falla, el ensayo fue suspendido para el posterior registro de la carga máxima alcanzada, y con las dimensiones tomadas al espécimen fracturado se calcularon parámetros mecánicos de ensayo tales como la resistencia a la

flexión, y el módulo de elasticidad en flexión como se muestra en las ecuaciones (11) y (12) respectivamente.

$$\text{Resistencia a la flexión: } \sigma = \frac{3FL}{2wh^2} \quad (11)$$

$$\text{Módulo de elasticidad en flexión: } MR = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta} \quad (12)$$

Donde,

F : Carga de rotura [kN]

L : Longitud entre apoyos [mm]

w : ancho [mm]

h : alto [mm]

δ : deflexión [mm]

Los resultados se discutieron teniendo en cuenta la carga de rotura, resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad en flexión, el tipo de fibra incorporada, el porcentaje de fibra y el tipo de falla. Es importante realizar la aclaración que debido a la inexistencia en el laboratorio de un extensómetro que pudiese registrar la deflexión real que mostraron las probetas, el valor de la deflexión se tomó como el desplazamiento registrado por el cabezal de carga de la máquina de ensayos.



Figura 4.12: Máquina de ensayo universal marca MTS Criterion modelo 45, con capacidad máxima de carga de 300 kN.
Fuente: Los autores.

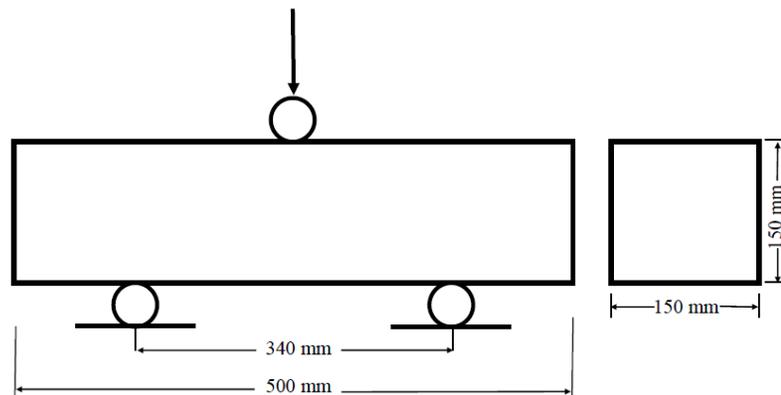


Figura 4.13: Diagrama del montaje de la probeta empleada para los ensayos de flexión a tres puntos.
Fuente: Los autores.

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. OBTENCIÓN DE LAS FIBRAS DE PET Y PP

Para las botellas de PET se encontró que es aprovechable un 55 % del envase de 3.125 L, un 35 % de los envases de 1.5 L, y un 28 % de los envases de 0.25 L, esto debido a la geometría de la herramienta de corte utilizada para obtener estas fibras.

Para los vasos desechables de PP se encontró que es aprovechable un 61 % de los vasos de 9 onzas, y el 39 % restante no es apto, debido a que estos no presentan la forma adecuada para obtener la fibra mediante la herramienta de corte usada para este fin.

En la figura 5.1 se observan el método de obtención de las fibras de PET y PP, y los materiales empleados para este fin.



Figura 5.1: a) Dispositivo de corte empleado para la obtención de las fibras de PET. b) Herramienta de corte empleada para la obtención de fibras de PP. c) Botellas de PET empleadas para la obtención de las fibras. d) Vasos desechables de PP usados para la obtención de las fibras de PP.

Fuente: Los autores

5.2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL PET Y PP

La medición de la masa de las muestras de PET fueron las siguientes:

Tabla 5.1: Medición de masa para las cuatro muestras de PET

Muestra	Masa (g)
M1	1.2358
M2	1.2354
M3	1.2361
M4	1.2359
M_T (Masa total)	4.9432

Fuente: Los autores

Utilizando la ecuación (3), el volumen total de las muestras de PET fue:

$$V_T = 4(0.07)(0.05)(2.7 \times 10^{-4})(m^3)$$

Por lo tanto, el volumen total calculado de las cuatro muestras fue: $V_T = 3.78 \times 10^{-6} m^3$

Utilizando la ecuación (4), la densidad para el PET fue:

$$Densidad\ del\ PET = \frac{4.9432 \times 10^{-3} Kg}{3.78 \times 10^{-6} m^3} = 1307.73 Kg/m^3$$

$$Densidad\ del\ PET = 1308 Kg/m^3$$

La medición de la masa de las muestras de PP fueron las siguientes:

Tabla 5.2: Medición de masa para las ocho muestras de PP

Muestra	Masa (g)
M1	0.4037
M2	0.4034
M3	0.4040
M4	0.4036
M5	0.4038
M6	0.4039
M7	0.4035
M8	0.4037
M_T (Masa total)	3.2296

Fuente: Los autores

Utilizando la ecuación (3), el volumen total de las muestras de PP fue:

$$V_T = 8(0.07)(0.05)(1.1 \times 10^{-4})(m^3)$$

Así el volumen total calculado de las ocho muestras fue: $V_T = 3.08 \times 10^{-6} m^3$

Utilizando la ecuación (4), la densidad para el PP fue:

$$Densidad\ del\ PP = \frac{3.2296 \times 10^{-3} Kg}{3.08 \times 10^{-6} m^3} = 1048.57\ Kg/m^3$$

$$**Densidad\ del\ PP = 1049\ kg/m^3**$$

En la tabla 5.3 se muestran las densidades teóricas del PET y PP.

Tabla 5.3: Densidades teóricas y obtenidas del PET y PP.

Muestra	Densidad Teórica (kg/m³)	Fuente Bibliográfica	Densidad obtenida (kg/m³)
PET	1380	Foti D. (2016)	1308
PP	910	Muntean R. et al. (2017)	1049

Fuente: Los autores.

Esta variación entre las densidades obtenidas y las densidades teóricas encontradas puede ser causada por los diferentes procesos de manufactura a los que fueron sometidos estos materiales para la obtención de estos productos finales (botellas y vasos desechables).

5.3. ENSAYOS DE TENSIÓN EN LAS FIBRAS DE PET Y PP

En la figura 5.2 se muestran las curvas de esfuerzo-deformación unitaria en forma general para las fibras de PET y PP ensayadas a tensión. En esta gráfica se ratifica que las fibras de PET mostraron una mayor resistencia a la tracción comparadas con las fibras de PP. Además, la ductilidad que presentaron las fibras de PP fue baja respecto a las presentadas por las fibras de PET, así mismo en la figura se puede observar claramente que las fibras de PET cuentan con una mayor tenacidad que las fibras de PP. Todo esto evidencia que el PP es un material menos resistente que el PET.

Por otro lado, todas las fibras de PET y PP mostraron un comportamiento típico de fibras poliméricas ensayadas en tensión, al inicio del ensayo se dio la región lineal donde el esfuerzo incrementa de manera constante en función de la deformación unitaria como se muestra en la figura 5.3.

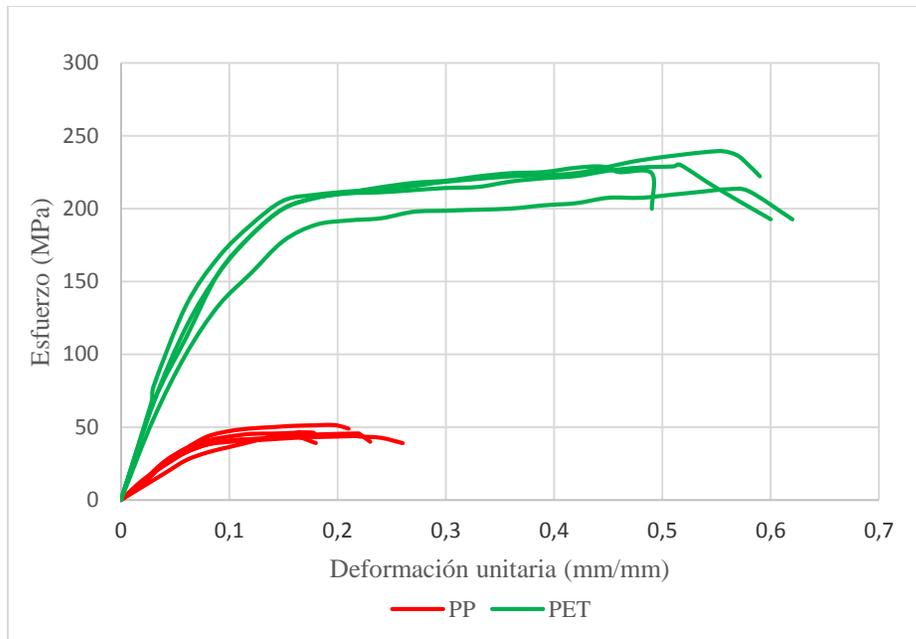


Figura 5.2: Graficas de esfuerzo-deformación unitaria para cinco muestras de fibras de PET y PP ensayadas a tensión
Fuente: Los autores

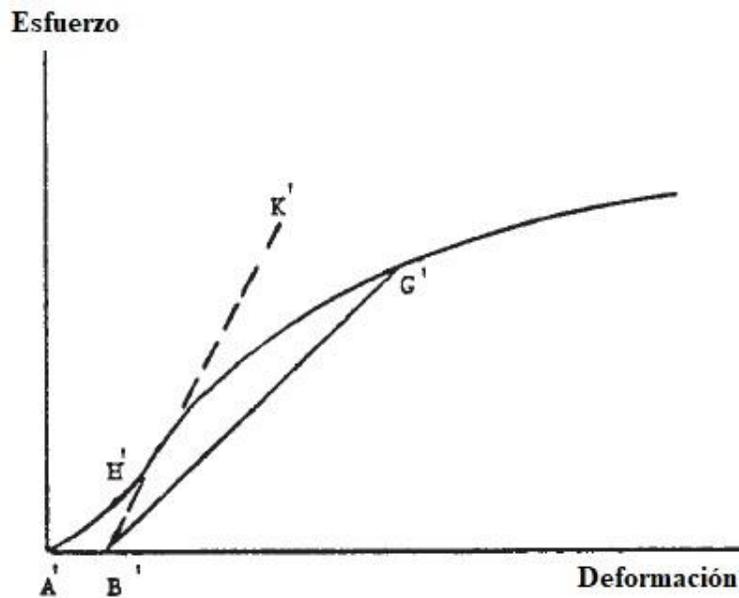


Figura 5.3: Grafica típica de esfuerzo vs deformación para materiales poliméricos de la norma ASTM D882 2012
Fuente: (Norma ASTM D882 2012)

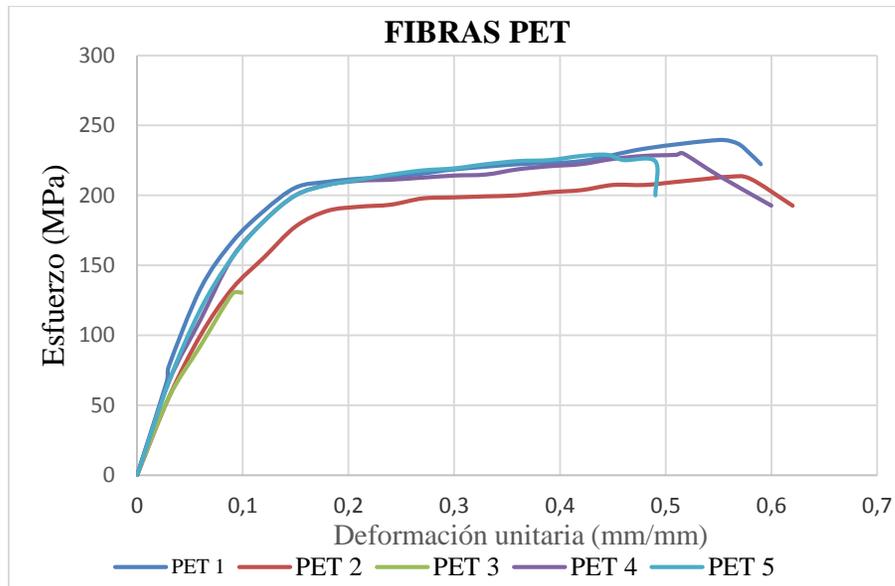


Figura 5.4: Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para cinco muestras de fibras de PET donde se evidencian los esfuerzos a tensión alcanzados
Fuente: Los autores

Durante el ensayo la muestra PET 3 falló previo al esfuerzo de fluencia debido a la concentración de esfuerzos producidos por el método de obtención de las probetas, por lo que no se muestra en la figura 5.2.

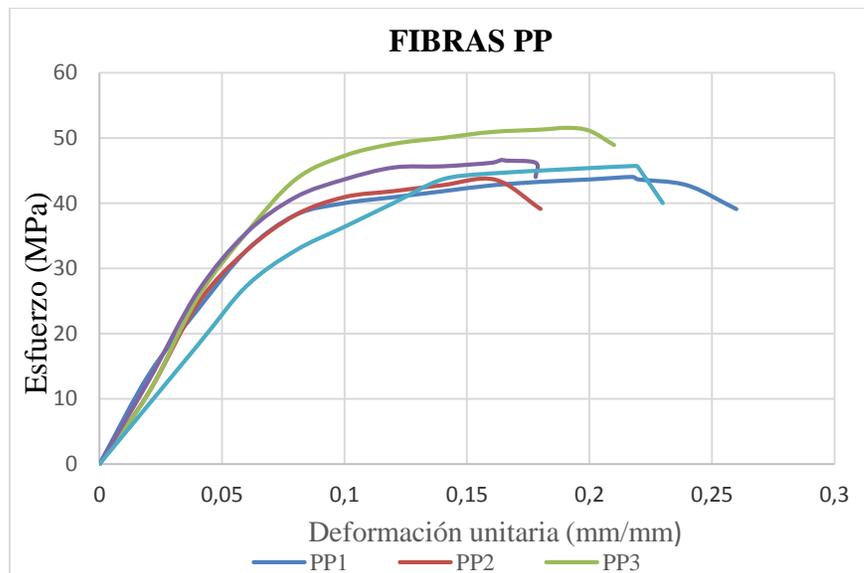


Figura 5.5: Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para cinco muestras de fibras de PP donde se evidencian los esfuerzos a tensión alcanzados
Fuente: Los autores

A continuación, en la tabla 5.4. se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de tensión a las fibras:

Tabla 5.4: Propiedades de las fibras de PET y PP medidas en ensayo de tensión

Muestra	Esfuerzo Último (MPa)	% Deformación a ruptura	Módulo de Young (MPa)	Tenacidad (MJ/m ³)
PET	208.45 ± 44.54	43.22 ± 19.58	2144.99 ± 438.51	114.08 ± 3.74
PP	46.29 ± 3.19	20.52 ± 4.02,	666.57 ± 77.69	8.73 ± 9.39

Fuente: Los autores

Se pudo observar que el esfuerzo último para las fibras de PP alcanzo un 22.2 % de la resistencia última de las fibras de PET, como se muestra en la figura 5.6, mientras que el porcentaje de deformación de las fibras de PET es 2.1 veces mayor que el porcentaje de deformación de las fibras de PP, esto se puede observar en la figura 5.7, lo anteriormente mencionado evidencia la alta ductilidad y tenacidad que presenta el PET respecto al PP.

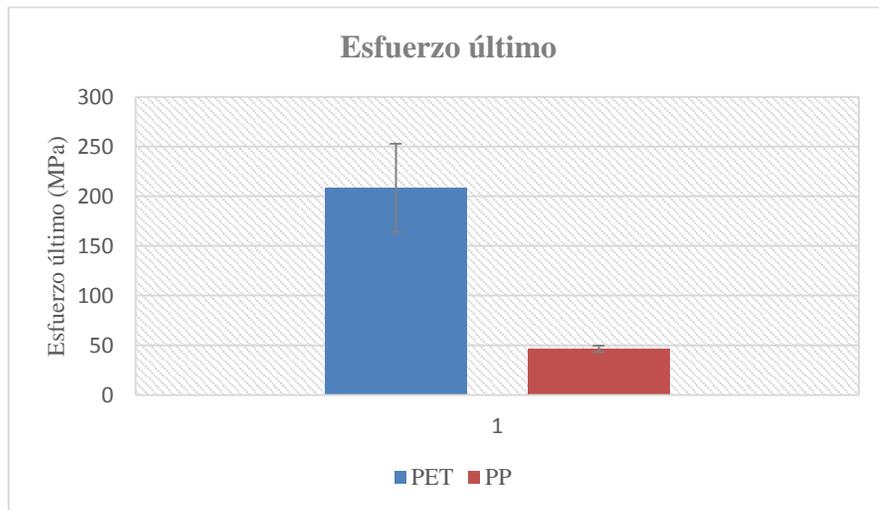


Figura 5.6: Valores promedio de resistencia a tensión de las fibras de PET y PP
Fuente: Los autores

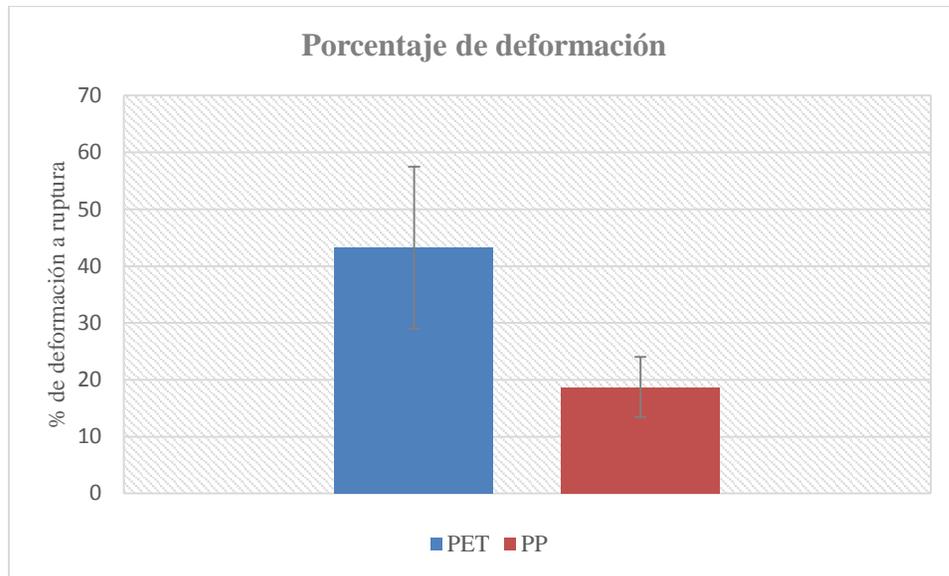


Figura 5.7: Porcentaje de deformación promedio en fibras de PET y PP sometidas a tensión
Fuente: Los autores

Por otra parte, se puede notar en la figura 5.8, que el PET es 3.2 veces más dúctil que el PP, lo que evidencia el alto porcentaje de deformación presentado por este material.

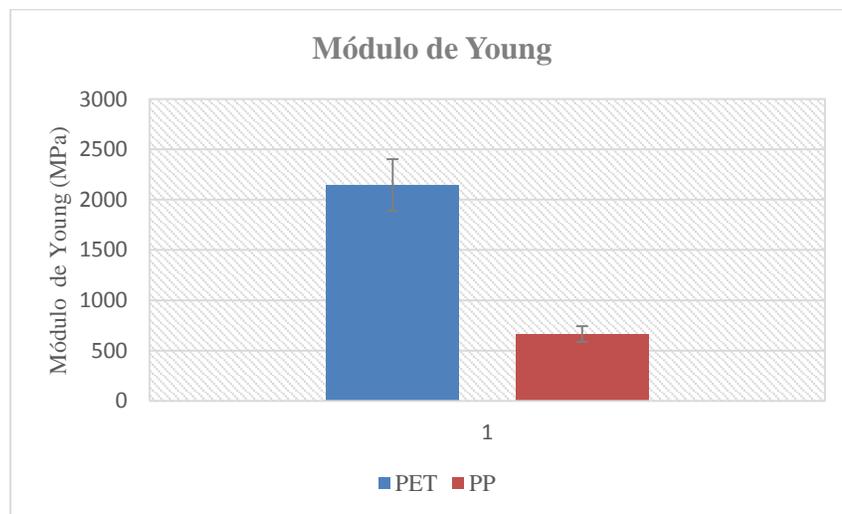


Figura 5.8: Valores promedios del módulo de Young para las fibras de PET y PP
Fuente: Los autores

Un comportamiento importante que se pudo evidenciar es la relación resistencia peso que presentaron estos materiales, la cual fue de 0.04 y 0.16 para el PP y PET respectivamente, lo que muestra que esta relación para el PET es 4 veces mayor que la presentada por el PP. Teniendo en cuenta que la densidad del PP representa un 82 % de la densidad del PET, se observa que el PET es un material con mayores propiedades mecánicas que el PP.

En la tabla 5.5. se puede encontrar la comparación de algunas propiedades mecánicas de las fibras de PET y PP usadas en el estudio con otras fibras sintéticas y naturales.

Tabla 5.5: Propiedades mecánicas de las fibras de PET, PP, fibras sintéticas y naturales

Tipo de fibras	Módulo de Young (MPa)	Esfuerzo de tensión (MPa)	% de deformación	Fuente
PET _r	10200	420.7	11.2	Kim S.B. et al (2009)
PP _r	4582	284.1	6.2	Yin et al (2016)
PET	2145	208	43	Los autores
PP	667	46	20	Los autores
HDPE _r	500	12	4	Pešić et al. (2016)
Poliester	3300	40	1	Reis (2011)
FCM NT	2650	56	4.03	Causil - Guzmán (2016)
Coco	2300	120	38	Gómez (2009)

Nota: El subíndice “r” es una abreviación de la palabra reciclado.
Fuente: Los autores

Como se observa en la tabla 5.5, las fibras de PET usadas en este estudio tienen propiedades mecánicas inferiores a las registradas por Kim S.B. et al (2009) quien utilizó fibras de PET extraídas de botellas recicladas con el fin de reforzar el concreto, las cuales fueron obtenidas por medio de un sistema de manufactura. Asimismo, Yin et al (2016) usó fibras de PP recicladas derivadas de un proceso de extrusión, quienes presentaron propiedades mecánicas superiores a las de este estudio.

La razón por la cual los esfuerzos registrados por las fibras de PET y PP de la presente investigación, pudo ser ocasionado por la forma de obtención de las probetas empleadas para los ensayos, que, por efectos de la herramienta de corte usada, las probetas presentaron un borde aserrado en toda su longitud, lo que genera una significativa concentración de esfuerzos, produciendo que el material falle antes de su resistencia límite. En la figura 5.9 se observa la probeta antes de ser ensayada y en la figura 5.10 se puede observar en detalle los bordes de las probetas vistos a través del microscopio.

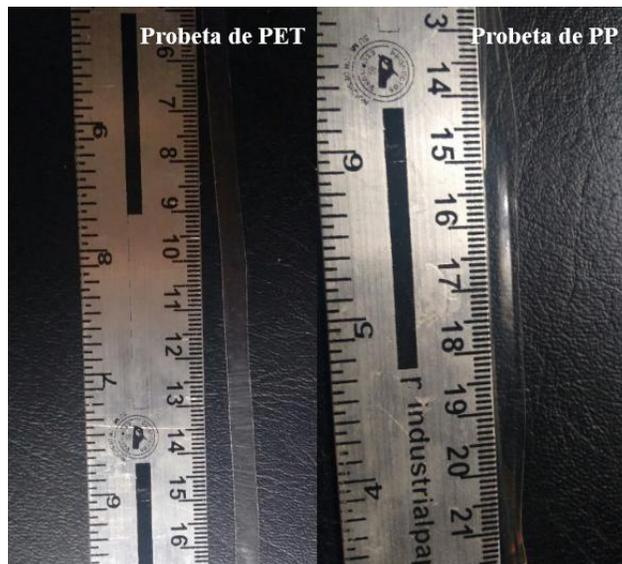


Figura 5.9 Probetas de PET y PP antes de ser ensayadas
Fuente: Los autores



Figura 5.10: Bordes de las probetas de PET y PP vistos con un aumento de 50X a través del microscopio.
Fuente: Los autores

5.4. CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PET Y PP

5.4.1. Análisis granulométrico de los agregados en el concreto

En la figura 5.11 se muestra la curva granulométrica para el agregado fino (arena) utilizado en este estudio, podemos observar que los valores de tamaño de partícula y el porcentaje de arena que pasa por los tamices se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C33 (2013), cumpliendo así con los requerimientos necesarios para elaborar la mezcla de concreto. El módulo de finura encontrado fue de 2.81, con este valor del módulo, el tipo de arena se puede clasificar como arena gruesa (ASOCRETO 2010).

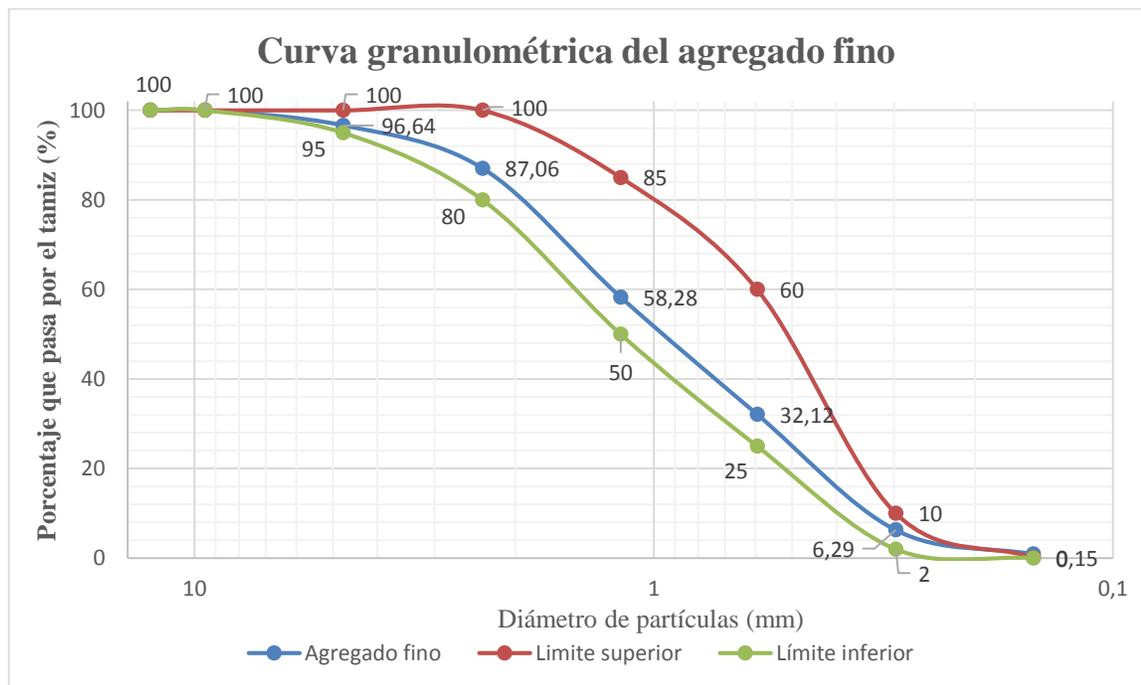


Figura 5.11: Granulometría del agregado fino utilizado para la realización de probetas de concreto.

Fuente: Los autores

En la figura 5.12 se muestra la curva granulométrica del agregado grueso (grava) utilizado. En el proceso de tamizaje de la grava se pudo observar que el 100 % de este material pasó por el tamiz 1 ½ pulgadas (38.1 mm) y en el tamiz de 1 pulgada (25.4 mm) el porcentaje retenido fue de 1.8 %, por lo que el tamaño máximo nominal de la grava es 1 pulgada (25.4 mm).

El procedimiento para la obtención del módulo de finura de la arena y el tamaño máximo nominal de la grava se describen en los anexos A5 y A6 respectivamente.

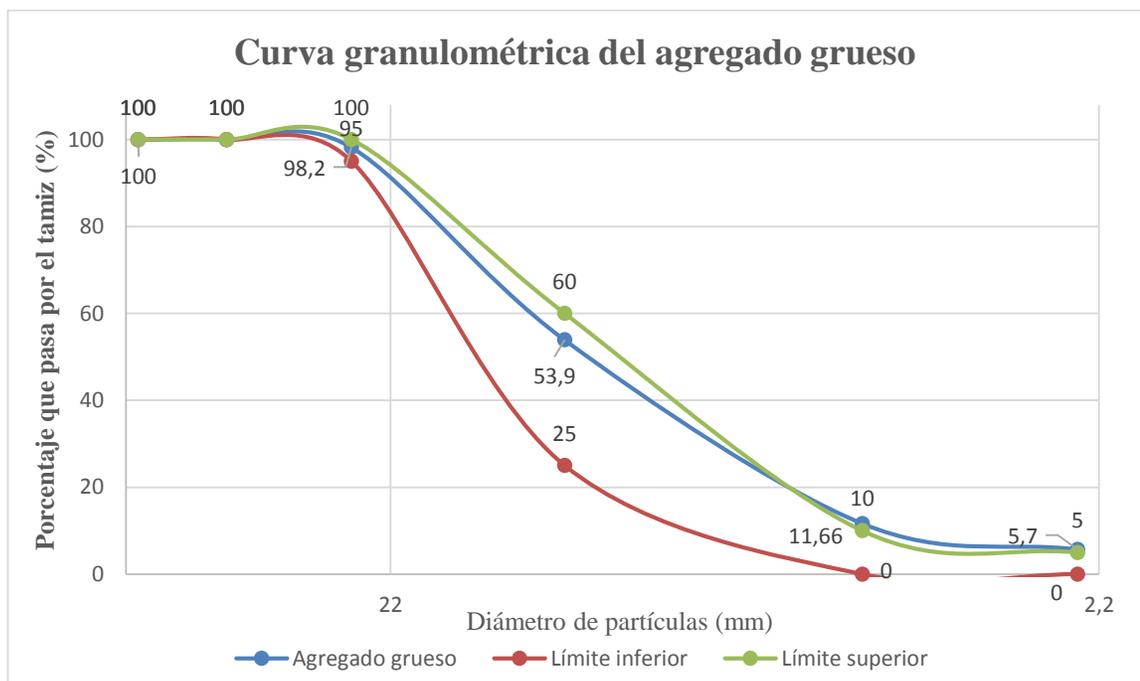


Figura 5.12: Granulometría del agregado grueso utilizado para la realización de probetas de concreto.

Fuente: Los autores

La tabla 5.6 muestra las propiedades del agregado fino, agregado grueso, y el cemento utilizados en la fabricación de las probetas de concreto.

Tabla 5.6: Propiedades del agregado grueso, agregado fino, cemento, y agua utilizado para la realización de probetas de concreto

Material	Propiedad	Valor
Grava	Densidad seca	1696 kg/m ³
Grava	Densidad especifica aparente	2622 kg/m ³
Arena	Densidad seca	1601 kg/m ³
Arena	Densidad especifica aparente	2573 kg/m ³
Cemento	Densidad especifica aparente	3100 kg/m ³
Agua	Densidad especifica aparente	1000 kg/m ³

Fuente: Causil y Guzmán (2016)

5.4.2. Elaboración de probetas de concreto para ensayos a compresión y a flexión

Se seleccionó un asentamiento de 7.5 cm y con un tamaño máximo nominal de 1 pulgada del agregado grueso se eligió la cantidad de agua de mezclado de acuerdo con la figura 5.13, que concierne a 180 kg/m³.

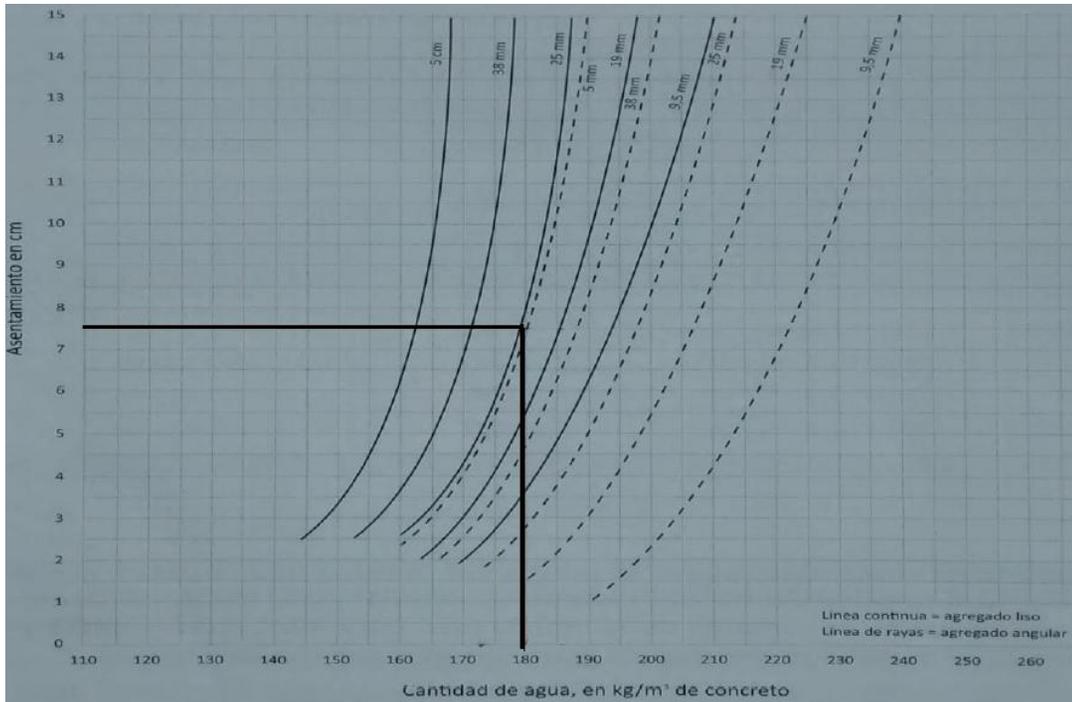


Figura 5.13: Requerimientos de agua de mezclado.

Fuente: ASOCRETO (2010)

Con la resistencia requerida de 2500 psi (175 kg/cm²), concreto sin contenido de aire y la relación de agua/cemento de 0.65 según la figura 5.14, se obtuvo la cantidad de cemento requerido para un metro cúbico de concreto.

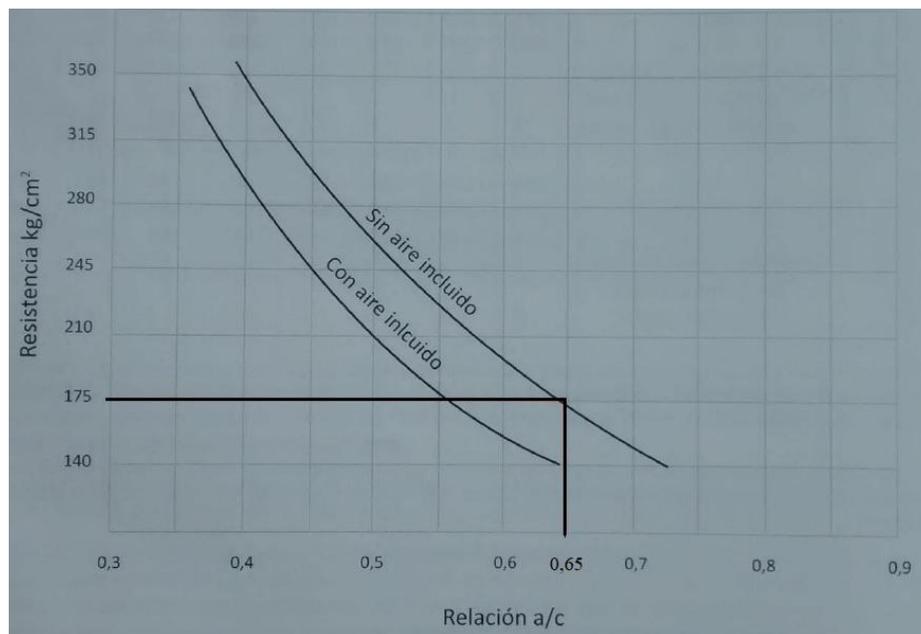


Figura 5.14: Curva de resistencia a compresión–relación agua/cemento

Fuente: ASOCRETO (2010)

$$\frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = 0,65$$

$$\text{Cemento} = \frac{\text{Agua}}{0,65} = \frac{180 \text{ Kg/m}^3}{0,65} = 277.92 \text{ Kg/m}^3$$

Por lo tanto, se necesitan 277.92 kg de cemento para un metro cubico de concreto.

Con el tamaño máximo nominal del agregado grueso y el módulo de finura del agregado fino, de acuerdo con la figura 5.15 se obtiene por interpolación que la relación:

$$\frac{b}{b_0} = 0.669$$

Ahora, de acuerdo con la ecuación 5: $b_0 = \frac{1696}{2622} = 0.647$

Luego reemplazando los valores en la ecuación 6 obtuvimos la cantidad en volumen de grava para un metro cubico de concreto:

$$B = (0.669)(0.647) = 0.4328 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$\mathbf{B = 0.4328 \text{ m}^3/\text{m}^3}$$

Máximo tamaño nominal de agregados		Volumen de agregado grueso secado en el horno por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino			
		MÓDULO DE FINURA			
pulgadas	mm	2,40	2,60	2,80	3,00
3/8	9,51	0,50	0,48	0,46	0,44
1/2	12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
3/4	19,1	0,66	0,64	0,62	0,60
1	25,4	0,71	0,69	0,67	0,65
1 1/2	38,1	0,75	0,73	0,71	0,69
2	50,8	0,78	0,76	0,74	0,72
3	76,1	0,82	0,80	0,78	0,76
6	152,4	0,87	0,85	0,83	0,81

Figura 5.15: Volumen de grava por unidad de volumen de concreto

Fuente: ASOCRETO 2010

El volumen requerido de cemento es:

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{278 \text{ Kg}}{3100 \text{ Kg/m}^3} = 0.089 \text{ m}^3$$

$$v = 0.09 \text{ m}^3$$

Calculamos el volumen requerido de agua:

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{180 \text{ Kg}}{1000 \text{ Kg/m}^3} = 0.18 \text{ m}^3$$

$$v = 0.18 \text{ m}^3$$

Para la grava, calculamos la masa requerida:

$$m = \rho * v = \left(\frac{2662 \text{ Kg}}{\text{m}^3}\right) * (0.4328 \text{ m}^3) = 1134.8 \text{ Kg}$$

$$m = 1134.8 \text{ Kg}$$

Para la arena, calculamos la masa requerida:

$$m = \rho * v = \left(\frac{2573 \text{ Kg}}{\text{m}^3}\right) * (0.3 \text{ m}^3) = 771.9 \text{ Kg}$$

$$m = 771.9 \text{ Kg}$$

En la tabla 5.7 se muestran las cantidades de cemento, agua, grava y arena utilizados para obtener 1 m³ de concreto con resistencia ultima de 2500 psi (17.23 MPa) con una relación agua/cemento de 0.65.

Tabla 5.7: Cantidad de materiales empleados para obtener 1 m³ de concreto con resistencia ultima de 2500 psi (relación agua/cemento de 0.65).

Material	Masa (kg)	Densidad (kg/m³)	Volumen (m³)
Cemento	278	3100	0.09
Agua	180	1000	0.18
Grava	1134.8	2622	0.43
Arena	771.9	2573	0.30

Fuente: Los autores

Para la elaboración de cualquier volumen de concreto con relación agua/cemento de 0.65 se estableció que se deben mantener los porcentajes en masa mostrados en la tabla 5.8.

Tabla 5.8: Porcentajes en masa para la preparación de concreto con relación agua/cemento de 0.65.

Material	Masa (kg)	% en Masa
Cemento	278.00	11.76
Agua	180.00	7.61
Grava	1134.80	47.99
Arena	771.90	32.64

Fuente: Los autores

Durante el proceso de elaboración de la mezcla de concreto con inclusión de fibras, se pudo notar que a mayor porcentaje de fibra incorporada aumentaba el esfuerzo físico requerido para efectuar el proceso de mezclado, por lo que se concluyó que se aumenta la trabajabilidad a mayor porcentaje de fibra adicionada en la mezcla. En las figuras 5.16, y 5.17 se muestran imágenes del proceso de fabricación de las probetas de concreto, se detallan los moldes, herramientas utilizadas y el proceso de curado, tanto para los ensayos de compresión, como para ensayos de flexión a tres puntos.



Figura 5.16: Proceso de fabricación de las probetas para ensayos de compresión. a) llenado de moldes y apisonado con varilla de acero b) golpes laterales con martillo de goma para la liberación de aire atrapado en la mezcla c) enrasado y fraguado d) proceso de curado en agua.

Fuente: Los autores



Figura 5.17: Proceso de fabricación de probetas para ensayos de flexión. a) llenado de moldes y apisonado con varilla de acero b) golpes laterales con martillo de goma para la liberación de aire atrapado en la mezcla c) enrasado y fraguado d) proceso de curado en agua.

Fuente: Los autores

5.5. ANÁLISIS DE DENSIDAD A LAS PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON PET Y PP

La figura 5.18 muestra el comportamiento del porcentaje de fibra incorporada respecto a la variación de la densidad de las probetas de concreto. En esta gráfica se pueden observar las diferentes reducciones en la densidad de las probetas de concreto debido a la adición de porcentajes en volumen de fibras de PET y PP.

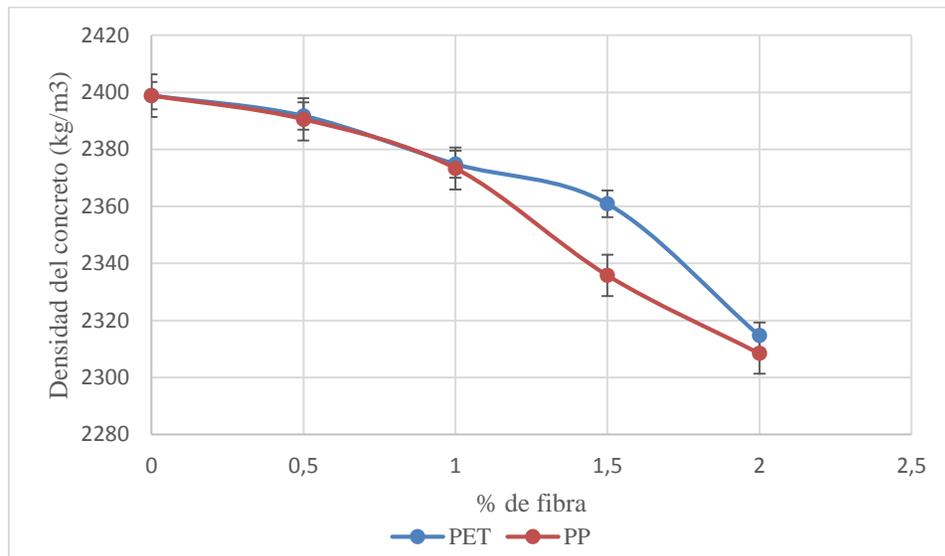


Figura 5.18: Curvas de densidad de las probetas de concreto en función del porcentaje de fibra incorporado
Fuente: Los autores

En la tabla 5.9 se describe el porcentaje de fibras de PET y PP incluida frente al porcentaje de reducción en la densidad de probetas de concreto.

Tabla 5.9: Porcentaje de fibra incorporado respecto al porcentaje de reducción de densidad de probetas de concreto.

% de fibra incorporado	% de reducción en la densidad
PET – 0.5	0.28
PP – 0.5	0.33
PET – 1.0	0.99
PP – 1.0	1.05
PET – 1.5	1.57
PP – 1.5	2.62
PET – 2.0	3.50
PP – 2.0	3.77

Fuente: Los autores

En la figura 5.19 se observa el porcentaje de fibra utilizado en relación con la variación de la densidad de las probetas. Se puede notar que a mayores porcentajes de fibras incorporadas hay una disminución en la densidad ya que existe una reducción en el volumen de concreto. Resultados similares se obtuvieron en el estudio desarrollado por Causil y Guzmán (2016).

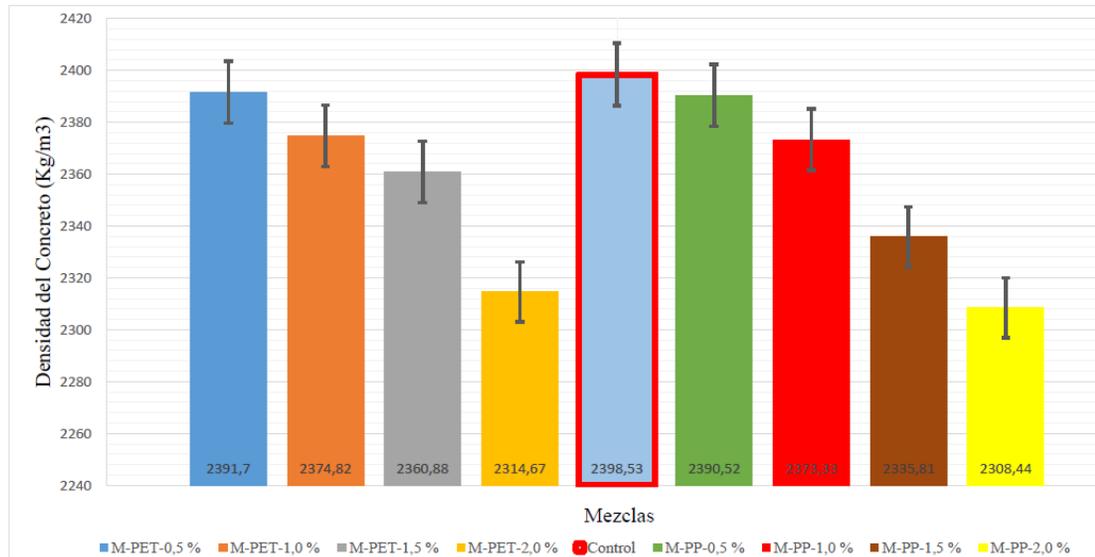


Figura 5.19: Densidad de las diferentes mezclas de concreto para 28 días de curado
Fuente: Los autores

Con la inclusión de un 2.0 % de fibras de PP en las probetas de concreto se presentó la mayor reducción en la densidad, la cual fue de 90.09 kg/m^3 , esto debido a la disminución de concreto y a la baja densidad que presentan las fibras de PP. Esta reducción de densidad significa que por cada metro cubico de concreto se puede ahorrar 10.79 kg de cemento, 42.80kg de grava, 29.52 kg de arena y 6.97 litros de agua.

Además de esto, en las probetas con fibras de PET incorporadas, el grupo que logró una mayor reducción en la densidad de concreto fueron las muestras con 2.0 % de fibras incorporadas. Hubo una reducción de 83.86 kg/m^3 , con esta reducción, por cada metro cúbico de concreto se puede ahorrar 9.79 kg de cemento, 39.76 kg de grava, 27.61 kg de arena y 6.70 litros de agua.

Los costos que se reducen por materiales para probetas con 2.0 % de fibras de PET y PP fueron de 6950 COP/m^3 y 8975 COP/m^3 respectivamente, teniendo como resultado una disminución en los costos de materiales para la construcción de estructuras y obras civiles.

NOTA: Estos valores fueron calculados con costos a la fecha de septiembre de 2017 y no se tuvo en cuenta costos por transporte ni por mano de obra.

5.6. RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PET Y PP

La figura 5.20 muestra en forma general los valores promedio de resistencia a compresión de las muestras de control y de las probetas de concreto reforzadas con fibras de PET y PP, posterior a los 3, 7 y 28 días de curado. Las mezclas de concreto MC-PET-0,5 – MC-PET-1,0 – MC-PP-0,5 y MC-PP-1,0 con 28 días de curado alcanzaron valores de resistencia a compresión cercanos a los obtenidos por las probetas de concreto sin adición de fibras utilizada como muestra de control. Los valores promedios de resistencia a compresión alcanzados por estas probetas se muestran en la tabla 5.10.

Tabla 5.10: Resistencia a compresión a los 28 días de curado.

Nomenclatura	Resistencia a compresión (MPa)
MC-PET-0.5	15.41
MC-PET-1.0	14.04
Control	18.31
MC-PP-0.5	15.53
MC-PP-1.0	14.65

Fuente: Los autores

En los anexos A 12 y A 13 se pueden encontrar todos los resultados de resistencia a compresión de cada probeta ensayada, y los valores promedios de resistencia a compresión para cada mezcla ensayada a las tres edades de curado establecidas respectivamente.

Además, se pudo observar que a menores porcentajes de fibras incorporadas en las probetas de concreto, mayores eran los valores de resistencia a compresión alcanzadas. Igualmente, se encontró que en todas las mezclas, al aumentar la edad de curado de las probetas, aumentaba la resistencia a compresión de estas, teniendo valores promedio de 56.48 % y 74.12 % para los 3 y 7 días de curado respectivamente, en relación a los 28 días de curado, en donde se obtiene la resistencia de diseño. Este comportamiento durante el proceso de curado de las probetas cumplen con las recomendaciones descritas por ASOCRETO (2010).

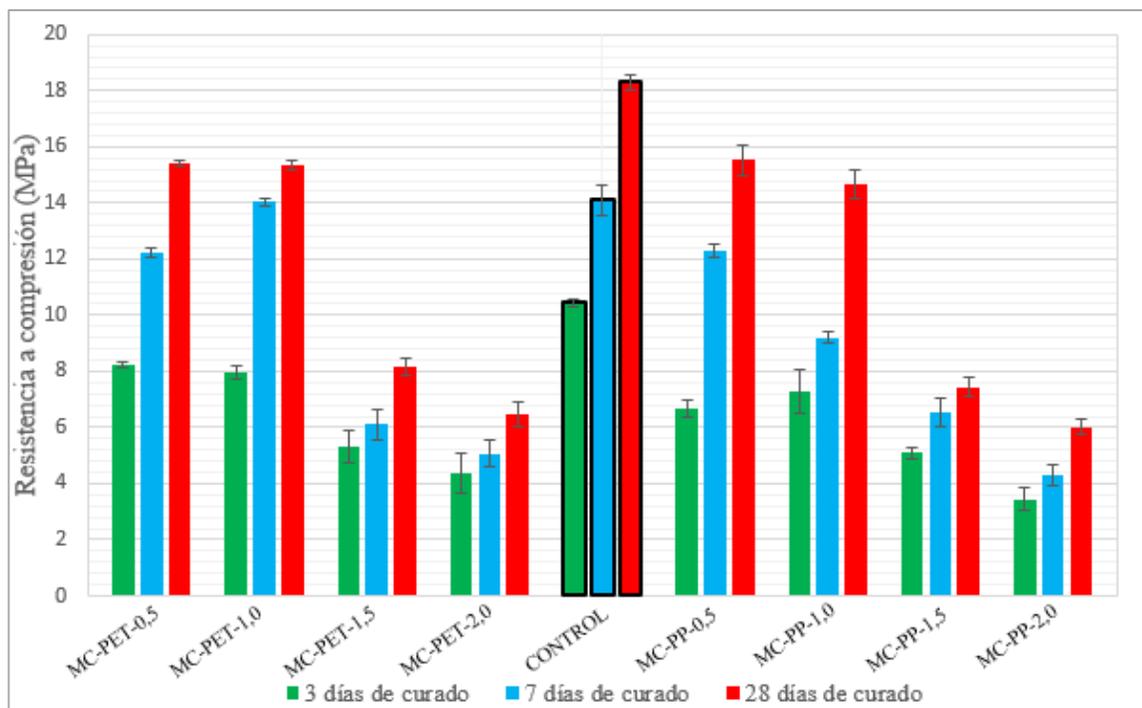


Figura 5.20: Valores promedio de resistencia a compresión para la muestra de control y las diferentes mezclas de concreto con adición de fibras de PET y PP para 3, 7 y 28 días de curado.

Fuente: Los autores

En la figura 5.21 se puede notar el comportamiento de la resistencia a compresión en función del porcentaje de fibra incorporada en la mezcla para 28 días de curado. Nótese

que a mayor porcentaje de inclusión de fibras tiende a disminuir la resistencia máxima a compresión. Esta grafica nos ayuda a confirmar que al incorporar un 0.5 % en fibras se obtiene una mayor resistencia a compresión para el concreto. En el anexo A 14 se pueden observar las gráficas de resistencia a compresión respecto al porcentaje de fibra incorporado para 3 y 7 días de curado respectivamente.

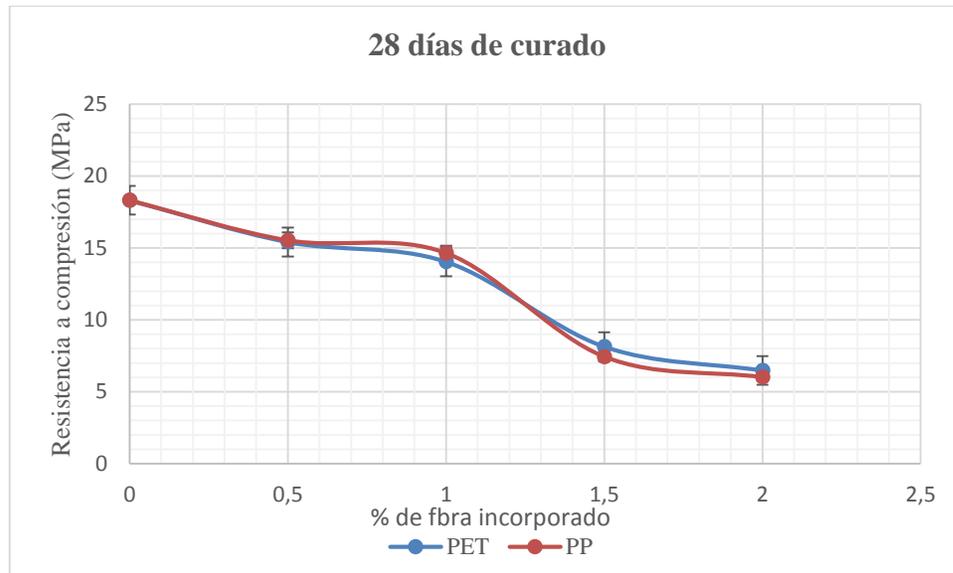


Figura 5.21: Curvas de resistencia a compresión en función del porcentaje de fibra incorporado para 28 días de curado

Fuente: Los autores

5.6.1. Efecto de la adición de fibras de PET y PP en la resistencia a compresión

El aumento en la cantidad de fibra incorporada no presenta una cohesión óptima como la que sí es presentada por los agregados durante el fraguado, este comportamiento se observó durante el proceso de mezclado, llenado y enrasado de las probetas, en el que las fibras se desprendían fácilmente de la mezcla de concreto. Al extraer parte del agregado fino y reemplazarlos por diversos porcentajes de fibras, en cuanto a resistencia, estas no tuvieron un comportamiento similar al material extraído de la mezcla, ya que estas no

ofrecen una resistencia a compresión significativa para el concreto. Al aumentar el porcentaje de fibra en la mezcla, tienden a generarse aglomeraciones de las mismas dentro de la matriz, lo que resulta en pequeños espacios, similares a burbujas de aire atrapadas como lo describe Juárez et al. (2010). Estas aglomeraciones se deben a la forma que poseen las fibras ya que no están completamente estiradas, si no que tienden a tomar una forma arqueada, esto como consecuencia de la geometría de los productos de donde fueron obtenidas. En la figura 5.22 se muestran las formas que poseen las fibras de PET y PP.



Figura 5.22: Formas que presentan las fibras de PET y PP respectivamente.

Fuente: Los autores

En esta investigación se encontró que el porcentaje de adición de fibra que más se acerca a la resistencia a compresión de diseño fue 0.5 % en fibras de PP, el cual obtuvo un valor de 15.53 MPa, alcanzando así un 85 % de la resistencia deseada. Mientras que para las muestras con adición de 0.5 % fibras de PET alcanzaron un valor de 15.41 MPa, obteniendo así un 84.16 % respecto a la resistencia de las muestras de control. También se observó que el porcentaje de adición en fibras que afecta drásticamente la resistencia a compresión fue la de 2 % en fibras de PET y PP, logrando una resistencia a compresión respecto a la resistencia de diseño de 35 % y 33 % respectivamente, para 28 días de curado. La tabla 5.11 muestra los porcentajes de resistencia a compresión alcanzados por el grupo restante de probetas con adición de fibra respecto a la resistencia de diseño.

Tabla 5.11: Porcentaje de resistencia a compresión alcanzado por las probetas con adición de fibra respecto a la resistencia de diseño a los 28 días de curado.

Nomenclatura	Porcentaje de resistencia alcanzada (%)
MC-PET-1.0	76.7
MC-PET-1.5	80.0
MC-PP-1.0	44.5
MC-PP-1.5	40.6

Fuente: Los autores

A continuación, se puede observar desde la figura 5.23 a la figura 5.26 la resistencia a compresión en función de los días de curado para los diferentes porcentajes de fibras de PET y PP incorporada en probetas de concreto.

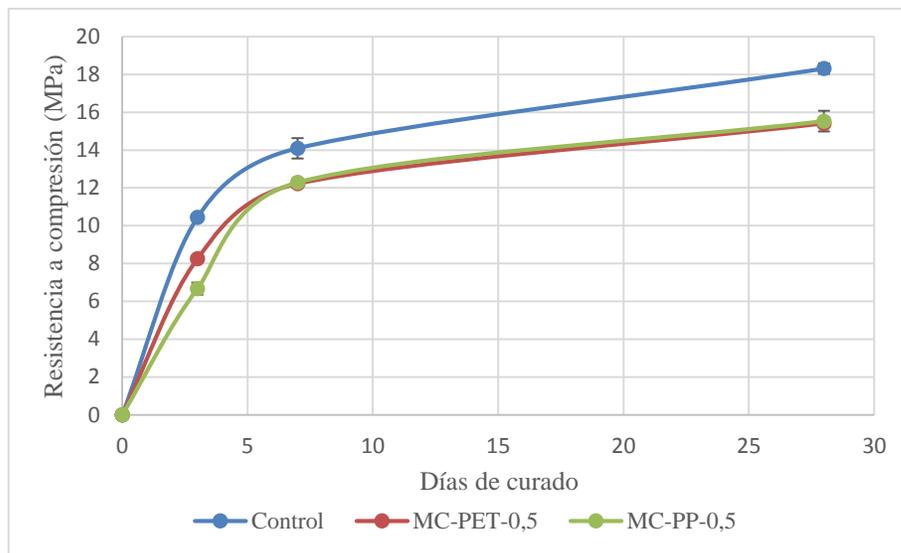


Figura 5.23: Curvas de resistencia a compresión en función de los días de curado para probetas de concreto reforzado con 0.5 % en volumen de fibra incorporada

Fuente: Los autores

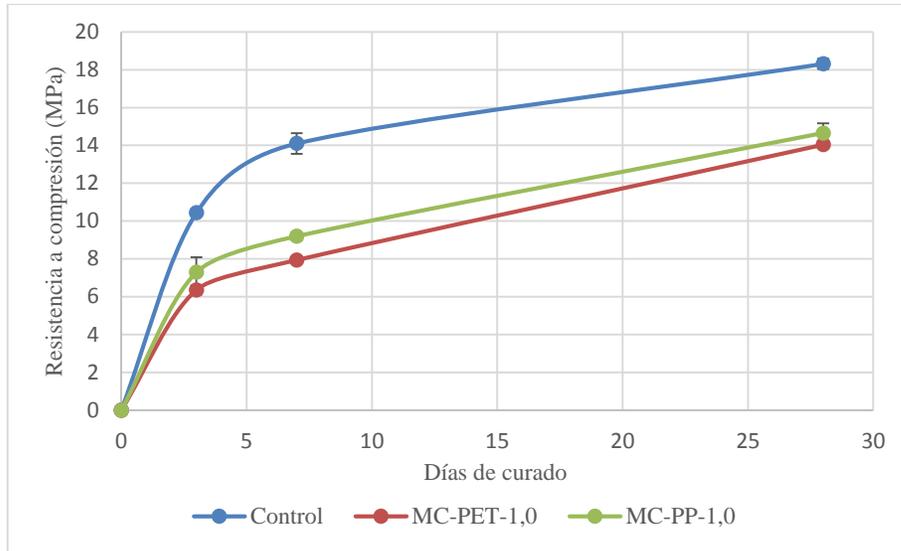


Figura 5.24: Curvas de resistencia a compresión en función de los días de curado para probetas de concreto reforzado con 1.0 % en volumen de fibra incorporada

Fuente: Los autores

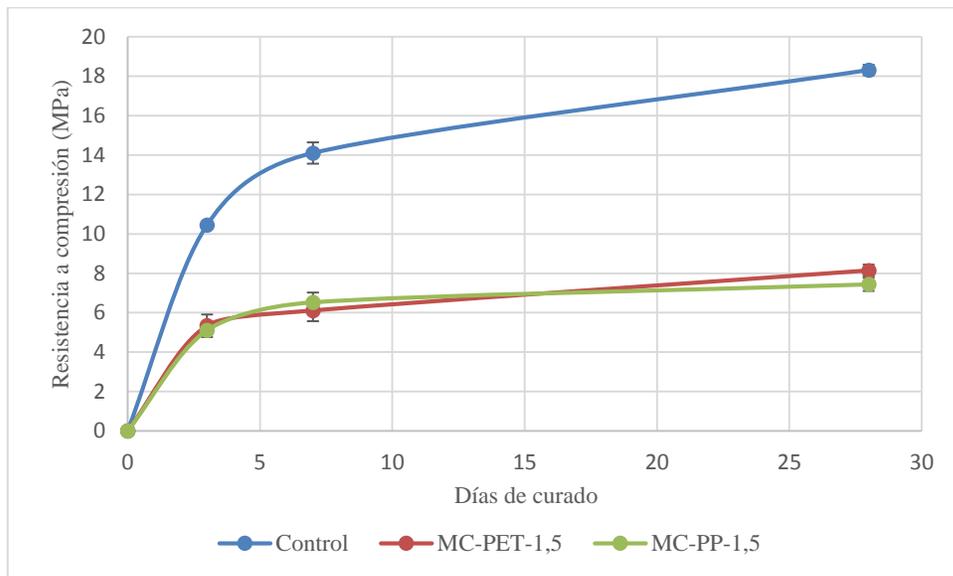


Figura 5.25: Curvas de resistencia a compresión en función de los días de curado para probetas de concreto reforzado con 1.5 % en volumen de fibra incorporada

Fuente: Los autores

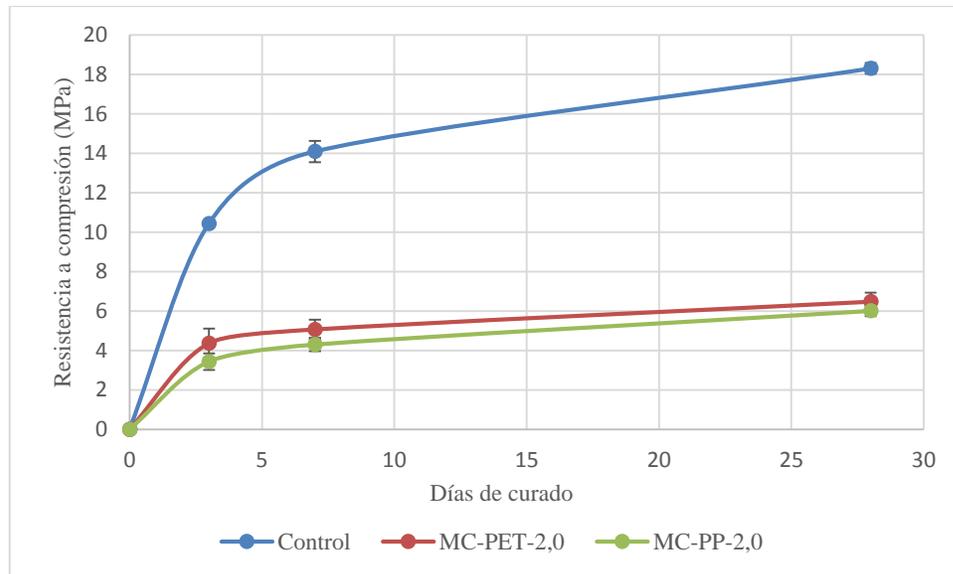


Figura 5.26: Curvas de resistencia a compresión en función de los días de curado para probetas de concreto reforzado con 2.0 % en volumen de fibra incorporada
Fuente: Los autores

En las figuras 5.23 a 5.26 puede notarse que a medida que aumenta el porcentaje de fibra incluido en la mezcla de concreto la resistencia a compresión de las probetas disminuye considerablemente frente a la resistencia a compresión de las probetas de control, esto se debe a la ausencia de concreto que pueda ofrecer una resistencia estable en las muestras, a pesar que las probetas alcanzaron los 28 días de curado, tiempo donde el concreto alcanza mayor resistencia, esta se vio afectada en todas las variaciones de porcentaje de fibras, mostrando la mayor diferencia de resistencia a compresión en probetas con 2.0 % de fibra incorporada.

Estos resultados obtenidos son similares a investigaciones desarrolladas anteriormente, donde se encuentra que a partir de un valor específico de porcentaje de fibra se obtiene un valor máximo de resistencia a la compresión, y a partir de este valor, la resistencia evidencia una disminución respecto al aumento de porcentaje de fibra incorporada. Kim S.B. et al. (2009) utilizaron fibras de PET y PP recicladas como refuerzo para el concreto,

y encontraron que para 0.5 % de fibras de PET la resistencia alcanzada fue de 26 MPa y la de diseño fue de 26.5 MPa, para valores en porcentajes de 0.75 y 1 % fue de 25 y 24 MPa respectivamente, por otro lado, para porcentajes de 0.5 % en fibras de PP encontró que la resistencia a compresión fue de 25.5 MPa y para valores en porcentaje de 0.75 y 1 % la resistencia alcanzada fue de 24.5 y 23.5 MPa respectivamente. A diferencia de la presente investigación, en dicho estudio emplearon fibras con menor longitud y ancho, además de emplear un tratamiento superficial abrasivo para mejorar la adherencia de las fibras con la matriz, ya que este tipo de fibras sin algún tipo de tratamiento mecánico poseen baja fuerza de unión con la matriz de concreto y, por lo tanto, no proporcionan la capacidad de resistencia al agrietamiento del hormigón de fibra. La ausencia de dicho tratamiento mecánico en las fibras de PET y PP empleados en la presente investigación posiblemente provocaron las caídas de resistencia a compresión para los distintos porcentajes de fibras incorporadas en la matriz.

Causil y Guzmán (2016) realizaron ensayos de compresión a concreto reforzado con fibras de capacho de maíz (FCM) con longitudes de 20 y 50 mm tratadas con parafina e hidróxido de calcio y encontraron que a mayor porcentaje de fibra incorporada a la matriz de concreto, disminuía el esfuerzo a compresión, ya que aumentar la cantidad de fibra en la matriz es equivalente a tener una cantidad similar de agujeros que a altas cantidades de fibra, lo que termina por disminuir la resistencia a compresión, puesto que estas no aportan resistencia a compresión, como sí lo hacen los demás agregados. Además, encontraron que, a mayores cantidades de adición de fibras, estas tienden a formar aglomeraciones que actúan como grandes vacíos o huecos, afectando aún más la resistencia a compresión. Los mismos autores registraron que el valor máximo corresponde al porcentaje de fibra de capacho de maíz (FCM) de 0.5 %, donde dicho valor fue de 16.43 MPa, mientras que el tratamiento sin

FCM alcanzó una resistencia de 16.02 MPa. Incluso estos mismos resultados han sido registrados en fibras de acero (Miao 2003).

Teniendo en cuenta que la distribución diaria de envases de PET por parte de una empresa local, los cuales se usaron para este estudio, es de 72.5 kg de material aprovechable, sirven para reforzar 37 m³ de concreto usando 0.5 % de PET quién fue el segundo grupo de probetas que más se acercó a la resistencia de diseño, evitando que 2426 botellas generen un impacto ambiental negativo.

5.6.2. Análisis de falla en las probetas de concreto

Durante los ensayos de compresión, se presentaron en las probetas 3 tipos de fallas, de las cuales dos se identifican en la norma ASTM C 39/ C39M (2014), referenciadas como tipo 3 y tipo 5. Las diferentes fallas presentadas durante los ensayos se muestran en la figura 5.27.



Figura 5.27: Tipos de fallas presentados en las probetas de concreto durante los ensayos de compresión. I) Falla tipo 5 presentada en las probetas de control. II) Falla no referenciada en la norma ASTM C39/C39M (2014) presentada en probeta de concreto con 1.5 % de fibra de PET. III) Falla tipo 3 presentada en probeta de concreto con 2.0 % de fibra de PP

Fuente: Los autores

La falla no referenciada se presentó solamente en algunas probetas de concreto con 1.5 % de fibra de PET, mientras que la falla tipo 5 se presentaron en probetas de control, probetas con 0.5 %, 1.0 % y 2.0 % de fibra de PET y en las probetas con 0.5 %, 1.0 % y 1.5 % de fibra de PP. La falla tipo 3 se presentó en las probetas con 2.0 % de fibra de PP. La falla tipo 5 se define como la formación de fracturas en la parte superior o inferior de la probeta debido al cizallamiento producido en el interior de la matriz. La falla tipo 3 se define como la formación de grietas en dirección de la carga aplicada, esta se produce cuando una o ambas superficies en donde se apoya no está totalmente horizontal, produciendo así concentración de esfuerzos en una zona puntual, ocurriendo la falla desde ese punto, propagándose en dirección de la carga hasta la parte inferior de la probeta. La falla no referenciada se presentó en algunas probetas con 1.5 % de fibra de PET, en las cuales se evidenció que se produjeron grietas en dirección de la carga aplicada, pero solo se propagaron en pequeñas longitudes. En la figura 5.28 se puede observar en detalle la forma y longitud de la falla no referenciada.

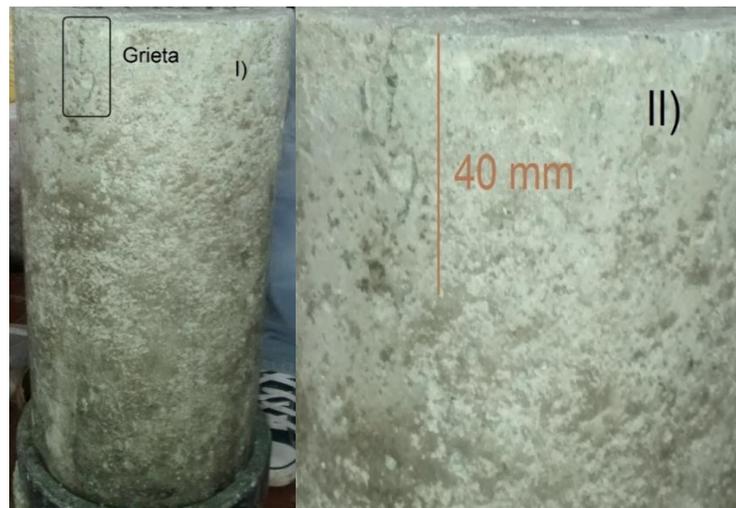


Figura 5.28: I) Grieta generada a través de la dirección de la carga aplicada durante el ensayo. II) Detalle de la grieta presentada después de la falla.

Fuente: Los autores

Las probetas que presentaron falla tipo 3, falla no referenciada y algunas que presentaron falla tipo 5, no presentaron desprendimiento de material, lo que nos muestra que las fibras presentes dentro la matriz ayudan a que la estructura se mantenga unida después de presentarse la fractura. Esta misma falla no referenciada fue reportada por Causil y Guzmán (2016).

Se observó que a medida que el porcentaje de fibra aumentaba se disminuía la cantidad de material desprendido, lo que evidencia que la adición de fibra a la matriz de concreto propicia una mayor adherencia dentro de la misma, diferente a lo que ocurre en la mezcla de concreto sin fibra, en la cual ocurre desprendimiento de material en la zona donde se presenta la falla. Resultados similares obtuvieron probetas de concreto con la adición de fibra de capacho de maíz, reportados por Causil y Guzmán (2016).

Para la mezcla de concreto con 0.5 % de fibra de PP, que fue el grupo de probetas que más se acercó a la resistencia de diseño, encontramos que se podría producir un resultado positivo, puesto que en una situación en la que una estructura falle por una sobrecarga, posiblemente se disminuye el riesgo de colapso de la misma, en consecuencia, mejorando la seguridad en las construcciones civiles. Los distintos tipos de fallas presentados durante los ensayos se muestran a forma de resumen en la tabla 5.12

Tabla 5.12: Tipos de fallas presentadas en probetas de concreto con adición de fibras de PET y PP

Nomenclatura	Muestra	Tipo de falla	Descripción
MCPET-0.5		5	Fractura en el lado inferior de la probeta, se desprende poca cantidad de material
MCPET-1.0		5	Fractura en el lado superior de la probeta, se desprende poca cantidad de material.

MCPET-1.5



No
referenciada

Presenta pequeñas fisuras en dirección de la carga aplicada sin el desprendimiento de material.

MCPET-2.0



5

Fractura en el lado inferior de la probeta, se desprende poca cantidad de material

Control



5

Fractura en el lado inferior de la probeta, se desprende poca cantidad de material

M CPP-0.5



5

Fractura en el lado superior de la probeta, se desprende poca cantidad de material.

M CPP-1.0



5

Fractura en el lado superior de la probeta, se desprende poca cantidad de material.

M CPP-1.5



5

Fractura en el lado superior de la probeta, se desprende poca cantidad de material.

MCPP-2.0



3

Presenta grietas a lo largo de la longitud de la probeta sin desprendimiento de material.

Fuente: Los autores

5.7. RESISTENCIA A FLEXIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PET Y PP

A continuación, se describe el análisis de los parámetros mecánicos de ensayos (carga de rotura, resistencia a la flexión y módulo de elasticidad en flexión) obtenidos durante el presente estudio.

5.7.1 Análisis de carga de rotura en probetas de concreto con adición de fibras de PET y PP

La figura 5.29 muestra los valores promedio de carga de rotura para la muestra de control y las diferentes mezclas de concreto con adición de porcentajes en volumen de fibras de PET y PP, después de 28 días de curado.

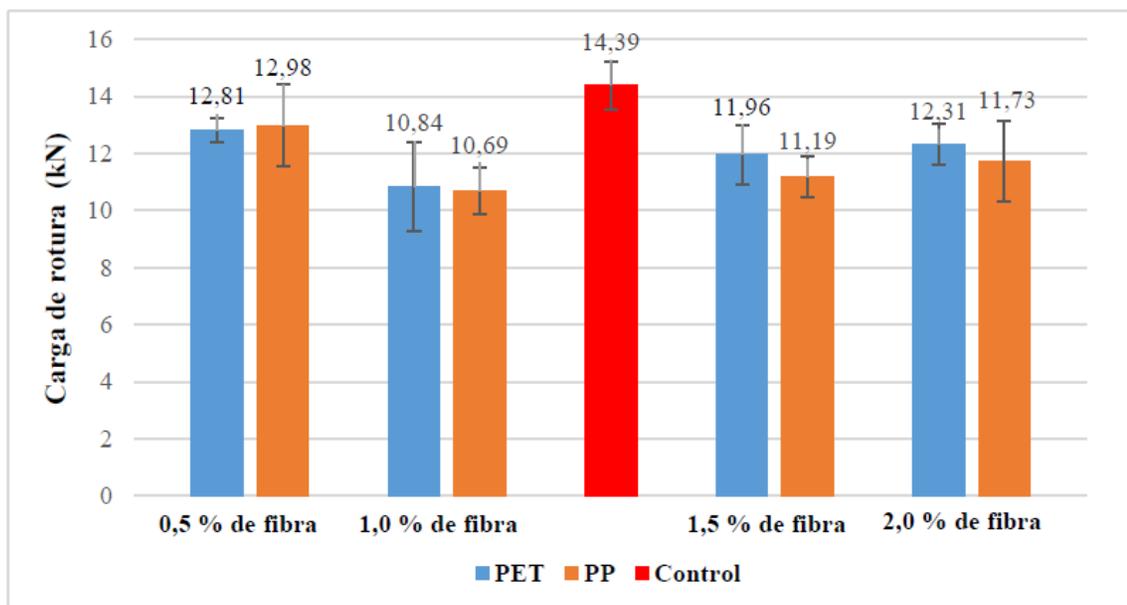


Figura 5.29: Valores promedio de carga de rotura para la muestra de control y las diferentes mezclas de concreto con adición de fibras de PET y PP a los 28 días de curado.

Fuente: Los autores

El porcentaje de adición de fibra que presentó la mayor carga de rotura fue el grupo de muestras con adición de 0,5 % de fibras de PP incorporada a la mezcla de concreto. Se

observó que estas lograron soportar la mayor carga, alcanzando un 90.2 % de la carga presentada por la muestra de control. Además, las muestras con 0.5 % de fibras de PET incluidas en la mezcla de concreto obtuvieron una carga del 89 %, siendo este el mayor valor registrado para este grupo de probetas respecto a la carga adquirida por las muestras de control. Para las muestras de PET y PP con inclusión de 2.0 % de fibras se pudo observar que estas alcanzaron un 85.5 y 77.8 % respectivamente. En la figura 5.30 se muestra la variación de la carga respecto al porcentaje de fibra incorporado en la mezcla de concreto.

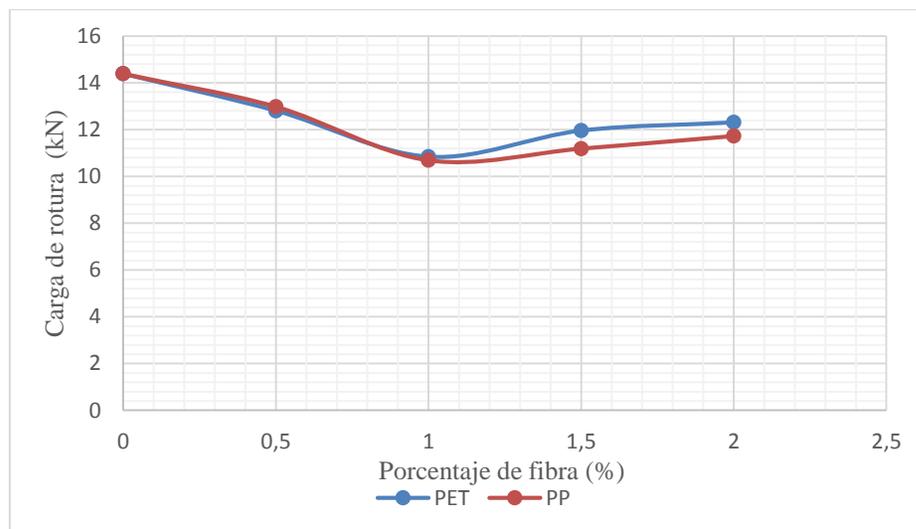


Figura 5.30: Diagrama de carga vs porcentaje de fibra incorporado para probetas con adición de fibras de PET y PP para 28 días de curado.

Fuente: Los autores

Se encontró que al aumentar el porcentaje de fibra incorporada entre 0.0 y 1.0 % la curva de carga vs porcentaje de fibra decrece, mientras que entre 1.0 y 2.0 % aumenta, lo que evidencia que la adición de 1.0 % de porcentaje de fibra de PET y PP en la mezcla de concreto presenta los menores valores de carga, por lo que esta combinación disminuye considerablemente la carga de rotura respecto a las muestras de control; resultados similares obtuvieron Caggiano et. al. (2017). Una explicación para este fenómeno puede ser que el porcentaje de 1.0 % de adición de fibra en la mezcla de concreto no presenta

una distribución adecuada en la matriz, por lo que el comportamiento de la misma bajo el efecto de carga transversal se ve afectado.

5.7.2. Análisis de la resistencia a la flexión de probetas de concreto con fibras de PET y PP incorporadas.

La figura 5.31 muestra los valores promedio de resistencia a la flexión para la muestra de control y las diferentes mezclas de concreto con adición de fibras de PET y PP para 28 días de curado. Se puede notar que las probetas con 0.5 % de fibra adicionada son las que lograron los mayores valores de resistencia a la flexión en comparación con las muestras de control, mientras que las que presentaron los menores valores de resistencia a flexión fueron las probetas con 1.0 % de fibra adicionada. En la tabla 5.13 se muestra la resistencia a la flexión, alcanzada por las probetas respecto a las probetas de control, expresada en porcentajes.

Tabla 5.13: Porcentaje de resistencia a flexión alcanzada de las probetas con adición de fibra de PET y PP respecto a las probetas de control a los 28 días de curado.

Nomenclatura	Porcentaje de resistencia a la flexión alcanzada (%)
MF-PET-0.5	89
MF-PET-1.0	76
MF-PET-1.5	83
MF-PET-2.0	86
MC-PP-0.5	90
MC-PP-1.0	74
MC-PP-1.5	78
MC-PP-2.0	82

Fuente: Los autores

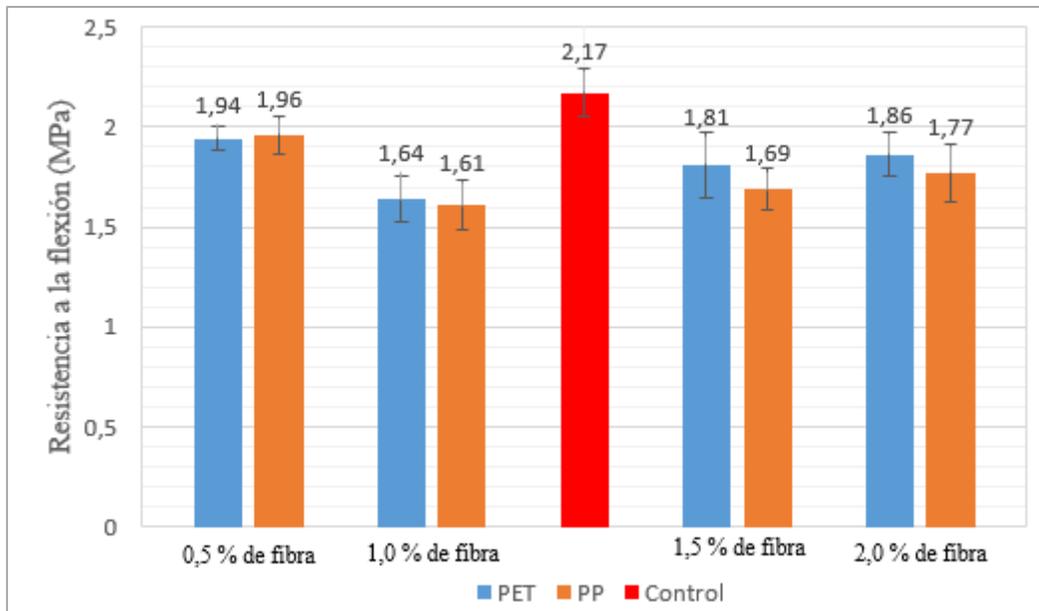


Figura 5.31: Valores promedio de resistencia a la flexión para la muestra de control y las diferentes mezclas de concreto con adición de fibras de PET y PP a los 28 días de curado.

Fuente: Los autores

5.7.3. Análisis del módulo de elasticidad en flexión de probetas de concreto con fibras de PET y PP incorporadas.

En la figura 5.32 se encuentran los valores promedios del módulo de elasticidad en flexión para las muestras de control y las diferentes mezclas de concreto con adición de fibras de PET y PP para 28 días de curado. Se muestran que los valores de módulo de elasticidad en flexión para probetas con adición de 0.5 % y 2.0 % de fibras de PET fueron de 64.91 ± 10.87 MPa y 64.29 ± 14.79 MPa respectivamente, valores que estadísticamente son iguales al valor del módulo mostrado por las muestras de control, el cual fue de 62.22 ± 4.91 MPa. Mientras que los valores de módulo de elasticidad en flexión que registraron las probetas con 1.0 % y 1.5 % de fibras de PP representan respectivamente el 78 % y 79 % del valor de modulo en flexión obtenido por las probetas de control.

En la figura 5.32 se puede observar que entre 0.5 y 1.0 % de fibra de PET y PP incorporada el módulo de elasticidad disminuye, este mismo comportamiento lo evidenció Kim S.B. et al (2009) empleando fibras de PET reciclado y PP virgen como refuerzo para el concreto.

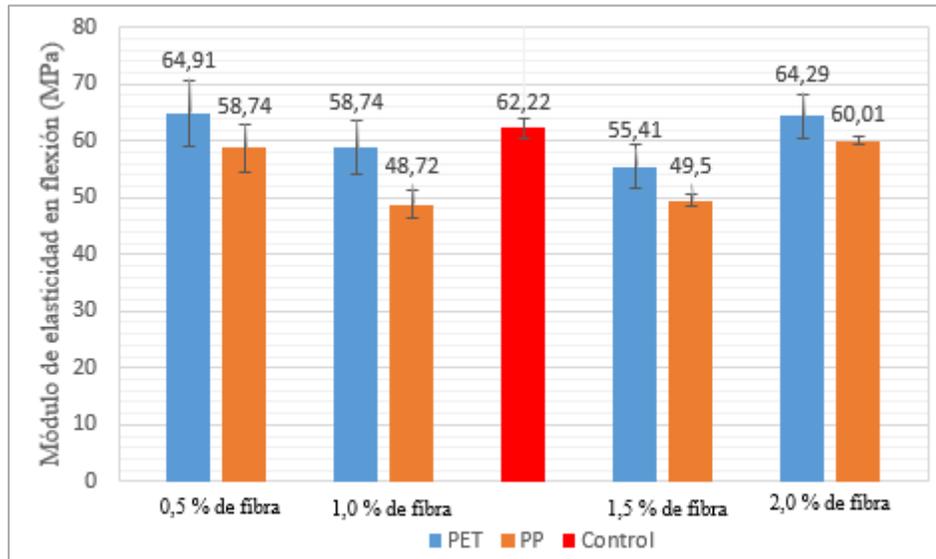


Figura 5.32: Valores promedio del módulo de elasticidad en flexión para la muestra de control y las diferentes mezclas de concreto con adición de fibras de PET y PP a los 28 días de curado.

Fuente: Los autores

De acuerdo con la ecuación (8) se observa que el módulo de elasticidad en flexión depende de la geometría del espécimen, carga de rotura, y deflexión máxima. La única variable de la que no se tuvo un control total de toma de datos fue la deflexión, ya que, durante los ensayos de flexión a tres puntos, la lectura de la deflexión registrada de la probeta fue la del cabezal de carga de la máquina de ensayo, lo que claramente no representa la deflexión real presentada por el espécimen, todo esto debido a la inexistencia en el laboratorio de un extensómetro que pudiese registrar la deflexión en tiempo real de la probeta durante la realización del ensayo. Sin embargo, los datos registrados de la deflexión máxima para las

diferentes muestras con adición de fibras y muestras de control se representan en la figura 5.33.

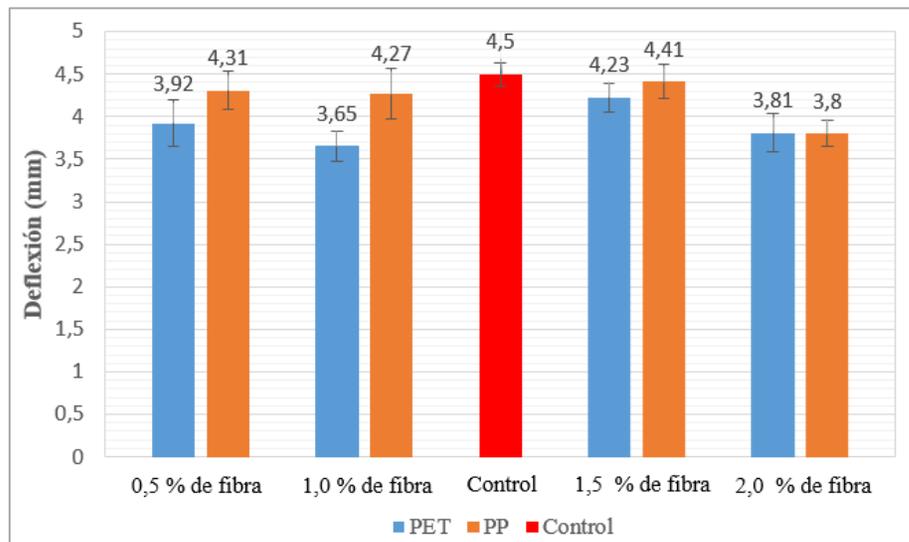


Figura 5.33: Valores promedio de la deflexión para las probetas de control y las diferentes mezclas de concreto con adición de fibras de PET y PP a los 28 días de curado.

Fuente: Los autores

Para el módulo de elasticidad en flexión tenemos que cuanto menor es la deflexión máxima registrada, mayor será este parámetro mecánico. De acuerdo con la figura 5.33 observamos que la mezcla que registró la mayor reducción en el valor de la deflexión fueron las probetas con 1.0 % en fibras de PET, este fenómeno puede atribuirse a la resistencia a la tensión de las fibras, lo que conlleva una mayor resistencia a esfuerzos cortantes dentro de la matriz de concreto y permitió una menor deformación sin propagación o formación de grietas (Botero et. al. 2015), reduciendo así un 19 % la deflexión presentada por las probetas de control. Sin embargo, para este grupo de probetas no se registró un valor máximo de carga de rotura, por lo que su rigidez no superó el valor adquirido por las muestras de control.

Como se muestra en la figura 5.32, para el grupo de probetas que superó el valor del módulo en flexión de las muestras de control, encontramos que para las mezclas con 0.5 % y 2.0 % de fibras de PET, la deflexión se redujo frente a las probetas de control un 13 % y 15.3 % respectivamente.

5.7.4. Análisis de falla en probetas sometidas a ensayo de flexión

Durante la realización de los ensayos las probetas presentaron un comportamiento similar entre los diferentes grupos, como es de esperarse en un elemento sometido a flexión bajo las condiciones del ensayo, la muestra falla por cedencia en la zona sometida a esfuerzos de tensión. En este caso, esta zona alcanza el punto de cedencia en el extremo más alejado del eje neutro de la probeta, lo que genera que la deflexión de la probeta aumente rápidamente con respecto al incremento de la carga a la que está sometida. Finalmente, estas tienden a fallar en la dirección de la carga aplicada, la cual se encuentra ubicada en el centro del espécimen.

Se observó que en las muestras de control la fractura ocurrió en su punto medio, dividiendo así la probeta en dos partes iguales. Las probetas con adición de fibras de PET se comportaron de tal manera que a medida que se aumentaba el porcentaje de fibra incorporado en la mezcla, la grieta generada por efecto de la carga disminuía en su longitud, a su vez al retirarlas de la maquina estas no se separaban, evidenciando así que las fibras ayudan a mantener unida la matriz después de la falla resultante del ensayo de flexión a tres puntos, como lo evidenció Foti, D (2011), quien encontró que las fibras sintéticas dentro de la matriz comienzan a contribuir su resistencia después de alcanzar la falla en la probeta y denominó a este fenómeno como “efecto de difusión” (“puntos de

sutura” que evitan la propagación de grietas en la probeta de concreto y que impide el desprendimiento del material). En la figura 5.34 se puede evidenciar el comportamiento anteriormente descrito.

Además, se observó que en las probetas con fibras de PP incorporadas presentaban una falla similar a las probetas de control y se comprobó que al retirarlas de la máquina de ensayo las fibras no eran lo suficientemente fuertes para mantener unida la matriz de la probeta, por lo que generaba la separación total de la probeta.



Figura 5.34: Probeta con adición de fibras de PET retirada de la máquina posterior al ensayo de flexión a tres puntos.

Fuente: Los autores

Los distintos tipos de fallas presentados posterior al ensayo de flexión a tres puntos se muestran a forma de resumen en la tabla 5.14.

Tabla 5.14: Tipos de fallas presentadas en probetas de concreto con adición de fibras de PET y PP posterior al ensayo de flexión a tres puntos.

Nomenclatura	Muestra	Descripción de la falla
MFPET-0.5		Fractura transversal desde el lado inferior, sin embargo, no se presenta una separación total de la probeta.
MFPET-1.0		Fractura transversal desde el lado inferior, sin embargo, no se presenta una separación total de la probeta.

<p>MFPET-1.5</p>		<p>Fractura transversal desde el lado inferior, sin embargo, no se presenta una separación total de la probeta.</p>
<p>MFPET-2.0</p>		<p>Fractura transversal desde el lado inferior, sin embargo, no se presenta una separación total de la probeta.</p>
<p>Control</p>		<p>Fractura transversal desde el lado inferior, se presenta una falla total de la probeta, dividiéndola completamente en su zona media.</p>

<p>MFPP-0.5</p>		<p>Fractura transversal desde el lado inferior, sin embargo, no se presenta una separación total de la probeta.</p>
<p>MFPP-1.0</p>		<p>Fractura transversal desde el lado inferior, sin embargo, no se presenta una separación total de la probeta.</p>
<p>MFPP-1.5</p>		<p>Fractura transversal desde el lado inferior, sin embargo, no se presenta una separación total de la probeta.</p>

MFPP-2.0		Fractura transversal desde el lado inferior, sin embargo, no se presenta una separación total de la probeta.
----------	--	--

Fuente: Los autores

Las fallas presentadas en las probetas MFPP-0.5 y MFPET-0.5 fueron similares en la longitud de propagación de la grieta, lo que nos indica que, a menores porcentajes de fibra adicionada, la longitud de propagación de la grieta es la que más tiende a acercarse al extremo superior del espécimen. Ya que al ocurrir el avance de la grieta y encontrarse con las fibras, estas obstaculizan dicho avance. Pešić et al. (2016) evidenció este mismo comportamiento en probetas reforzadas con 0.4 % de fibras de poliestireno de alta densidad (HDPE) de $\varnothing=0.25$ mm.

6. CONCLUSIONES

Con el método de obtención de fibras de PET y PP utilizadas para el ensayo de tensión se encontró que la herramienta de corte utilizada genera concentradores de esfuerzo en los bordes de la probeta, evitando así que estas alcancen su resistencia límite, y fallen por efecto de estos concentradores.

Se encontró que la densidad del PET y PP usado presenta menores valores que las densidades teóricas para estos materiales (material virgen), lo que puede atribuirse a los procesos de manufacturas a los que estos son sometidos para la fabricación de productos finales tales como botellas y vasos desechables.

Durante los ensayos de tensión se encontró que el PET presenta una resistencia 4,5 veces superior a la registrada por el PP, teniendo este una capacidad de absorción de energía previo a la falla 13 veces mayor en comparación con el PP. Teniendo en cuenta la densidad y la resistencia de estos materiales, se encontró que el PET posee una mayor resistencia – peso que el PP.

En los ensayos de compresión se observó que el porcentaje de adición de fibra a la mezcla de concreto que más se acercó a la resistencia de diseño fue de 0.5 % en PP, alcanzando un valor de 15.53 MPa representando así un 85 % de la resistencia de diseño. Por otro lado, el porcentaje de adición de fibras para las probetas con PET que registró una menor caída en la resistencia de diseño (18.31 MPa) fue el porcentaje de 0.5 % el cual alcanzó un valor 15.42 MPa. Los porcentajes de adición de fibras a la mezcla de concreto que presentaron la mayor disminución en la resistencia fueron las probetas con 2.0 % en fibras de PET y PP incorporadas alcanzando tan solo una resistencia de 6.48 y 6.01 MPa respectivamente, frente a la resistencia de diseño. Esto demuestra que a mayores

porcentajes de fibras incorporada en la mezcla de concreto la resistencia a compresión se ve notoriamente afectada.

Para la mezcla de concreto con 0.5 % de fibras de PP, la cual presento mejor resistencia se obtuvo una reducción en la densidad de 8.01 kg/m^3 . Esta reducción de densidad significa que para un metro cúbico de concreto se pudo ahorrar 0.96 kg de cemento, 3.80 kg de grava, 2.61 kg de arena y 0.63 litros de agua.

Para la mezcla de concreto con 0.5 % de fibras de PET, la cual presento mejor resistencia dentro de este grupo, se obtuvo una reducción en la densidad de 6.83 kg/m^3 . Esta reducción de densidad significa que para un metro cúbico de concreto se pudo ahorrar 0.79 kg de cemento, 3.27 kg de grava, 2.19 kg de arena y 0.51 litros de agua.

Durante los ensayos de compresión, se observaron 3 tipos de fallas recurrentes, dos de las cuales pertenecen a la clasificación suministrada por la norma ASTM C39/C39M 2014 referenciadas como tipo 3 y tipo 5. La falla no referenciada se presentó solamente en algunas probetas de concreto con 1.5 % de fibra de PET, en la cual no hubo desprendimiento de material después de la fractura, mientras que la falla tipo 5 se presentaron en probetas de control, probetas con 0.5 %, 1.0 % y 2.0 % de fibra de PET y en las probetas con 0.5 %, 1.0 % y 1.5 % de fibra de PP. La falla tipo 3 solo se presentó en las probetas con 2.0 % de fibra de PP.

Las mezclas de concreto reforzado con 0.5 % de fibras de PET y PP las cuales se acercan a la resistencia de diseño y permiten disminuir el peso propio de la estructura, y además esta se mantiene unida aún después de la fractura.

Para los ensayos de flexión las muestras con 0.5 % de PP y PET registraron los mayores valores de carga de rotura, los cuales fueron de 12.98 y 12.81 kN respectivamente. Para lo resistencia a la flexión, el grupo de probetas con 0.5 % de fibra adicionada son las que

lograron los mayores valores de resistencia a la flexión en comparación con las muestras de control alcanzando un 90 y 89 % de la resistencia presentada por las probetas de control. Para el módulo de elasticidad en flexión el mayor valor presentado fue en probetas con 0.5 % de adición de fibras de PET, alcanzando el módulo registrado por la muestra de control, lo que nos muestra que la adición de este porcentaje de fibra no afecta dicho parámetro mecánico.

Posterior al ensayo de flexión a tres puntos, se observó que, a mayor porcentaje de fibra adicionada a la mezcla de concreto, la propagación de la grieta por efecto de la carga transversal disminuía en su longitud, presentando la menor propagación las muestras con 2.0 % de adición de fibras. Para el grupo de probetas con 0.5 % de adición de fibras de PET y PP quienes presentaron los mayores valores de carga de rotura, se observó que las fibras ayudan a mantener unida la matriz después de ocurrida la falla, lo que nos demuestra que en un eventual colapso de estructuras que posean estas fibras dentro de la matriz de concreto estas posiblemente no presenten desprendimiento de material aumentando así el factor de seguridad en obras civiles.

7. RECOMENDACIONES

Para el método de obtención de las probetas es indispensable poseer una herramienta de corte adecuada con el fin de que la muestra esté libre de concentradores de esfuerzo para así obtener la resistencia máxima del material.

Durante la obtención de las fibras de PET y PP se pudo observar que no se puede aprovechar la totalidad de los vasos y botellas, por lo que se recomienda utilizar una herramienta de corte que cuente con una mayor versatilidad, de tal forma que se pueda adaptar a la geometría de los vasos y botellas de todas las presentaciones y así aumentar el aprovechamiento de los mismos.

En este estudio se agregó fibras de PET y PP al concreto en volúmenes de fibra de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 % del volumen del agregado fino y se observó que el valor de la resistencia caía a medida que se aumentaba el porcentaje de fibra incorporado, y el grupo que presentaba menor caída de resistencia fue el que usó de 0.5 % de fibra, por lo que se recomienda realizar un estudio en el que se consideren porcentajes menores a 0.5 % y así poder igualar o superar la resistencia de diseño. Asimismo, emplear estos mismos porcentajes en el estudio de los parámetros mecánicos del concreto sometido a flexión.

Para realizar los ensayos de flexión a tres puntos, se recomienda el empleo de un extensómetro que registre el valor de la deflexión de la probeta, con el fin de obtener análisis más detallados de los parámetros mecánicos y propiedades que se puedan calcular.

Se recomienda efectuar un estudio de tenacidad al concreto reforzado con fibras de PET y PP y así observar el efecto que estas puedan tener sobre esta propiedad mecánica.

Se recomienda aplicar algún tratamiento químico y/o mecánico a las fibras que se incorporen al concreto, con el fin de poder mejorar la adherencia de esta dentro de la matriz. Además, se recomienda la caracterización de la microestructura del concreto.

8. BIBLIOGRAFÍA.

Aluna Consultores. 2011. Estudio nacional de reciclaje y los recicladores. Aproximación al mercado de reciclables y las experiencias significativas. p10.

Arias. 2015. [en línea]. Enka ya vende la mitad de la producción al exterior. EL COLOMBIANO. Colombia. <http://www.elcolombiano.com/negocios/enka-ya-vende-la-mitad-de-la-produccion-al-exterior-CD1489576>. Acceso: 12 de Abril (2017).

Askeland, D., Fulay, P., Wright, W. 2010. The Science and Engineering of Materials. Cengage Learning, Stamford, p204-215.

ASOCRETO. 2010. Tecnología del concreto. Materiales, propiedades y diseño de mezclas. Tomo I. Nomos impresores, Colombia, p2-60.

ASTM C1116. 2010. Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete. Annual book of ASTM standards

ASTM C150. 2015. Standard specification for portland cement. Annual book of ASTM standards.

ASTM C293. 2016. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading). Annual book of ASTM standards.

ASTM C31/C31M. 2008. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. Annual book of ASTM standards.

ASTM C33. 2013. Standard Specification for Concrete Aggregates. Annual book of ASTM standards.

ASTM C39/C39M. 2014. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual book of ASTM standards.

ASTM D882. 2012. Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. Annual book of ASTM standards

ASTM E11. 2015. Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. Annual book of ASTM standards.

Baldenebro, F. 2015. Estudio numérico-experimental de fibras de PET y su comportamiento en una matriz de concreto. Tesis Doctor en Materiales. Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Chihuahua.

Borg, R., Baldacchino, O., Ferrara, L. 2016. Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 108: 29–47.

Botero, E., Ossa, A., Sherwell, G., Ovando-Shelley, E. 2015. Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). *Geotextiles and Geomembranes* 43: 363-369

Caggiano, A., Folino, P., Lima, C., Martinelli, E., Pepe., M. 2017. On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers. *Construction and Building Materials* 147 P292: 286–295

Castro, C. 2016. Las fibras de vidrio, acero y polipropileno en forma de hilachas, aplicadas como fibras de refuerzo en la elaboración de morteros de cemento. Tesis Ingeniero Civil. Universidad Técnica de Ambato. Ambato., p5.

Causil, R., y Guzmán, V. 2016. Caracterización de las fibras de capacho de maíz (zea mays) como material de refuerzo alternativo para el concreto mediante ensayos mecánicos. Tesis Ingeniero Mecánico. Universidad de Córdoba. Montería.

- DANE. 2013.** [en línea]. Informe de Coyuntura Económica Regional. Departamento de Córdoba. Colombia. http://www.dane.gov.co/files/icer/2013/ICER_Cordoba_2013.pdf. Acceso: 17 de Marzo (2017)
- DANE. 2014.** [en línea]. Boletín técnico. 3er Censo Nacional Agropecuario. Colombia. <https://www.dane.gov.co/files/CensoAgropecuario/entrega-definitiva/Boletin-6-Infraestructura/6-Boletin.pdf>. Acceso: 14 de Marzo (2017).
- DANE. 2015.** [en línea]. Estadísticas de Concreto Premezclado. Colombia. http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/concreto/Bol_con_dic_14.pdf. Acceso: 14 de Marzo (2017).
- Donnini, S., y Zanin, M. 1999.** Recyclability of Pet from Virgin Resin. Materials Research vol.2 São Carlos. 1516-1439.
- Essentia. 2015.** Película, empaque agro y textil: Los sectores que impulsan el consumo aparente de polipropileno en Colombia. El Diario ESENTTIA.
- Figuroa, M. 2013.** Comparativa de la tenacidad entre hormigón convencional, hormigón reforzado con fibras de acero y hormigón reforzado con fibras de polipropileno. Tesis Máster en ingenierías de las estructuras, cimentaciones y materiales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- Foti, D. 2011.** Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. Construction and Building Materials 25: 1906–1915
- Foti, D. 2016.** Innovative techniques for concrete reinforcement with polymers. Construction and Building Materials 112: 202–209
- Fraternali, F., Ciancia, V., Chechile, R., Rizzano, G., Feo, L. 2011.** Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete. Composite Structures 93: 2368–2374.

- García, P. 2007.** Verificación de la dosificación de fibras sintéticas para neutralizar las fisuras causadas por contracción plástica en el concreto. Tesis Ingeniero Civil. Universidad Ricardo Palma. Lima., p25.
- Hsieh, M., Tu, CH., Song, P.S. 2008.** Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering A* 494: 153–157
- Juárez, C., Guevara, B., Valdez, P. y Durán, A. 2010.** Mechanical properties of natural fibers reinforced sustainable masonry. *Construction and Building Materials*. 24 (2010): 1536 – 1541.
- Karahan, O., y Atiş, C. 2011.** The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials and Design* 32: 1044–1049.
- Kalpakjian, S., Schmid, S. 2008.** *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educacion, Mexico, p194.
- Kim, S.B., Yi, N.H., Kim, H.Y., Kim, J.-H., Song, Y.-C. 2009.** Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites* 32: 232–240.
- Maccaferri, N. 2015.** “Manual de Fibras para concreto”
- Macías, J. 2009.** Utilización de Fibras en Hormigones, Quito.
- Mastali M., Dalvand A., Sattarifard A.R. 2016.** The impact resistance and mechanical properties of reinforced selfcompacting concrete with recycled glass fiber reinforced polymers. *Journal of Cleaner Production* 124: 312-324.
- Mestanza, J. 2016.** Análisis comparativo de la resistencia a compresión del concreto con adición de fibras de polipropileno sometido a ambientes severos: altas, bajas temperaturas y ambientes salinos. Tesis Ingeniera Civil. Universidad Técnica de Ambato. Ambato., p21-22.

Miao, B., Chern, J. y Yang, C. 2003. Influences of fiber content on properties of self-compacting Steel fiber reinforced concrete. Journal of the Chinese Institute of Engineers 26(4): 523 – 530.

Millán, M. 2013. Comportamiento del hormigón reforzado con fibras de polipropileno y su influencia en sus propiedades mecánicas en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua. Tesis Ingeniera Civil. Universidad Técnica de Ambato. Ambato., p13.

MINCOMERCIO. 2015. Ministerio de Comercio, Industria y Turismo de Colombia. Informe de industria - marzo 2015.

M.P. de la cruz. 2014. Materiales de construcción: Hormigón. Componentes.

Muntean, R., Cazacu, C., Mizgan, P., Galatanu, T., Tamas, F. 2017. Practical applications of dispersely reinforced concrete with Polypropylene fibers: Beams. Procedia Engineering 181: 285 - 292.

Ochi, T., Okubo, S., Fukui, K. 2007. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. Cement and concrete composites 29 448-455, p450.

Pešić N., Živanović S., Garcia R., Papastergiou P. 2016. Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibers. Construction and Building Materials 115: 362-370.

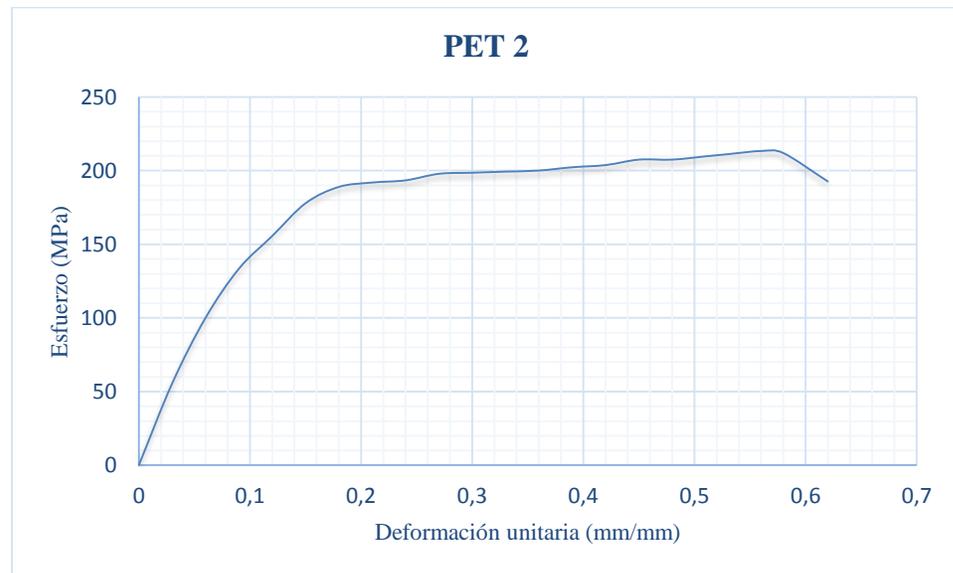
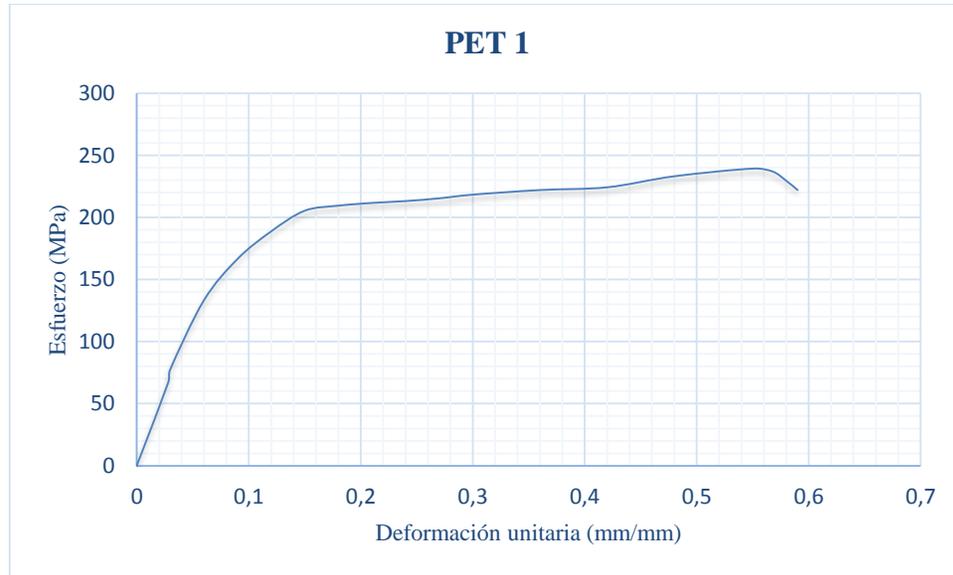
PlasticsEurope. 2011. Plásticos - Situación en 2011, Análisis de la producción, la demanda y la recuperación de plásticos en Europa en 2011

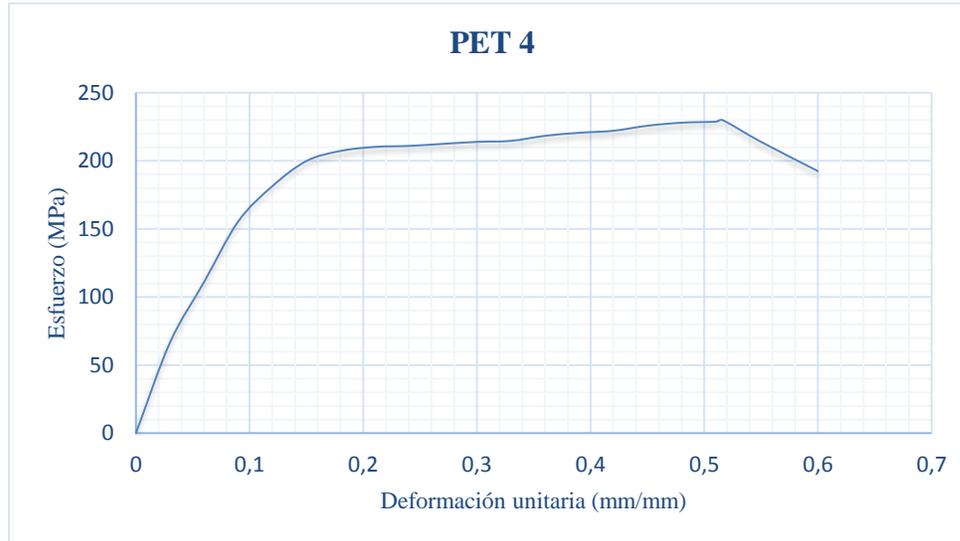
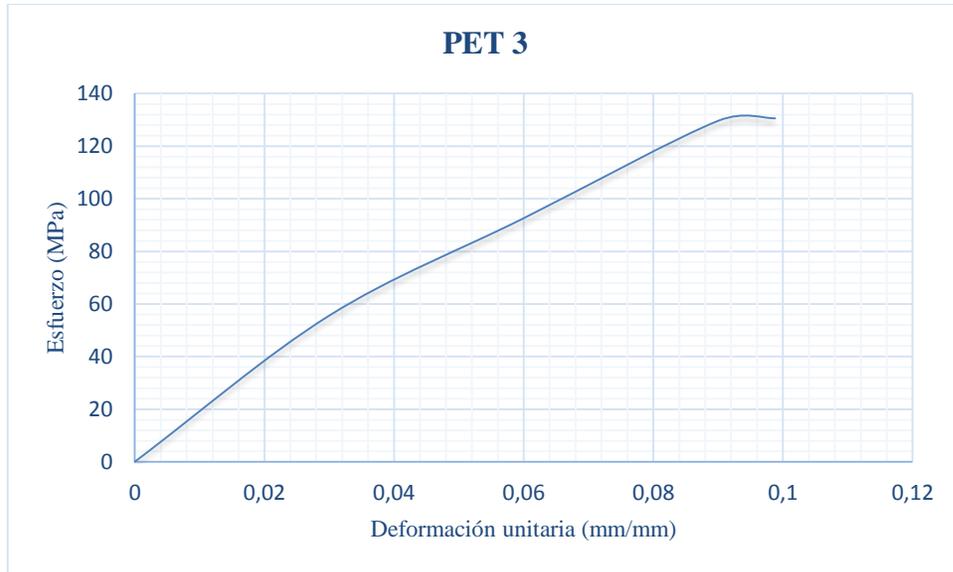
PNUMA. 2014. Programa de las naciones unidas para el medio ambiente. Extracción de arena, un recurso no renovable. p2.

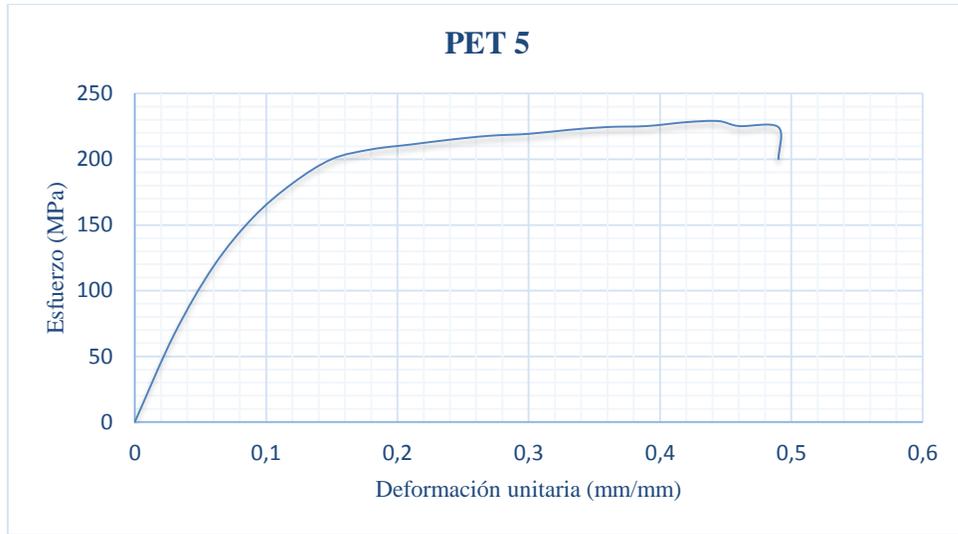
- Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M.H.A., Allahyari, H., Nikbin, I. M. 2013.** On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials* 47: 1302–1308.
- Reis, J.M.L. 2011.** Effect of aging on the fracture mechanics of unsaturated polyester based on recycled PET polymer concrete. *Materials Science and Engineering A* 528 3007–3009
- SIREM. 2012.** Superintendencia de Sociedades, SIREM. Ventas de plástico en Colombia (2008-2012).
- Spadea, S., Farina, I., Carrafiello, A., Fraternali, F. 2015.** Effect of nylon fibers on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems. *Construction and Building Materials* 80: 200–209.
- Téllez, A. 2012.** La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá. Tesis Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. p14.
- UPME, 2005.** La Cadena del Carbón. El carbón colombiano fuente de energía para el mundo. Unidad de planeación ministerio de energía. p11.
- UPME. 2014.** Evaluación de la situación actual y de los escenarios futuros del mercado de los materiales de construcción y arcillas en las ciudades de Cali, Cúcuta, Villavicencio, Cartagena, Sincelejo, Yopal, Valledupar y Montería. p43.
- Yin, S., Tuladhar, R., Riella, R., Chung, D., Collister, T., Combe, M., Sivakugan, N. 2016.** Comparative evaluation of virgin and recycled polypropylene fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 114: 134-141.

9. ANEXOS

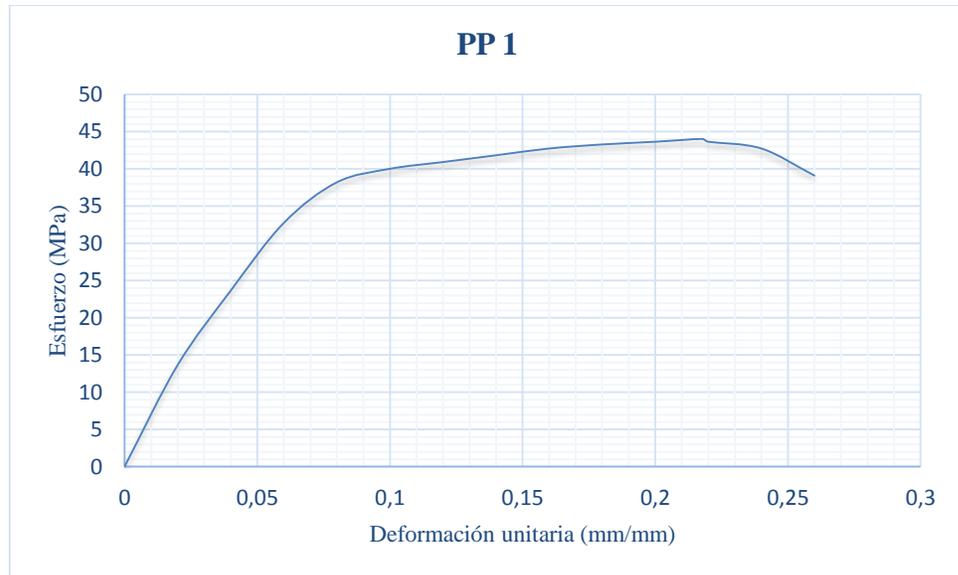
A 1: Diagrama esfuerzo-deformación unitaria de fibras de PET

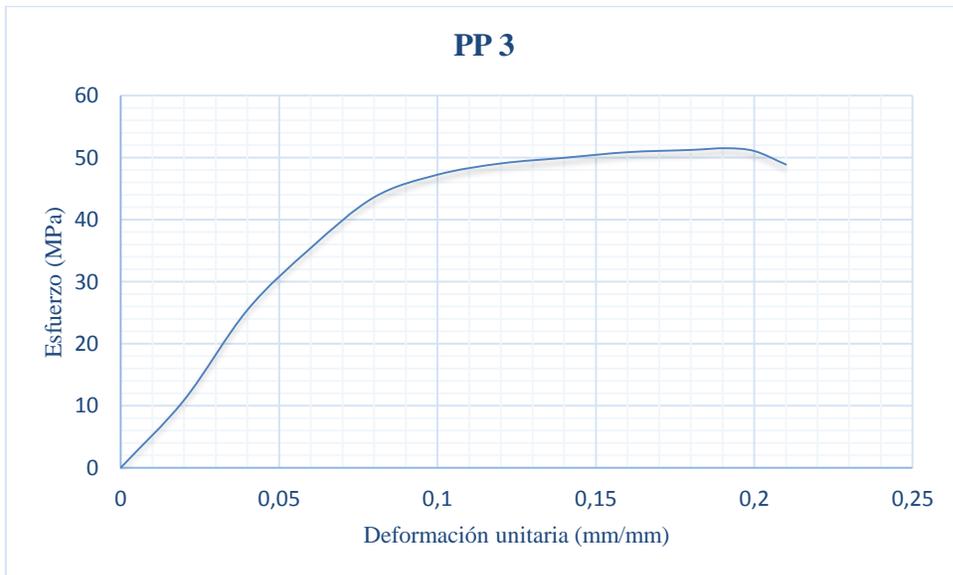
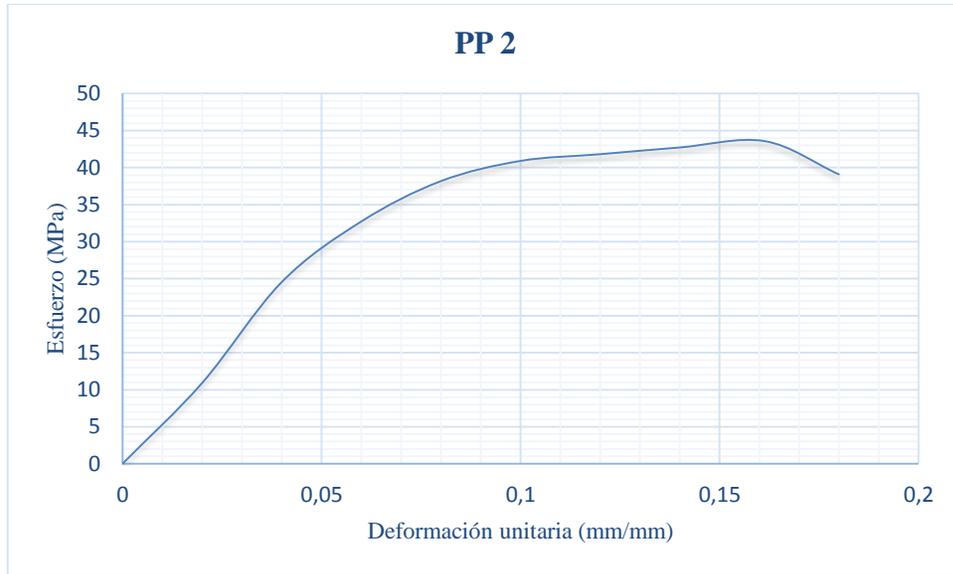


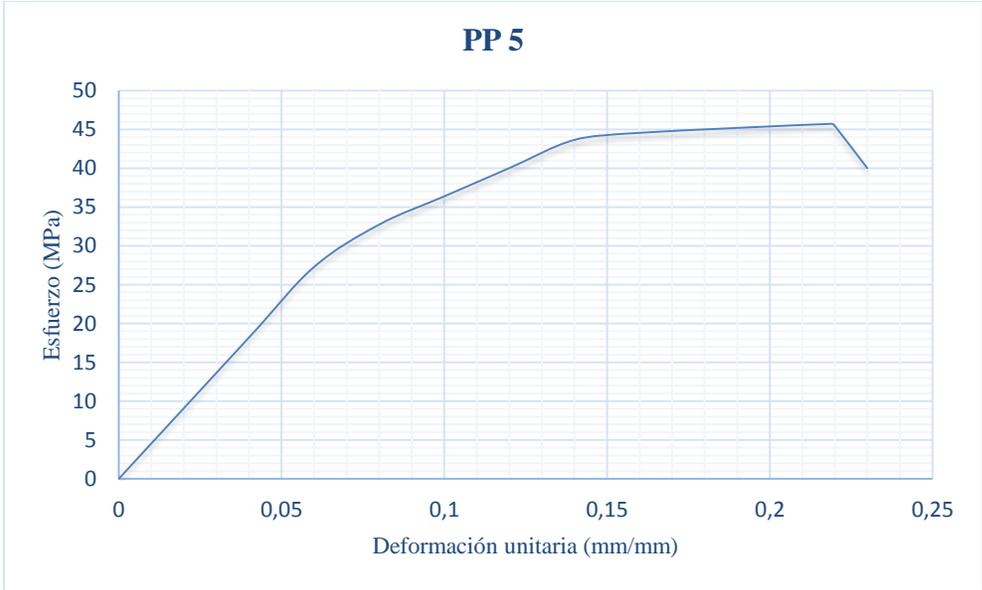
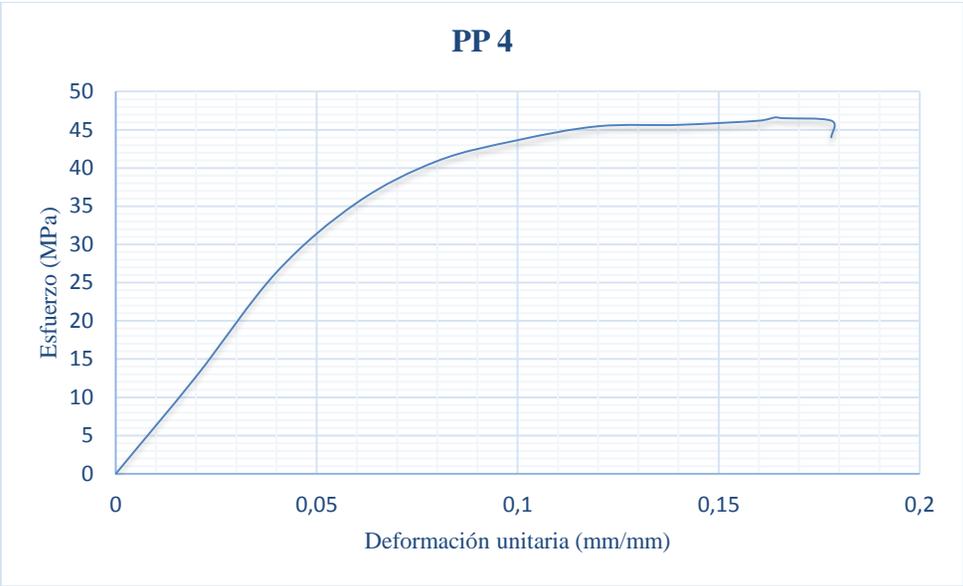




A 2: Diagrama esfuerzo-deformación unitaria de fibras de PP







A 3: Propiedades mecánicas de las muestras de PET ensayadas a tensión.

Muestra	Carga Máxima (N)	Despla. Total (mm)	Esfuerz Último (MPa)	% Def.	Esfuerz Rupt.	% Def a Rupt.	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
PET – 1	323.38	27.52	239.54	55.03	237.13	55.86	206.9	2769.1
PET – 2	287.97	28.04	213.31	56.08	212.43	56.63	187.32	1854.13
PET – 3	176.28	4.94	130.58	9.88	130.51	9.84	NA (*)	1622.31
PET – 4	310.34	25.83	229.88	51.66	228.84	52.06	209.14	2195.43
PET – 5	309.09	22.22	228.96	44.44	102.76	41.72	209.21	2283.99
Promedio	281.41	21.71	208.45	43.42	182.33	43.22	203.14	2144.99
Desviación estándar	60.12	9.65	44.54	19.3	61.42	19.58	10.61	438.51

A 4: Propiedades mecánicas de las muestras de PP ensayadas a tensión.

Muestra	Carga Máxima (N)	Despl. Total (mm)	Esfuerz Último (MPa)	% Def.	Esfuer Rupt.	% Def. Rupt.	Esf. de Fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
PP – 1	24.21	10.88	44.01	21.75	41.88	26.03	39.93	595.79
PP – 2	23.97	8.07	43.59	16.14	40.38	17.78	41.94	669.49
PP – 3	28.35	9.55	51.55	19.11	49.06	20.72	49.28	796.97
PP – 4	25.64	8.2	46.61	16.39	44.93	17.55	44.11	644.32
PP – 5	25.14	10.95	45.71	21.89	35.19	11.5	43.74	626.27
Promedio	25.46	9.53	46.29	19.06	42.29	18.72	43.8	666.57
Desviación Estándar	1.75	1.39	3.19	2.78	5.17	5.29	3.48	77.69

A 5: Granulometría de la arena del Rio Sinú utilizada para la realización de las probetas de concreto reforzado con fibras de PET y PP

Módulo de finura (Arena río Sinú)

Muestra (g)	1250		
N° Tamiz	Masa retenida (g)	% retenido	% Que pasa
2"	0	0	100
1½"	0	0	100
1"	0	0	100
¾"	0	0	100
½"	15.40	1.23	100
⅜"	20.60	1.65	98.96
4	131	10.48	96.64
8	244.80	19.58	87.06
16	159.70	12.78	58.28
30	12.01	12.01	32.12
50	243.10	19.45	6.29
100	273.90	21.91	0.91
200	4.20	0.34	0.58
Módulo de finura	2.81		

A 6: Cálculo del Tamaño Máximo Nominal de la grava del Río Sinú utilizada para la realización de las probetas de concreto reforzado con fibras de PET y PP

Tamaño Máximo Nominal (TMN) (Grava Río Sinú)

Muestra (g)	2554		
N° Tamiz	Masa retenida (g)	% retenido	% Que pasa
2"	0	0	100
1½"	0	0	100
1"	49.5	1.8	98.2
¾"	27.9	1.09	97.11
½"	548	21.46	53.90
⅜"	794.10	31.09	44.56
4	840.30	32.90	11.66
8	152.20	5.96	5.70
16	23.20	0.91	4.79
30	10.60	0.42	4.38
50	18	0.70	3.67
100	18.90	0.74	2.93
TMN	1"		

A 7: Densidad de todas las probetas de concreto sometidas al ensayo de compresión.

Muestra	Material de la fibra	% en volumen de fibra	Días de curado	Volumen (m³)	Masa (kg)	Densidad (kg/m³)
TC1	CONTROL	0,0	3	0,0053	12,80	2414,44
TC2	CONTROL	0,0	3	0,0053	12,65	2386,14
TC3	CONTROL	0,0	3	0,0053	12,59	2374,82
TC4	CONTROL	0,0	7	0,0053	12,70	2395,57
TC5	CONTROL	0,0	7	0,0053	12,70	2395,57
TC6	CONTROL	0,0	7	0,0053	12,65	2386,14
TC7	CONTROL	0,0	28	0,0053	12,69	2395,57
TC8	CONTROL	0,0	28	0,0053	12,66	2388,92
TC9	CONTROL	0,0	28	0,0053	12,68	2392,13
MCPET1	PET	0,5	3	0,0053	13,10	2471,02
MCPET2	PET	0,5	3	0,0053	12,35	2329,55
MCPET3	PET	0,5	3	0,0053	12,55	2367,28
MCPET4	PET	0,5	7	0,0053	11,95	2254,10
MCPET5	PET	0,5	7	0,0053	12,60	2376,71
MCPET6	PET	0,5	7	0,0053	12,60	2376,71
MCPET7	PET	0,5	28	0,0053	12,56	2369,16
MCPET8	PET	0,5	28	0,0053	13,16	2482,34
MCPET9	PET	0,5	28	0,0053	12,33	2325,78
MCPET10	PET	1,0	3	0,0053	13,10	2471,02
MCPET11	PET	1,0	3	0,0053	13,10	2471,02
MCPET12	PET	1,0	3	0,0053	12,70	2395,57
MCPET13	PET	1,0	7	0,0053	12,60	2376,71
MCPET14	PET	1,0	7	0,0053	12,45	2348,41
MCPET15	PET	1,0	7	0,0053	12,15	2291,83
MCPET16	PET	1,0	28	0,0053	12,82	2418,21

MCPET17	PET	1,0	28	0,0053	12,18	2297,48
MCPET18	PET	1,0	28	0,0053	12,17	2295,60
MCPET19	PET	1,5	3	0,0053	13,20	2489,88
MCPET20	PET	1,5	3	0,0053	12,75	2405,05
MCPET21	PET	1,5	3	0,0053	12,20	2301,26
MCPET22	PET	1,5	7	0,0053	12,50	2357,85
MCPET23	PET	1,5	7	0,0053	12,70	2395,57
MCPET24	PET	1,5	7	0,0053	13,05	2461,59
MCPET25	PET	1,5	28	0,0053	12,21	2303,15
MCPET26	PET	1,5	28	0,0053	12,64	2384,26
MCPET27	PET	1,5	28	0,0053	12,64	2384,26
MCPET28	PET	2,0	3	0,0053	12,35	2329,55
MCPET29	PET	2,0	3	0,0053	12,25	2310,69
MCPET30	PET	2,0	3	0,0053	13,00	2452,16
MCPET31	PET	2,0	7	0,0053	12,80	2414,43
MCPET32	PET	2,0	7	0,0053	12,99	2450,27
MCPET33	PET	2,0	7	0,0053	12,68	2391,80
MCPET34	PET	2,0	28	0,0053	12,09	2280,51
MCPET35	PET	2,0	28	0,0053	12,66	2388,03
MCPET36	PET	2,0	28	0,0053	12,06	2274,85
MCPP1	PP	0,5	3	0,0053	12,70	2395,57
MCPP2	PP	0,5	3	0,0053	12,50	2357,85
MCPP3	PP	0,5	3	0,0053	13,10	2471,03
MCPP4	PP	0,5	7	0,0053	12,20	2301,26
MCPP5	PP	0,5	7	0,0053	12,80	2414,43
MCPP6	PP	0,5	7	0,0053	12,50	2357,85
MCPP7	PP	0,5	28	0,0053	12,22	2305,03
MCPP8	PP	0,5	28	0,0053	13,12	2474,80
MCPP9	PP	0,5	28	0,0053	12,93	2438,96

MCPP10	PP	1,0	3	0,0053	12,85	2423,87
MCPP11	PP	1,0	3	0,0053	12,75	2405,01
MCPP12	PP	1,0	3	0,0053	12,40	2338,98
MCPP13	PP	1,0	7	0,0053	12,80	2414,43
MCPP14	PP	1,0	7	0,0053	12,65	2386,14
MCPP15	PP	1,0	7	0,0053	11,95	2254,10
MCPP16	PP	1,0	28	0,0053	12,99	2450,27
MCPP17	PP	1,0	28	0,0053	13,00	2452,16
MCPP18	PP	1,0	28	0,0053	12,18	2297,49
MCPP19	PP	1,5	3	0,0053	12,70	2395,57
MCPP20	PP	1,5	3	0,0053	12,55	2367,28
MCPP21	PP	1,5	3	0,0053	12,78	2410,66
MCPP22	PP	1,5	7	0,0053	12,54	2365,39
MCPP23	PP	1,5	7	0,0053	12,76	2406,89
MCPP24	PP	1,5	7	0,0053	12,75	2405,01
MCPP25	PP	1,5	28	0,0053	12,12	2286,17
MCPP26	PP	1,5	28	0,0053	12,10	2282,39
MCPP27	PP	1,5	28	0,0053	12,90	2433,30
MCPP28	PP	2,0	3	0,0053	13,04	2459,71
MCPP29	PP	2,0	3	0,0053	12,55	2367,28
MCPP30	PP	2,0	3	0,0053	12,87	2427,64
MCPP31	PP	2,0	7	0,0053	12,80	2414,44
MCPP32	PP	2,0	7	0,0053	12,50	2357,85
MCPP33	PP	2,0	7	0,0053	12,34	2327,67
MCPP34	PP	2,0	28	0,0053	12,01	2265,42
MCPP35	PP	2,0	28	0,0053	12,07	2276,74
MCPP36	PP	2,0	28	0,0053	12,45	2348,42

A 8: Densidad de todas las probetas de concreto sometidas al ensayo de flexión a tres puntos.

Muestra	Material de la fibra	% en volumen de fibra	Días de curado	Volumen (m³)	Masa (kg)	Densidad (kg/m³)
TF1	CONTROL	0.0	3	0.011	26.96	2396.44
TF2	CONTROL	0.0	3	0.011	27.00	2400
TF3	CONTROL	0.0	3	0.011	26.63	2367.11
TF4	CONTROL	0.0	7	0.011	26.35	2342.22
TF5	CONTROL	0.0	7	0.011	26.85	2386.66
TF6	CONTROL	0.0	7	0.011	27.16	2414.22
TF7	CONTROL	0.0	28	0.011	26.94	2394.53
TF8	CONTROL	0.0	28	0.011	26.99	2399.54
TF9	CONTROL	0.0	28	0.011	27.02	2401.52
MFPET1	PET	0.5	3	0.011	27.07	2406.22
MFPET2	PET	0.5	3	0.011	26.38	2344.88
MFPET3	PET	0.5	3	0.011	26.38	2344.88
MFPET4	PET	0.5	7	0.011	25.84	2296.88
MFPET5	PET	0.5	7	0.011	26.00	2311.11
MFPET6	PET	0.5	7	0.011	25.86	2298.66
MFPET7	PET	0.5	28	0.011	26.87	2388.44
MFPET8	PET	0.5	28	0.011	26.75	2377.77
MFPET9	PET	0.5	28	0.011	27.10	2408.88
MFPET10	PET	1.0	3	0.011	27.14	2412.44
MFPET11	PET	1.0	3	0.011	26.91	2392
MFPET12	PET	1.0	3	0.011	26.74	2376.88
MFPET13	PET	1.0	7	0.011	26.50	2355.55
MFPET14	PET	1.0	7	0.011	26.45	2351.11
MFPET15	PET	1.0	7	0.011	26.25	2333.33
MFPET16	PET	1.0	28	0.011	26.65	2368.90

MFPET17	PET	1.0	28	0.011	26.78	2380.44
MFPET18	PET	1.0	28	0.011	26.72	2375.11
MFPET19	PET	1.5	3	0.011	26.98	2398.22
MFPET20	PET	1.5	3	0.011	26.74	2376.88
MFPET21	PET	1.5	3	0.011	26.87	2388.44
MFPET22	PET	1.5	7	0.011	26.52	2357.33
MFPET23	PET	1.5	7	0.011	26.73	2376
MFPET24	PET	1.5	7	0.011	26.65	2368.89
MFPET25	PET	1.5	28	0.011	26.60	2364.44
MFPET26	PET	1.5	28	0.011	26.32	2339.55
MFPET27	PET	1.5	28	0.011	26.76	2378.66
MFPET28	PET	2.0	3	0.011	26.32	2339.56
MFPET29	PET	2.0	3	0.011	26.80	2382.22
MFPET30	PET	2.0	3	0.011	26.60	2364.44
MFPET31	PET	2.0	7	0.011	27.00	2400
MFPET32	PET	2.0	7	0.011	27.10	2408.88
MFPET33	PET	2.0	7	0.011	27.00	2400
MFPET34	PET	2.0	28	0.011	26.10	2320
MFPET35	PET	2.0	28	0.011	25.93	2304.89
MFPET36	PET	2.0	28	0.011	26.09	2319.1
MFPP1	PP	0.5	3	0.011	27.10	2408.89
MFPP2	PP	0.5	3	0.011	26.90	2391.11
MFPP3	PP	0.5	3	0.011	27.30	2426.66
MFPP4	PP	0.5	7	0.011	26.42	2348.44
MFPP5	PP	0.5	7	0.011	26.67	2370.67
MFPP6	PP	0.5	7	0.011	26.80	2382.22
MFPP7	PP	0.5	28	0.011	27.16	2414.22
MFPP8	PP	0.5	28	0.011	26.70	2373.33
MFPP9	PP	0.5	28	0.011	26.82	2384

MFPP10	PP	1.0	3	0.011	26.72	2375.11
MFPP11	PP	1.0	3	0.011	26.87	2388.44
MFPP12	PP	1.0	3	0.011	26.65	2368.89
MFPP13	PP	1.0	7	0.011	26.30	2337.78
MFPP14	PP	1.0	7	0.011	26.45	2351.11
MFPP15	PP	1.0	7	0.011	26.60	2364.44
MFPP16	PP	1.0	28	0.011	26.90	2391.11
MFPP17	PP	1.0	28	0.011	26.80	2382.22
MFPP18	PP	1.0	28	0.011	26.40	2346.66
MFPP19	PP	1.5	3	0.011	26.61	2365.33
MFPP20	PP	1.5	3	0.011	26.70	2373.33
MFPP21	PP	1.5	3	0.011	26.87	2388.44
MFPP22	PP	1.5	7	0.011	26.76	2378.66
MFPP23	PP	1.5	7	0.011	27.05	2404.44
MFPP24	PP	1.5	7	0.011	26.69	2372.44
MFPP25	PP	1.5	28	0.011	26.20	2329.13
MFPP26	PP	1.5	28	0.011	26.26	2344.22
MFPP27	PP	1.5	28	0.011	26.29	2337.18
MFPP28	PP	2.0	3	0.011	27.25	2422.22
MFPP29	PP	2.0	3	0.011	26.95	2395.56
MFPP30	PP	2.0	3	0.011	27.32	2428.44
MFPP31	PP	2.0	7	0.011	26.78	2380.44
MFPP32	PP	2.0	7	0.011	26.68	2371.56
MFPP33	PP	2.0	7	0.011	26.37	2344
MFPP34	PP	2.0	28	0.011	26.16	2325.33
MFPP35	PP	2.0	28	0.011	25.85	2297.78
MFPP36	PP	2.0	28	0.011	25.90	2302.22

A 9: Densidad promedio de las probetas sometidas a compresión a las tres edades de curado

Nomenclatura	Densidad de probetas para compresión a los 3 días de curado (kg/m³)	Densidad de probetas para compresión a los 7 días de curado (kg/m³)	Densidad de probetas para compresión a los 28 días de curado (kg/m³)
MC-PET-0.5	2389.29 ± 73.26	2335.84 ± 70.80	2392.43 ± 80.83
MC-PET-1.0	2445.9 ± 43.56	2339 ± 43.22	2337.10 ± 70.25
MC-PET-1.5	2398.7 ± 94.50	2405 ± 52.51	2357.22 ± 46.83
MC-PET-2.0	2364.14 ± 76.81	2418.84 ± 29.48	2314.46 ± 63.77
TC	2391.8 ± 20.4	2392.43 ± 5.44	2392.21 ± 3.32
MC-PP-0.5	2408.15 ± 57.63	2357.85 ± 56.60	2406.26 ± 89.5
MC-PP-1.0	2389.29 ± 44.57	2351.56 ± 85.58	2399.98 ± 88.76
MC-PP-1.5	2391.17 ± 22.02	2392.43 ± 23.43	2333.96 ± 86.05
MC-PP-2.0	2418.21 ± 46.93	2366.65 ± 44.05	2296.86 ± 45.01

A 10: Densidad promedio de las probetas sometidas a flexión a las tres edades de curado

Nomenclatura	Densidad de probetas para flexión a los 3 días de curado (kg/m³)	Densidad de probetas para flexión a los 7 días de curado (kg/m³)	Densidad de probetas para flexión a los 28 días de curado (kg/m³)
MF-PET-0.5	2365.33 ± 35.41	2302.22 ± 7.75	2391.70 ± 15.81
MF-PET-1.0	2393.78 ± 17.84	2346.67 ± 11.76	2374.82 ± 5.77
MF-PET-1.5	2387.85 ± 10.68	2367.41 ± 9.42	2360.88 ± 10.80
MF-PET-2.0	2362.07 ± 21.43	2402.96 ± 5.13	2314.67 ± 8.48
TF	2387.85 ± 18.05	2381.04 ± 36.33	2398.63 ± 3.60
MF-PP-0.5	2408.88 ± 17.78	2367.11 ± 17.17	2390.52 ± 21.21
MF-PP-1.0	2377.48 ± 10.00	2351.11 ± 13.33	2373.33 ± 23.52
MF-PP-1.5	2375.70 ± 11.74	2385.18 ± 16.97	2333.51 ± 4.07
MF-PP-2.0	2415.41 ± 17.47	2365.33 ± 19.00	2308.44 ± 14.79

A 11: Densidad promedio de todas las probetas a las tres edades de curado

Mezclas	Densidad promedio de probetas a los 3 días de curado (kg/m³)	Densidad promedio de probetas a los 7 días de curado (kg/m³)	Densidad promedio de probetas a los 28 días de curado (kg/m³)
M-PET-0.5	2377.31 ± 53.11	2319.03 ± 48.66	2392.07 ± 52.10
M-PET-1.0	2419.83 ± 41.24	2342.83 ± 28.64	2355.96 ± 26.67
M-PET-1.5	2393.28 ± 60.42	2386.21 ± 39.53	2359.05 ± 32.22
M-PET-2.0	2363.11 ± 50.45	2410.90 ± 20.83	2314.57 ± 40.69
Control	2389.83 ± 17.36	2386.73 ± 24.06	2395.42 ± 4.54
M-PP-0.5	2408.52 ± 38.14	2362.48 ± 37.74	2398.40 ± 58.80
M-PP-1.0	2383.38 ± 29.60	2351.34 ± 54.78	2386.65 ± 59.88
M-PP-1.5	2383.44 ± 17.91	2388.81 ± 18.72	2333.73 ± 0.32
M-PP-2.0	2416.81 ± 31.71	2366 ± 30.35	2302.65 ± 30.63

A 12: Resistencia a compresión de cada una de las probetas ensayadas.

Probeta	Material de la fibra	Porcentaje en volumen de fibra	Edad de curado (días)	Resistencia a compresión (MPa)
TC1	CONTROL	0.0	3	10.59
TC2	CONTROL	0.0	3	10.29
TC3	CONTROL	0.0	3	10.45
TC4	CONTROL	0.0	7	14.64
TC5	CONTROL	0.0	7	13.56
TC6	CONTROL	0.0	7	14.10
TC7	CONTROL	0.0	28	18.04
TC8	CONTROL	0.0	28	18.59
TC9	CONTROL	0.0	28	18.31
MCPET1	PET	0.5	3	8.30
MCPET2	PET	0.5	3	8.26

MCPET3	PET	0.5	3	8.20
MCPET4	PET	0.5	7	12.00
MCPET5	PET	0.5	7	12.30
MCPET6	PET	0.5	7	12.35
MCPET7	PET	0.5	28	15.30
MCPET8	PET	0.5	28	15.41
MCPET9	PET	0.5	28	15.52
MCPET10	PET	1.0	3	6.10
MCPET11	PET	1.0	3	6.60
MCPET12	PET	1.0	3	6.37
MCPET13	PET	1.0	7	7.80
MCPET14	PET	1.0	7	8.10
MCPET15	PET	1.0	7	7.92
MCPET16	PET	1.0	28	14.14
MCPET17	PET	1.0	28	14.14
MCPET18	PET	1.0	28	13.84
MCPET19	PET	1.5	3	5.98
MCPET20	PET	1.5	3	5.16
MCPET21	PET	1.5	3	4.89
MCPET22	PET	1.5	7	5.71
MCPET23	PET	1.5	7	5.89
MCPET24	PET	1.5	7	6.73
MCPET25	PET	1.5	28	7.80
MCPET26	PET	1.5	28	8.36
MCPET27	PET	1.5	28	8.26
MCPET28	PET	2.0	3	3.80
MCPET29	PET	2.0	3	4.10
MCPET30	PET	2.0	3	5.20
MCPET31	PET	2.0	7	5.53
MCPET32	PET	2.0	7	4.56
MCPET33	PET	2.0	7	5.14

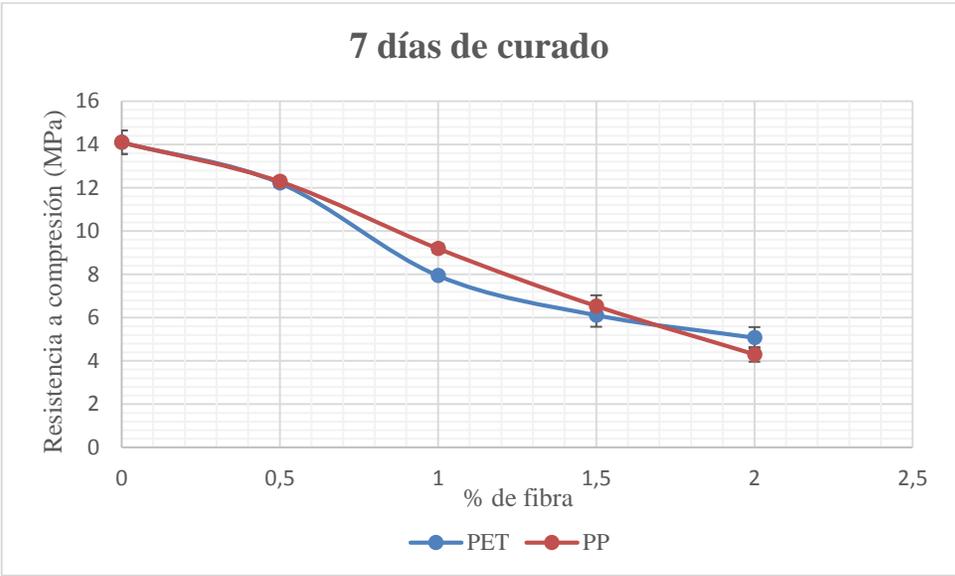
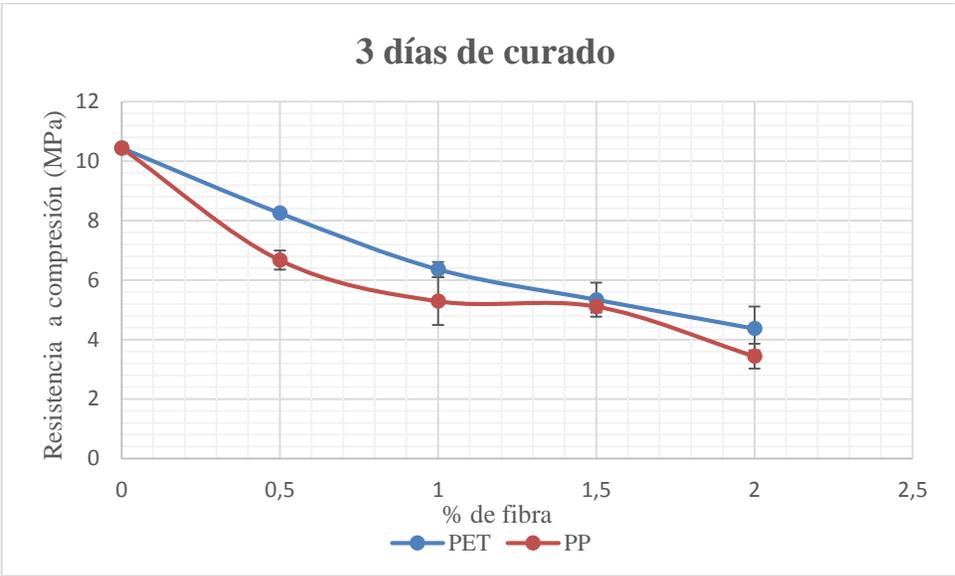
MCPET34	PET	2.0	28	6.83
MCPET35	PET	2.0	28	5.96
MCPET36	PET	2.0	28	6.64
MCPP1	PP	0.5	3	7.04
MCPP2	PP	0.5	3	6.49
MCPP3	PP	0.5	3	6.48
MCPP4	PP	0.5	7	12.05
MCPP5	PP	0.5	7	12.45
MCPP6	PP	0.5	7	12.36
MCPP7	PP	0.5	28	15.03
MCPP8	PP	0.5	28	15.45
MCPP9	PP	0.5	28	16.12
MCPP10	PP	1.0	3	5.12
MCPP11	PP	1.0	3	5.45
MCPP12	PP	1.0	3	5.31
MCPP13	PP	1.0	7	9.00
MCPP14	PP	1.0	7	9.42
MCPP15	PP	1.0	7	9.15
MCPP16	PP	1.0	28	15.23
MCPP17	PP	1.0	28	14.44
MCPP18	PP	1.0	28	14.28
MCPP19	PP	1.5	3	4.88
MCPP20	PP	1.5	3	5.17
MCPP21	PP	1.5	3	5.28
MCPP22	PP	1.5	7	6.11
MCPP23	PP	1.5	7	6.40
MCPP24	PP	1.5	7	7.08
MCPP25	PP	1.5	28	7.43
MCPP26	PP	1.5	28	7.12
MCPP27	PP	1.5	28	7.78
MCPP28	PP	2.0	3	3.87

M CPP29	PP	2.0	3	3.42
M CPP30	PP	2.0	3	3.03
M CPP31	PP	2.0	7	4.22
M CPP32	PP	2.0	7	3.99
M CPP33	PP	2.0	7	4.65
M CPP34	PP	2.0	28	5.83
M CPP35	PP	2.0	28	6.31
M CPP36	PP	2.0	28	5.88

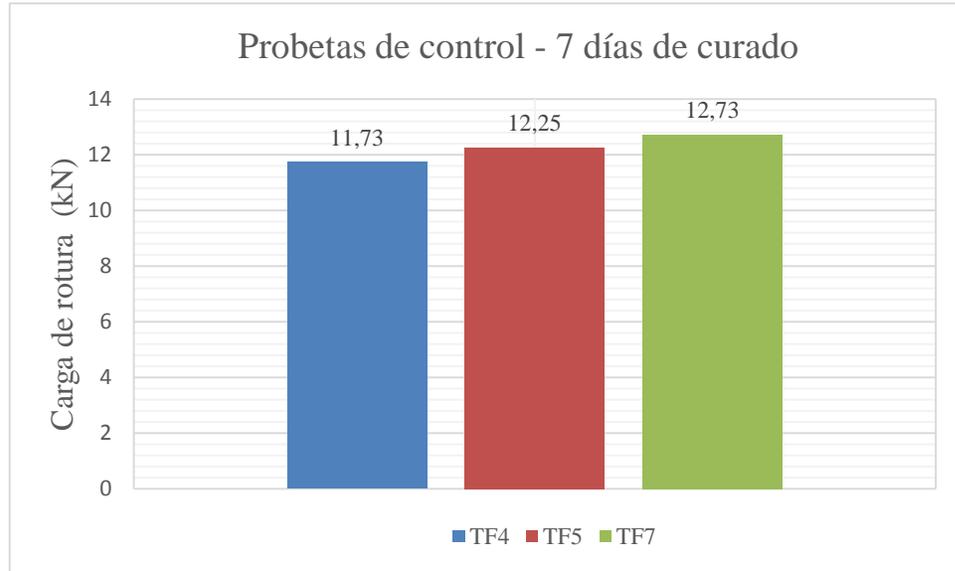
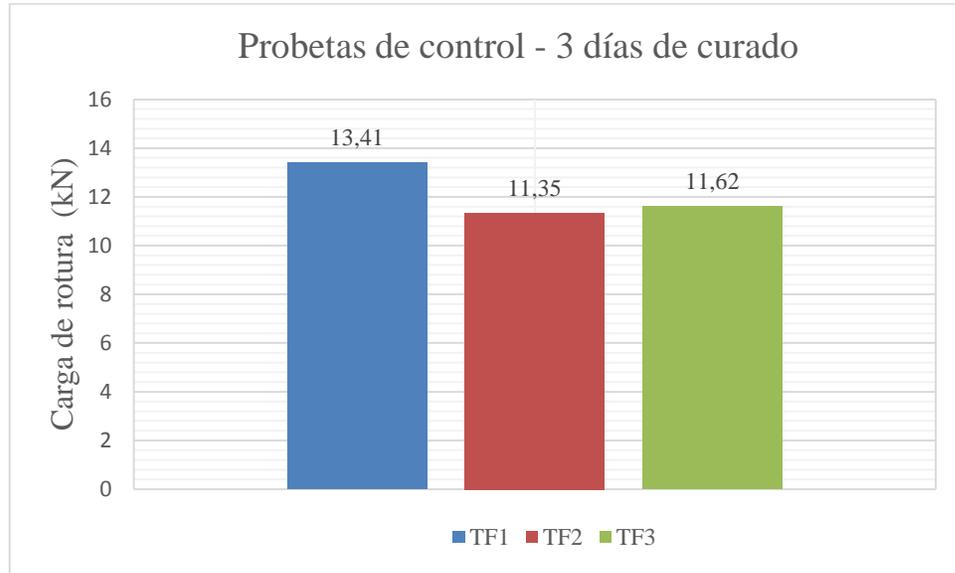
A 13: Resistencia a compresión promedio para las 3 edades de curado

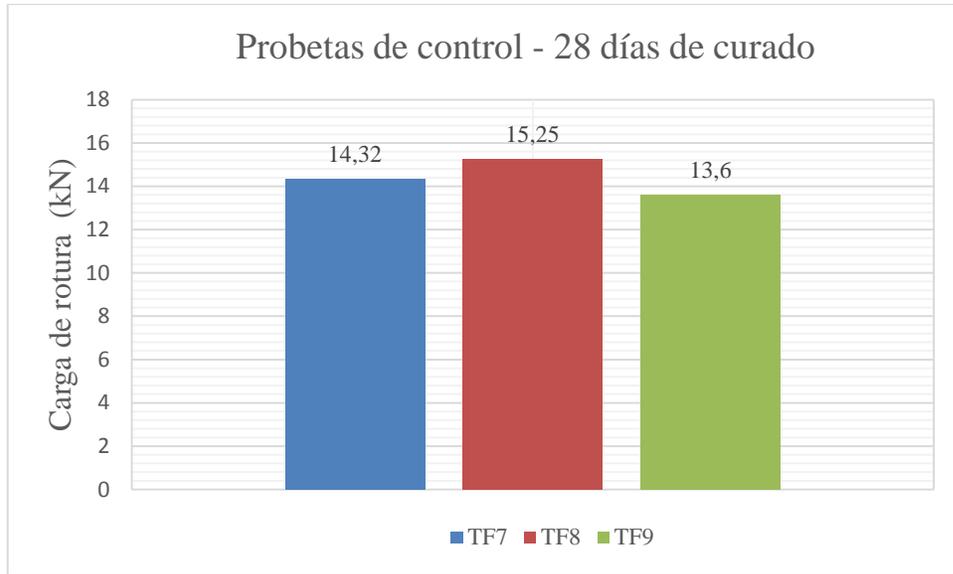
MEZCLAS	Resistencia a compresión para los 3 días de curado (Mpa)	Resistencia a compresión para los 7 días de curado (Mpa)	Resistencia a compresión para los 28 días de curado (Mpa)
MC-PET-0.5	8.25 ± 0.05	12.22 ± 0.19	15.41 ± 0.11
MC-PET-1.0	6.36 ± 0.25	7.94 ± 0.15	14.04 ± 0.17
MC-PET-1.5	5.34 ± 0.57	6.11 ± 0.54	8.14 ± 0.30
MC-PET-2.0	4.37 ± 0.74	5.07 ± 0.49	6.48 ± 0.46
Control	10.44 ± 0.15	14.10 ± 0.54	18.31 ± 0.27
MC-PP-0.5	6.67 ± 0.32	12.29 ± 0.21	15.53 ± 0.55
MC-PP-1.0	5.29 ± 0.16	9.19 ± 0.21	14.65 ± 0.51
MC-PP-1.5	5.11 ± 0.20	6.53 ± 0.50	7.44 ± 0.33
MC-PP-2.0	3.44 ± 0.42	4.30 ± 0.34	6.01 ± 0.26

A 14: Curva de resistencia a compresión en función del porcentaje de fibra incorporado para 3 y 7 días de curado

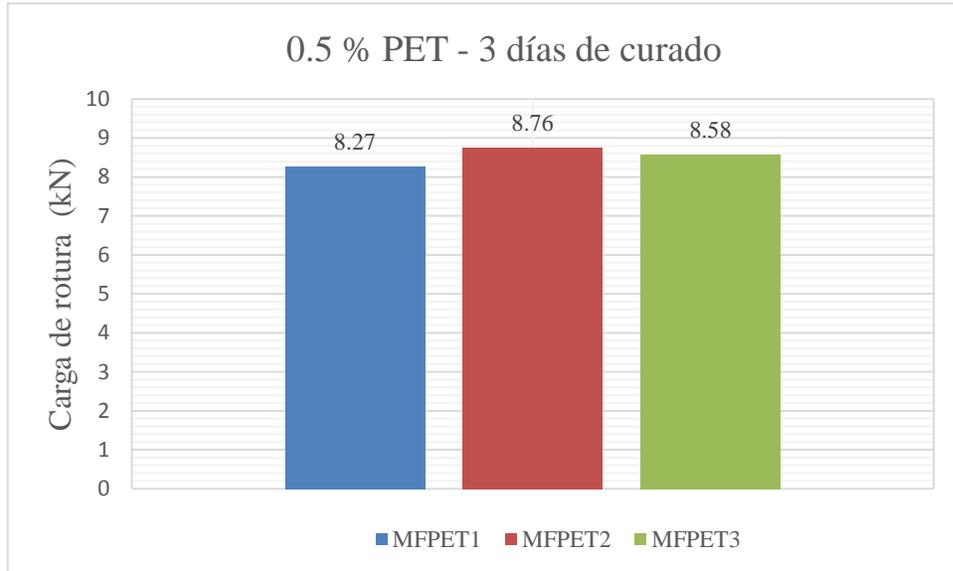


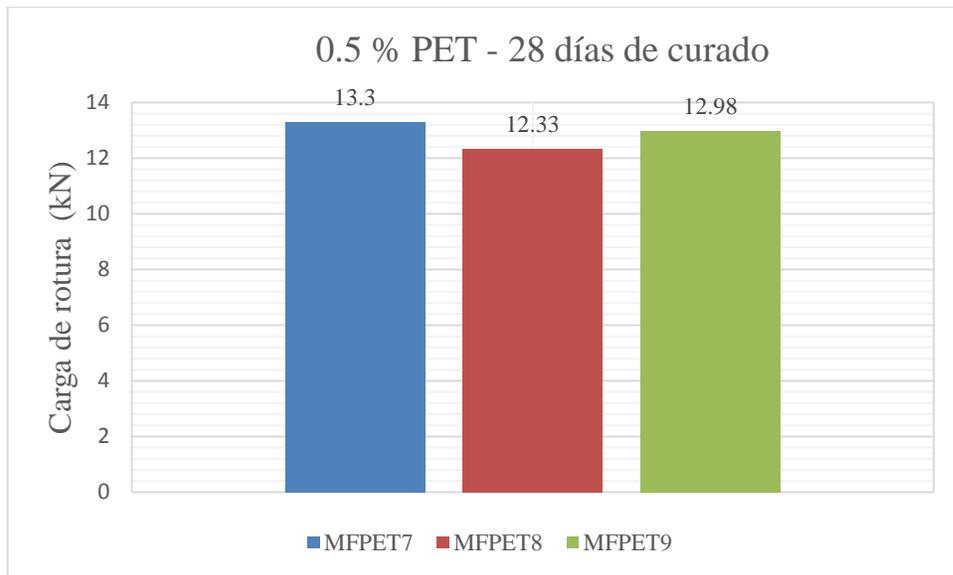
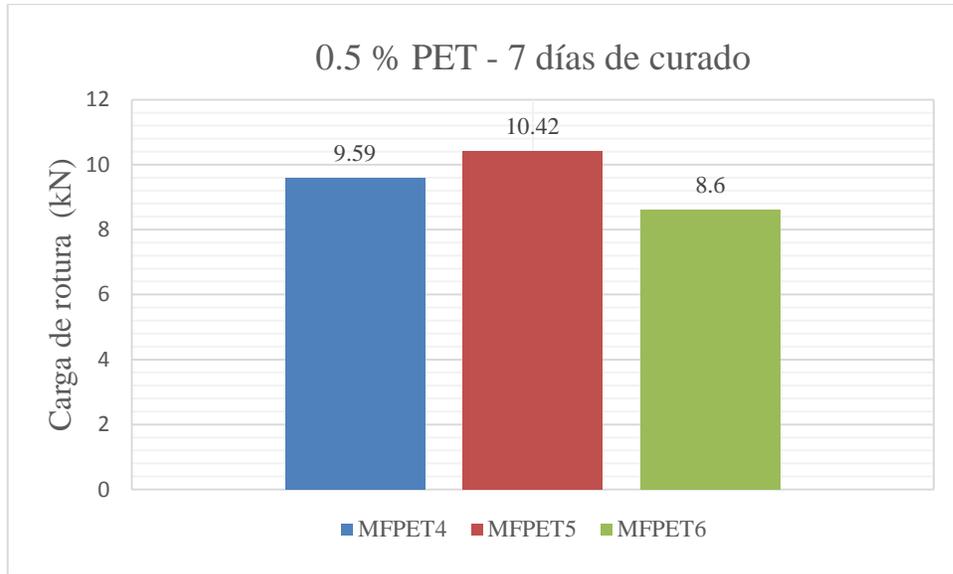
A 15: Valores de carga de rotura para la muestra de control a las 3 edades de curado.

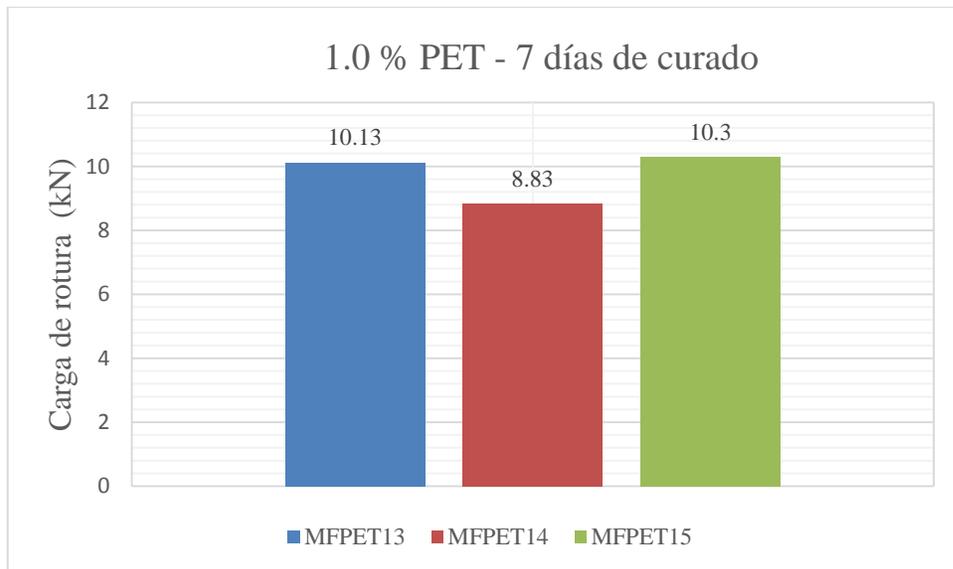
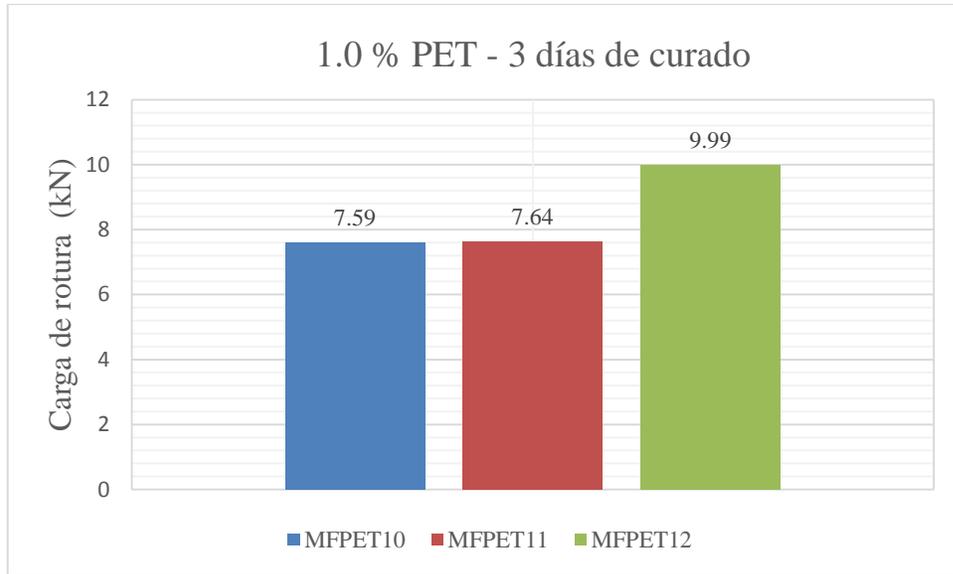


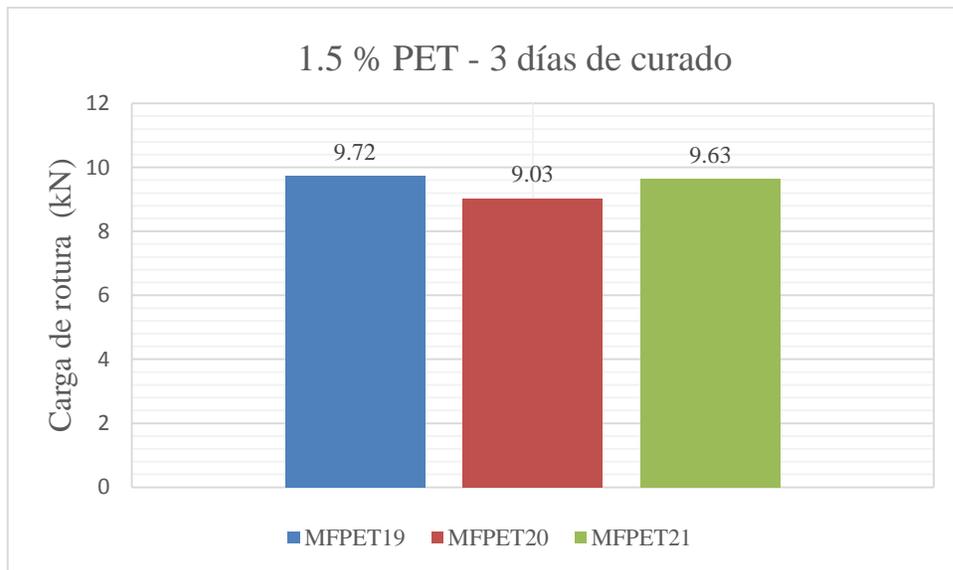
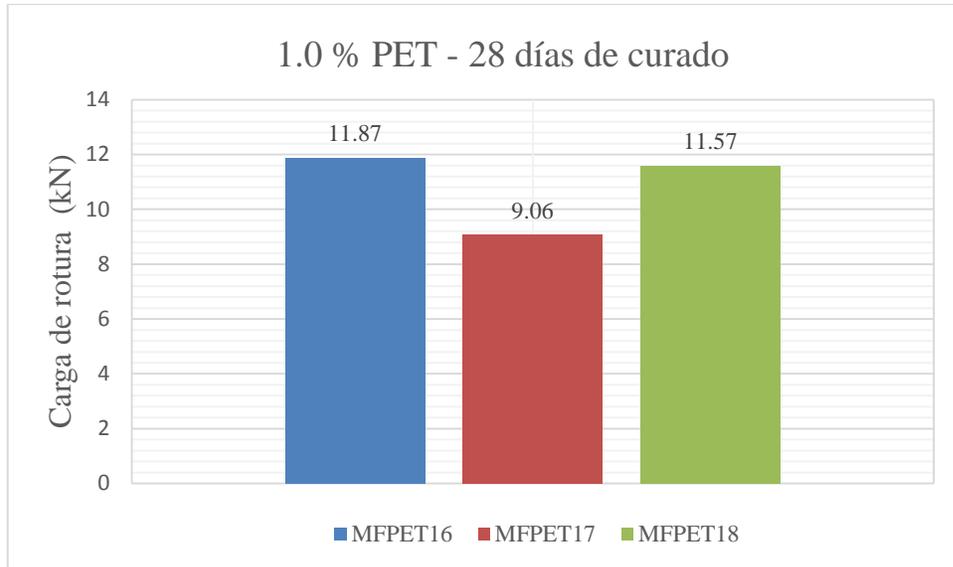


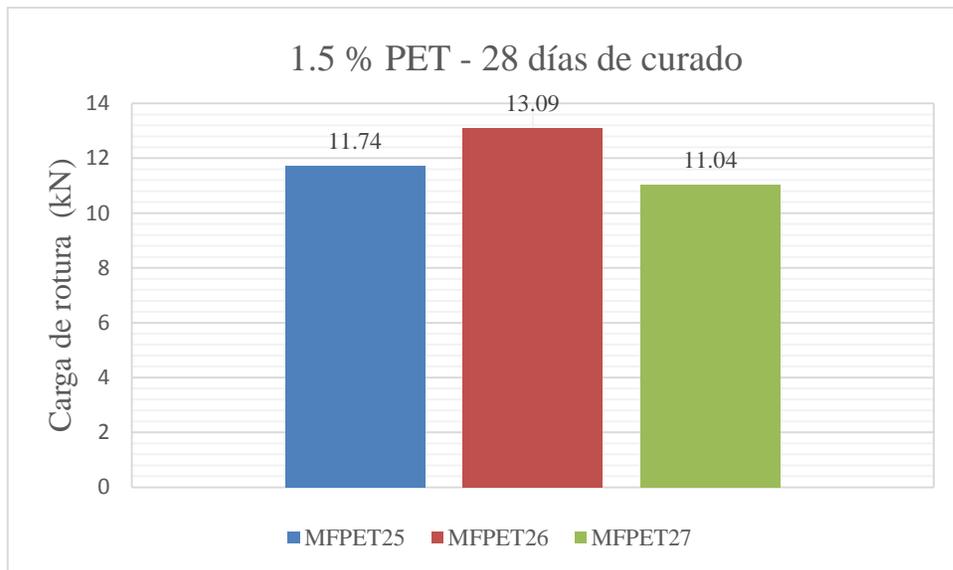
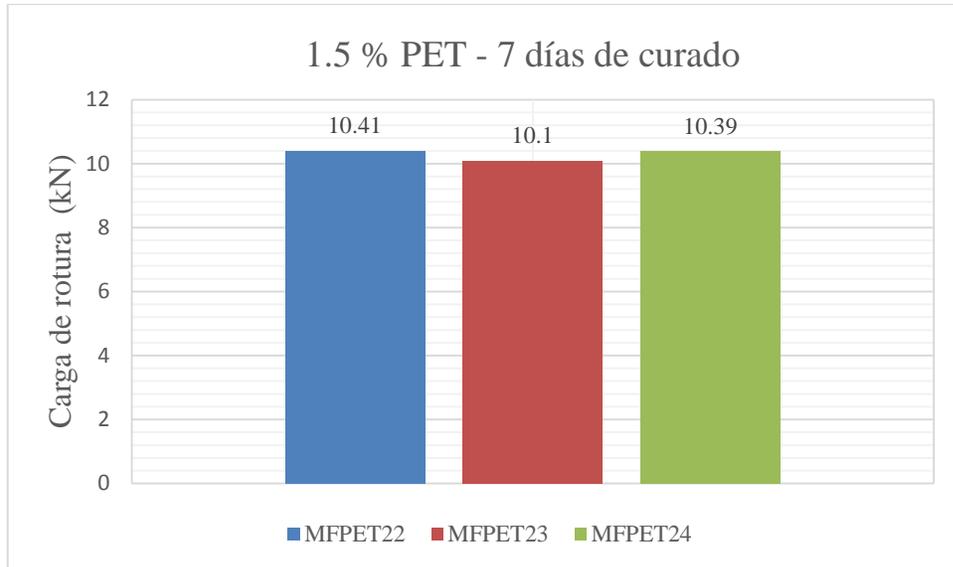
A 16: Diagramas de carga-deflexión para las probetas de concreto con adición de fibras de PET a las 3 edades de curado.

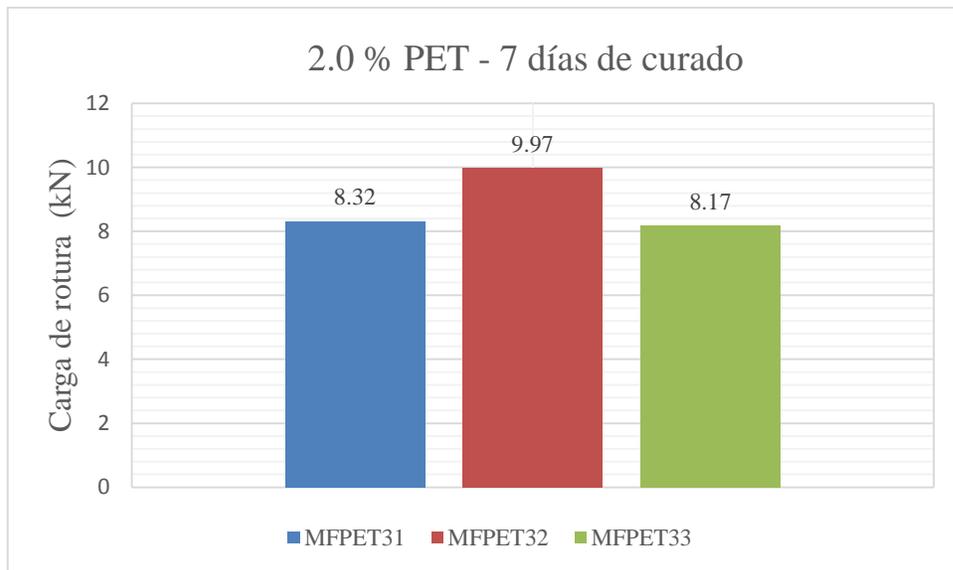
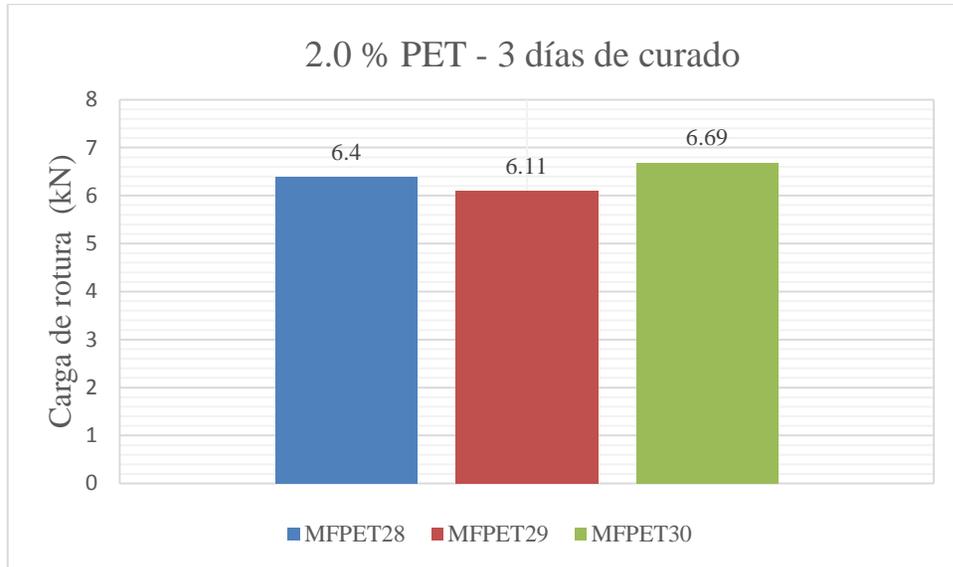


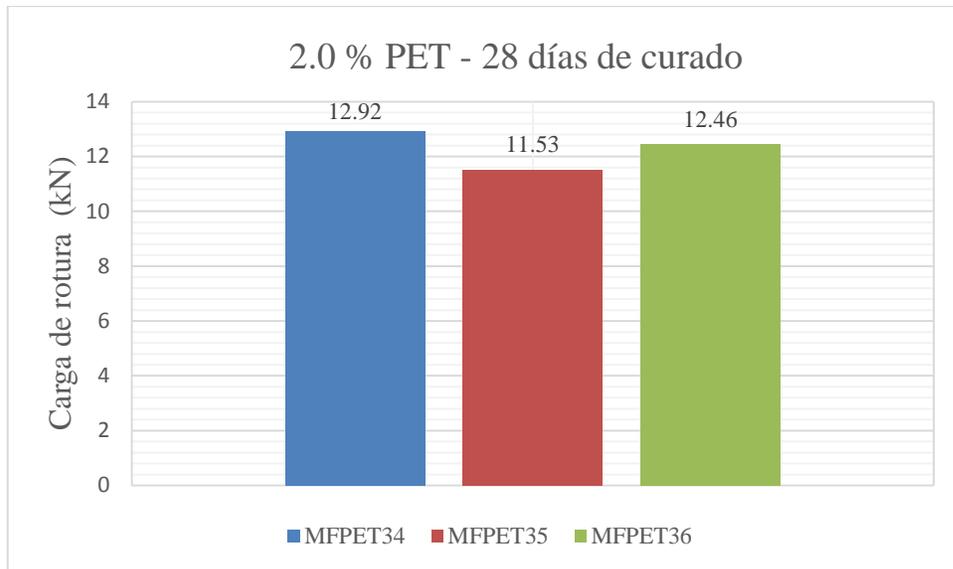




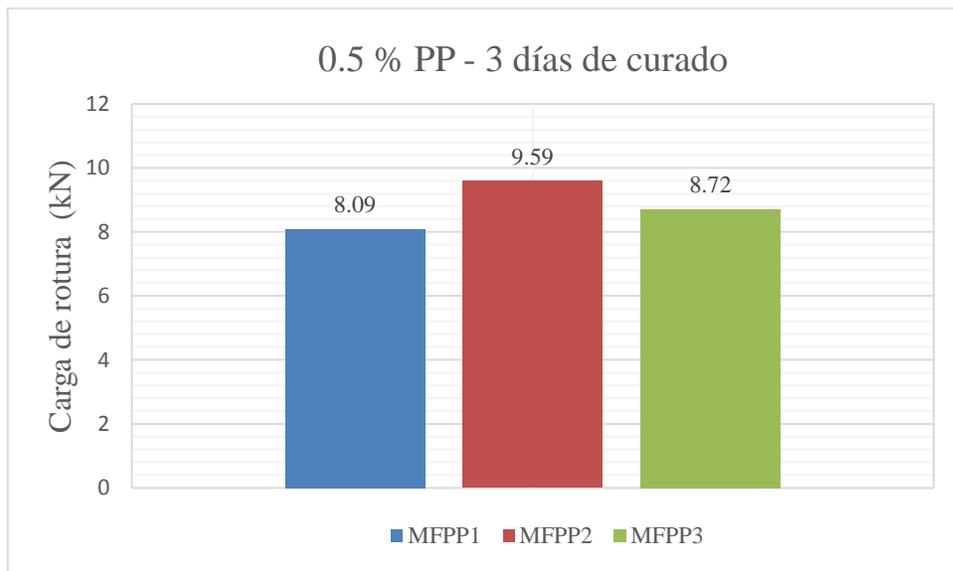


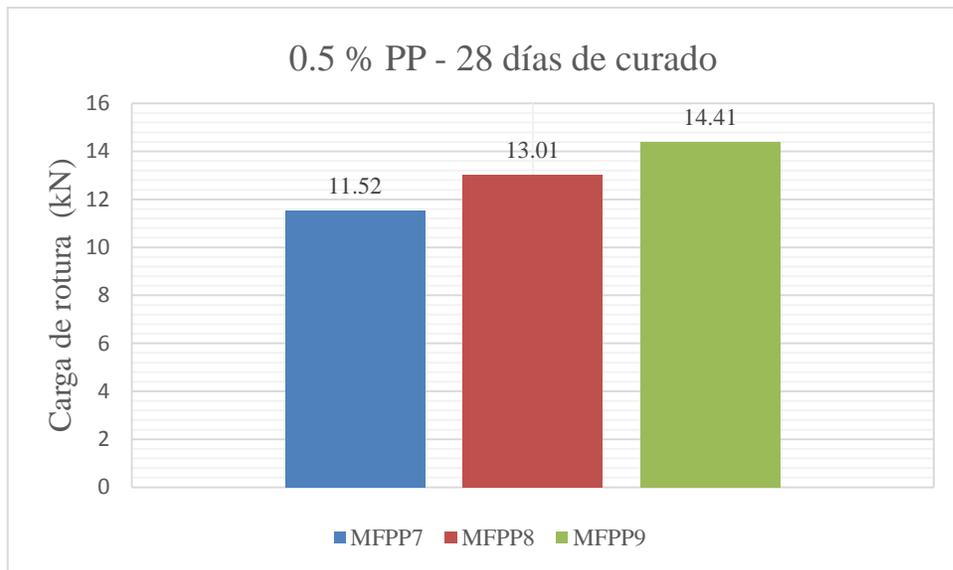
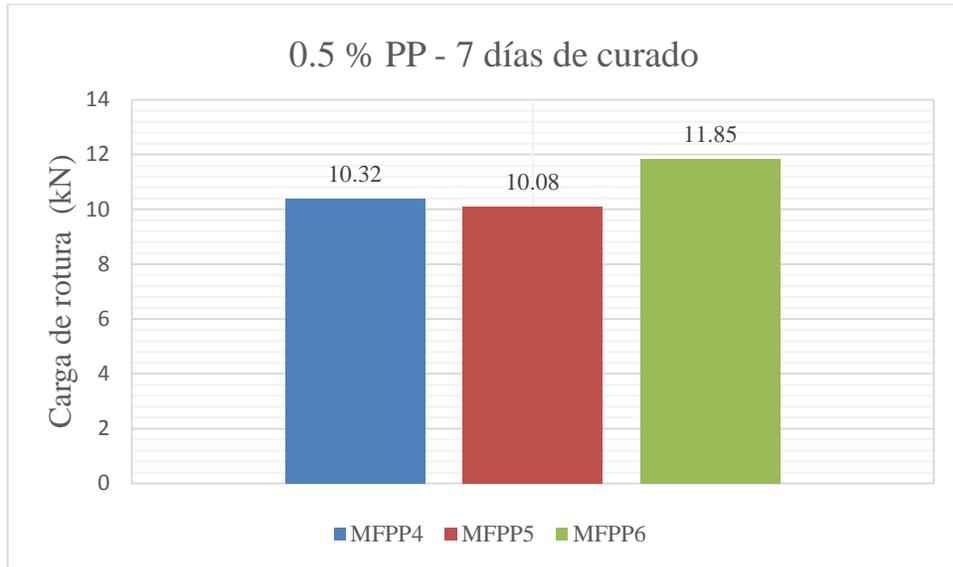


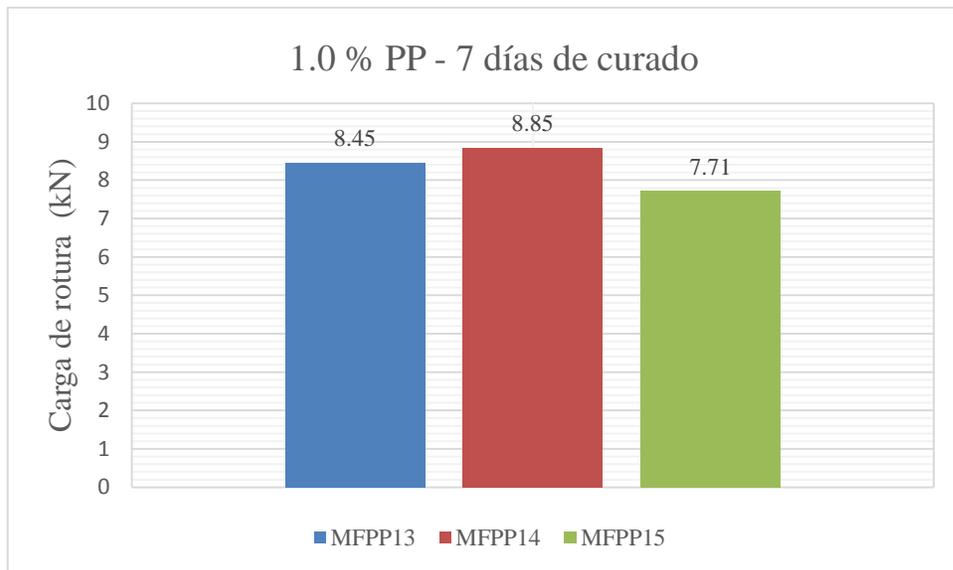
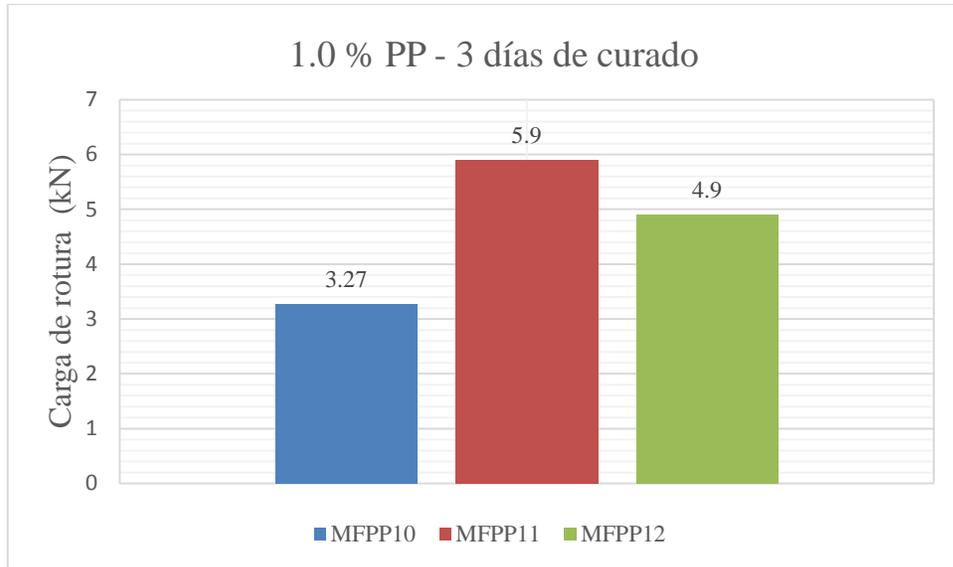


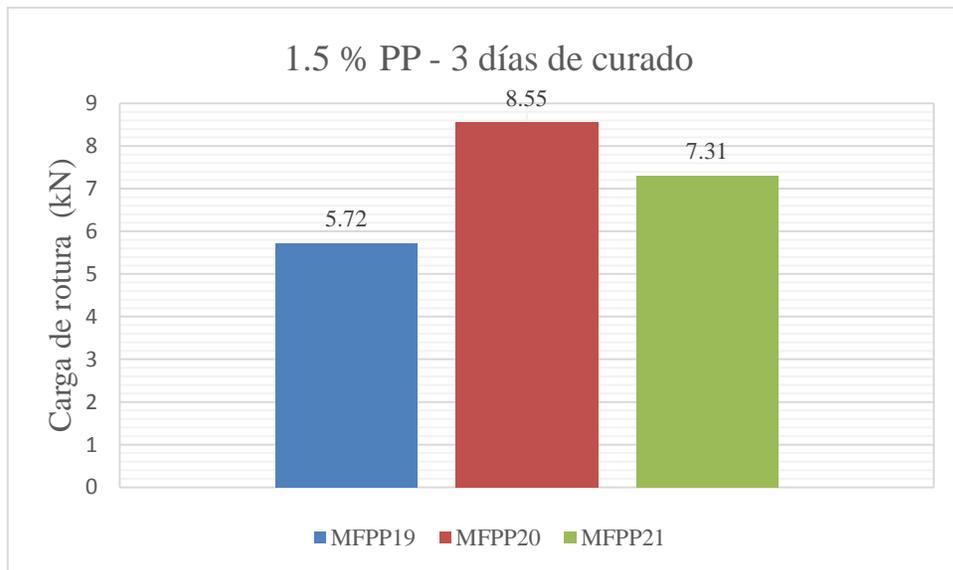
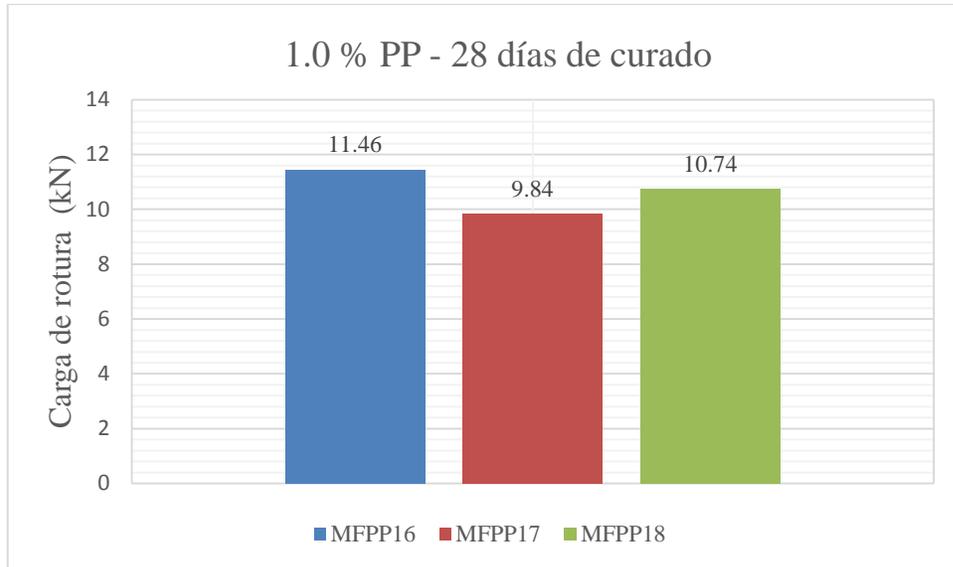


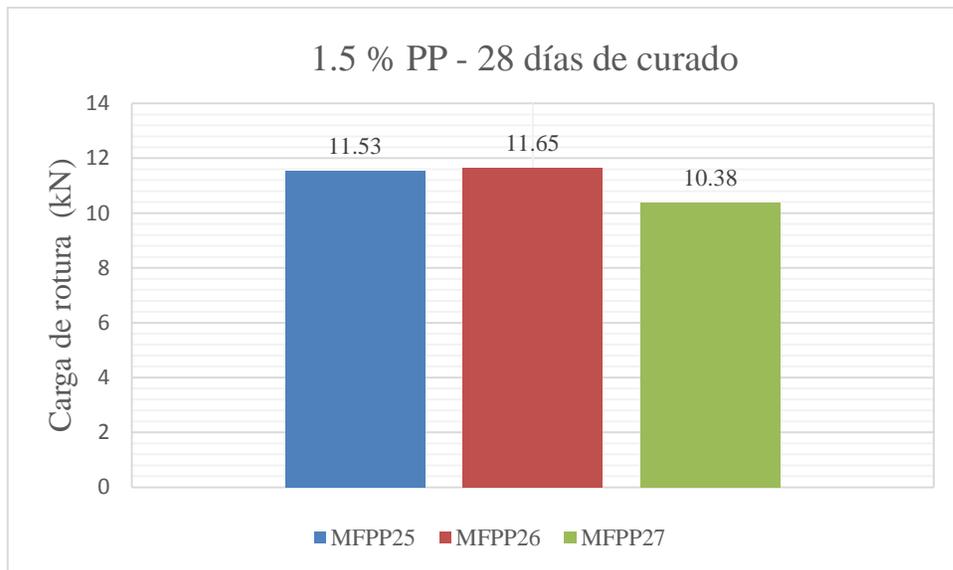
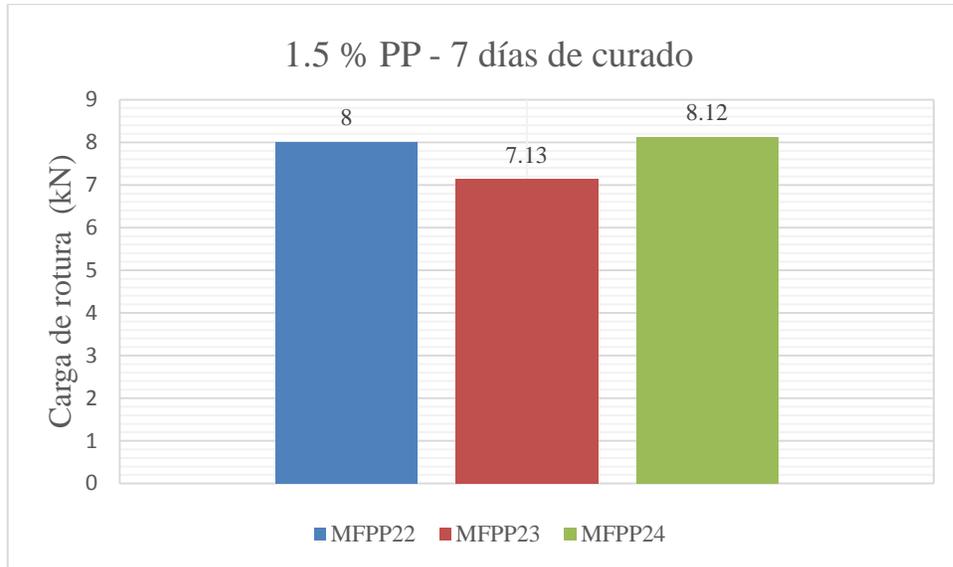
A 17: Diagramas de carga-deflexión para las probetas de concreto con adición de fibras de PP a las 3 edades de curado

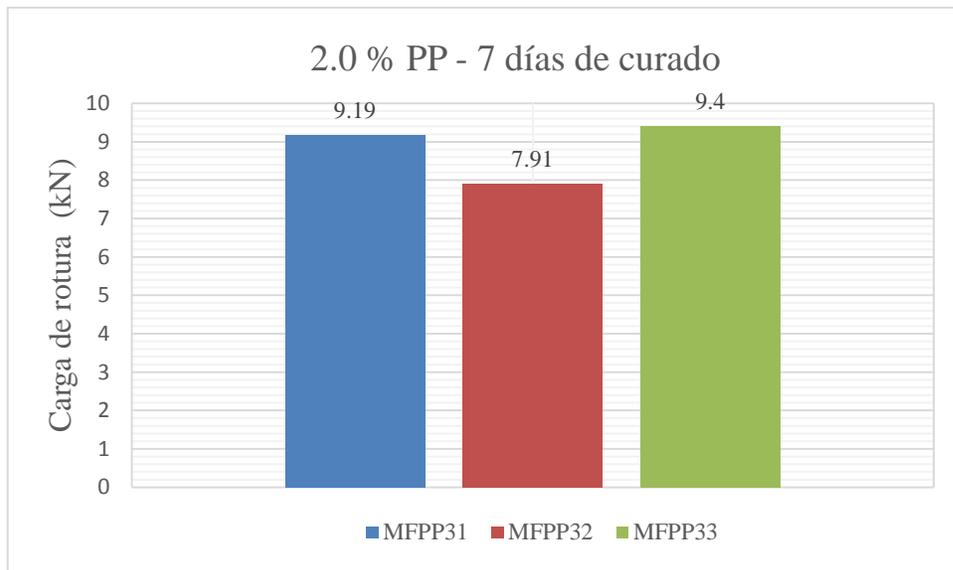
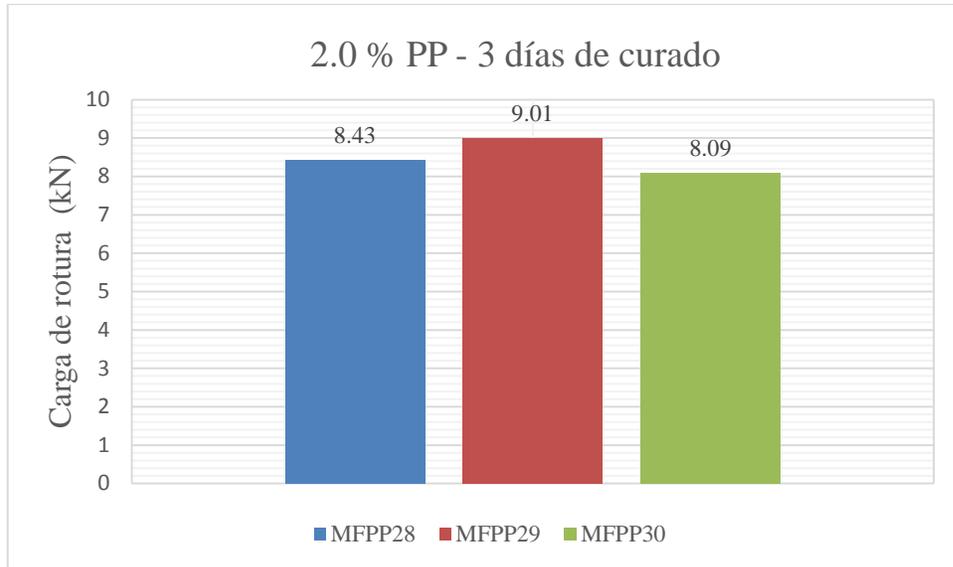


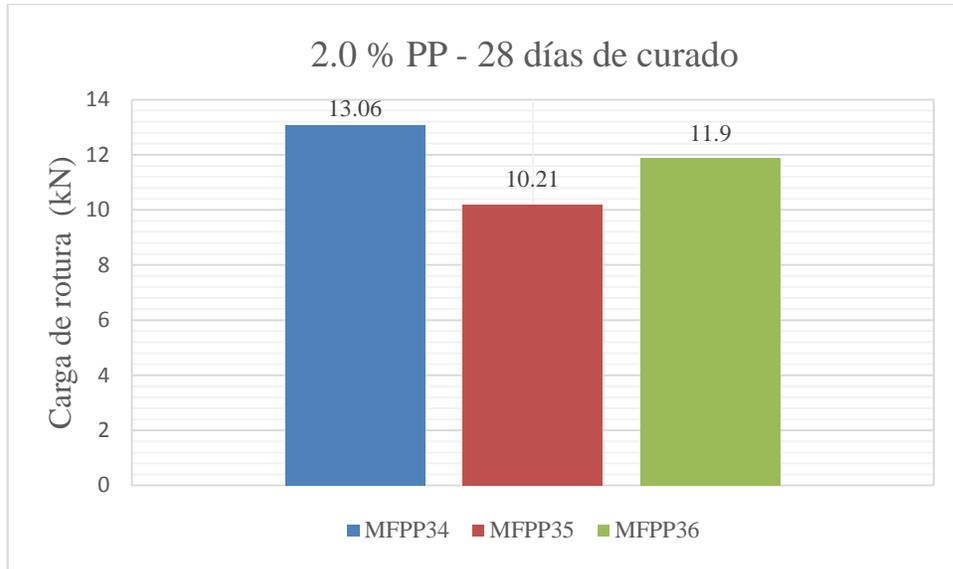












A 18: Parámetros mecánicos de las probetas sometidas a flexión a las 3 edades de curado.

Probeta	Material de la fibra	% en volumen de fibra	Edad de curado (días)	Deflexión máxima (mm)	Carga máxima (kN)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad en flexión (MPa)
TF1	CONTROL	0.0	3	3.70	13.41	2.02	70.52
TF2	CONTROL	0.0	3	1.98	11.35	1.71	111.04
TF3	CONTROL	0.0	3	3.75	11.62	1.76	60.17
TF4	CONTROL	0.0	7	3.64	11.73	1.77	62.60
TF5	CONTROL	0.0	7	2.70	12.25	1.85	88.03
TF6	CONTROL	0.0	7	3.18	12.73	1.92	77.71
TF7	CONTROL	0.0	28	4.20	14.32	2.16	66.23
TF8	CONTROL	0.0	28	4.65	15.25	2.30	63.67
TF9	CONTROL	0.0	28	4.65	13.60	2.05	56.74
MFPET1	PET	0.5	3	3.32	8.27	1.24	48.34
MFPET2	PET	0.5	3	2.76	8.76	1.32	61.62
MFPET3	PET	0.5	3	3.54	8.58	1.29	47.05
MFPET4	PET	0.5	7	3.25	9.59	1.44	57.15
MFPET5	PET	0.5	7	4.05	10.42	1.57	49.97
MFPET6	PET	0.5	7	3.90	8.60	1.29	42.77
MFPET7	PET	0.5	28	3.86	13.30	1.98	65.97
MFPET8	PET	0.5	28	3.18	12.33	1.86	75.20
MFPET9	PET	0.5	28	4.71	12.98	1.96	53.54
MFPET10	PET	1.0	3	2.28	7.59	1.14	64.57
MFPET11	PET	1.0	3	2.85	7.64	1.15	51.98
MFPET12	PET	1.0	3	2.94	9.99	1.51	66.00
MFPET13	PET	1.0	7	4.40	10.13	1.53	44.58
MFPET14	PET	1.0	7	3.27	8.83	1.33	52.36
MFPET15	PET	1.0	7	3.92	10.30	1.55	50.91
MFPET16	PET	1.0	28	4.20	11.87	1.79	54.82
MFPET17	PET	1.0	28	3.72	9.06	1.36	47.26

MFPET18	PET	1.0	28	3.03	11.57	1.74	74.12
MFPET19	PET	1.5	3	3.28	9.72	1.46	57.49
MFPET20	PET	1.5	3	3.00	9.03	1.36	58.39
MFPET21	PET	1.5	3	2.58	9.63	1.45	72.44
MFPET22	PET	1.5	7	3.22	10.41	1.57	62.72
MFPET23	PET	1.5	7	3.42	10.10	1.52	57.32
MFPET24	PET	1.5	7	4.35	10.39	1.57	46.37
MFPET25	PET	1.5	28	3.80	11.74	1.77	59.95
MFPET26	PET	1.5	28	4.20	13.09	1.97	60.47
MFPET27	PET	1.5	28	4.68	11.04	1.66	45.79
MFPET28	PET	2.0	3	3.30	6.40	0.96	37.60
MFPET29	PET	2.0	3	3.54	6.11	0.92	33.54
MFPET30	PET	2.0	3	4.32	6.69	1.01	30.08
MFPET31	PET	2.0	7	3.46	8.32	1.25	46.60
MFPET32	PET	2.0	7	3.69	9.97	1.50	52.43
MFPET33	PET	2.0	7	3.57	8.17	1.23	44.44
MFPET34	PET	2.0	28	3.09	12.92	1.95	81.25
MFPET35	PET	2.0	28	4.13	11.53	1.74	54.10
MFPET36	PET	2.0	28	4.20	12.46	1.88	57.51
MFPP1	PP	0.5	3	2.94	8.09	1.22	53.44
MFPP2	PP	0.5	3	3.36	9.59	1.44	55.38
MFPP3	PP	0.5	3	3.81	8.72	1.31	44.45
MFPP4	PP	0.5	7	3.75	10.38	1.56	53.72
MFPP5	PP	0.5	7	4.35	10.08	1.52	44.97
MFPP6	PP	0.5	7	4.14	11.85	1.79	55.58
MFPP7	PP	0.5	28	4.56	11.52	1.74	49.04
MFPP8	PP	0.5	28	4.11	13.01	1.96	61.50
MFPP9	PP	0.5	28	4.26	14.41	2.17	65.66
MFPP10	PP	1.0	3	0.78	3.27	0.49	81.36
MFPP11	PP	1.0	3	3.57	5.9	0.89	32.11
MFPP12	PP	1.0	3	3.51	4.90	0.74	27.11

MFPP13	PP	1.0	7	4.56	8.45	1.27	35.97
MFPP14	PP	1.0	7	4.32	8.85	1.33	39.71
MFPP15	PP	1.0	7	4.71	7.71	1.16	31.77
MFPP16	PP	1.0	28	4.20	11.46	1.73	52.97
MFPP17	PP	1.0	28	3.93	9.84	1.488	48.62
MFPP18	PP	1.0	28	4.68	10.74	1.62	44.55
MFPP19	PP	1.5	3	1.41	5.72	0.86	78.86
MFPP20	PP	1.5	3	3.78	8.55	1.29	43.89
MFPP21	PP	1.5	3	3.99	7.31	1.10	35.58
MFPP22	PP	1.5	7	3.60	8.00	1.21	43.14
MFPP23	PP	1.5	7	3.96	7.13	1.07	34.95
MFPP24	PP	1.5	7	3.84	8.12	1.22	41.02
MFPP25	PP	1.5	28	4.59	11.53	1.74	48.79
MFPP26	PP	1.5	28	4.83	11.65	1.76	46.81
MFPP27	PP	1.5	28	3.81	10.38	1.56	52.88
MFPP28	PP	2.0	3	4.02	8.43	1.27	40.70
MFPP29	PP	2.0	3	3.78	9.01	1.36	46.28
MFPP30	PP	2.0	3	3.36	8.09	1.22	46.74
MFPP31	PP	2.0	7	2.64	9.19	1.38	67.57
MFPP32	PP	2.0	7	4.14	7.91	1.19	37.10
MFPP33	PP	2.0	7	4.20	9.40	1.42	43.43
MFPP34	PP	2.0	28	4.14	13.06	1.97	61.25
MFPP35	PP	2.0	28	3.21	10.21	1.54	61.71
MFPP36	PP	2.0	28	4.05	11.90	1.79	57.05

A 19: Parámetros mecánicos promedios de las probetas de control sometidas a flexión a las 3 edades de curado.

Nomenclatura	Días de curado	Carga máxima (kN)	Deflexión máxima (mm)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
CONTROL	3	12.13 ± 1.11	3.14 ± 1.00	1.83 ± 0.17	80.57 ± 26.89
CONTROL	7	12.24 ± 0.50	3.17 ± 0.47	1.85 ± 0.08	76.11 ± 12.79
CONTROL	28	14.39 ± 0.83	4.50 ± 0.26	2.17 ± 0.12	62.22 ± 4.91

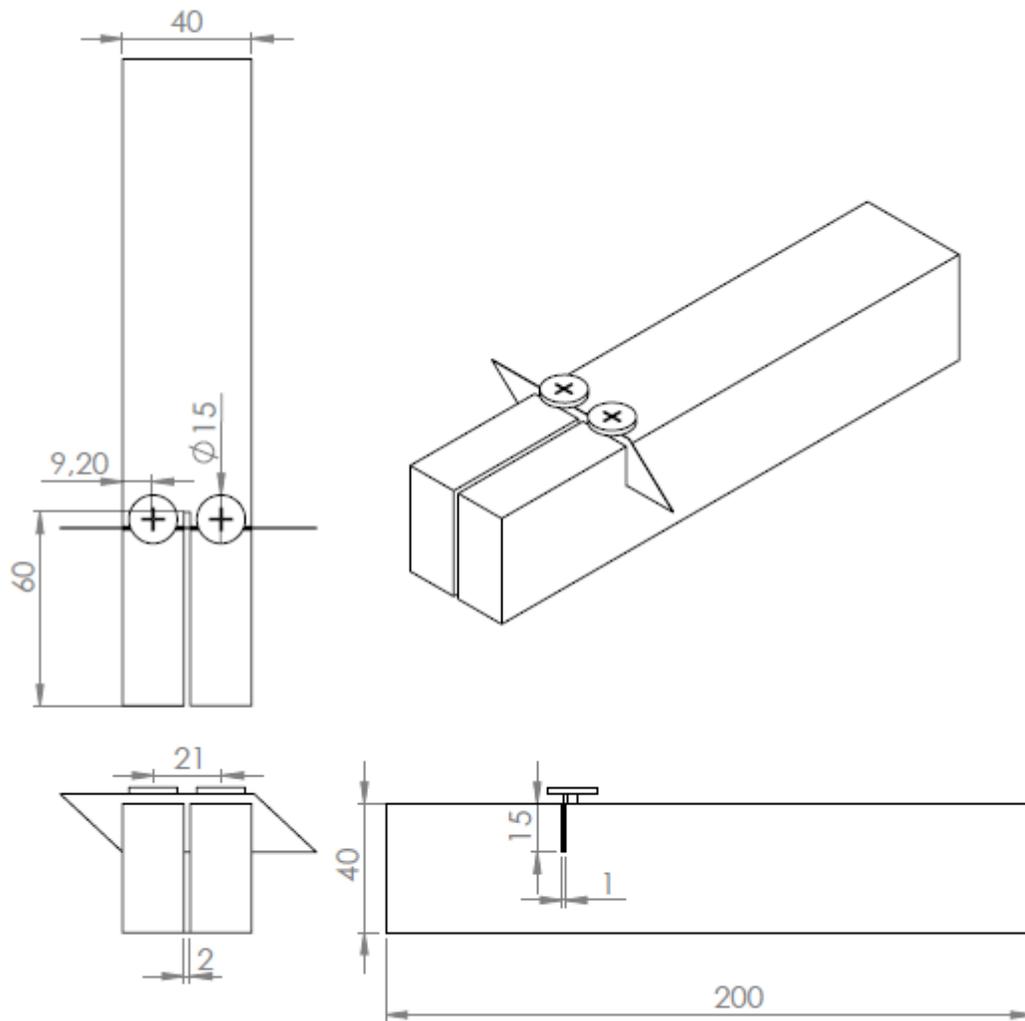
A 20: Parámetros mecánicos promedios de las probetas con adición de fibras de PET sometidas a flexión a las 3 edades de curado.

Nomenclatura	Días de curado	Carga máxima (kN)	Deflexión máxima (mm)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
MF-PET-0.5	3	8.54 ± 0.25	3.21 ± 0.40	1.30 ± 0.04	52.34 ± 8.06
MF-PET-0.5	7	9.54 ± 0.91	3.73 ± 0.42	1.44 ± 0.14	49.97 ± 7.19
MF-PET-0.5	28	12.81 ± 0.43	3.92 ± 0.76	1.94 ± 0.06	64.91 ± 10.87
MF-PET-1.0	3	8.41 ± 1.37	2.70 ± 0.36	1.27 ± 0.21	60.85 ± 7.61
MF-PET-1.0	7	9.75 ± 0.81	3.87 ± 0.57	1.47 ± 0.12	49.29 ± 4.14
MF-PET-1.0	28	10.84 ± 1.54	3.65 ± 0.59	1.64 ± 0.23	58.74 ± 13.85
MF-PET-1.5	3	9.46 ± 0.37	2.95 ± 0.35	1.43 ± 0.06	62.78 ± 8.35
MF-PET-1.5	7	10.30 ± 0.17	3.66 ± 0.60	1.56 ± 0.02	55.47 ± 8.33
MF-PET-1.5	28	11.96 ± 1.04	4.23 ± 0.44	1.81 ± 0.16	55.41 ± 8.32
MF-PET-2.0	3	6.40 ± 0.29	3.72 ± 0.53	0.97 ± 0.04	33.75 ± 3.76
MF-PET-2.0	7	8.82 ± 1.00	3.57 ± 0.11	1.33 ± 0.15	47.83 ± 4.13
MF-PET-2.0	28	12.31 ± 0.71	3.81 ± 0.63	1.86 ± 0.11	64.29 ± 14.79

A 21: Parámetros mecánicos promedios de las probetas con adición de fibras de PP sometidas a flexión a las 3 edades de curado.

Nomenclatura	Días de curado	Carga máxima (kN)	Deflexión máxima (mm)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
MF-PP-0.5	3	8.81 ± 0.75	3.37 ± 0.43	1.33 ± 0.11	51.10 ± 5.83
MF-PP-0.5	7	10.77 ± 0.95	4.08 ± 0.30	1.63 ± 0.14	51.43 ± 5.66
MF-PP-0.5	28	12.98 ± 1.44	4.31 ± 0.23	1.96 ± 0.22	58.74 ± 8.65
MF-PP-1.0	3	4.70 ± 1.33	2.62 ± 1.60	0.71 ± 0.20	46.86 ± 29.98
MF-PP-1.0	7	8.34 ± 0.58	4.53 ± 0.19	1.26 ± 0.09	35.82 ± 3.97
MF-PP-1.0	28	10.69 ± 0.81	4.27 ± 0.38	1.61 ± 0.12	48.72 ± 4.21
MF-PP-1.5	3	7.20 ± 1.41	3.06 ± 1.43	1.09 ± 0.21	52.78 ± 22.97
MF-PP-1.5	7	7.75 ± 0.54	3.80 ± 0.18	1.17 ± 0.08	39.71 ± 4.25
MF-PP-1.5	28	11.19 ± 0.70	4.41 ± 0.53	1.69 ± 0.10	49.50 ± 3.09
MF-PP-2.0	3	8.51 ± 0.47	3.72 ± 0.33	1.29 ± 0.07	44.58 ± 3.36
MF-PP-2.0	7	8.84 ± 0.81	3.66 ± 0.88	1.33 ± 0.12	49.37 ± 16.08
MF-PP-2.0	28	11.73 ± 1.43	3.80 ± 0.51	1.77 ± 0.22	60.01 ± 2.57

A 22: Plano de herramienta de corte de fabricación propia.



Medidas en mm