

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CONCRETO HIDRÁULICO REFORZADO
CON FIBRAS PET RECICLADAS Y SU IMPLEMENTACIÓN EN LA
CONSTRUCCIÓN DE LOSAS DE PAVIMENTO RÍGIDO**

**ING. GLORIA MONGUA LUCERO
ING. VÍCTOR HUGO SUAREZ LÓPEZ**



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ D.C.
NOVIEMBRE DE 2022**

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CONCRETO HIDRÁULICO REFORZADO CON
FIBRAS PET RECICLADAS Y SU IMPLEMENTACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE
LOSAS DE PAVIMENTO RÍGIDO**

**ING. GLORIA MONGUA LUCERO
ING. VÍCTOR HUGO SUAREZ LÓPEZ**

Trabajo final de grado para optar al título de Maestría en Infraestructura vial

Director:

Ing. JUAN MANUEL SALGADO DÍAZ, Msc.

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ D.C.
NOVIEMBRE DE 2022**

Bogotá D.C., noviembre de 2022

Nota de aceptación:

Aprobado por el comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Santo Tomas para optar al Título de Maestría en Infraestructura Vial.

Jurado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

Al Todopoderoso; a mis padres que me han dado la existencia; y con ella la capacidad de superación y desear lo mejor en cada paso por este camino difícil y arduo de la vida.

Gracias por ser como son, porque su presencia y persona han ayudado a construir y forjar el ser humano que ahora soy.

A mis hijas que son la razón de ser de mi existencia, y que han sabido comprender el trabajo de la mamá, teniendo paciencia y alentando a seguir adelante. A mi esposo que con su alegría e inteligencia unida a la paciencia y entrega estuvo apoyándome en cada decisión que tomara y hoy está conmigo compartiendo este nuevo logro.

A mis maestros y amigos; que en el andar por la vida nos hemos ido encontrando; porque cada uno de ustedes ha motivado mis sueños y esperanzas en consolidar un mundo más humano y con justicia; en especial a la Dra. Adriana Del Pilar Soacha Ortega (QEPD) que con sus consejos me exhortó a terminar este proyecto. Gracias a todos los que han recorrido a mi lado este camino, porque me han enseñado a ser más humana.

Gloria

DEDICATORIA

En honor a mi madre (QEPD), por todo su amor, esfuerzo y apoyo para lograr ser lo que soy como persona y particularmente por este logro.

Víctor Hugo.

AGRADECIMIENTOS

Ante todo, gracias a Dios, por permitirnos soñar y cumplir nuestros sueños, metas. cómo esté importante logro que es la maestría.

A los profesores de la Universidad Santo Tomas, que con sus conocimientos y dedicación nos ayudan a formar no solo como profesionales sino como personas, gracias por ejercer y engrandecer la noble disciplina de la docencia.

Gracias especialmente a la recordada exdirectora de la Maestría, Dra. Adriana Del Pilar Soacha Ortega (QEPD), al Doctor Wilson Arias, actual director de la maestría, y al Ingeniero Juan Manuel Salgado.

A nuestros familiares, amigos y compañeros de estudios de la maestría, que siempre nos apoyaron y alentaron para estudiar y culminar esta gran meta.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1 GENERALIDADES	16
1.1 TITULO	16
1.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN A LA QUE APLICA.....	16
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
3 JUSTIFICACIÓN.....	18
4 OBJETIVOS.	20
4.1 OBJETIVO GENERAL	20
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
5 ESTADO DEL ARTE.	21
5.1 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CONCRETO	21
5.2 USO DE FIBRAS EN CONCRETO	22
5.3 USO DE FIBRAS POLIMÉRICAS	23
5.4 USO DE FIBRAS PET RECICLADAS EN CONCRETO	24
5.5 USO DE FIBRAS PET EN CONCRETO PARA PAVIMENTO RÍGIDO.....	26
6 MARCO REFERENCIAL	28
6.1 MARCO CONCEPTUAL	28
6.2 MARCO TEÓRICO	29
6.2.1 Tereftalato de polietileno (PET)	29
6.2.2 Refuerzo de fibras para concreto	30
6.2.3 Concreto	31
6.2.4 Resistencia a la compresión	32
6.2.5 Módulo de rotura.....	33

6.2.6	Módulo de elasticidad	33
6.2.7	Pavimentos en concreto rígido.....	33
7	METODOLOGÍA.....	35
7.1	OBJETIVO ESPECÍFICO NO 1	35
7.2	OBJETIVO ESPECÍFICO NO 2	36
7.3	OBJETIVO ESPECÍFICO NO 3	37
7.4	OBJETIVO ESPECÍFICO NO 4	38
8	CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS PET RECICLADAS.....	40
8.1	PROPIEDADES FÍSICAS	40
8.2	PROPIEDADES MECÁNICAS	41
8.3	OTRAS PROPIEDADES	42
9	CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS Y DISEÑO DE MEZCLA.....	43
9.1	CEMENTO	43
9.1.1	Densidad	43
9.1.2	Finura del cemento	44
9.1.3	Consistencia normal	44
9.1.4	Tiempos de fraguado	45
9.2	AGREGADO FINO	46
9.2.1	Humedad Natural.....	46
9.2.2	Densidad y absorción	47
9.2.3	Peso unitario suelto y compacto	48
9.2.4	Granulometría.....	49
9.3	AGREGADO GRUESO	50
9.3.1	Humedad natural	50
9.3.2	Densidad y absorción	51
9.3.3	Peso unitario suelto y compacto	52
9.3.4	Granulometría.....	53
10	FABRICACIÓN DE MUESTRAS	55
10.1	DISEÑO DE MEZCLA.....	55
10.1.1	Elección del asentamiento (slump) de la mezcla.....	55

10.1.2	Elección del TMN del agregado grueso y MF del agregado fino	56
10.1.3	Determinación del contenido de aire y cantidad de agua de la mezcla	56
10.1.4	Elección de la relación agua – cemento (a/c).....	57
10.1.5	Cálculo del contenido de cemento	58
10.1.6	Estimación del contenido de agregado grueso y fino	58
10.1.7	Diseño de mezcla de control.....	59
10.1.8	Ajuste por uso de plastificante	59
10.1.9	Modificación del diseño con refuerzo de fibra	60
10.1.10	Proporciones de mezcla.....	61
10.2	FUNDIDA DE MUESTRAS	61
10.2.1	Mezcla de materias primas	62
10.2.2	Fabricación de las muestras	64
10.2.3	Desmolde y curado de muestras.....	65
10.2.4	Muestras para ensayo de resistencia.....	66
11	CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO	67
11.1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	67
11.2	MÓDULO DE ROTURA (MR)	70
11.3	MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	73
12	DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO DE LOSAS DE PAVIMENTO RÍGIDO POR “MEF”	74
12.1	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO	74
12.1.1	Definición del tipo de vía.....	74
12.1.2	Tránsito y periodo de Diseño	75
12.1.3	Cálculo de la Subrasante	75
12.1.4	Material de Soporte para el pavimento.....	76
12.1.5	Características de concreto para pavimentos	76
12.1.6	Juntas.....	76
12.1.7	Transferencia de cargas entre losas	77
12.1.8	Espesor de losa de concreto de acuerdo con la combinación de variables.....	77
12.1.9	Estructura de pavimento	78
12.2	DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO POR “MEF”	79
12.2.1	Creación de los materiales.....	80

12.2.2	Geometría de la losa.....	81
12.2.3	Generación de los apoyos	83
12.2.4	Cargas sobre la losa.....	85
12.2.5	Análisis de la losa	86
12.3	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA	88
12.3.1	Muestra de CONTROL	88
12.3.2	Muestra PET1.....	93
12.3.3	Muestra PET2.....	98
12.3.4	Muestra PET3.....	103
12.3.5	Resumen de resultados	108
13	RESULTADOS.....	109
13.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS	109
13.1.1	Resistencia a la compresión	109
13.1.2	Resistencia a flexión	111
13.1.3	Módulo de elasticidad	113
13.1.4	Deflexiones en la losa.....	115
13.1.5	Esfuerzo de tensión en la losa	116
13.1.6	Momento flector en la losa	117
13.1.7	Esfuerzos de compresión en la base granular	118
13.2	IMPACTOS SOCIALES.	118
13.3	IMPACTOS AMBIENTALES.	119
14	CONCLUSIONES.....	121
15	RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES.	123
16	BIBLIOGRAFÍA	124
	ANEXO 1 – RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO	129

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curva esfuerzo deformación del concreto.....	22
Figura 2. Ensayo de caracterización mecánica de las fibras.....	41
Figura 3. Ensayo de tiempo de fraguado en cemento.....	45
Figura 4. Curva granulométrica de la arena.....	50
Figura 5. Curva granulométrica de la grava.....	54
Figura 6. Contenido de aire y cantidad de agua de la mezcla.....	56
Figura 7. Mezcla de agregados.....	62
Figura 8. Mezcla de concreto en estado fresco.....	63
Figura 9. Moldes para fabricación de muestras.....	63
Figura 10. Fabricación de viguetas de concreto.....	64
Figura 11. Fabricación de cilindros de concreto.....	64
Figura 12. Desmolde de muestras.....	65
Figura 13. Curado de muestras.....	65
Figura 14. Muestras cilíndricas para ensayo.....	66
Figura 15. Viguetas para ensayo.....	66
Figura 16. Ensayo de resistencia a la compresión a 7 días.....	67
Figura 17. Ensayo de resistencia a la compresión a 28 días.....	68
Figura 18. Ensayo de módulo de rotura (MR) en viguetas de concreto.....	70
Figura 19. Falla de viguetas de concreto a flexión.....	71
Figura 20. Ensayo de módulo de elasticidad del concreto.....	73
Figura 21. Asignación de propiedades materiales en modelo.....	81
Figura 22. Definición de la geometría de la losa.....	82
Figura 23. Geometría de la losa en 3D.....	83
Figura 24. Generación de módulo de reacción en el modelo.....	84
Figura 25. Asignación de módulo de reacción en la losa.....	85

Figura 26. Tránsito de ejes de carga sobre la losa	86
Figura 27. Deflexiones de la losa de CONTROL.....	89
Figura 28. Valores de esfuerzos de tensión en la losa de CONTROL	90
Figura 29. Valores de momento en la losa de CONTROL	91
Figura 30. Valores de esfuerzo sobre la base en la losa de CONTROL	92
Figura 31. Deflexiones de la losa PET1	94
Figura 32. Valores de esfuerzo de tensión en la losa PET1.....	95
Figura 33. Valores de momento en la losa PET1	96
Figura 34. Valores de esfuerzo sobre la base en la losa PET1.....	97
Figura 35. Deflexiones de la losa PET2	99
Figura 36. Valores de esfuerzo de tensión en la losa PET2.....	100
Figura 37. Valores de momento en la losa PET2	101
Figura 38. Valores de esfuerzo sobre la base en la losa PET2.....	102
Figura 39. Deflexiones de la losa de PET3	104
Figura 40. Valores de esfuerzo de tensión en la losa PET3.....	105
Figura 41. Valores de momento en la losa PET3	106
Figura 42. Valores de esfuerzo sobre la base en la losa PET3.....	107
Figura 43. Resistencia a compresión vs edad.....	109
Figura 44. Resistencia a compresión vs contenido de fibra	110
Figura 45. Resistencia a flexión (MR) vs edad.....	112
Figura 46. Resistencia a flexión (MR) vs contenido de fibras.....	113
Figura 47. Módulo de elasticidad (E) vs contenido de fibras	114
Figura 48. Deflexiones (deformaciones) de la losa vs contenido de fibras	115
Figura 49. Esfuerzos de tensión (cortante) en la losa vs contenido de fibras	116
Figura 50. Momentos en la losa vs contenido de fibras	117
Figura 51. Esfuerzos de compresión en la base vs contenido de fibras	118

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características físicas de las fibras PET	40
Tabla 2. Características mecánicas de las fibras PET	42
Tabla 3. Otras propiedades de las fibras PET	42
Tabla 4. Densidad del cemento.....	43
Tabla 5. Finura del cemento por aparato de Blaine	44
Tabla 6. Consistencia normal del Cemento.....	44
Tabla 7. Tiempos de fraguado del cemento	46
Tabla 8. Humedad natural de la arena	46
Tabla 9. Datos de ensayo de densidad y absorción.....	47
Tabla 10. Densidad y absorción del agregado fino	48
Tabla 11. Pesos unitarios sueltos y compactos de la arena.....	48
Tabla 12. Resultados obtenidos del análisis granulométrico de la arena.....	49
Tabla 13. Humedad natural de la grava	51
Tabla 14. Datos de ensayo de densidad y absorción en grava.....	51
Tabla 15. Densidad y absorción del agregado grueso	52
Tabla 16. Pesos unitarios sueltos y compactos de la grava.....	52
Tabla 17. Resultados obtenidos del análisis granulométrico de la grava.....	53
Tabla 18. Elección del asentamiento (slump).....	55
Tabla 19. Elección de la relación a/c.....	57
Tabla 20. Proporciones de agregado fino y grueso.....	58
Tabla 21. Diseño de mezcla de control	59
Tabla 22. Diseño de mezcla de concreto	61
Tabla 23. Total, de muestras fabricadas	62
Tabla 24. Resultado ensayo resistencia a compresión para mezcla de CONTROL	68

Tabla 25. Resultado ensayo de resistencia a compresión para mezcla PET1.....	69
Tabla 26. Resultado ensayo de resistencia a compresión para mezcla PET2.....	69
Tabla 27. Resultado ensayo de resistencia a compresión para mezcla PET3.....	70
Tabla 28. Resultados ensayos de módulo de rotura (MR) en muestras de CONTROL ..	71
Tabla 29. Resultados ensayos de módulo de rotura (MR) en muestras PET1.....	72
Tabla 30. Resultados ensayos de módulo de rotura (MR) en muestras PET2.....	72
Tabla 31. Resultados ensayos de módulo de rotura (MR) en muestras PET3.....	73
Tabla 32. Resultados de ensayo de módulo de elasticidad (E).....	74
Tabla 33. Determinación de Tránsito y periodo de Diseño.....	75
Tabla 34. Calculo Subrasante	75
Tabla 35. Determinación material de Soporte	76
Tabla 36 Definición de características del concreto	76
Tabla 37 Transferencia de cargas entre losas	77
Tabla 38 Determinación del espesor de la losa	78
Tabla 39 Datos finales de la estructura de pavimento.....	78
Tabla 40. Datos de entrada para diseño de estructura de pavimento	79
Tabla 41. Casos de carga sobre la losa.....	87
Tabla 42. Combinaciones de carga sobre la losa de pavimento	88
Tabla 43. Datos para modelo de pavimento de control	89
Tabla 44. Datos para modelo de pavimento PET1.....	93
Tabla 45. Datos para modelo de pavimento PET2.....	98
Tabla 46. Datos para modelo de pavimento PET3.....	103
Tabla 47. Resumen de resultado de los modelos	108

INTRODUCCIÓN

El concreto es el material de construcción más utilizado a nivel mundial, debido a su versatilidad, resistencia y economía. Sin embargo, debido a que es un material cerámico, su resistencia a tracción es baja en comparación con su resistencia a la compresión. Por tal motivo, se suele reforzar el concreto para mejorar sus propiedades. Dicho refuerzo puede ser de dos tipos, como barras de acero de refuerzo o en forma de fibras (AIS, 2010).

En ese orden de ideas, en las últimas décadas las fibras (macrofibras y microfibras) se han vuelto sumamente populares en la industria de la construcción, principalmente por los beneficios que representa en el comportamiento de las estructuras de concreto, entre los que destacan el aumento de la resistencia a tracción y flexión, el control de fisuración, el aumento de la resistencia al impacto, y el aumento de la tenacidad. Así mismo, se destacan por su buena relación costo – beneficio.

Por otro lado, el tereftalato de polietileno, mejor conocido como PET (por sus siglas en inglés polyethylene terephthalate), el cual es un material polimérico termoplástico altamente utilizado en la industria, se ha convertido en una de las principales fuentes de contaminación a nivel mundial. Por tal motivo, en los últimos años, las investigaciones para encontrar formas de reutilizar el PET se han vuelto sumamente importantes.

En ese orden de ideas, en la presente investigación se determinó la influencia de fibras PET recicladas en algunas propiedades mecánicas del concreto hidráulico, y se evaluó su implementación en la construcción de losas de pavimento rígido. De acuerdo con los resultados obtenidos, se determinó que se pueden desarrollar aplicaciones prácticas que permitan usar el PET en los materiales de construcción de infraestructura vial.

1 GENERALIDADES

1.1 TITULO

Comportamiento mecánico del concreto hidráulico reforzado con fibras PET recicladas y su implementación en la construcción de losas de pavimento rígido.

1.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN A LA QUE APLICA

Investigación aplicada. Caracterización y Comportamiento de Materiales en Ingeniería Civil.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la actualidad, el concreto es el material de construcción más utilizado a nivel mundial, debido a sus múltiples ventajas de resistencia a la compresión, costo, durabilidad y facilidad en la construcción. Sin embargo, dicho material no es capaz de soportar grandes esfuerzos de tracción debido a su naturaleza cerámica (Monteiro & Mehta, 2014).

Para mitigar esta característica, el concreto generalmente se refuerza para que pueda soportar mayores esfuerzos de tracción. Dicho refuerzo puede ser de dos tipos, en forma de barras (como se utiliza en la construcción de estructuras), o en forma de fibras (para la construcción de losas, tableros, pisos y pavimentos).

Por otro lado, el tereftalato de polietileno, mejor conocido como PET (por sus siglas en inglés polyethylene terephthalate), es un material polimérico termoplástico ampliamente utilizado en la industria de los envases y los textiles, el cual es muy utilizado debido a sus propiedades. Sin embargo, debido a que no es biodegradable, en la actualidad se ha convertido en una de las principales fuentes de contaminación, por lo cual es necesario desarrollar aplicaciones que permitan reutilizar este tipo de material (Gomes, Visconte, & Pacheco, 2019).

De esta necesidad, en los últimos años surgió la posibilidad de transformar los residuos PET en fibras para diferentes aplicaciones. En ese orden de ideas, la pregunta de investigación de la presente investigación es:

¿Cuál es la influencia de las fibras PET recicladas en las propiedades mecánicas del concreto hidráulico y como se pueden implementar en la construcción de losas de pavimento rígido?

3 JUSTIFICACIÓN.

De acuerdo con la normativa ASTM C-125, el concreto se define como un material compuesto que consiste en un aglomerante en el cual se encuentran inmersas partículas de agregado (fino y grueso); para tal fin, se utiliza un cemento hidráulico, agua, grava y arena (ASTM, 2013). Dicho material se ha convertido en el material de construcción más utilizado, y el segundo material más utilizado a nivel mundial, debido principalmente a su economía, versatilidad, resistencia y durabilidad (Bostanci, Limbachiya, & Kew, 2018). No obstante, la industria y los requerimientos tecnológicos han generado la necesidad de modificar las propiedades del concreto tales como resistencia, dureza, ductilidad, durabilidad, manejabilidad, entre otras (Iker Bekir Topçu, 1997). Debido a esto, en los últimos años se ha popularizado la implementación de diferentes tipos de complementos en la mezcla de concreto, tales como: adiciones minerales, aditivos, fibras, entre otros, los cuales permiten modificar una o varias propiedades del material.

En el caso de las fibras, estas han sido utilizadas desde hace mucho tiempo en la industria de la construcción, como por ejemplo en la tapia pisada, el adobe, y otros, y su principal función ha sido como refuerzo para ayudar a soportar esfuerzos de tracción. En el caso del concreto, las fibras se clasifican de acuerdo con el material como: (a) Metálicas, (b) Sintéticas y (c) Fibras Naturales (Sika Colombia, 2014). Así mismo, se pueden clasificar de acuerdo con su funcionalidad en: (a) Microfibras, las cuales son utilizadas para evitar la fisuración en estado fresco o antes de las 24 horas; y (b) Macrofibras, las cuales son utilizadas para prevenir la fisuración en estado endurecido, reducir el ancho de la fisura cuando se presente y a permitir el adecuado funcionamiento de la estructura fisurada. Estas son usadas principalmente para aumentar la tenacidad y algunos tipos de resistencia del material (Figueiredo, 2000).

Por otro lado, se tiene el tereftalato de polietileno, mejor conocido como PET (por sus siglas en inglés polyethylene terephthalate), el cual es un material polimérico termoplástico altamente utilizado en la industria de los envases y los textiles. Dicho

material se destaca por su alta resistencia mecánica, buena resistencia al desgaste y la abrasión, su buena resistencia química y su bio-compatibilidad, lo cual ha generado su uso intensivo como envase de comida a nivel mundial.

Sin embargo, debido a su naturaleza, el PET es un material altamente resistente a la biodegradación, lo cual lo convierte en una de las principales fuentes de contaminación a nivel mundial (Blettler, 2017). Por tal motivo, muchas investigaciones en las últimas décadas se han concentrado en la búsqueda de métodos para reciclar y/o reutilizar el PET, y de esta forma reducir el impacto ambiental generado por su uso. Teniendo en cuenta lo anterior, el uso de PET reciclado en los materiales de construcción se ha convertido en una alternativa de suma importancia, para reducir el impacto ambiental de dicho material.

4 OBJETIVOS.

4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia de fibras PET recicladas en las propiedades mecánicas del concreto hidráulico para su implementación en la construcción de losas de pavimento rígido.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de fibras recicladas de tereftalato de polietileno (PET) empleadas para la fabricación de muestras de concreto hidráulico.
- Elaborar muestras de concreto hidráulico con adición de diferentes proporciones de fibras PET recicladas.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de muestras de concreto con adición de fibras PET recicladas.
- Evaluar el comportamiento del concreto reforzado con fibras PET en losas de pavimento rígido, mediante una modelación con un programa de elementos finitos.

5 ESTADO DEL ARTE.

El uso de fibras en los materiales de construcción se remonta a varios siglos antes de la aparición del cemento Portland y el concreto hidráulico tal y como lo conocemos en la actualidad; su uso en bareque y tapias para modificar la resistencia a tracción fue una técnica común durante los siglos XVI y XVII (Antillón, 2016).

Sin embargo, durante las últimas 5 décadas, el uso de fibras (micro y macro) para modificar el comportamiento de algunas propiedades del concreto ha sido ampliamente estudiado (Antillón, 2016). Esto se ha acentuado en los últimos años, en especial con la aparición de los concretos de alto desempeño, los cuales requieren grandes especificaciones en cuanto a resistencias y durabilidad.

En esta sección se hace referencia a algunas de las recientes innovaciones del uso de fibras en concreto, haciendo especial énfasis en el uso de fibras poliméricas, así como acerca de su implementación en construcción losas de pavimento rígido.

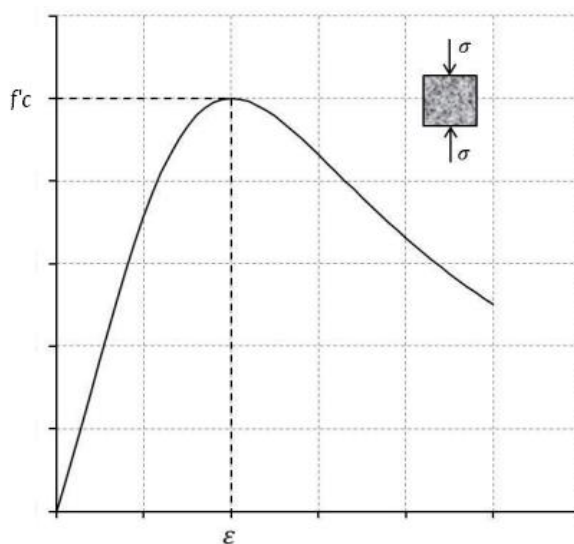
5.1 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CONCRETO

El concreto es un material compuesto el cual se compone de una matriz de agregados (finos y gruesos), unidos mediante una pasta de cemento que surge de la reacción de cemento hidráulico con agua, y que sirve como material conglomerante. La naturaleza del concreto hace que su comportamiento mecánico sea complejo, principalmente debido a que depende de muchos factores tales como (Segura Franco, 2011):

- Relación agua – material cementante,
- Volumen de agregado
- Tamaño y forma del agregado
- Tipo de cemento hidráulico.

A continuación, se presenta la curva esfuerzo – deformación (figura1) para caracterizar el comportamiento del concreto a compresión:

Figura 1. Curva esfuerzo deformación del concreto



Fuente: Adaptado de: (Rodríguez, 2011)

En cuanto al comportamiento mecánico del material, el concreto es un material de naturaleza frágil, el cual es muy competente para soportar esfuerzos de compresión, pero se ve afectado por los esfuerzos de tensión. Estos esfuerzos de tensión producen microfisuras en el material, lo cual a su vez afecta la resistencia, y la relación esfuerzo deformación del material (Rodríguez, 2011).

Al aplicar cargas sobre elementos de concreto, las microfisuras se propagan y empiezan a afectar tanto la resistencia del material, como las propiedades mecánicas del mismo, lo que se traduce en un comportamiento no lineal del material (Segura Franco, 2011).

5.2 USO DE FIBRAS EN CONCRETO

El uso de fibras en concreto está asociado principalmente con: Reducir la fisuración por asentamiento y por contracción plástica, disminuir la permeabilidad e incrementar la resistencia a la abrasión y al impacto del material (Antillón, 2016). Sin embargo, en últimos años se ha demostrado que el uso de dicho refuerzo al concreto también permite mejorar la resistencia del material en estado endurecido, en especial la resistencia a la tracción y al cortante, así como a la resistencia a la flexión asociada a las secciones sometidas a tracción (Hermida, Garzón, & Lamilla, 2006). Así mismo, se ha encontrado que las fibras,

especialmente las microfibras, pueden mejorar el comportamiento del material en estado plástico, reduciendo la dependencia de superplastificantes y reductores de agua.

Saucedo, Atoche y Muñoz manifiestan que una vez realizada la revisión literaria de 50 artículos científicos de diversas revistas y analizar los diferentes efectos en las propiedades del concreto por la incorporación de agregados PET, les permitió determinar que existe una mejora en la resistencia a la flexión, en el agrietamiento y ductilidad debido al uso de fibra de PET (Saucedo, Atoche, & Muñoz, 2021). De esta manera, los valores de resistencia a compresión axial y a tracción por compresión diametral del compuesto se ven disminuidos cuando se incorpora mayor porcentaje de fibras PET. Estas últimas llegan a ser un gran aliado en la reducción de fisuras, la deflexión de elementos estructurales, la resistencia a la abrasión del concreto; la cual aumenta con el incremento de residuos de PET como remplazo, de agregado grueso; ya en el ensayo de resistencia al desgaste por abrasión disminuyó en 0,42 mm a 0,23 mm.

Con lo anterior, se demuestra que las fibras PET constituyen una alternativa sostenible como agregado que dan beneficios en las diferentes propiedades del concreto, así mismo se determina que no es recomendable incorporar una cantidad mayor al 5 % del volumen total, ya que no existiría ningún beneficio a la mezcla endurecida

5.3 USO DE FIBRAS POLIMÉRICAS

Múltiples estudios han demostrado que el uso de fibras de polipropileno logra aumentar la resistencia del concreto. De acuerdo con Johnston, la cantidad de fibras polimérica utilizadas en el concreto varía mucho en función de la finalidad de las fibras y del tipo y la geometría de estas. Un mínimo de 0,1% en volumen ($0,9 \text{ kg/m}^3$ para el polipropileno de densidad 910 kg/m^3) se utiliza ampliamente en las placas de concreto con el fin de reducir o eliminar la posibilidad de agrietamiento por contracción plástica en las primeras horas después de la colocación. Cuando se incrementa a porcentajes mayores entre 0,5% - 0,7% se observa una mejora significativa de las propiedades mecánicas después del endurecimiento. (Johnston, 2010).

Así mismo, en 2017 Zebua, Syukur y Nursyamsi, encontraron que el concreto obtenido después de adicionar diferentes proporciones de fibras PET es más ligero en comparación con el concreto que no contiene adiciones de fibras PET; así mismo, encontraron que la adición de fibras PET en la mezcla de concreto incremento la resistencia a la compresión en cerca de un 7% en comparación con las muestras sin adiciones de fibras PET (Zebua, Syukur, & Nursyamsi, 2017).

5.4 USO DE FIBRAS PET RECICLADAS EN CONCRETO

En el año 2018, Sakulneya y Wattanachai realizaron un estudio comparativo acerca de la influencia de fibras PET en el comportamiento elástico del concreto. Para tal fin fabricaron diferentes muestras de concreto con siete proporciones diferentes de fibras PET, y estudiaron su comportamiento mecánico mediante ensayos de resistencia a compresión, tracción y flexión. Llegaron a la conclusión de que un contenido máximo de 8 kg de fibras por m³ de concreto representa una mejora sustancial en las propiedades de resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, ductilidad, módulo de elasticidad y disipación de energía. Así mismo, encontraron que, con dicha proporción, no se afectaba significativamente la resistencia a la compresión del material (Sakulneya & Wattanachai, 2018).

En ese mismo año (2018) Sosoi y otros, estudiaron el uso de fibras sintéticas de PET con forma anular al interior de una matriz de concreto, evaluando la resistencia a la compresión, la tracción, la fractura y a la flexión. Los resultados mostraron que la inclusión de fibras anulares en el concreto, propiciaron un aumento en la resistencia a la tracción de la matriz del material, debido a que los elementos plásticos con forma de anillo producen un material fibroso con un rendimiento comparable al de las fibras sintéticas comerciales (Sosoi, Barbuta, Serbanoiu, & Babor, 2018).

Posteriormente, Baricevic y otros, estudiaron la influencia del plástico tipo PET en el comportamiento del concreto, para lo cual fabricaron cinco diferentes mezclas de concreto

con dosificaciones entre 0.9 y 1.8 kg/m³ de plástico PET reciclado, a las cuales le realizaron ensayos de sortividad, permeabilidad, porosidad, resistencia a tracción y resistencia a la compresión. Los resultados mostraron que la adición de estas fibras recicladas mejoró la resistencia a tracción del concreto, disminuyeron la fisuración del material; sin embargo, la adición de este tipo de fibras es responsable de una mayor porosidad en el material, debido a que se reduce la trabajabilidad del material en estado fresco (Baricevic, Pezer, Rukavina, Serdar, & Stirmer, 2018).

Para el segundo caso, diferentes investigaciones han estudiado la influencia de las fibras PET en el comportamiento del concreto en estado fresco. Por ejemplo, en el 2011 Mendoza, Aire y Dávila evaluaron el efecto que tiene la incorporación de fibras cortas de polipropileno en las propiedades del concreto. Para tal fin fabricaron ocho mezclas diferentes de concreto, las cuales se ensayaron en estado fresco y endurecido. Como resultado obtuvieron que la presencia de las fibras en el concreto fresco modifica la consistencia de la mezcla y reduce el agrietamiento por contracción plástica. Así mismo, en estado endurecido encontraron que se incrementa la tenacidad y la resistencia al impacto y se reduce la contracción por secado y el agrietamiento del material (Mendoza, Aire, & Dávila, 2011).

En 2017 Lopes, Oliveira y Gomes, estudiaron el comportamiento en edades tempranas del concreto reforzado con fibras PET producidas a partir de residuos no biodegradables. Para tal fin, fabricaron nueve diferentes mezclas con dos diferentes tipos de fibras (rectas y onduladas) de 50mm de longitud, y con dosificaciones de 0.5%, 1.0% y 1.5% en volumen. Los resultados mostraron un ligero aumento de entre el 1% y el 8.5% tanto en la resistencia a la compresión, como en la resistencia a flexión. Así mismo, encontraron que la trabajabilidad de la mezcla en estado fresco se reducía debido a la adición de las fibras PET (Lopes, Oliveira, & Gomes, 2017).

Finalmente, la influencia de fibras PET en otras propiedades del concreto (diferentes a las propiedades mecánicas) han sido estudiadas en los últimos años. En 2018 Baricevic y otros estudiaron la influencia de las fibras PET en la porosidad y permeabilidad del

concreto. Los resultados mostraron que la adición de este tipo de fibras reduce la trabajabilidad, sin embargo, esto no representa un problema en términos de durabilidad, ya que los resultados indicaron una pequeña reducción en la permeabilidad del material (Baricevic, Pezer, Rukavina, Serdar, & Stirmer, 2018). Así mismo, Cárdenas-Pulido, Rodríguez e Higuera estudiaron la influencia de las fibras PET en algunas propiedades físicas del concreto; los resultados mostraron que la adición de fibras PET mejoran la absorción, porosidad y densidad del concreto, y no afecta ninguna de las propiedades mecánicas del mismo (Cardenas-Pulido, Rodriguez, & Higuera, 2020).

5.5 USO DE FIBRAS PET EN CONCRETO PARA PAVIMENTO RÍGIDO

En cuanto al uso de fibras PET como refuerzo de estructuras de pavimentos rígido Ruge y Bastidas en su artículo titulado Reinforced concrete with synthetic fibers (PET+PP) for rigid pavement structures exponen como el concreto así como otros materiales de construcción, experimenta cambios volumétricos de (expansión y contracción) debido a las solicitaciones de carga y las condiciones climáticas (humedad y temperatura) , lo cual ocasiona la aparición de grietas en las placas de concreto de pavimentos rígidos cuando no se han tomado las medidas necesarias durante el proceso de diseño, construcción y mantenimiento de los pavimentos.

Diversos estudios de concreto han indicado que el refuerzo con fibras en capas compactadas con rodillo genera un mejor desempeño mecánico del pavimento rígido comparado con materiales convencionales. Es importante destacar que el uso de macrofibras reduce la fisuración causada por la contracción de fraguado y cargas estructurales. Las macrofibras actúan como materiales añadidos en el contrafuerte del concreto, permitiendo interceptar la grieta que se genera antes de la tensión, anclando y atacando la deformación lineal que se traduce en la mitigación de la contracción (Ruge Cardenas, Bastidas, & Torres, 2018)

Así mismo, Solorzano y Cerna en su artículo “Influencia de la adición del 0.2%, 0.3% y 0.4% de tereftalato de polietileno en las propiedades de resistencia y permeabilidad de

pavimento de concreto” evaluaron el efecto del uso del PET reciclado en la elaboración de concreto para pavimentos, con la finalidad de promover su uso racional en lugar de desecharlo y disminuir la contaminación ambiental que representa el plástico PET. En esta investigación se comparó el concreto con agregado patrón diseñado para una resistencia de $f'c=280$ kg/cm² con adiciones al 3%, 4% y 5% de PET en los ensayos de permeabilidad, compresión axial y flexión. Encontrando que el PET en un porcentaje de 0.3% mejora la resistencia a la compresión, mientras que en un 0.4% de PET mejora la flexión y permeabilidad. Por lo cual los investigadores concluyen que si se busca la mayor resistencia se utilice menor dosificación de PET y si se busca mayor flexión y permeabilidad se utilice mayor porcentaje de PET. Este estudio demostró que el PET si influye significativamente en las propiedades físico-mecánicas del concreto permeable en pequeñas adiciones. (Solorzano Ordinola & Cerna Vasquez Junior, 2021)

6 MARCO REFERENCIAL

6.1 MARCO CONCEPTUAL

Los principales conceptos utilizados en el desarrollo de la presente propuesta se muestran a continuación:

- **Concreto:** Es un material obtenido de la mezcla de cemento, arena, grava, agua, aire, y en ocasiones aditivos y adiciones, y el cual al endurecerse se convierte en una roca artificial, la cual tiene gran capacidad de soportar esfuerzos de compresión (Monteiro & Mehta, 2014).
- **Agregados:** Los agregados son materiales granulares inertes, los cuales sirven como llenantes en el concreto hidráulico. Los agregados se clasifican de acuerdo con su tamaño, en agregados gruesos (gravas) y finos (arenas), y que se puede utilizar en su estado natural o triturados (Monteiro & Mehta, 2014).
- **Fibras:** Son elementos discontinuos de diferentes materiales (metálicas, poliméricas, naturales), las cuales se utilizan con el fin de modificar una o varias de las propiedades del concreto (Gu & Ozbakkaloglu, 2016).
- **Microfibras:** Fibras poliméricas (polipropileno, polietileno o nylon), que ayudan a reducir la segregación de la mezcla de concreto y previenen la formación de fisuras durante la construcción. Se consideran microfibras, las fibras que tienen diámetros inferiores a 0.05 mm y cuyas longitudes oscilan entre los 10 mm y 75 mm (Bayasi & McIntyre, 2002).
- **Macrofibras:** Fibras de diferentes materiales (acero, polímeros o materiales naturales), las cuales se utilizan como refuerzo distribuido en los elementos y orientado en cualquier dirección. En este caso, las fibras actúan como refuerzo del concreto, por lo que incrementan su capacidad de carga a compresión, flexión y tracción, resistencia al impacto y tenacidad. Se consideran macrofibras a las fibras cuyo diámetro es mayor a 0.05 mm, con longitudes variables entre 10 mm y 100 mm (Bayasi & McIntyre, 2002).

- **Durabilidad:** Es la habilidad del concreto para resistir diferentes acciones exteriores, las cuales se pueden clasificar en físicas, mecánicas, químicas o biológicas, y que se relaciona con el funcionamiento y servicio de las estructuras de concreto (Sánchez de Guzmán, 2002).
- **Polímero:** Es una molécula en forma de cadena compuesta por grandes moléculas formadas por la unión mediante enlaces covalentes de unidades simples llamadas monómeros, donde cada unidad química se repite a lo largo de la misma y por lo general en cantidades muy grandes. La relación por la cual se forman los polímeros se denomina polimerización (Gu & Ozbakkaloglu, 2016).
- **Tereftalato de polietileno:** Mejor conocido como PET (por sus siglas en inglés polyethylene terephthalate), es un material polimérico termoplástico, perteneciente al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres. Este tipo de plástico es muy usado en las industrias de bebidas y textiles (Alhozaimy, Soroushian, & Mirza, 1996).

6.2 MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan los principales apartados teóricos para el desarrollo del presente proyecto:

6.2.1 Tereftalato de polietileno (PET)

El tereftalato de polietileno, mejor conocido como PET (por sus siglas en inglés polyethylene terephthalate) es un material polimérico termoplástico, y en la actualidad se constituye en uno de los materiales plásticos más utilizados por la industria a nivel mundial. Por su composición química, el tereftalato de polietileno o PET es un tipo de poliéster, el cual se obtiene mediante la policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Después de obtener el material, el mismo se procesa de diferentes maneras para obtener productos derivados mediante diferentes técnicas, las cuales incluyen inyección, extrusión, termo-conformado y soplado (Suasnavas Flores, 2017).

Debido a sus características, el PET es un material muy adecuado para la fabricación de botellas, frascos, piezas y textiles, razón por la cual su producción y uso se ha intensificado en las últimas décadas, generando alrededor de 8 millones de toneladas de desperdicio al año (Wang, Yuan, Deng, Zeng, & Yu, 2020). Debido a lo anterior, y teniendo en cuenta que el PET no es un material biodegradable (requiere alrededor de 300 años para poder degradarse), la producción de PET se ha convertido en uno de los agentes más contaminantes del planeta. Sin embargo, en comparación con otros plásticos, el PET es uno de los que presenta mejores condiciones para ser reciclado, debido a la sencillez de los procedimientos que se requieren para su reproceso, los cuales requieren tecnologías relativamente económicas y temperaturas relativamente bajas para su transformación en nuevos productos (Wang, Yuan, Deng, Zeng, & Yu, 2020). El proceso de reciclado del PET consiste tradicionalmente en transformar las botellas usadas en monómeros o fibras, a través de métodos físicos, químicos o térmicos (Ayala & Riaño, 2019).

6.2.2 Refuerzo de fibras para concreto

En general, los materiales de refuerzo confieren a un material compuesto, como el concreto, mejoran las propiedades de los materiales constituyentes como, por ejemplo: resistencia, rigidez, dureza, rendimiento a altas temperaturas y conductividad. En el concreto es de vital importancia que el material de refuerzo sea compatible con la matriz y resistente al ataque de los productos de hidratación del cemento. En la última década se han realizado investigaciones sobre concreto reforzado con fibras y partículas de polímeros como polipropileno, poliestireno, PET y polietileno; obteniéndose resultados muy satisfactorios.

En el caso de las fibras, estas presentan varias propiedades físicas, mecánicas y químicas, que lo hacen un material con altas especificaciones para aplicaciones en ingeniería y construcción. Entre sus propiedades se encuentran la alta resistencia a los esfuerzos de tracción, a la abrasión y al impacto; así mismo, tiene una densidad de aproximadamente 1.35 g/cm^3 (relativamente baja), resistencia a temperaturas

relativamente altas (aproximadamente 100°C), así como buena resistencia a la humedad, a los gases y a los agentes químicos y biológicos (Ayala & Riaño, 2019).

6.2.3 Concreto

El concreto es un material de construcción, el cual está constituido por un material aglutinante llamado cemento y por su parte granular como es el agregado, grueso (gravas) y agregado fino (arenas); materiales que mezclados adecuadamente proporcionan resistencia y durabilidad en las estructuras (Segura Franco, 2011).

La buena resistencia del concreto depende generalmente de sus características en estado plástico como la manejabilidad, la consistencia, la plasticidad, grado de exudación, segregación y la relación agua/cemento, pero además intervienen otros elementos de gran importancia como son la granulometría, la textura superficial, la forma, la resistencia, la rigidez y el tamaño máximo de los agregados, el tipo y la calidad del cemento, la calidad del agua y aditivos que se empleen durante la fabricación. Para la evaluación de sus propiedades se realizan diferentes ensayos mecánicos tales como resistencia a la compresión y resistencia a la flexión entre otros.

Por otro lado, el concreto es el segundo material más utilizado a nivel mundial, y ocupa el primer lugar entre los materiales de construcción. Este material se caracteriza por su alta resistencia a compresión, buena durabilidad, economía y facilidad de construcción (Segura Franco, 2011). Sin embargo, el proceso de producción del cemento hidráulico es altamente contaminante, debido a que se deben calcinar arcillas y piedra caliza a una temperatura de aproximadamente 1600 °C. Este proceso de producción genera alrededor de 1 Tonelada de CO₂ por cada Tonelada de cemento producido, lo cual convierte a la industria cementera y concretera en la tercera más contaminante, con una contribución de aproximadamente el 8% de los gases de efecto invernadero a nivel mundial (Amato, 2013).

A pesar de las grandes bondades del concreto con respecto a su construcción, y la resistencia mecánica a compresión que puede desarrollar, este material tiene una gran desventaja en cuanto a su comportamiento mecánico, debido a que, por ser un material cerámico, no es capaz de desarrollar grandes resistencias a tracción (Monteiro & Mehta, 2014). Por tal motivo, para la construcción en concreto, generalmente es necesario reforzar el material. En ese orden de ideas, el refuerzo del concreto se puede encontrar de dos formas, como barras de acero o como fibras (AIS, 2010). En el caso de las fibras, estas se pueden dividir en: a) Microfibras, las cuales tienen diámetros inferiores a 0.25 mm con longitudes que oscilan entre los 12 y los 75 mm y que normalmente son poliméricas de fibra de plástico, polipropileno, polietileno o nylon; y b) Macrofibras, cuyo diámetro oscila entre 0.25 mm y 1.5 mm con longitudes entre 13 mm y 70 mm, y las cuales normalmente son de acero, vidrio, poliméricas, sintéticas o naturales (Ayala & Riaño, 2019).

El uso de fibras genera múltiples beneficios al material. Entre estos beneficios podemos enumerar los siguientes: incremento de la resistencia al impacto, incremento de la resistencia a tracción, incremento de la resistencia a la fatiga, disminución de la retracción del fraguado, disminución del asentamiento, disminución de la absorción de agua y aumento de la resistencia a agentes biológicos (Figueiredo, 2000).

6.2.4 Resistencia a la compresión

El ensayo a compresión está regido por la norma NTC 673 – o INVIAS E 410, consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados, de 15 cm x 30 cm hasta llegar a la falla; la carga obtenida durante el ensayo es dividida por el área transversal del espécimen ensayado a fin de obtener la resistencia a la compresión del espécimen. Para el cálculo de la resistencia a la compresión (f'_c), se divide la carga de fractura por el área de la sección transversal (INVIAS, 2013).

6.2.5 Módulo de rotura

El Módulo de rotura, es la resistencia a la flexión del concreto. El ensayo a flexión está regido por la norma NTC 2871 o INVIAS INV E-414, y consiste en aplicar cargas a los tercios medios de la luz, con el fin de calcular el módulo de rotura que define el esfuerzo máximo que soporta el espécimen (INVIAS, 2013).

6.2.6 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del concreto representa la rigidez que presenta el material ante una carga, el ensayo para la determinación del módulo de elasticidad estático del concreto se hace por medio de la Norma Técnica Colombiana 4025, que tiene como antecedente la ASTM C 469, o INVIAS 424 (INVIAS, 2013).

La primera fase de la determinación del módulo de elasticidad inicia en la zona elástica, donde el esfuerzo y la deformación unitaria puede oscilar entre el 0% y 40% de la resistencia a la compresión. En la segunda fase, se produce microfisuración al recibir la carga, estas fisuras se ubican en la interface agregado - pasta y está comprendida entre el 45% y 98% de la resistencia del concreto.

6.2.7 Pavimentos en concreto rígido

Son pavimento formados por la construcción de una losa de concreto simple o armado apoyado sobre base granular o sub base; debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, absorbe gran parte de los esfuerzos, los distribuye y transmite a la subrasante (ICPC; INVIAS, 2008).

- **Subrasante**

La subrasante puede estar constituida por suelos en su estado natural (cortes), o por éstos con algún proceso de mejoramiento tal como sucede cuando se someten a una estabilización mecánica (terraplén) o mixtas, estabilización fisicoquímica con

aditivos como el cemento Portland, la cal o el asfalto, entre otras, y básicamente es la fundación sobre la cual el pavimento se construirá.

- **Base Granular**

Las principales funciones de esta capa son las de dar soporte uniforme y constante al apoyo de losas, controlar las variaciones volumétricas de la subrasante y aumentar la capacidad de soporte de la fundación, deben cumplir con ciertas características que se estipulan en normas o especificaciones; para el caso concreto, en Colombia, el Instituto Nacional de Vías las regula mediante sus especificaciones técnicas: Especificaciones generales de construcción de carretas, particularmente en el caso de la base granular el Capítulo 3 – AFIRMADOS, SUBBASES Y BASES.

- **Losa de concreto**

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante, dado que no usan capa de base.

7 METODOLOGÍA.

En el desarrollo de la investigación, se desarrolló la siguiente metodología para el cumplimiento de cada uno de los objetivos propuestos:

7.1 OBJETIVO ESPECÍFICO NO 1

Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de fibras recicladas de tereftalato de polietileno (PET) empleadas para la fabricación de muestras de concreto hidráulico.

- i. **Adquirir fibras recicladas de tereftalato de polietileno (PET):** Se adquirieron fibras comerciales de PET reciclado.
- ii. **Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de las fibras PET recicladas:**
A las fibras se le determinaron sus principales parámetros físicos:
 - Propiedades físicas: Longitud, diámetro y densidad.
 - Propiedades mecánicas: Se evaluó la resistencia a la tracción de seis (6) fibras PET recicladas. El resultado es el promedio de todos los resultados obtenidos.
- iii. **Implementar el uso de fibras PET recicladas en concreto:** Se implementó el uso de fibras PET recicladas como refuerzo en mezclas de concreto hidráulico.
 - Revisión bibliográfica del uso de fibras PET en concreto hidráulico
 - Diseño de mezcla para la dosificación de fibras PET recicladas en el concreto hidráulico: Se definieron cuatro diferentes dosificaciones: 0 kg/m³, 1 kg/m³, 2 kg/m³ y 3 kg/m³. Esta dosificación se ha determinado de acuerdo con investigaciones anteriores, en las cuales se indica que la máxima cantidad de fibras poliméricas es de 5 kg por m³ de concreto; sin embargo, dicha cantidad afecta fuertemente la trabajabilidad de la mezcla en estado fresco. Por tal motivo, diferentes autores recomiendan limitar esta cantidad a 3 kg/m³ (valor límite para no afectar la trabajabilidad), cantidad definida para la presente investigación.

7.2 OBJETIVO ESPECÍFICO NO 2

Elaborar muestras de concreto hidráulico con adición de diferentes proporciones de fibras PET recicladas.

- **Adquirir y caracterizar materias primas para fabricación de concreto hidráulico:** Se adquirieron y caracterizaron las materias primas para la elaboración de las mezclas. Así mismo, se desarrollaron los siguientes ensayos de caracterización:
 - **Agregados:** Se desarrollaron ensayos de granulometría, densidad, masas unitarias sueltas y masas unitarias compactas en los agregados finos (arena) y gruesos (grava).
 - **Cemento:** Se utilizó cemento hidráulico comercial tipo UG (de Uso General). Para caracterizarlo se desarrollaron ensayos de densidad, finura de Blaine, consistencia normal y tiempos de fraguado.
- **Realizar diseño de mezclas de concreto hidráulico con diferentes contenidos de fibras PET recicladas**
 - Se desarrolló un diseño de mezcla con las materias primas caracterizadas, para un concreto hidráulico MR 40 kg/cm².
 - Se modificó el diseño de mezcla mediante la inclusión de diferentes porcentajes de fibra en dosificaciones de 0 kg/m³, 1 kg/m³, 2 kg/m³ y 3 kg/m³ (kg de fibra / m³ de concreto).
- **Fabricación de muestras de concreto con diferentes contenidos de fibras PET recicladas de acuerdo con el diseño realizado:** Se fabricaron 64 muestras distribuidas de la siguiente forma.

- Para la resistencia a la flexión (MR) se hicieron ocho (8) viguetas de 52x15x15 cm para cada una de las mezclas diseñadas.
- Para la resistencia a la compresión (f'_c) se fabricaron nueve (9) cilindros de concreto de 15x30 cm para cada una de las mezclas diseñadas.
- Para módulo de elasticidad (E) se fabricaron dos (2) cilindros de 15x30 cm para cada una de las mezclas diseñadas.

Todas las muestras fueron curadas sumergidas en agua, hasta el día de ensayo. En cuanto a la evaluación de las muestras elaboradas, en el caso del módulo de rotura (MR), las muestras se evaluaron en cuatro edades diferentes: 7 días, 14 días, 21 días y 28 días; para la resistencia a la compresión, las muestras se evaluaron para tres edades: 7 días, 14 días y 28 días. Finalmente, todos los ensayos de módulo de elasticidad del concreto se hicieron para una edad de 28 días.

7.3 OBJETIVO ESPECÍFICO NO 3

Determinar las propiedades físicas y mecánicas de muestras de concreto con adición de fibras PET recicladas.

- i. Evaluar las propiedades físicas de las muestras de concreto: Densidad y porosidad abierta:** A cada una de las muestras de concreto se le midió la densidad y la porosidad abierta de acuerdo con la norma ASTM C642 – 15.
- ii. Evaluar las propiedades mecánicas de las muestras de concreto:** A cada una de las muestras de concreto endurecido se les hicieron los siguientes ensayos:
 - **Resistencia a la compresión (f'_c):** Ensayo de compresión en cilindros de concreto de 15x30 cm de acuerdo con la norma ASTM C39 – 20. Se hicieron ensayos en tres edades: 7 días, 14 días y 28 días. Para cada edad evaluada, se hicieron un total de tres (3) repeticiones.

- **Resistencia a la flexión (MR):** Ensayo de resistencia a flexión en viguetas de concreto de 52x15x15 cm de acuerdo con la norma ASTM C78 / C78M – 18. Se hicieron ensayos en cuatro edades: 7 días, 14 días, 21 días y 28 días. Para cada edad evaluada, se hicieron un total de dos (2) repeticiones.
 - **Módulo de elasticidad (E):** Ensayo del módulo de elasticidad en cilindros de concreto de 15x30 cm de acuerdo con la norma ASTM C469 – 14. Se hicieron ensayos a una edad de 28 días.
- iii. **Analizar la influencia del contenido de fibras PET recicladas en el comportamiento mecánico del concreto hidráulico:** De acuerdo con los resultados obtenidos, se analizó la influencia de la adición de fibras en el comportamiento mecánico del concreto hidráulico.

7.4 OBJETIVO ESPECÍFICO NO 4

Evaluar el comportamiento del concreto reforzado con fibras PET en losas de pavimento rígido, mediante una modelación con un programa de elementos finitos

- i. **Desarrollar un modelo numérico de una losa de pavimento rígido reforzada con fibras PET por medio del método de los elementos finitos (MEF):** Se desarrollaron modelos numéricos en SAP2000® de losas de pavimento de concreto reforzado con fibras PET recicladas mediante el método de elementos finitos (MEF).
- ii. **Calibración del modelo de acuerdo con los resultados experimentales obtenidos:** Todos los modelos fueron calibrados en función del comportamiento mecánico de los materiales.
- iii. **Evaluar el comportamiento mecánico de losas de pavimento rígido reforzadas con fibras PET recicladas a través del modelo numérico desarrollado:** Mediante la implementación del modelo numérico se evaluó el comportamiento de las losas de pavimento rígido.

- iv. Evaluar la viabilidad del uso de concreto reforzado con fibras PET recicladas para la construcción de losas de pavimento rígido:** De acuerdo con los resultados obtenidos de la modelación de la losa de pavimento rígido se evaluó la viabilidad del uso de fibras PET recicladas en la construcción de losas de pavimento rígido.

A continuación, se presenta el desarrollo de cada uno de los puntos de la metodología de investigación.

8 CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS PET RECICLADAS

En primer lugar, se hicieron ensayos de caracterización de las fibras de PET reciclado para implementación en la presente investigación. Para el presente trabajo se utilizaron macrofibras de PET referencia comercial MallaPet 3D, las cuales son macrofibras sintéticas para reforzamiento del concreto producidas por la empresa Metainplast®. Este tipo de fibras se fabrican con base en PET reciclado, lo cual garantiza que es un producto ambientalmente amigable; así mismo, mejora la durabilidad y vida útil del concreto reforzado, y genera una reducción de costos en la construcción de este. Para estas fibras se caracterizaron las propiedades físicas (diámetro, longitud y forma) y mecánicas (resistencia a flexión y módulo de elasticidad) necesarias para desarrollar el diseño y fabricación de las mezclas de concreto. Otras propiedades, se tomaron de la ficha técnica del proveedor del producto.

8.1 PROPIEDADES FÍSICAS

En el caso de las propiedades físicas, se caracterizaron el diámetro, la longitud y la forma de las fibras PET recicladas. En el caso del diámetro y la longitud, se caracterizaron las fibras mediante micro-proyección de acuerdo con las indicaciones de la Norma ASTM D2130-13 (ASTM, 2013). La forma de las fibras es recta y corrugada, y se determinó mediante inspección visual, de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Finalmente, la densidad se determinó mediante el método del desplazamiento de agua de acuerdo con la norma ASTM D792-20 (ASTM, 2020). Las propiedades físicas de las fibras utilizadas se presentan a continuación en la tabla 1:

Tabla 1. Características físicas de las fibras PET

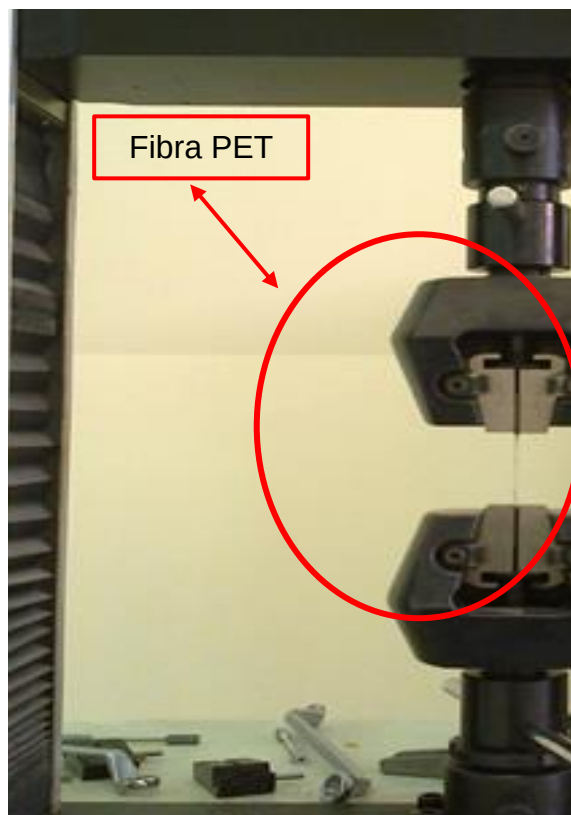
Características	
Diámetro	0.51 mm $\pm$ 0.01 mm
Longitud	50 $\pm$ 1 mm
Forma	Recta y corrugada
Densidad	1.25 $\pm$ 0.05 g/cm ³

Fuente: Elaboración propia

8.2 PROPIEDADES MECÁNICAS

En el caso de las propiedades mecánicas, se caracterizaron la resistencia a tensión y el módulo de Young (módulo de elasticidad) de las fibras utilizadas en la presente investigación, de acuerdo con la norma ASTM C1557 (ASTM, 2020). Los ensayos se realizaron en una máquina de ensayos universal Shimadzu ® para ensayos de tensión estáticos, como se muestra a continuación en la figura 2:

Figura 2. Ensayo de caracterización mecánica de las fibras



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de propiedades mecánicas de las fibras utilizadas en la presente investigación se muestran en la tabla 2 a continuación:

Tabla 2. Características mecánicas de las fibras PET

Características	
Resistencia a tensión	682 $\pm$ 17 MPa
Módulo de Young	9.4 $\pm$ 0.6 GPa

Fuente: Elaboración propia

8.3 OTRAS PROPIEDADES

Finalmente, se tienen otras propiedades de las fibras PET utilizadas en la presente investigación: Color, Denier, punto de fusión y punto de ignición. Estas propiedades se tomaron directamente de la ficha técnica suministrada por el fabricante, tal como se presenta en la tabla 3 a continuación:

Tabla 3. Otras propiedades de las fibras PET

Características	
Color	Gris
Denier	4500
Punto de fusión	550 °C
Punto de ignición	260 °C

Fuente: Elaboración propia

9 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS Y DISEÑO DE MEZCLA

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación, se elaboraron muestras de concreto normal con refuerzo de fibras PET recicladas. En primer lugar, se utilizó cemento Argos® tipo UG de uso comercial; en el caso de los agregados se utilizó arena de río y grava común; adicionalmente, se utilizó una pequeña cantidad de superplastificante para garantizar un asentamiento (slump) de 5 cm en todas las mezclas. A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de caracterización de todos los materiales trabajados, así como el diseño de las mezclas elaboradas en el presente proyecto.

9.1 CEMENTO

En este caso, se utilizó cemento Argos® tipo UG comercial, del cual se obtuvieron los siguientes resultados de caracterización:

9.1.1 Densidad

El ensayo de densidad se desarrolló con el frasco de Le Chatelier, de acuerdo con las indicaciones de la Norma Técnica Colombiana NTC-221 (ICONTEC, 2019). La densidad se calcula como la relación entre la masa de cemento, y el volumen corregido de kerosene en el frasco de Le Chatelier. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4:

Tabla 4. Densidad del cemento

Propiedad	Cantidad
Masa del cemento (g)	68.2
Volumen inicial - V_i (cm ³)	0.6
Volumen final - V_f (cm ³)	23.2
Densidad (g/cm³)	3.02

Fuente: Elaboración propia

9.1.2 Finura del cemento

Posteriormente, se determinó la finura del cemento mediante el método del aparato de Blaine de acuerdo con las indicaciones de la Norma NTC 33 (ICONTEC, 2019). Los resultados obtenidos del ensayo se muestran en la siguiente tabla 5:

Tabla 5. Finura del cemento por aparato de Blaine

Temperatura (°C)	21
Porosidad de la muestra	0.5
Peso del cemento, W (g)	2.76
Tiempo de descenso, Ts (s)	76.6
Factor Blaine, FB	380
Finura de Blaine, Ss (cm²/g)	3325.8

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, el cemento utilizado tiene una finura de Blaine (superficie específica) de 3325.8 cm²/g.

9.1.3 Consistencia normal

El ensayo de consistencia normal de cemento se realizó con las agujas de Vicat de acuerdo con las indicaciones de la Norma NTC 110 (ICONTEC, 2019). Este ensayo consiste en encontrar la relación a/c que produzca una penetración de la aguja gruesa de Vicat de 10 + 1 mm en un tiempo de 30 segundos. A esta cantidad de agua, se le conoce como consistencia normal. En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos para este ensayo:

Tabla 6. Consistencia normal del Cemento

Volumen de agua (cm³)	180
Masa de cemento (g)	650
Relación a/c	0.28
Penetración con aguja de Vicat (mm)	10

Fuente: Elaboración propia

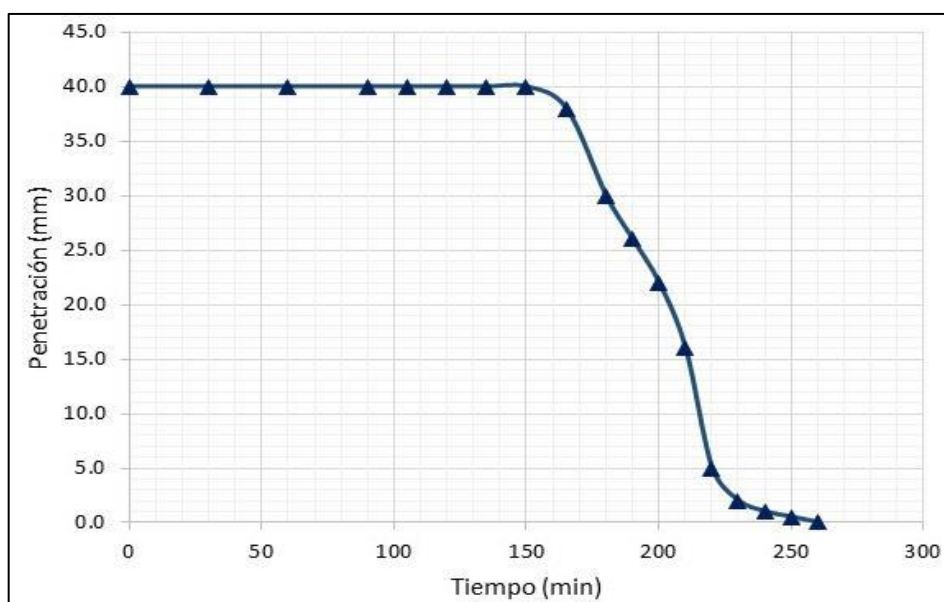
Por tanto, se tiene que el cemento necesita una relación a/c de 0.28 (28%) para alcanzar la consistencia normal.

9.1.4 Tiempos de fraguado

Para determinar los tiempos de fraguado (inicial y final) del cemento, se siguieron las recomendaciones de la norma NTC 118, en la cual se indica que se debe preparar una muestra de pasta de cemento con la cantidad de agua para lograr una consistencia normal (en este caso 28%), y medir el tiempo necesario para que las agujas delgadas de Vicat penetren 25 mm (tiempo inicial), y para que penetren 0 mm sin dejar huella (tiempo final) en la muestra de pasta de cemento (ICONTEC, 2004).

En este caso, se hizo el ensayo y se desarrolló una gráfica de Penetración en mm, vs tiempo en minutos. Con base en esta grafica se determinaron los tiempos de fraguado del cemento utilizado en la presente investigación. Los resultados obtenidos del ensayo se presentan en la figura 3 a continuación:

Figura 3. Ensayo de tiempo de fraguado en cemento



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, los tiempos de fraguado del cemento se registran en la tabla N°7:

Tabla 7. Tiempos de fraguado del cemento

Tiempo inicial (min)	185
Tiempo final (min)	280

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que los tiempos de fraguado del cemento utilizado en la presente investigación, cumple con lo establecido en las normas ICONTEC NTC 118 y NTC 121 (ICONTEC, 2004) (ICONTEC, 2021). De acuerdo con estas normas, el tiempo inicial debe ser mínimo de 45 min, y el tiempo final máximo de 10 horas (600 min); con lo cual el cemento utilizado cumple con los requisitos para ser utilizado en obras de infraestructura.

9.2 AGREGADO FINO

En esta sección se presentan los resultados de caracterización de la arena utilizada en la presente investigación:

9.2.1 Humedad Natural

En primer lugar, se determinó la humedad natural de la arena utilizada en la fabricación de las muestras de concreto de acuerdo con la Norma NTC 1776 (ICONTEC, 2019). Para tal fin, se tomó una muestra de 300 g de arena y se secó al horno a una temperatura de 110 °C durante 24 horas. Los resultados obtenidos, se presentan en la tabla 8:

Tabla 8. Humedad natural de la arena

Peso Inicial (g)	Peso Seco (g)	Wn (%)
300	288.9	3.7

Fuente: Elaboración propia

9.2.2 Densidad y absorción

Así mismo, se determinó la densidad (relativa y aparente) y la absorción de los agregados finos. Para tal fin se siguieron las especificaciones de la norma INV E-222 (INVIAS, 2013); en ese orden de ideas, se tomó una muestra de 500 g de arena, se secó al horno durante 24 horas a 110 °C y se tomó su peso; posteriormente se sumergió en agua durante 24 horas y se suministró aire caliente con un secador para encontrar el pesos en estado saturado superficialmente seco (SSS) de la muestra; finalmente se tomaron 500 g del material en estado SSS y se llenó el picnómetro con agua y con el material. De este procedimiento se obtuvieron los datos registrados en la tabla 9:

Tabla 9. Datos de ensayo de densidad y absorción

Definición	W (g)
Masa de la muestra seca al horno (A)	488.1
Masa del picnómetro lleno de agua (B)	684.9
Masa total del picnómetro con la muestra (C)	1005.2
Masa de la muestra SSS (S)	500.6

Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos, la densidad relativa se calculó de la siguiente forma:

$$\frac{A}{(B + S - C)}$$

Así mismo, se calculó la densidad aparente de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{A}{(B + A - C)}$$

Para terminar, se calculó la absorción de la muestra de la siguiente forma:

$$\frac{S - A}{A} * 100$$

De acuerdo con lo anterior, los resultados de caracterización del agregado fino se presentan en la tabla 10:

Tabla 10. Densidad y absorción del agregado fino

Densidad relativa	2.71 g/cm ³
Densidad aparente	2.91 g/cm ³
Absorción	2.56%

Fuente: Elaboración propia

9.2.3 Peso unitario suelto y compacto

Se determinó el peso unitario (densidad bulk) de la arena, de acuerdo con las indicaciones de la norma INV E-217-13 (INVIAS, 2013). El peso unitario es el peso por unidad de volumen de un agregado fino; sin embargo, se diferencia de la densidad debido a que incluye la relación de vacíos entre las partículas de agregado.

Para tal fin, se tomó el molde para pesos unitarios del agregado fino (cilindro de 15cm de diámetro x 15 cm de altura), y se llenó con material. El peso unitario se determina como la relación entre el peso del material y el volumen que ocupa en el molde. El material se puede disponer de dos formas, suelta y compacta (apisonada). A continuación, en la tabla 11, se presentan los resultados obtenidos para los pesos unitarios de la arena:

Tabla 11. Pesos unitarios sueltos y compactos de la arena

Promedio peso agregado suelto más molde (kg)	6.08
Promedio peso agregado compacto más molde (kg)	6.35
Peso molde (kg)	1.61
Volumen molde (m ³)	0.0027
Peso unitario suelto (kg/m³)	1686.79
Peso unitario compacto (kg/m³)	1788.68

Fuente: Elaboración propia

9.2.4 Granulometría

Posteriormente se hizo la granulometría de la arena utilizada en el desarrollo del trabajo de investigación. Mediante este ensayo se determina la distribución del tamaño que tienen las partículas de agregado fino.

Este análisis se desarrolló de acuerdo con las indicaciones de la norma INV E 213-13 (INVIAS, 2013), para lo cual se tomaron 300 g de arena, y se hicieron pasar a través del juego de tamices organizado de la siguiente forma: #4, #8, #16, #30, #50, #100, #200 y fondo; posteriormente se determinó cuanto fue el peso retenido, el porcentaje de material retenido acumulado, y el porcentaje de material que pasa en cada uno de los tamices. Los resultados obtenidos del ensayo se pueden apreciar en la tabla 12 a continuación:

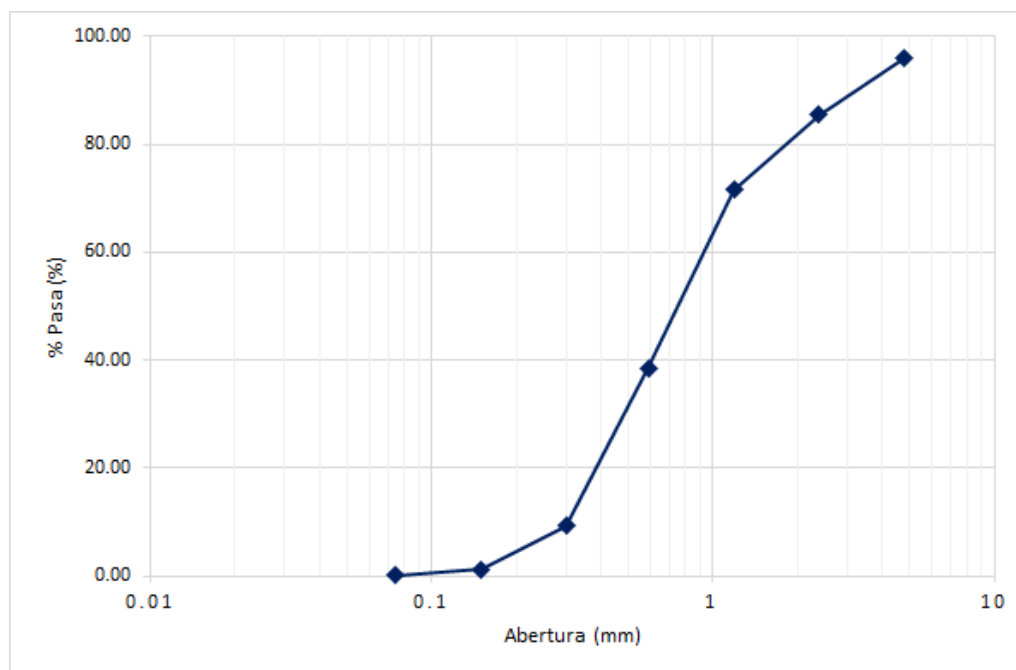
Tabla 12. Resultados obtenidos del análisis granulométrico de la arena

Tamices	mm	Peso retenido (g)	% Retenido	Retenido acumulado	% Pasa
#4	4.76	12.05	4.08	4.08	95.92
#8	2.38	30.68	10.40	14.49	85.51
#16	1.19	41.06	13.92	28.40	71.60
#30	0.59	97.78	33.15	61.55	38.45
#50	0.3	86.15	29.20	90.76	9.24
#100	0.15	23.71	8.04	98.79	1.21
#200	0.07	3.45	1.17	99.96	0.04
Pasa #200		0.11	0.04	100.00	0.00
Total		294.99	100.00		

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se hizo la curva granulométrica de la arena, graficando la abertura del tamiz vs el porcentaje que pasa para cada tamaño, como se observa a continuación en la figura 4:

Figura 4. Curva granulométrica de la arena



Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la gráfica anterior, se encontró que la arena presenta buena gradación cumpliendo con lo estipulado en la norma INV. E 213-13 (INVIAS, 2013).

9.3 AGREGADO GRUESO

En esta sección se presentan los resultados de caracterización de la grava utilizada en la presente investigación:

9.3.1 Humedad natural

De forma similar al agregado fino, se determinó la humedad natural de la grava utilizada en la fabricación de las muestras de concreto de acuerdo con la Norma NTC 1776 (ICONTEC, 2019). Para tal fin, se tomó una muestra de 300 g de grava y se secó al horno

a una temperatura de 110 °C durante 24 horas. Los resultados obtenidos, se presentan en la tabla 13:

Tabla 13. Humedad natural de la grava

Peso Inicial (g)	Peso Seco (g)	Wn (%)
300.4	298.3	0.7

Fuente: Elaboración propia

9.3.2 Densidad y absorción

Para el agregado grueso (grava), también se determinó la densidad (relativa y aparente) y la absorción. Para tal fin se siguieron las especificaciones de la norma INV E-222 (INVIAS, 2013); en ese orden de ideas, se tomó una muestra de 2.0 kg de material, se seleccionó sobre el tamiz #4, se secó al horno durante 24 horas a 110 °C y se tomó su peso; posteriormente se sumergió en agua durante y se determinó su peso en estado saturado superficialmente seco (SSS) de la muestra. De este procedimiento se obtuvieron los datos relacionados en la tabla 14:

Tabla 14. Datos de ensayo de densidad y absorción en grava

Definición	W (g)
Masa de la muestra	2000.0
Masa de la muestra seca (A)	1988.2
Masa de la muestra SSS (B)	2062.2
Masa de la muestra sumergida (C)	1205.3

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, se determinaron los valores de densidad (relativa y aparente) y absorción del agregado grueso utilizado. Los valores obtenidos se presentan en la tabla 15:

Tabla 15. Densidad y absorción del agregado grueso

Densidad relativa	2.32 g/cm ³
Densidad aparente	2.41 g/cm ³
Absorción	3.59%

Fuente: Elaboración propia

9.3.3 Peso unitario suelto y compacto

Se determinó el peso unitario suelto y compacto de la grava, de acuerdo con las indicaciones de la norma INV E-217-13 (INVIAS, 2013). Para tal fin, se tomó el molde para pesos unitarios del agregado grueso (cilindro de 22 cm de diámetro x 20 cm de altura), y se llenó con la grava. El peso unitario se determina como la relación entre el peso del material y el volumen que ocupa en el molde. El material se trabajó de dos maneras: de forma suelta (sin apisonar), y de forma compacta (apisonada). A continuación, en la tabla 16 se presentan los resultados obtenidos para los pesos unitarios de la grava:

Tabla 16. Pesos unitarios sueltos y compactos de la grava

Promedio peso agregado suelto más molde (kg)	17.78
Promedio peso agregado compacto más molde (kg)	18.52
Peso molde (kg)	5.00
Volumen molde (m ³)	0.008
Peso unitario suelto (kg/m³)	1607.55
Peso unitario compacto (kg/m³)	1700.63

Fuente: Elaboración propia

9.3.4 Granulometría

Finalmente, y de forma similar a como se hizo con la arena, se realizó el análisis granulométrico de la grava utilizada en el desarrollo del trabajo de investigación. Mediante este ensayo se determina la distribución del tamaño que tienen las partículas de agregado grueso. Este análisis se desarrolló de acuerdo con las indicaciones de la norma INV E 213-13 (INVIAS, 2013), para lo cual se tomaron 1000 g de grava, y se hicieron pasar a través del juego de tamices organizado de la siguiente forma: 1 ½", 1", ¾", ½", ⅜", #4, y fondo; posteriormente se determinó cuanto fue el peso retenido, el porcentaje de material retenido acumulado, y el porcentaje de material que pasa en cada uno de los tamices. Los resultados obtenidos del ensayo se pueden apreciar en la tabla 17 a continuación:

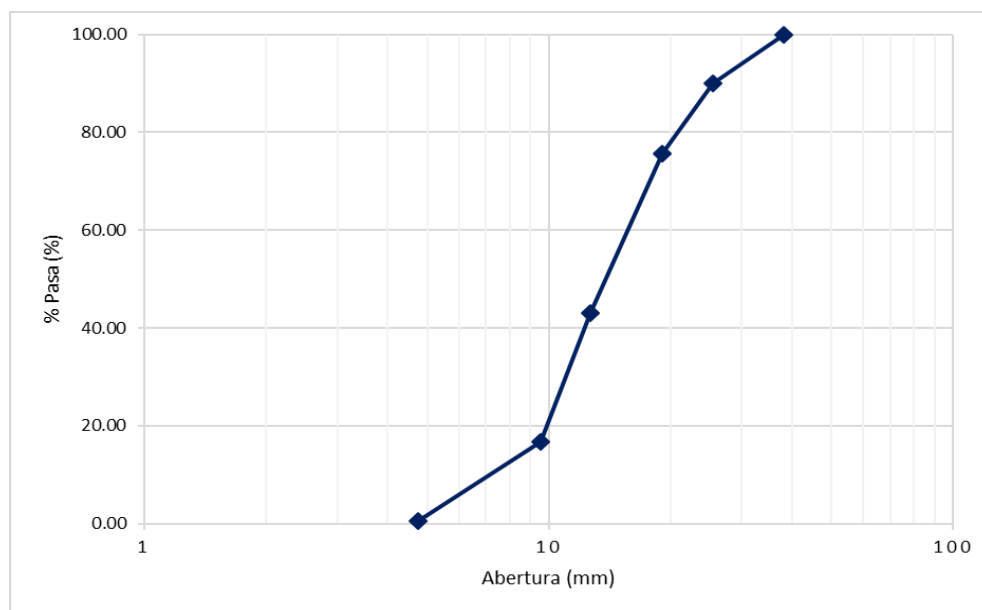
Tabla 17. Resultados obtenidos del análisis granulométrico de la grava

Tamices	mm	Peso retenido (g)	% retenido	Retenido acumulado	% Pasa
1 1/2"	38.1	0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	99.7	10.03	10.03	89.97
3/4"	19.05	143.1	14.39	24.42	75.58
1/2"	12.7	323.4	32.53	56.95	43.05
3/8"	9.53	261.1	26.26	83.21	16.79
#4	4.76	161.8	16.27	99.49	0.51
Pasa #4		5.1	0.51	100.00	0.00
Total		994.2	100		

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se hizo la curva granulométrica de la arena, graficando la abertura del tamiz vs el porcentaje que pasa para cada tamaño, como se observa a continuación:

Figura 5. Curva granulométrica de la grava



Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la gráfica anterior, se encontró que la grava presenta buena gradación cumpliendo con lo estipulado en la norma INV. E 213-13 (INVIAS, 2013).

10 FABRICACIÓN DE MUESTRAS

En el presente capítulo, se presentará el diseño de mezcla, y la fundida de las muestras de concreto en laboratorio.

10.1 DISEÑO DE MEZCLA

De acuerdo con las características de las materias primas (cemento, arena y grava) se hizo un diseño de mezcla para un concreto MR 40 kg/cm². Para tal fin, se utilizó la metodología de diseño y selección de proporciones de la mezcla del Instituto Americano del Concreto (ACI por sus siglas en Ingles) (ACI, 2022). A continuación, se detalla paso a paso como fue desarrollado el diseño de mezcla.

10.1.1 Elección del asentamiento (slump) de la mezcla

En primer lugar, se determina el asentamiento (slump) que se desea en la mezcla. Para tal fin, se utilizan las recomendaciones de la Norma ACI 211.1, para pavimentos y placas de concreto, como se presenta a continuación en la tabla 18:

Tabla 18. Elección del asentamiento (slump)

Tipo de construcción	Slump, mm	
	Máximo	Mínimo
Zapatas y elementos de fundación	75	25
Caissons, muros y estribos.	75	25
Vigas y muros de edificaciones	100	25
Columnas de edificaciones	100	25
Pavimentos y placas	75	25
Concreto masivo	75	25

Fuente: Adaptado de Norma ACI 211.1 (ACI, 2022)

Por tanto, se definió un asentamiento de 50 mm (5 cm) para las mezclas de concreto en estado fresco.

10.1.2 Elección del TMN del agregado grueso y MF del agregado fino

Para el diseño de mezcla es necesario determinar el Tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso, y el Módulo de finura (MF) del agregado fino. Para tal fin, se toman los datos de granulometría del capítulo 9 del presente documento. De acuerdo con lo anterior, los datos de TMN y MF de los agregados son:

- **TMN grava** = 3/4" (19 mm)
- **MF arena** = 2.98

10.1.3 Determinación del contenido de aire y cantidad de agua de la mezcla

Posteriormente, se determina el contenido de aire y la cantidad de agua por m³ de mezcla de concreto, para un asentamiento específico. En este caso, se eligen los valores recomendados por la Norma ACI 211, en función del asentamiento (50 mm) y el TMN de la grava (3/4"), de acuerdo con la figura 6 que se presenta a continuación:

Figura 6. Contenido de aire y cantidad de agua de la mezcla

Agua, lb/yd ³ de concreto por tamaño máximo nominal del agregado						
Slump, inch	3/8 in.*	1/2 in.*	3/4 in.*	1 in.*	1-1/2 in.*	2 in.**
Contenido de agua						
1 a 2	350	335	315	300	275	260
3 a 4	385	365	340	325	300	285
6 a 7	410	385	360	340	315	300
Más de 7*	-	-	-	-	-	-
Cantidad aproximada de aire atrapado en el concreto, porcentaje	3	2.5	2	1.5	1	0.5

Fuente: Adaptado de Norma ACI 211.1 (ACI, 2022)

Por tanto, se tienen que la mezcla necesita 315 lb/yd³ de agua, lo cual equivale a 185 kg/m³ de agua. Así mismo, se determina que la mezcla de concreto contiene un 2% de aire atrapado.

10.1.4 Elección de la relación agua – cemento (a/c)

A continuación, se debe determinar la relación agua – cemento (a/c) que debe tener la mezcla de concreto.

Para tal fin, se utiliza la recomendación de relación a/c de la Norma ACI 211. Sin embargo, esta norma utiliza referencias en resistencia a la compresión. Por tal motivo, se utiliza la especificación para una resistencia a la compresión de 40 MPa (400 kg/cm²); la cual debe garantizar un MR de 40 kg/cm² (resistencia a la flexión). La elección de la relación a/c se presenta a continuación en la tabla 19:

Tabla 19. Elección de la relación a/c

Resistencia a la compresión a los 28 días, MPa*	Relación agua/cemento, por masa	
	Sin incorporador de aire	Con incorporador de aire
40	0.42	-
35	0.47	0.39
30	0.54	0.45
25	0.61	0.52
20	0.69	0.60
15	0.79	0.70

Fuente: Adaptado de Norma ACI 211.1 (ACI, 2022)

Por tal motivo, las mezclas de concreto se trabajarán con una relación agua – cemento (a/c) de 0.42.

10.1.5 Cálculo del contenido de cemento

Como ya se determinó el contenido de agua, y la relación a/c, ahora se debe determinar el contenido de cemento de la mezcla. Esto se hizo como la relación entre a cantidad de agua y la relación a/c, de la siguiente forma:

$$c = \frac{a}{a/c} = \frac{185 \text{ kg}}{0.42}$$

$$c = 440.5 \text{ kg}$$

Por tal motivo, el contenido de cemento a utilizar, es de 440 kg por m³ de mezcla de concreto.

10.1.6 Estimación del contenido de agregado grueso y fino

Para finalizar con el diseño de mezcla, se determinan las proporciones de agregado fino y grueso de la mezcla de concreto. Para tal fin, se utilizó la recomendación de la Norma ACI 211, para la proporción de agregados finos y gruesos en función del MF (Modulo de finura) de la arena, y del TMN (tamaño máximo nominal) de la grava, como se presenta a continuación en la tabla 20:

Tabla 20. Proporciones de agregado fino y grueso

Tamaño máximo nominal del agregado, mm	Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura del agregado fino*			
	2.40	2.60	2.80	3.00
10	0.5	0.48	0.46	0.44
14	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.64	0.62	0.60
28	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.75	0.73	0.71	0.69
56	0.78	0.76	0.74	0.72
80	0.82	0.8	0.78	0.76
15	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Adaptado de Norma ACI 211.1 (ACI, 2022)

De acuerdo con lo anterior, se determina un contenido de grava de 0.60, y un contenido de arena de 0.40. Lo anterior significa que, de todo el volumen de agregados en la mezcla de concreto, el 60% corresponde a grava, mientras que el 40% corresponde a arena.

10.1.7 Diseño de mezcla de control

De acuerdo con el diseño realizado, a continuación, en la tabla 21, se define el diseño de la mezcla de control para 1 m³ de concreto, utilizado en la presente investigación:

Tabla 21. Diseño de mezcla de control

	Masa (kg)	Volumen (m ³)
Cemento (kg)	440.5	0.146
Agua (kg)	185.0	0.185
Arena (kg)	722.7	0.268
Grava (kg)	963.5	0.401
Total	2311.7	1.00

Fuente: Elaboración propia

10.1.8 Ajuste por uso de plastificante

Debido a la baja relación a/c que tiene el diseño de mezcla, no se puede garantizar la manejabilidad (asentamiento) de la mezcla en estado fresco. De acuerdo con Matallana, mezclas de concreto con bajas relaciones a/c, “se tornan rígidas y poco trabajables (manejables), debido a que hay escaso lubricante entre las partículas de agregado” (Matallana, 2019). Por tal motivo, fue necesario utilizar un aditivo plastificante en la fabricación de las mezclas de concreto, de tal forma que se garantizará un asentamiento (slump) mínimo de 50 mm.

Para tal fin, se utilizó SikaPlast ® de Sika, producto que es un aditivo líquido, compuesto por resinas sintéticas y polímeros, que funciona como reductor de agua para el concreto, y que puede emplearse como plastificante (Sika Colombia, 2017). De acuerdo con la hoja

técnica del producto, el fabricante recomienda utilizar entre 0.2% y 0.8% del peso de cemento. Por tal motivo, se utilizó un 0.5% de aditivo; esto significa que para 440.5 kg de cemento, se utilizaron 2.2 kg de SikaPlast, por m^3 de mezcla de concreto. Este valor se reemplaza por la misma cantidad del agua de mezcla que se presenta en la Tabla 21.

10.1.9 Modificación del diseño con refuerzo de fibra

De acuerdo con los objetivos de la presente investigación, se deben incluir diferentes contenidos de fibras PET recicladas. Para tal fin, es necesario definir la cantidad de fibras que se deben incluir en las mezclas de concreto.

Diferentes autores han estudiado el uso de fibras en concreto, principalmente como refuerzo para soportar esfuerzos de cortante; de los resultados obtenidos han definido los límites de uso de las fibras, las cuales varían principalmente en función del material que las componen. En ese sentido, se pueden definir los siguientes límites (Johnston, 2010):

- Para fibras de polipropileno y vidrio se recomienda usar entre 1 kg y 6 kg de fibras por 1m^3 de concreto.
- Para fibras de acero se recomienda usar entre 10 kg y 25 kg de fibras por 1 m^3 de concreto.
- Para fibras sintéticas se recomienda usar entre 8 kg y 18 kg de fibras por 1 m^3 de concreto
- Para fibras naturales se recomienda usar entre 1 kg y 5 kg de fibras por 1m^3 de concreto.

Para la presente investigación, se tienen fibras PET (tereftalato de polietileno - ver capítulo 8 del presente documento). Por tal motivo, se definieron tres (3) proporciones de adición de fibras: 1kg, 2kg, y 3kg de fibras por 1 m^3 de mezcla de concreto.

En ese orden de ideas, se tienen 4 mezclas diferentes a evaluar: 1) mezcla de **CONTROL** (sin fibras); 2) mezcla **PET 1** (con 1 kg/m^3 de fibras PET); 3) mezcla **PET 2** (con 2 kg/m^3 de fibras PET); y 4) mezcla **PET 3** (con 3 kg/m^3 de fibras PET).

10.1.10 Proporciones de mezcla

De acuerdo con el diseño de mezcla realizado, se definieron todas las proporciones de cada uno de los materiales para 1 m³ de concreto. Posteriormente, se hizo la corrección del diseño debido a la diferencia de densidad del PET. Los valores corregidos de acuerdo con las densidades de los materiales se presentan a continuación en la tabla 22:

Tabla 22. Diseño de mezcla de concreto

	CONTROL	PET 1	PET 2	PET 3
Cemento (kg)	440.5	440.1	439.7	439.4
Agua (kg)	183.0	182.8	182.7	182.5
Arena (kg)	722.7	722.1	721.6	720.9
Grava (kg)	963.5	962.7	961.9	961.2
Plastificante (kg)	2.2	2.2	2.2	2.2
Fibra (kg)	0.0	1.0	2.0	3.0

Fuente: Elaboración propia

10.2 FUNDIDA DE MUESTRAS

De acuerdo con el diseño de mezclas definitivo, se fundieron todas las muestras de concreto. En primer lugar, se fabricaron las muestras de control, y se prosiguió con las muestras PET1, PET2, y PET3. Todas las muestras se fundieron en un total de cuatro (4) días, utilizando el mismo tipo de materias primas (cemento, arena y grava), y en el mismo laboratorio, para evitar dispersión de los datos.

Para cada mezcla, se fundieron un total de: 8 viguetas de 15cm x 15 cm x 52 cm, para evaluar evolución del Módulo de Rotura (MR) a los 7 días, 14 días, 21 días, y 28 días (2 repeticiones por cada edad); 6 cilindros de 15 cm x 30 cm, para evaluar la evaluación de la resistencia a la compresión (f'_c) del concreto a los 7 días, 14 días y 28 días (2 repeticiones por cada edad); y 2 cilindros de 15 cm x 30 cm, para evaluar el módulo de elasticidad del concreto (E_c) a los 28 días. Por tanto, el total de muestras fabricadas se presenta a continuación en la tabla 23:

Tabla 23. Total, de muestras fabricadas

Mezcla	Viguetas - MR	Cilindros - f'c	Cilindros - E _c	Total
CONTROL	8	6	2	16
PET1	8	6	2	16
PET2	8	6	2	16
PET3	8	6	2	16
TOTAL				64

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra el proceso de elaboración de las muestras:

10.2.1 Mezcla de materias primas

Para la fabricación de las mezclas de concreto se siguieron las recomendaciones de la Norma INV E-401 (INVIAS, 2013). En primer lugar, se mezclaron los agregados finos y gruesos, con tal de obtener una distribución uniforme de los materiales:

Figura 7. Mezcla de agregados

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se introdujeron todos los materiales (agregados, cemento, agua y plastificante) en la mezcladora, y se mezcló todo por aproximadamente 3 min (para

garantizar una correcta distribución de las materias primas y evitar segregación); posteriormente, se extrajo el material en bandejas, y se midió el slump (asentamiento) de las mezclas de concreto:

Figura 8. Mezcla de concreto en estado fresco



Fuente: Elaboración propia

Paralelamente, se prepararon los moldes para fabricación de las muestras, en total, para cada mezcla se prepararon dieciséis (16) moldes (8 viguetas y 8 cilindros), los cuales se humedecieron con desmoldante para evitar dañar las muestras de concreto.

Figura 9. Moldes para fabricación de muestras



Fuente: Elaboración propia

10.2.2 Fabricación de las muestras

En total, para cada mezcla se fabricaron 8 vigueta y 8 cilindros. En el caso de las viguetas, el llenado se hizo en dos (2) capas, con 50 golpes por capa.

Figura 10. Fabricación de viguetas de concreto



Fuente: Elaboración propia

En el caso de los cilindros el llenado se hizo en tres (3) capas, con 25 golpes por cada capa de material.

Figura 11. Fabricación de cilindros de concreto



Fuente: Elaboración propia

10.2.3 Desmolde y curado de muestras

Después de 18 horas, se hizo el desmolde de las probetas, y se dispusieron sumergidas, para un correcto curado (INVIAS, 2013).

Figura 12. Desmolde de muestras



Fuente: Elaboración propia

Todas las muestras permanecieron sumergidas hasta el día del ensayo de resistencia (7, 14, 21 o 28, según corresponda).

Figura 13. Curado de muestras



Fuente: Elaboración propia

10.2.4 Muestras para ensayo de resistencia

El día en que cada muestra cumplió la edad para ensayo, se sacaron los especímenes de curado sumergido, y se prepararon para los respectivos ensayos de resistencia.

Figura 14. Muestras cilíndricas para ensayo



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Viguetas para ensayo



Fuente: Elaboración propia

11 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de las muestras de concreto.

11.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En primer lugar, se realizó el ensayo de resistencia a la compresión (f'_c) en cilindros de concreto de 15 cm de diámetro x 30 cm de altura, de acuerdo con lo indicado en la norma INV E-410 (INVIAS, 2013), como se muestra en la figura 16:

Figura 16. Ensayo de resistencia a la compresión a 7 días



Fuente: Elaboración propia

El ensayo se hizo para las cuatro (4) mezclas estudiadas, y para un total de tres (3) edades: 7, 14 y 28 días. Para cada una de las mezclas estudiadas se hizo un total de dos (2) repeticiones.

Figura 17. Ensayo de resistencia a la compresión a 28 días

Fuente: Elaboración propia

Por tal motivo, para cada edad de ensayo, la resistencia a compresión del material se obtuvo como el promedio de dos ensayos por mezcla y por edad. A continuación, en la tabla 24, se presentan los resultados obtenidos para las muestras de control (sin fibras PET), a edades de 7, 14 y 28 días:

Tabla 24. Resultado ensayo resistencia a compresión para mezcla de CONTROL

Edad (días)	Resistencia a compresión (MPa)		CONTROL	
	Muestra 1	Muestra 2	Promedio	Desviación
7	26.4	26.5	26.5	0.08
14	29.2	29.8	29.5	0.40
28	36.2	37.6	36.9	1.00

Fuente: Elaboración propia

De igual forma, en la tabla 25, se presentan los resultados obtenidos para el ensayo de resistencia a compresión en las muestras de la mezcla PET1 (con 1 kg de fibra por 1 m³ de concreto):

Tabla 25. Resultado ensayo de resistencia a compresión para mezcla PET1

Edad (días)	Resistencia a compresión (MPa)		PET-1	
	Muestra 1	Muestra 2	Promedio	Desviación
7	27.5	27.3	27.4	0.12
14	31.3	32.2	31.8	0.66
28	40.5	39.7	40.1	0.62

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en la tabla 26 se presentan los resultados obtenidos para el ensayo de resistencia a compresión en las muestras de la mezcla PET2 (con 2 kg de fibra por 1 m³ de concreto):

Tabla 26. Resultado ensayo de resistencia a compresión para mezcla PET2

Edad (días)	Resistencia a compresión (MPa)		PET-2	
	Muestra 1	Muestra 2	Promedio	Desviación
7	29.7	30.7	30.2	0.68
14	34.9	34.0	34.4	0.60
28	41.5	42.7	42.1	0.87

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la tabla 27 se presentan los resultados obtenidos para el ensayo de resistencia a compresión en las muestras de la mezcla PET3 (con 3 kg de fibra por 1 m³ de concreto):

Tabla 27. Resultado ensayo de resistencia a compresión para mezcla PET3

Edad (días)	Resistencia a compresión (MPa)		PET-3	
	Muestra 1	Muestra 2	Promedio	Desviación
7	29.8	31.4	30.6	1.17
14	34.6	34.8	34.7	0.18
28	43.4	44.1	43.7	0.53

Fuente: Elaboración propia

11.2 MÓDULO DE ROTURA (MR)

En segundo lugar, se evaluó la resistencia a la flexión o módulo de rotura de las muestras de concreto, en viguetas de 15 cm x 15 cm x 52 cm, cargadas en los tercios, de acuerdo con las indicaciones de la Norma INV E-414 (INVIAS, 2013).

Figura 18. Ensayo de módulo de rotura (MR) en viguetas de concreto

Fuente: Elaboración propia

El ensayo se hizo para las cuatro (4) mezclas estudiadas, y para un total de cuatro (4) edades: 7, 14, 21 y 28 días. Para cada una de las mezclas estudiadas se hicieron un total

de dos (2) repeticiones. Para todas las muestras ensayadas, se garantizó que la falla ocurriera en el tercio central, como se muestra a continuación:

Figura 19. Falla de viguetas de concreto a flexión



Fuente: Elaboración propia

Para cada edad de ensayo, la resistencia a flexión – Módulo de Rotura del material se obtuvo como el promedio de dos ensayos por mezcla y por edad. A continuación, en la tabla 28 se presentan los resultados obtenidos para las muestras de control (sin fibras PET), a edades de 7, 14, 21 y 28 días:

Tabla 28. Resultados ensayos de módulo de rotura (MR) en muestras de CONTROL

Edad (días)	MR (kg/cm ²)	Desviación
7	33.9	1.9
14	39.3	1.7
21	40.2	2.1
28	40.3	2.2

Fuente: Elaboración propia

De igual forma, se presentan los resultados de resistencia la flexión – Modulo de rotura (MR) del material, para las muestras PET1 (con 1 kg de fibra por 1 m³ de concreto) en la tabla 29:

Tabla 29. Resultados ensayos de módulo de rotura (MR) en muestras PET1

Edad (días)	MR (kg/cm ²)	Desviación
7	37.1	2.1
14	43.3	2.3
21	47.1	3.0
28	48.2	3.1

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se presentan los resultados de resistencia la flexión – Modulo de rotura (MR) del material, para las muestras PET2 (con 2 kg de fibra por 1 m³ de concreto):

Tabla 30. Resultados ensayos de módulo de rotura (MR) en muestras PET2

Edad (días)	MR (kg/cm ²)	Desviación
7	37.6	2.3
14	43.7	2.2
21	49.1	2.7
28	49.8	3.0

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se presentan los resultados de resistencia la flexión – Modulo de rotura (MR) del material, en la tabla 31 para las muestras PET3 (con 3 kg de fibra por 1 m³ de concreto):

Tabla 31. Resultados ensayos de módulo de rotura (MR) en muestras PET3

Edad (días)	MR (kg/cm ²)	Desviación
7	39.8	2.4
14	45.1	2.6
21	51.7	3.1
28	53.7	3.3

Fuente: Elaboración propia

11.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD

Para terminar, el módulo de elasticidad del material se evaluó en cilindros de concreto de 15 cm de diámetro x 30 cm de altura, de acuerdo con lo indicado en la norma INV E-424 (INVIAS, 2013), como se muestra en la siguiente figura:

Figura 20. Ensayo de módulo de elasticidad del concreto

Fuente: Elaboración propia

El ensayo se hizo para las cuatro (4) mezclas estudiadas, todas a una edad de 28 días; para cada una de las mezclas estudiadas se hicieron un total de dos (2) repeticiones del ensayo. A continuación, en la tabla 32, se presentan los resultados de módulo de elasticidad obtenidos:

Tabla 32. Resultados de ensayo de módulo de elasticidad (E)

Mezcla	Módulo de elasticidad - E (MPa)			
	Muestra 1	Muestra 2	Promedio	Desviación
CONTROL	24151.0	24976.7	24563.8	583.89
PET1	24761.2	23933.7	24347.5	585.12
PET2	24675.8	23876.5	24276.2	565.14
PET3	23639.3	24450.3	24044.8	573.45

Fuente: Elaboración propia

12 DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO DE LOSAS DE PAVIMENTO RÍGIDO POR “MEF”

Para el presente trabajo, uno de los objetivos es determinar la influencia de las fibras PET en el comportamiento de losas de pavimento rígido, razón por la cual, se desarrolló un modelo numérico por medio del método de los elementos finitos (MEF), utilizando el software SAP2000® de la empresa CSI (Computers and Structures Inc), el cual es un programa de elementos finitos con interfaz gráfico, preparado para realizar la modelación, análisis y dimensionamiento de problemas de ingeniería (CSI, 2016). En el modelo desarrollado se simulan las condiciones de trabajo de una losa de pavimento, y en función de los parámetros de los materiales utilizados en su construcción (caracterizados en los anteriores capítulos), se determina la influencia de las fibras PET en el comportamiento de la estructura de pavimento.

12.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

12.1.1 Definición del tipo de vía

En primer lugar, se diseñó una estructura de pavimento rígido para una autopista interurbana de primera importancia, con una velocidad de diseño promedio de 40 km/h y un ancho de carril de 3.50 m. Para tal fin se utilizó el Manual de diseño de pavimentos de concreto del ICPC y el INVIAS (Londoño & Alvarez, 2008).

12.1.2 Tránsito y periodo de Diseño

Para tal fin, se definió la categoría de la vía, se determinó trabajar en una autopista interurbana nueva de primera importancia categoría 2, que tiene un tránsito promedio diario de 1000, y según lo cual el total de ejes de 8.2 t es de 2.500.000 tal y como se observa en la tabla 33. (Londoño & Alvarez, 2008)

Tabla 33. Determinación de Tránsito y periodo de Diseño

Categoría	Tipo de Vía	TPDs	Ejes acumulados de 8.2 t
T ₀	(Vt) – (E)	0 a 200	< 1'000.000
T ₁	(Vp) – (M ó A) – (CC)	201 a 500	1'000.000 a 1'500.000
T ₂	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	501 a 1.000	1'500.000 a 5'000.000
T ₃	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	1.001 a 2.500	5'000.000 a 9'000.000
T ₄	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	2.501 a 5.000	9'000.000 a 17'000.000
T ₅	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	5.001 a 10.000	17'000.000 a 25'000.000
T ₆	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	Más de 10.001	25'000.000 a 100'000.000

Fuente (Londoño & Alvarez, 2008)

12.1.3 Cálculo de la Subrasante

Así mismo, se definió una subrasante en función de la relación del CBR y el módulo de reacción de la subrasante K que es el parámetro más usado para las ecuaciones de diseño de pavimentos; en este caso se determinó que la clasificación de la subrasante se encuentra en clase S2, ya que cuenta con un CBR de 5% y un módulo resiliente de 500 kg/cm², tal y como se observa en la tabla 34:

Tabla 34. Calculo Subrasante

Clase o Tipo	CBR (%)	Módulo resiliente (kg/cm ²)
S1	< 2	< 200
S2	2 - 5	200 – 500
S3	5 - 10	500 – 1.000
S4	20 - 10	1.000 – 2.000
S5	> 20	> 2.000

Fuente (Londoño & Alvarez, 2008)

12.1.4 Material de Soporte para el pavimento

Como base de soporte de pavimentos se empleó base granular tal y como se observa en la tabla 35:

Tabla 35. Determinación material de Soporte

Denominación	Descripción
SN	Subrasante Natural
BG	Base Granular
BEC	Base Estabilizada con Cemento

Fuente (Londoño & Alvarez, 2008)

12.1.5 Características de concreto para pavimentos

Como valores de resistencia del concreto empleado en la construcción de losas en concreto, se empleó los valores de resistencias de concreto a flexo-tracción (módulo de rotura) estableciendo como valor de diseño 40 kg/cm² como se observa en la tabla 36:

Tabla 36 Definición de características del concreto

Descripción	Resistencia a la flexión (kg/cm ²)
MR1	38
MR2	40
MR3	42
MR4	45

Fuente (Londoño & Alvarez, 2008)

12.1.6 Juntas

Las juntas son parte importante de los pavimentos de concreto y se hacen con el fin de controlar los esfuerzos que se presentan en el concreto como consecuencia de los movimientos de contracción y de dilatación del material y a los cambios de temperatura y humedad, entre la cara superficial y la de soporte de las losas de concreto

12.1.7 Transferencia de cargas entre losas

Hay dos factores que influyen en la determinación del espesor de las losas de concreto y son la presencia de pasadores de carga (dovelas) en las juntas transversales y los confinamientos laterales del pavimento, así como las bermas tal y como se observa en la tabla 37.

Tabla 37 Transferencia de cargas entre losas

Denominación	Descripción
D	Dovelas
B	Bermas
No D	No Dovelas
No B	No Bermas

Fuente (Londoño & Alvarez, 2008)

12.1.8 Espesor de losa de concreto de acuerdo con la combinación de variables

De acuerdo con los datos antes obtenidos se y de acuerdo con la combinación de variables con tránsito tipo 2 como factor principal se encontró que espesor de la losa de concreto es de 23 cm, tal y como se observa en la tabla 38:

Tabla 38 Determinación del espesor de la losa

ESPEORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																						
Tránsito T2																						
		S1					S2				S3				S4				S5			
		D y B	D y no B	No D y B	No D y no B		D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B
SN	MR1	25	29	25	29	24	28	24	28	22	26	22	26	22	25	22	25	21	25	22	25	
	MR2	24	28	25	28	24	27	24	27	22	25	22	25	21	24	22	24	21	24	22	24	
	MR3	24	27	25	27	24	28	26	28	21	24	22	24	20	23	22	23	20	23	22	23	
	MR4	22	26	25	26	23	27	26	27	20	23	22	24	19	22	22	23	19	22	22	23	
BG	MR1	24	28	24	28	23	27	23	27	22	25	22	25	21	25	22	25	21	24	21	24	
	MR2	23	27	23	27	23	26	23	26	21	24	22	24	21	24	22	24	20	23	21	23	
	MR3	22	26	23	26	23	27	25	27	20	24	22	24	20	23	22	23	20	23	21	23	
	MR4	21	25	23	25	22	26	25	26	19	23	22	23	19	22	22	23	19	22	21	23	
BEC	MR1	21	24	21	24	21	24	21	24	19	22	21	22	19	22	20	22	19	21	20	22	
	MR2	20	23	21	23	20	23	21	23	19	21	21	22	18	21	20	22	18	20	20	22	
	MR3	19	23	21	23	20	23	23	24	18	21	21	22	18	20	20	22	17	20	20	22	
	MR4	18	22	21	23	19	22	23	24	17	20	21	22	17	19	20	22	17	19	20	22	

Fuente (Londoño & Alvarez, 2008)

12.1.9 Estructura de pavimento

La determinación de la estructura de pavimento rígido elaborada bajo el manual de bajos volúmenes de tránsito elaborado por el ICPC queda definido de la tabla 39:

Tabla 39 Datos finales de la estructura de pavimento

Espesor de la base granular (cm)	15
Módulo de reacción de la subrasante (MPa/m)	39.25
K combinado (MPa/m)	49.0
Módulo de rotura del concreto (MPa)	4.03
Espesor de la losa (cm)	23
La losa debe estar confinada y la junta con pasadores.	

Fuente: Elaboración propia

Con base en los datos obtenidos y teniendo en cuenta que para la presente investigación el concreto de referencia sin fibra es de 40.3 kg/cm^2 , los datos de entrada para el diseño de la estructura de pavimento se presentan en la tabla 40:

Tabla 40. Datos de entrada para diseño de estructura de pavimento

PARÁMETRO	INDICADOR	PARÁMETROS INVIAS
Categoría vía	Autopista interurbana de primera importancia.	Vía principal (Vp)
Vía doble calzada de 4 carriles	4 carriles	Carreteras multicarril (MC)
Ancho del carril (m)	3.50	Medias
Bermas	SI	B
Tránsito 8.2 Ton	2,500,000	Tránsito - T2
CBR subrasante (%)	5	Tipo - S2
Espesor de la base granular (cm)	15	BG - 15
Módulo de rotura del concreto (MPa)	4.03	MR2
Dovelas	SI	D
Módulo de elasticidad del concreto (MPa)	24563.8	
Días promedio que llueve al año	107	
Velocidad media de VC (%) (km/h)	40	
Calidad del drenaje	Regular	
Losa confinada		
RESUMEN DATOS: T2-S2-BG-D-B		

Fuente: Elaboración propia

12.2 DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO POR “MEF”

Para el desarrollo del modelo numérico, se utilizó el método de los elementos finitos (MEF). En el modelo se asignaron las propiedades de geometría y materiales definidas

en la Tabla 39 y la Tabla 40. Así mismo, se asignaron las cargas de ejes transitando sobre las losas de pavimento rígido. Posteriormente, se modificaron las propiedades del concreto de las losas (Resistencia a compresión (f'_c), resistencia a flexión (MR), y módulo de elasticidad (E)); y para cada modelo desarrollado se evaluaron cuatro resultados: deformaciones de la losa, valores de fuerza cortante, valores de momento, y esfuerzos sobre la base granular. Para el desarrollo del modelo numérico por el método de los elementos finitos “MEF” se utilizó el software SAP2000® de la empresa CSI (Computers and Structures Inc). A continuación, se presenta como se formuló el modelo:

12.2.1 Creación de los materiales

En primer lugar, se definen las propiedades de los materiales. En este caso específico, se definieron las propiedades físicas y mecánicas del concreto de la losa, las cuales se caracterizaron en la sección 11 del presente documento. Para el caso de la mezcla de concreto de control, los valores de las propiedades caracterizadas se presentan a continuación:

- **Densidad** = 23.1 kN/m³
- **Resistencia a la compresión (f'_c)**= 36.9 MPa
- **Resistencia a la flexión – Modulo de rotura (MR)** = 40.3 kg/cm² (4.0 MPa)
- **Módulo de elasticidad (E)**= 24563.8 MPa

Por tal motivo, se desarrolla el modelo de control con dichos valores como se muestra en la siguiente figura; y posteriormente se hacen variaciones en las propiedades para cada una de las mezclas caracterizadas en laboratorio. Esto significa que se desarrollan 4 diferentes modelos, todas con la misma geometría y cargas, pero con variaciones en las propiedades de los materiales (Control, PET1, PET2, y PET3).

Figura 21. Asignación de propiedades materiales en modelo

General Data

Material Name: MR 40

Material Type: Concrete

Directional Symmetry Type: Isotropic

Material Display Color: [Color Selection] Change...

Material Notes: [Text Area] Modify/Show Notes...

Material Weight and Mass

☒ Specify Weight Density ☐ Specify Mass Density

Weight per Unit Volume: 23,1 kN/m³

Mass per Unit Volume: 2355,544 kg/m³

Mechanical Property Data

Modulus of Elasticity, E: 24563,8 MPa

Poisson's Ratio, U: 0,2

Coefficient of Thermal Expansion, A: 0,0000099 1/C

Shear Modulus, G: 10234,92 MPa

Design Property Data

Modify/Show Material Property Design Data...

Advanced Material Property Data

Nonlinear Material Data... Material Damping Properties... Time Dependent Properties...

Modulus of Rupture for Cracked Deflections

☐ Program Default (Based on Concrete Slab Design Code)

☒ User Specified: 4,03 MPa

OK Cancel

Fuente: Elaboración propia

12.2.2 Geometría de la losa

Posteriormente, se define la geometría de la losa de pavimento rígido. De acuerdo con los resultados obtenidos en la sección 12.1, se definió que la losa es de 23 cm (0.23m), lo cual se define en el modelo como una sección de placa (slab) tipo Shell, con un espesor de 230 mm, como se presenta a continuación:

Figura 22. Definición de la geometría de la losa

The image shows a software dialog box titled "Definición de la geometría de la losa". It is divided into two main sections: "General Data" and "Property Data".

General Data:

- Property Name: LOSA
- Slab Material: MR 40 PET3 (with a dropdown arrow and an ellipsis button)
- Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...
- Modeling Type: Shell-Thin (with a dropdown arrow)
- Modifiers (Currently Default): Modify/Show...
- Display Color: A blue square followed by a Change... button
- Property Notes: Modify/Show...

Property Data:

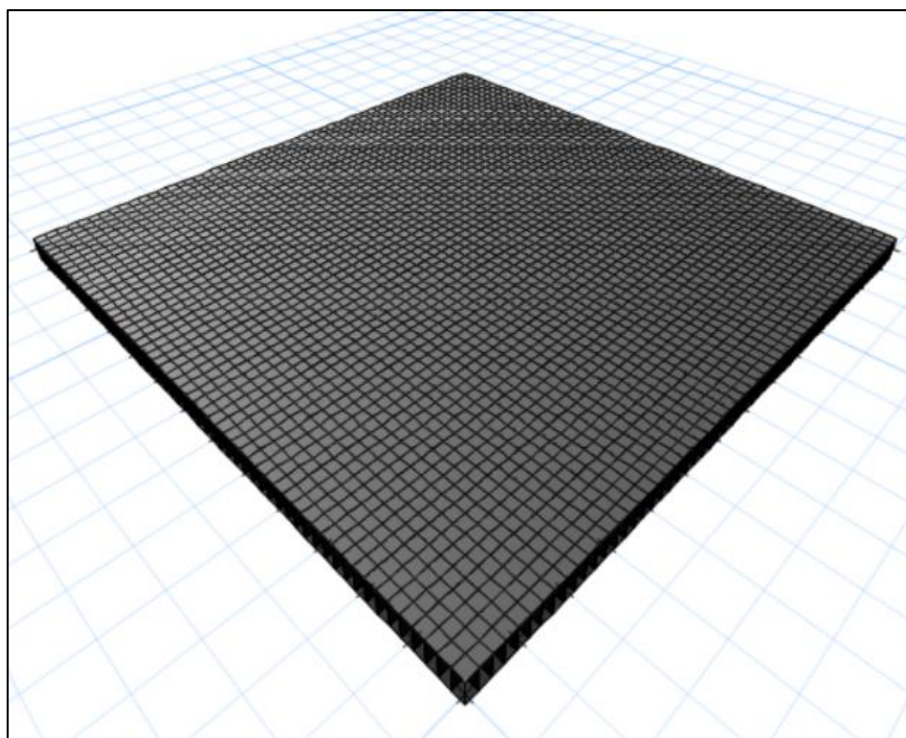
- Type: Slab (with a dropdown arrow)
- Thickness: 230 mm

At the bottom of the dialog are two buttons: OK and Cancel.

Fuente: Elaboración propia

La placa se discretiza mediante la subdivisión de los elementos en un mallado (mesh) de 10 cm x 10 cm (0.10m x 0.10m), para desarrollar el análisis por elementos finitos. Por tal motivo, la losa queda de la siguiente forma:

Figura 23. Geometría de la losa en 3D



Fuente: Elaboración propia

12.2.3 Generación de los apoyos

Como tal, la losa no está sobre apoyos, sino que se apoya directamente sobre el suelo y la base granular. Por tal motivo, la losa se modela sobre un lecho elástico, el cual se asigna en el software a través de elementos tipo resorte de área que simulan la reacción suelo-estructura a través del módulo de reacción combinado de la subrasante y de la base granular (K combinado) definido en la sección 12.1.

En dicho caso, el módulo de reacción es 49.0 MPa/m, los cuales se asignaron en el modelo como 49000 kPa/m, tal y como se muestra a continuación:

Figura 24. Generación de módulo de reacción en el modelo

E Area Spring Property Data

General Data

Property Name: MOD REACCION

Display Color: Change...

Property Notes: Modify/Show Notes...

Spring Stiffness Options

☒ User Specified Stiffness and Nonlinearity

☐ Link Property (Link local axes are same as Area local axes)

☐ Based on Soil Profile

Spring Constants / Unit Area

Local 1 Direction: 49000 kN/m²

Local 2 Direction: 49000 kN/m²

Local 3 Direction (Compression Only): 49000 kN/m²

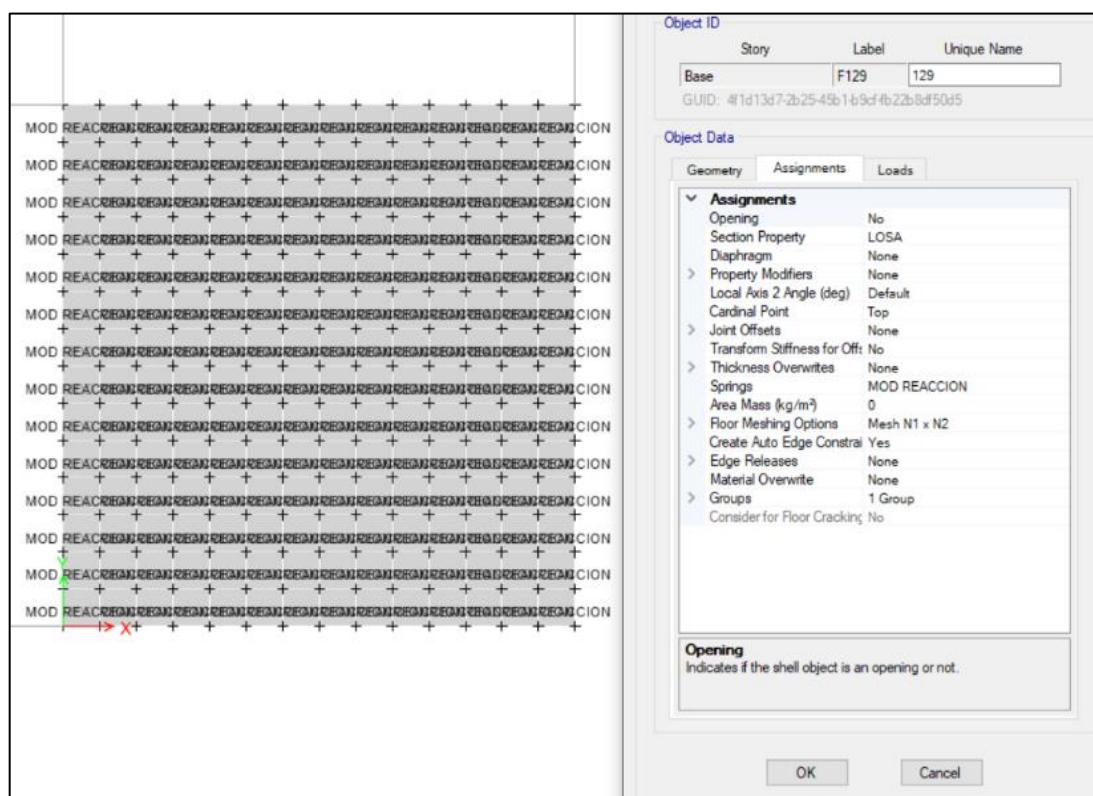
Nonlinear Option for Local 3 Direction

☐ None (Linear) ☒ Compression Only ☐ Tension Only

OK Cancel

Fuente: Elaboración propia

Este valor de módulo de reacción se asigna a todos los elementos de la losa tal y como se presenta a continuación. Los resortes de área se asignan en todas las direcciones del plano, aunque en el eje z se asignan solo para trabajar en compresión, debido a que la base granular solo puede trabajar a compresión.

Figura 25. Asignación de módulo de reacción en la losa

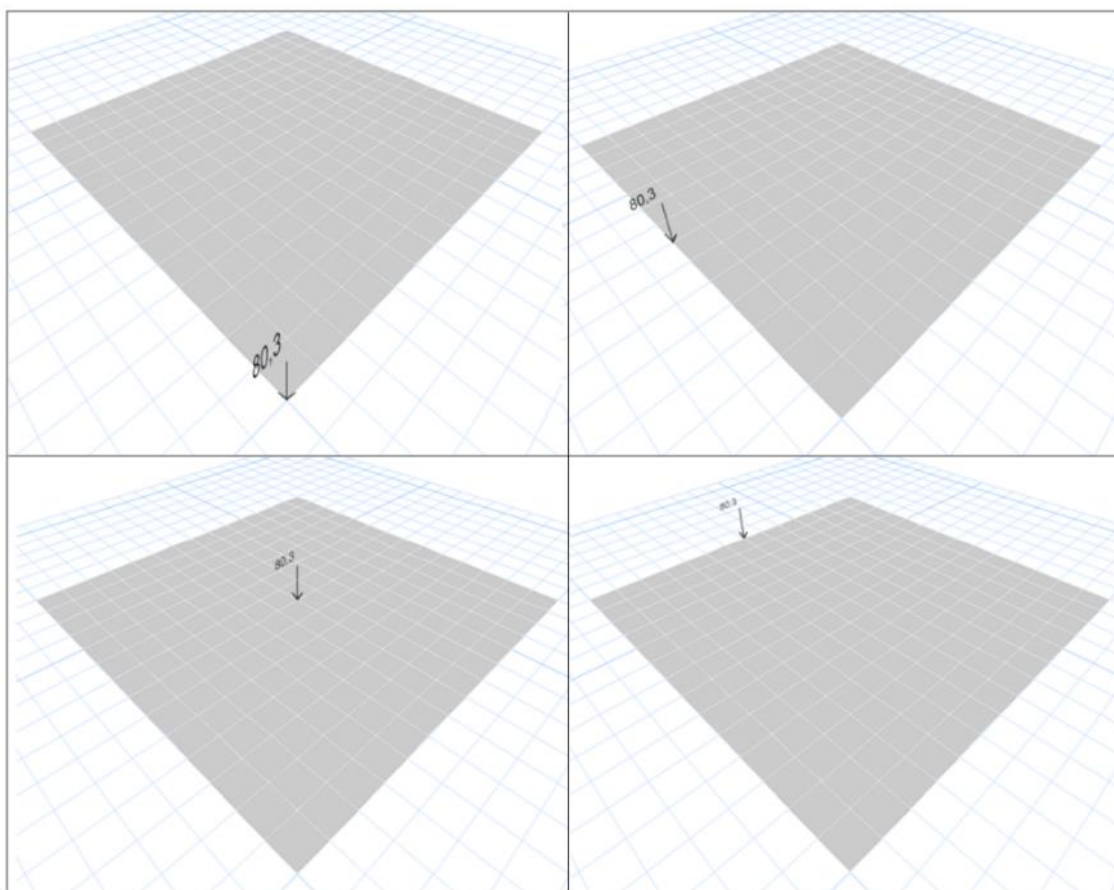
Fuente: Elaboración propia

12.2.4 Cargas sobre la losa

Para modelar las cargas sobre la losa de pavimento, se tomó el valor del eje 8.2 Ton (equivalente a 80.3 kN). Este valor del eje se asignó en diferentes posiciones de carga sobre la losa de pavimento, simulando el tránsito del eje sobre la losa.

Para tal fin, se generaron nueve (9) configuraciones diferentes de la carga transitando sobre la losa de pavimento, intentando simular las diferentes posiciones que va a tener el eje sobre el pavimento. A continuación, se presenta una imagen indicando como se asignaron las cargas sobre cada una de las líneas de tránsito de los ejes sobre la losa (debido a la gran cantidad de casos de carga, solo se muestran cuatro (4) posiciones del eje, en dos líneas de carga diferente):

Figura 26. Tránsito de ejes de carga sobre la losa



Fuente: Elaboración propia

12.2.5 Análisis de la losa

Para el análisis de la losa, se generaron en total 10 casos de carga, el primero corresponde al peso propio de la losa, el cual se calcula dentro de la rutina de solución del software, de acuerdo con la configuración geométrica de los elementos, y las propiedades de los materiales que se presentaron en las secciones 12.2.1 y 12.2.2 del presente documento.

Así mismo, se asignaron nueve (9) casos de carga, asociados a cada una de las líneas de tránsito de las cargas del eje. Todos los casos de carga utilizados en el análisis de la losa de pavimento se presentan a continuación:

Tabla 41. Casos de carga sobre la losa

Definiciones de casos de carga - Resumen	
Nombre	Tipo
PESO	Estática Lineal
EJES 1	Estática Lineal
EJES 2	Estática Lineal
EJES 3	Estática Lineal
EJES 4	Estática Lineal
EJES 5	Estática Lineal
EJES 6	Estática Lineal
EJES 7	Estática Lineal
EJES 8	Estática Lineal
EJES 9	Estática Lineal

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se generaron las combinaciones de carga para el análisis de la losa. En primer lugar, se generó una envolvente para incluir el efecto más crítico de las nueve (9) líneas de carga de tránsito. Posteriormente, la envolvente de la carga de tránsito se sumó al efecto del peso propio de la losa; ningún factor de carga fue incluido, debido a que se desea evaluar el comportamiento del material en condición de servicio. Las combinaciones utilizadas para el análisis del comportamiento de la losa se presentan a continuación:

Tabla 42. Combinaciones de carga sobre la losa de pavimento

Definición de combinación de cargas				
Nombre	Tipo	Is Auto	Nombre de la carga	SF
ENVOLVENTE EJES	sobre	No	EJES 1	1
ENVOLVENTE EJES			EJES 2	1
ENVOLVENTE EJES			EJES 3	1
ENVOLVENTE EJES			EJES 4	1
ENVOLVENTE EJES			EJES 5	1
ENVOLVENTE EJES			EJES 6	1
ENVOLVENTE EJES			EJES 7	1
ENVOLVENTE EJES			EJES 8	1
ENVOLVENTE EJES			EJES 9	1
ESFUERZOS SERVICIO	Adición lineal	No	PESO	1
ESFUERZOS SERVICIO			ENVOLVENTE EJES	1

Fuente: Elaboración propia

12.3 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA

A continuación, se presentan los modelos desarrollados, y los resultados obtenidos para cada caso.

12.3.1 Muestra de CONTROL

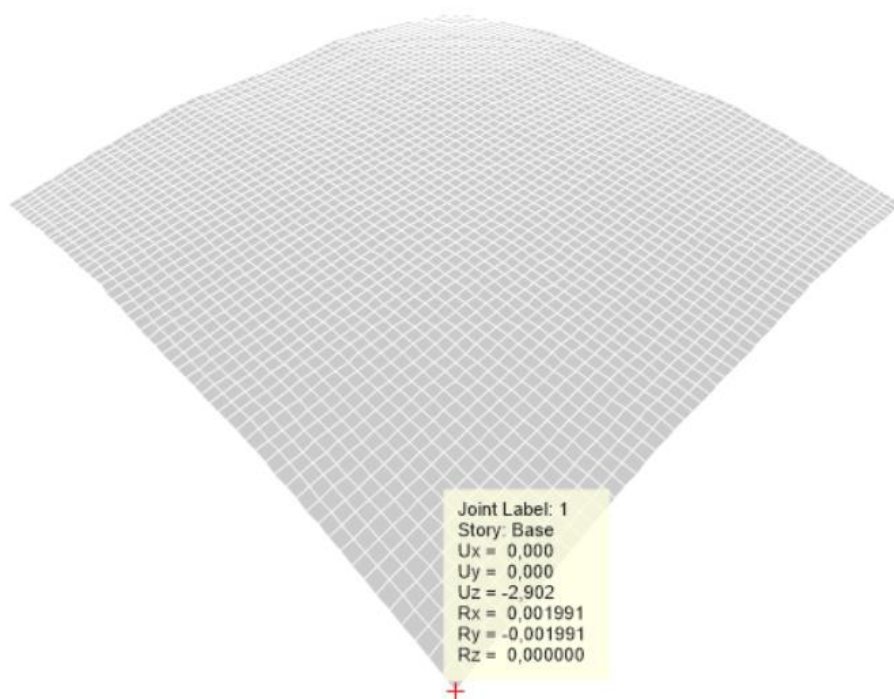
Para empezar, se desarrolló el modelo de la estructura de pavimento (como se presentó en la sección 12.2), para el concreto de las muestras de control, esto quiere decir sin fibras PET. Las propiedades del concreto de la losa para la muestra de control se presentan a continuación. En cuanto a las demás propiedades, se utilizaron las indicadas en la Tabla 40.

Tabla 43. Datos para modelo de pavimento de control

Resistencia a compresión (MPa)	36.9
Resistencia a flexión – Modulo de rotura (kg/cm²)	40.3
Módulo de elasticidad	24563.8

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, se obtienen las deflexiones de la losa en el rango elástico o determinadas en el programa SAP2000 como deformaciones de la losa; para tal fin se mide la deformación en cada punto y en sentido perpendicular a los ejes de la losa, tal y como se presentan en la siguiente figura:

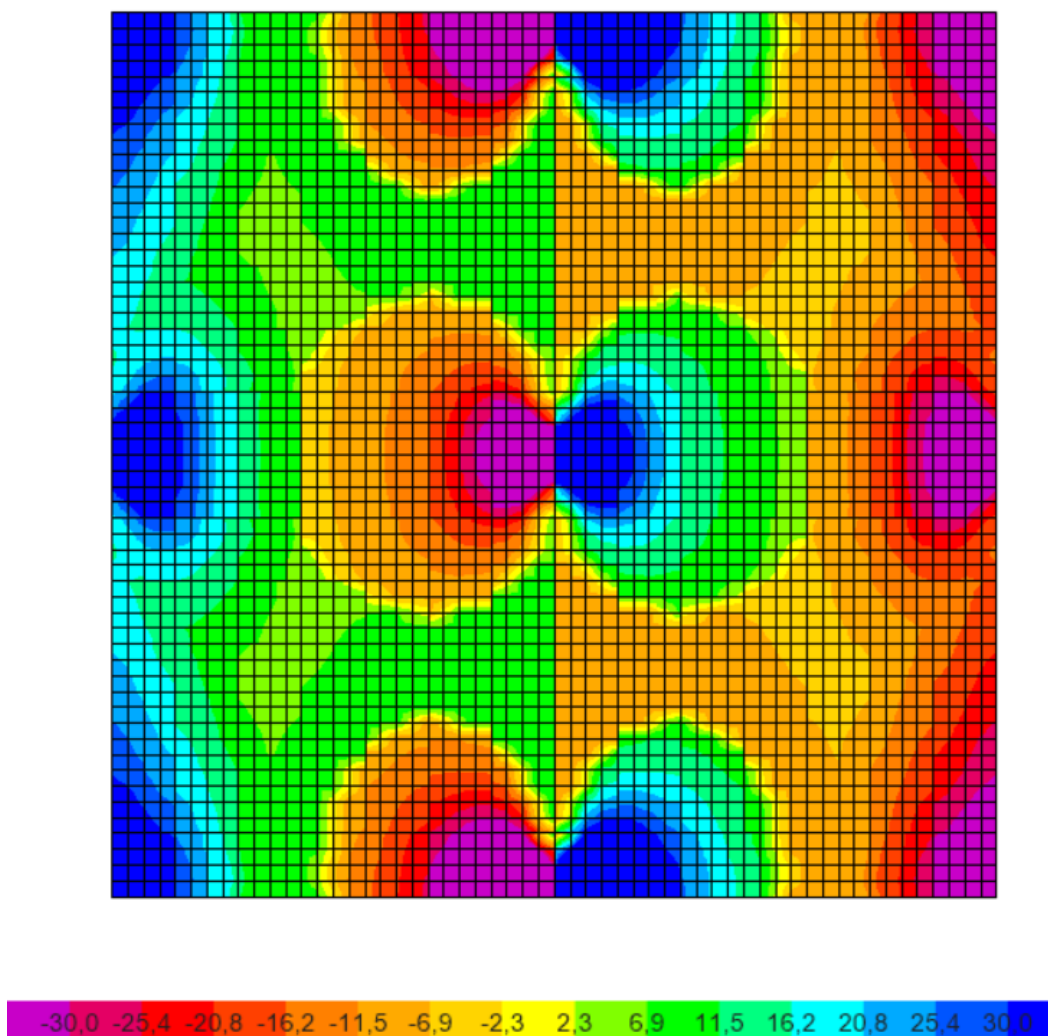
Figura 27. Deflexiones de la losa de CONTROL

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior significa que la mayor deflexión de la losa se presenta en las esquinas, y para las losas de concreto de control, dicho valor es de 2.902 mm.

Posteriormente, se obtuvo el diagrama de distribución de valores de esfuerzos de tensión en la losa de pavimento rígido, o fuerza cortante en el programa SAP2000, tal y como se presenta a continuación:

Figura 28. Valores de esfuerzos de tensión en la losa de CONTROL

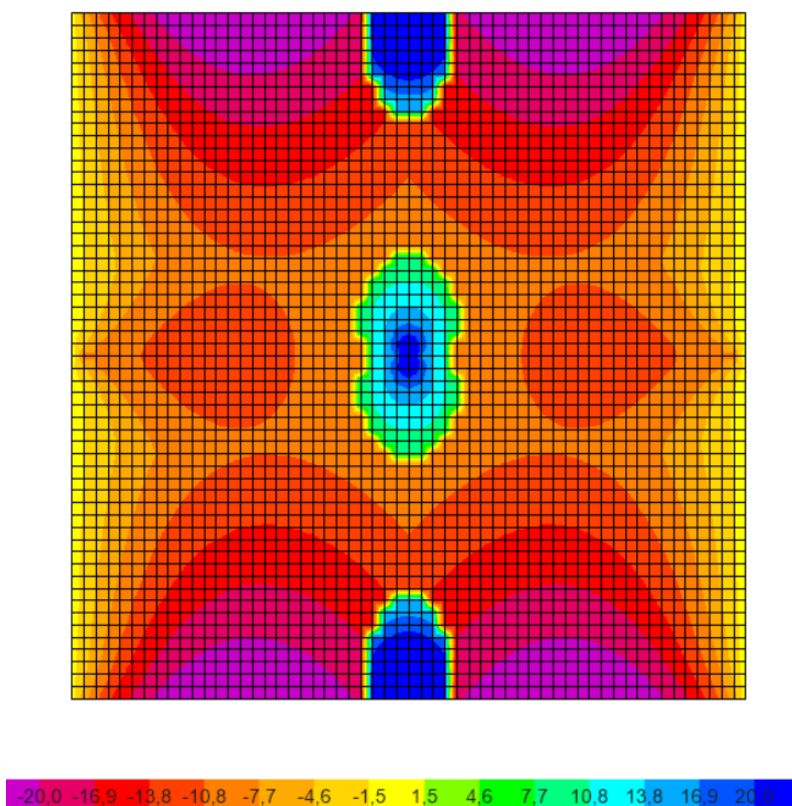


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el diagrama, se puede observar que los máximos esfuerzos de tensión se encuentran en el rango de los 36 kN; en el diagrama las concentraciones de esfuerzos de tensión se pueden observar en color azul y en color magenta, lo cual significa que los máximos esfuerzos de cortante se concentran debajo de las líneas de carga, aproximadamente en las secciones laterales y centrales de la losa.

De igual forma, se obtuvo el diagrama de distribución de valores de momento flector al interior de la losa de pavimento rígido (de forma similar al cortante), tal y como se presenta a continuación:

Figura 29. Valores de momento en la losa de CONTROL

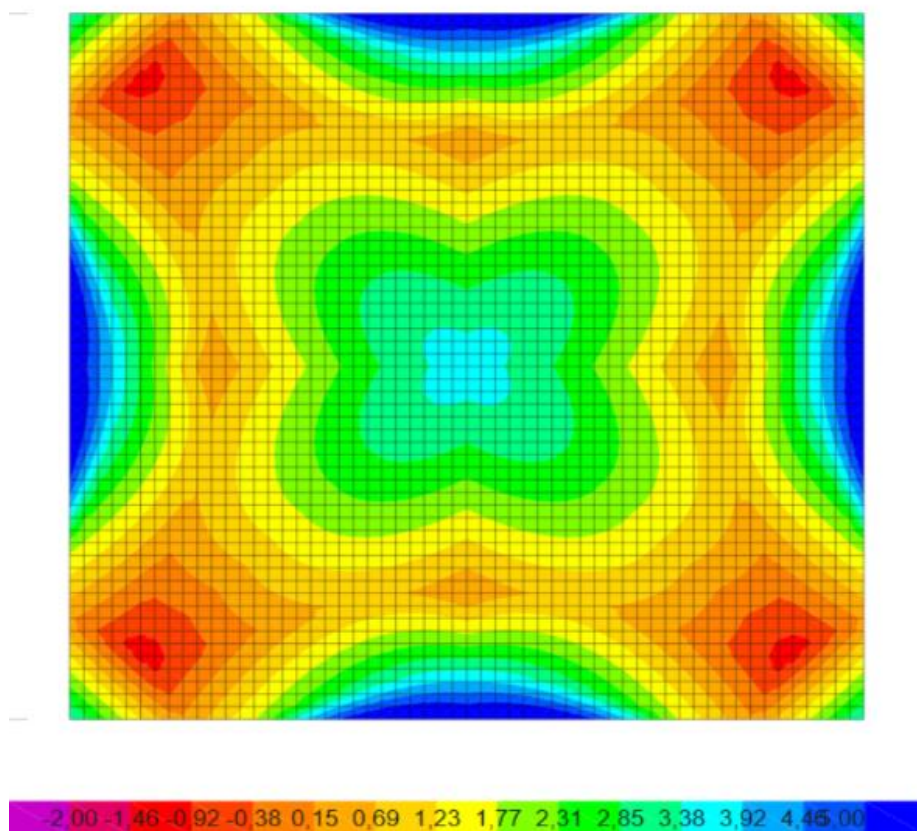


Fuente: Elaboración propia

En el caso de la distribución de valores de momento en la losa de pavimento, se puede observar que los valores máximos de momento flector son de 25 kN.m, los cuales se presentan principalmente en la parte central de la losa, como se puede observar en color azul y magenta en la figura. A diferencia del cortante, la distribución del momento flector en la losa no se concentra en las esquinas, sino tiende a concentrarse en la parte central de la misma, en la misma línea donde transitan las líneas de carga, y va disminuyendo hasta acercarse a zonas de momento flector cero (en color amarillo).

Finalmente, se obtuvo el diagrama de esfuerzos de compresión que se transmiten desde la losa sobre la base granular para la losa de pavimento de concreto, para la mezcla de CONTROL (sin fibra PET). Los resultados obtenidos de este análisis se pueden observar a continuación:

Figura 30. Valores de esfuerzo sobre la base en la losa de CONTROL



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados presentados en la figura, se puede observar que los mayores esfuerzos de compresión sobre la base granular se presentan en las esquinas y secciones laterales, coincidiendo nuevamente (como en el caso de momento flector y cortante) con las líneas de tránsito. Los esfuerzos de compresión máximos son de 5.1 MPa, y se pueden observar en color azul en la figura. En la medida que el esfuerzo sobre la base granular se va disminuyendo, el diagrama tiende a volverse de color amarillo, hasta los tonos rojos donde el esfuerzo sobre la base granular es cero; en algunos casos puntuales se pone en tensión (aunque en valores muy bajos), que no afectan el comportamiento de la estructura de pavimento.

12.3.2 Muestra PET1

A continuación, se desarrolló el modelo de la estructura de pavimento, para el concreto de las muestras PET1 (1kg/m³ de fibras PET). Para tal fin, el modelo se trabajó igual que en las secciones 12.2 y 12.3.1, y solo se hacen modificaciones de las propiedades del material tal y como se presenta a continuación. En cuanto a las demás propiedades, se utilizaron las indicadas en la Tabla 40.

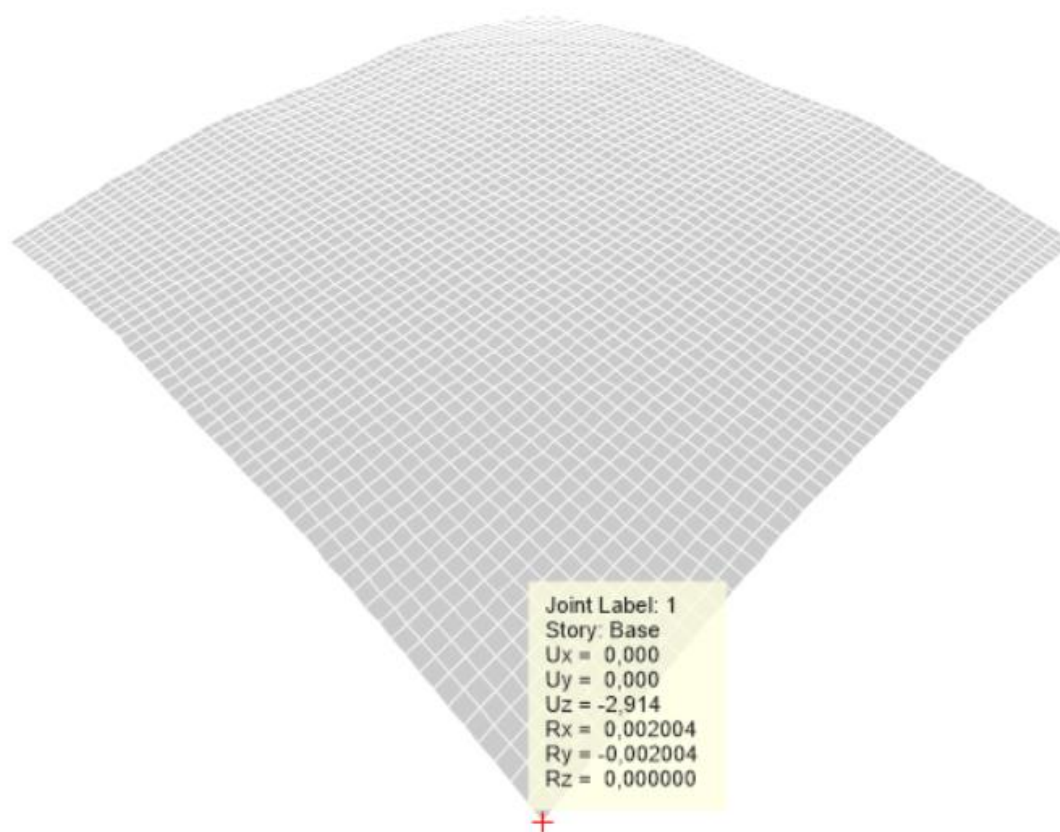
Tabla 44. Datos para modelo de pavimento PET1

Resistencia a compresión (MPa)	40.1
Resistencia a flexión – Modulo de rotura (kg/cm²)	48.2
Módulo de elasticidad (MPa)	24347.5

Fuente: Elaboración propia

De forma similar a la losa de Control, en primer lugar, se obtienen las deformaciones en el rango elástico de la losa para la mezcla PET 1 (1 kg/m³ de fibras PET), como se presentan en la siguiente figura:

Figura 31. Deflexiones de la losa PET1

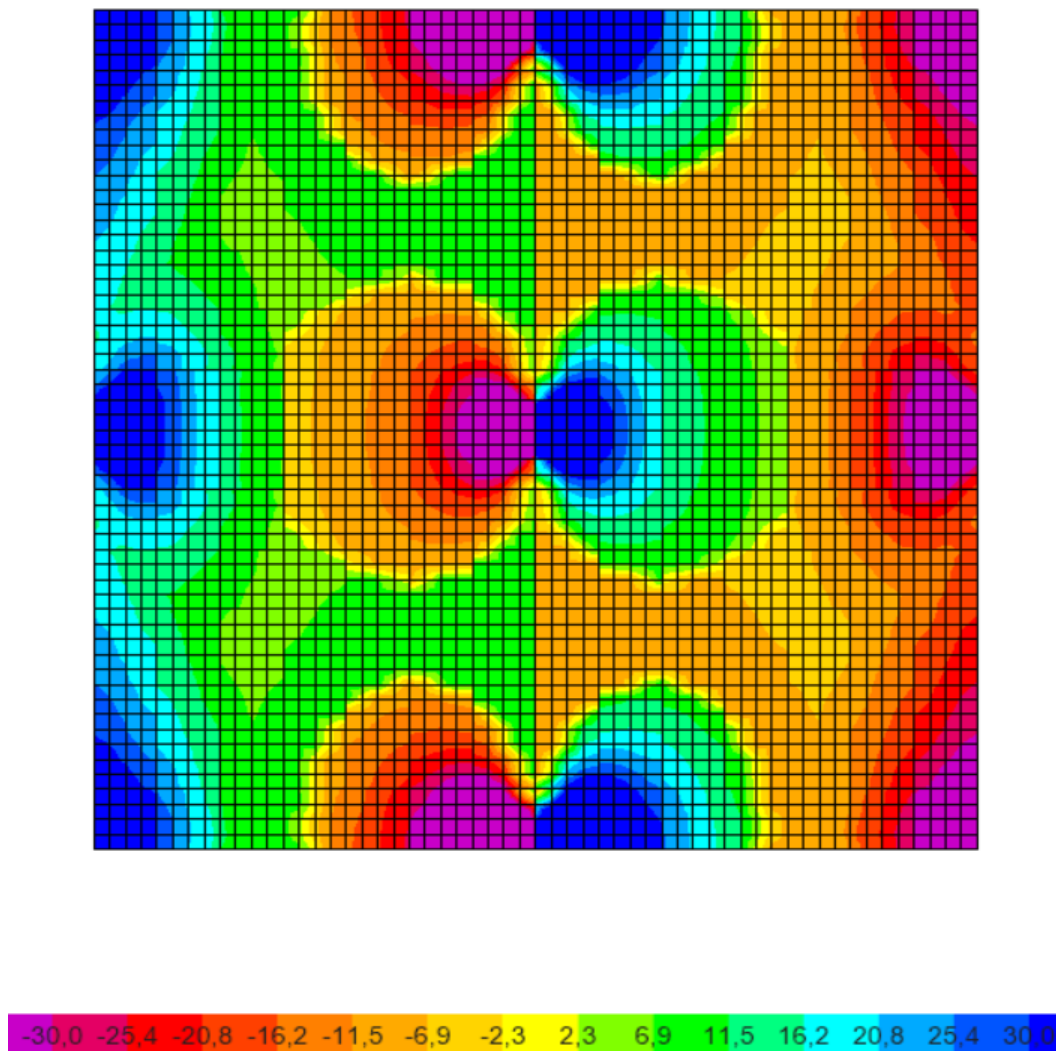


Fuente: Elaboración propia

En este caso, se obtuvo que la deflexión de la losa es de 2.914 mm en dirección perpendicular al eje de la losa de concreto; esto significa que al a adicionar 1 kg de fibras PET a la mezcla de concreto, se presenta un pequeño incremento en la deflexión de la losa.

Posteriormente, se obtuvo el diagrama de distribución de valores de esfuerzo de tensión en la losa de concreto PET1 (de forma similar a lo que se hizo en la muestra de Control), como se presenta a continuación:

Figura 32. Valores de esfuerzo de tensión en la losa PET1

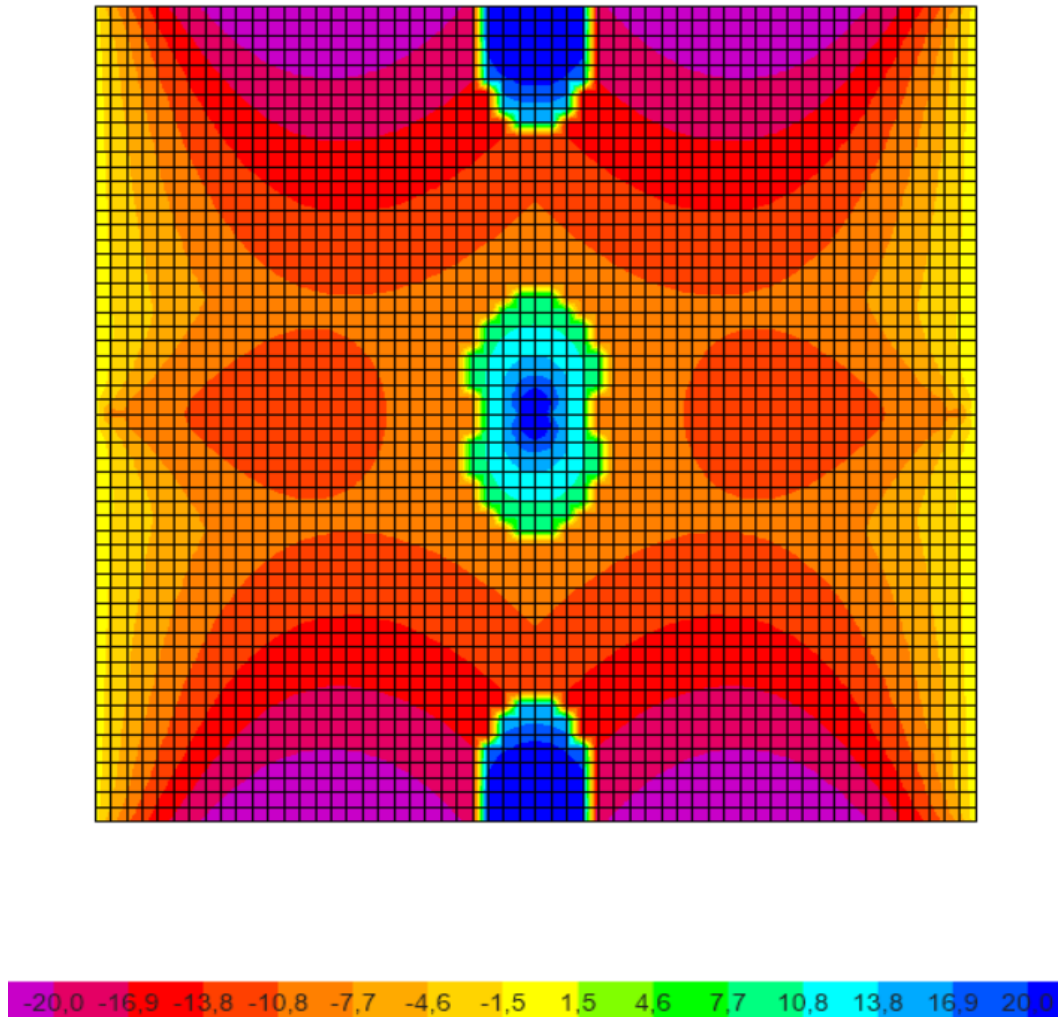


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la figura de distribución de esfuerzos de tensión en la losa de concreto tipo PET1, se puede observar que los valores de esfuerzo de tensión son de 33 kN, se concentran en las esquinas de la losa, y coinciden con la línea de tránsito de los ejes. Las trayectorias de los esfuerzos de tensión en la losa de concreto son muy similares que las trayectorias en la losa de Control, sin embargo, se puede apreciar una disminución en los valores de esfuerzo de tensión al interior de la losa.

Posteriormente, al igual que en la losa de control, se obtiene el diagrama de distribución de valores de momento flector en la losa de pavimento PET1 (1 kg de fibras PET), como se presenta a continuación:

Figura 33. Valores de momento en la losa PET1



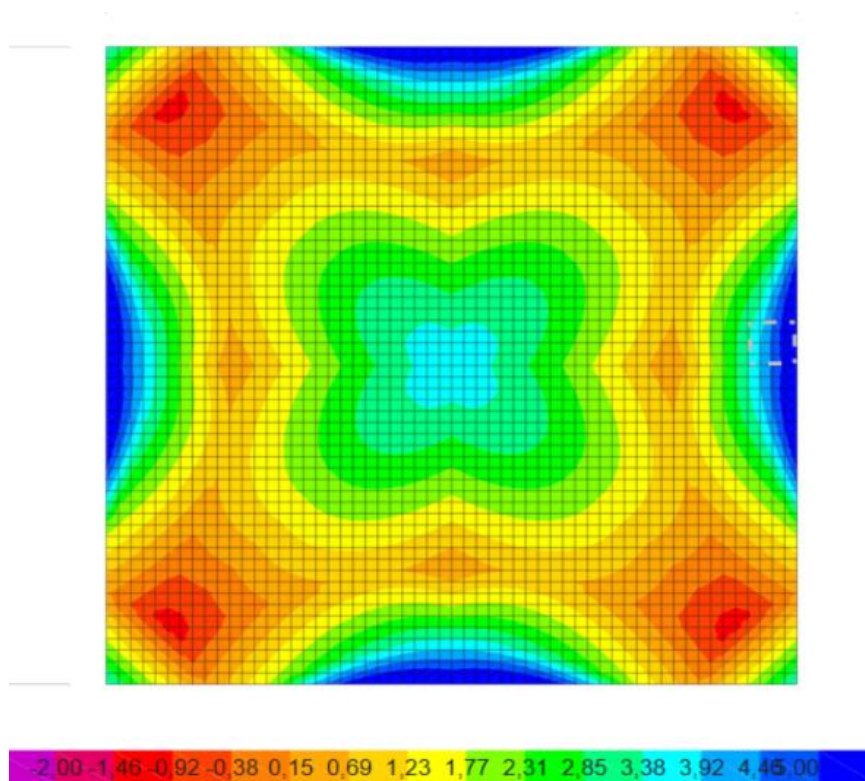
Fuente: Elaboración propia

En este caso, la distribución de valores de momento en la losa de pavimento se puede observar que los valores máximos de momento flector son de 23.5 kN.m, los cuales se presentan principalmente en la parte central de la losa, como se puede observan en color

azul y magenta en la figura. De forma similar a la losa de control, la distribución del momento flector en la losa no se concentra en las esquinas, sino tiende a concentrarse en la parte central de la misma, en la misma línea donde transitan las líneas de carga, y va disminuyendo hasta acercarse a zonas de momento flector cero (que se pueden apreciar en color amarillo).

Finalmente, para la losa de pavimento rígido para la mezcla de concreto PET1, se obtuvo el diagrama de distribución de esfuerzos de compresión sobre la base granular, como se presenta a continuación:

Figura 34. Valores de esfuerzo sobre la base en la losa PET1



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados presentados en la figura, se puede observar que los mayores esfuerzos de compresión sobre la base granular se presentan en las esquinas y secciones laterales, coincidiendo con las líneas de tránsito. Los esfuerzos de compresión

máximos sobre la base granular son de 5.0 MPa, y se pueden observar en color azul en la figura. Así mismo, se puede observar que los esfuerzos se van disminuyendo en las partes donde el diagrama toma colores en tono amarillo, y entra en tracción en las zonas donde el diagrama está en color rojo.

12.3.3 Muestra PET2

A continuación, se desarrolló el modelo de la estructura de pavimento, para el concreto de las muestras PET2 (2 kg/m³ de fibras PET), modificando las propiedades del concreto tal y como se presenta en la tabla a continuación. En cuanto a las demás propiedades, se utilizaron las indicadas en la Tabla 40.

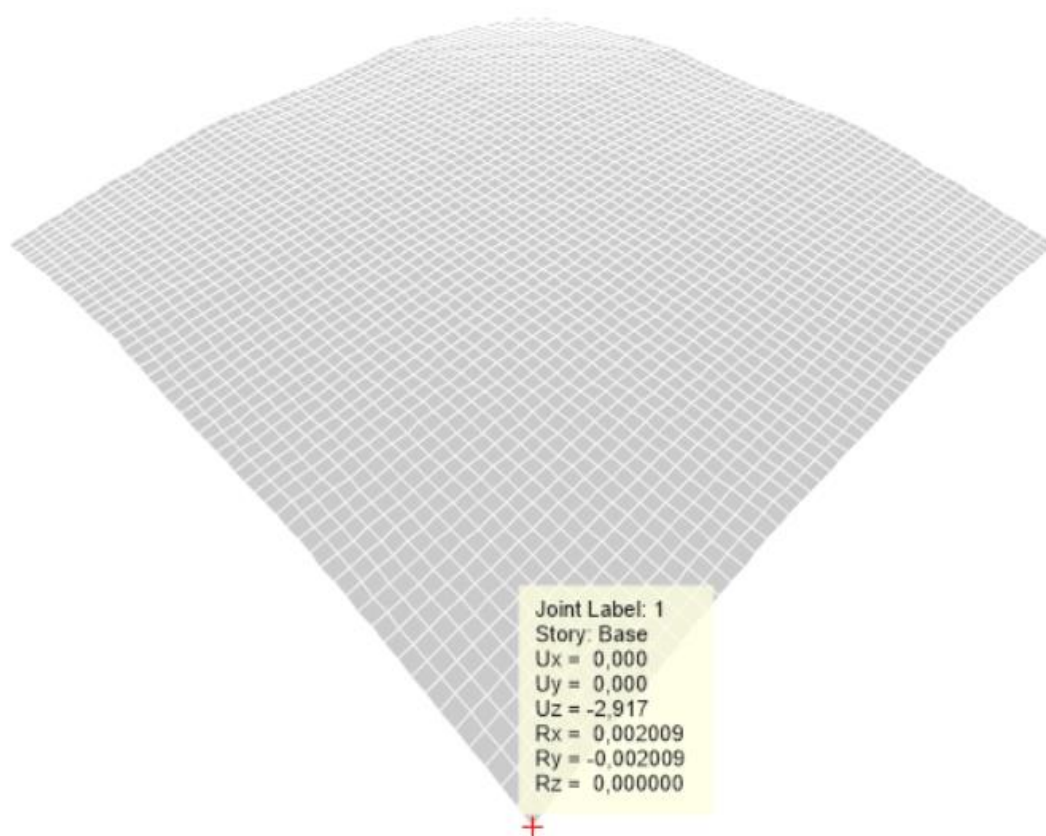
Tabla 45. Datos para modelo de pavimento PET2

Resistencia a compresión (MPa)	42.1
Resistencia a flexión – Modulo de rotura (kg/cm²)	49.8
Módulo de elasticidad (MPa)	24276.2

Fuente: Elaboración propia

De forma similar a lo que se hizo anteriormente, primero se obtienen las deflexiones de la losa de pavimento rígido de concreto PET2 (con 2 kg de fibras PET), como se presenta en la siguiente figura:

Figura 35. Deflexiones de la losa PET2

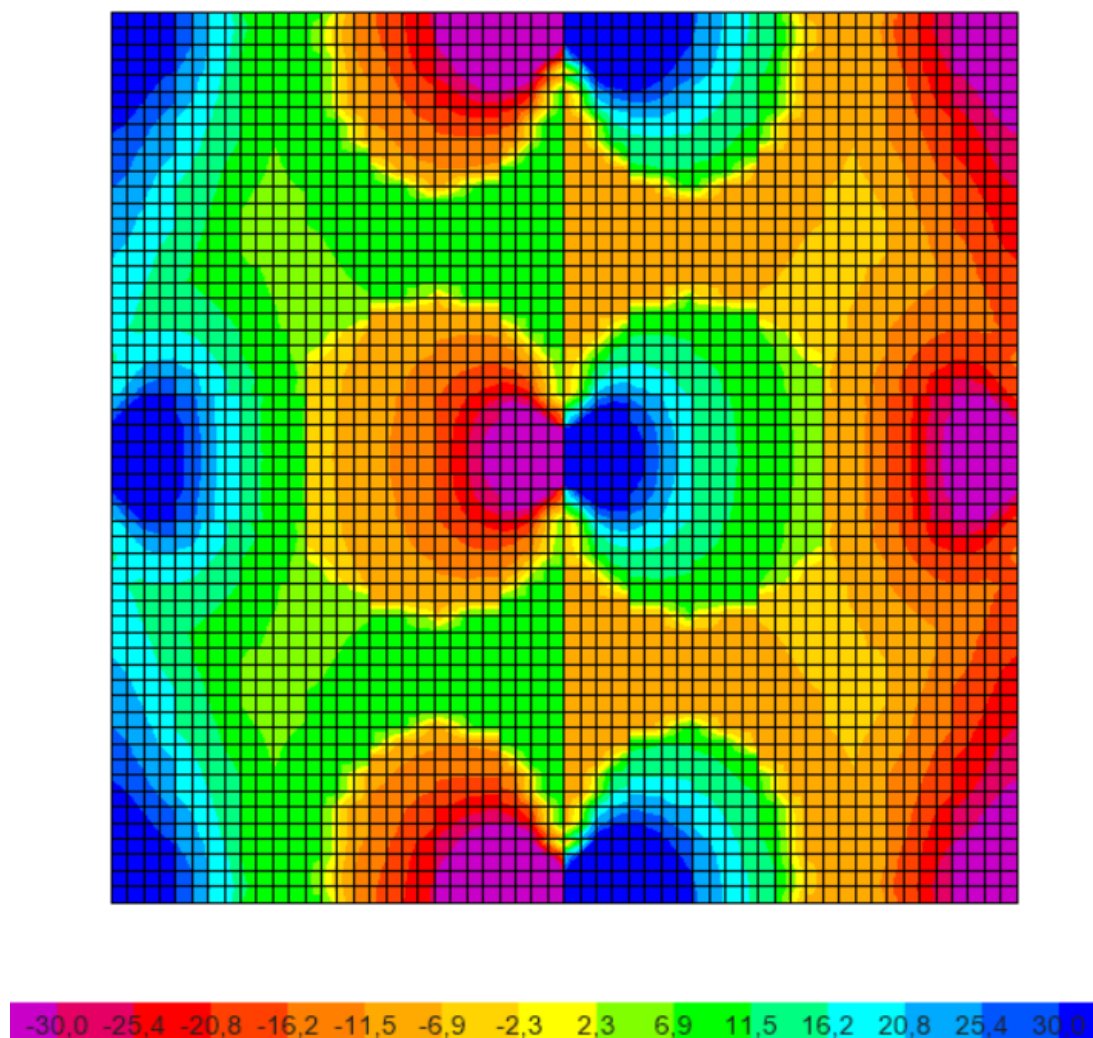


Fuente: Elaboración propia

En el caso de la losa de pavimento rígido de concreto PET2, la deflexión máxima de la losa en el rango elástico es de 2.917 mm en dirección perpendicular al eje de la losa de concreto. Esto significa que al adicionar 2 kg de fibras PET al concreto para losas de pavimento, se aumentan las deflexiones de la losa.

Posteriormente, se obtuvo el diagrama de distribución de valores de esfuerzo de tensión en la losa de concreto PET2 (de forma similar a lo que se ha realizado para las demás muestras), como se presenta a continuación:

Figura 36. Valores de esfuerzo de tensión en la losa PET2

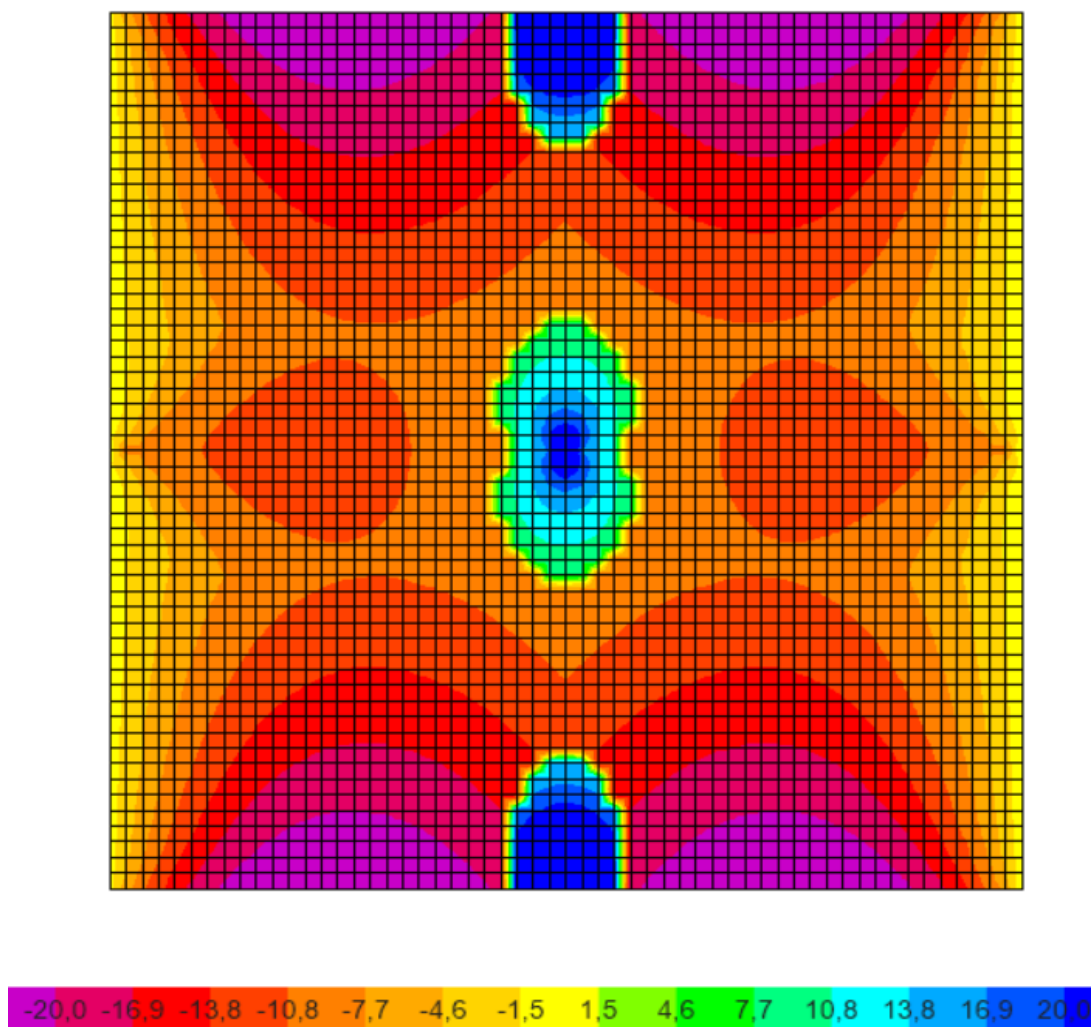


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el diagrama de cortante mostrado en la figura, se puede observar que los máximos esfuerzos de tensión se encuentran en el rango de los 31 kN; en el diagrama las concentraciones de esfuerzos de tensión se pueden observar en color azul y en color magenta, lo cual significa que los máximos esfuerzos de tensión se concentran en las esquinas, secciones laterales y centrales de la losa, debajo de las líneas de los ejes de carga. Se puede observar una reducción sostenida de los esfuerzos de tensión al interior de la losa de pavimento, a medida que se aumenta el contenido de fibras PET en el concreto.

Así mismo, como se ha realizado para las otras muestras, se obtiene el diagrama de distribución de valores de momento flector en la losa de pavimento PET2 (2 kg de fibras PET), como se presenta a continuación:

Figura 37. Valores de momento en la losa PET2

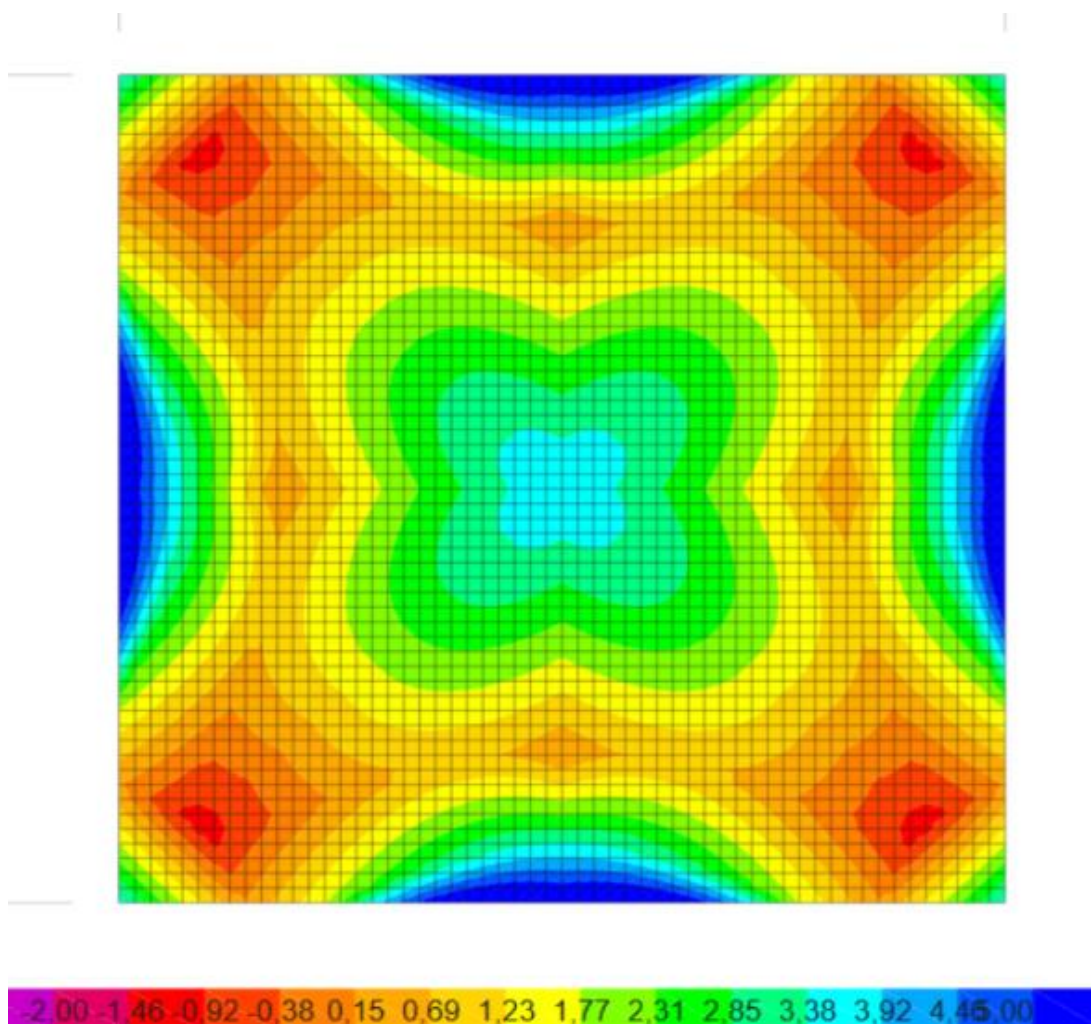


Fuente: Elaboración propia

Para el caso de las losas de concreto PET2, en la figura se puede apreciar la distribución de valores de momento en la losa de pavimento. En este caso, los valores máximos de

momento flector son de 21.0 kN.m, los cuales se presentan principalmente en la parte central de la losa, como se puede observar en color azul y magenta en la figura. De forma similar a los casos anteriores, la distribución del momento flector en la losa no se concentra en las esquinas, sino tiende a concentrarse en la parte central de la misma, en la misma línea donde transitan las líneas de carga, y va disminuyendo hasta acercarse a zonas de momento flector cero. Finalmente, se obtuvo el diagrama de distribución de esfuerzos de compresión sobre la base granular de pavimento para la losa de concreto PET2, como se presenta a continuación:

Figura 38. Valores de esfuerzo sobre la base en la losa PET2



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados presentados en la figura, se puede observar que los mayores esfuerzos de compresión sobre la base granular se presentan en las esquinas y secciones laterales, coincidiendo nuevamente (como en el caso de momento flector y cortante) con las líneas de tránsito.

En este caso, los esfuerzos de compresión máximos son de 4.9 MPa, y se pueden observar en color azul en la figura. En la medida que el esfuerzo sobre la base granular se va disminuyendo, el diagrama tiende a volverse de color amarillo, hasta los tonos rojos donde el esfuerzo sobre la base granular es cero; en algunos casos puntuales se pone en tensión (aunque en valores muy bajos), que no afectan el comportamiento de la estructura de pavimento.

12.3.4 Muestra PET3

Para terminar, se desarrolló el modelo de la estructura de pavimento, para el concreto de las muestras PET3 (3kg/m³ de fibras PET). Para tal fin, se hacen las modificaciones de las propiedades del concreto (de igual forma que en los casos anteriores), como se presenta a continuación. En cuanto a las demás propiedades, se utilizaron las indicadas en la Tabla 40.

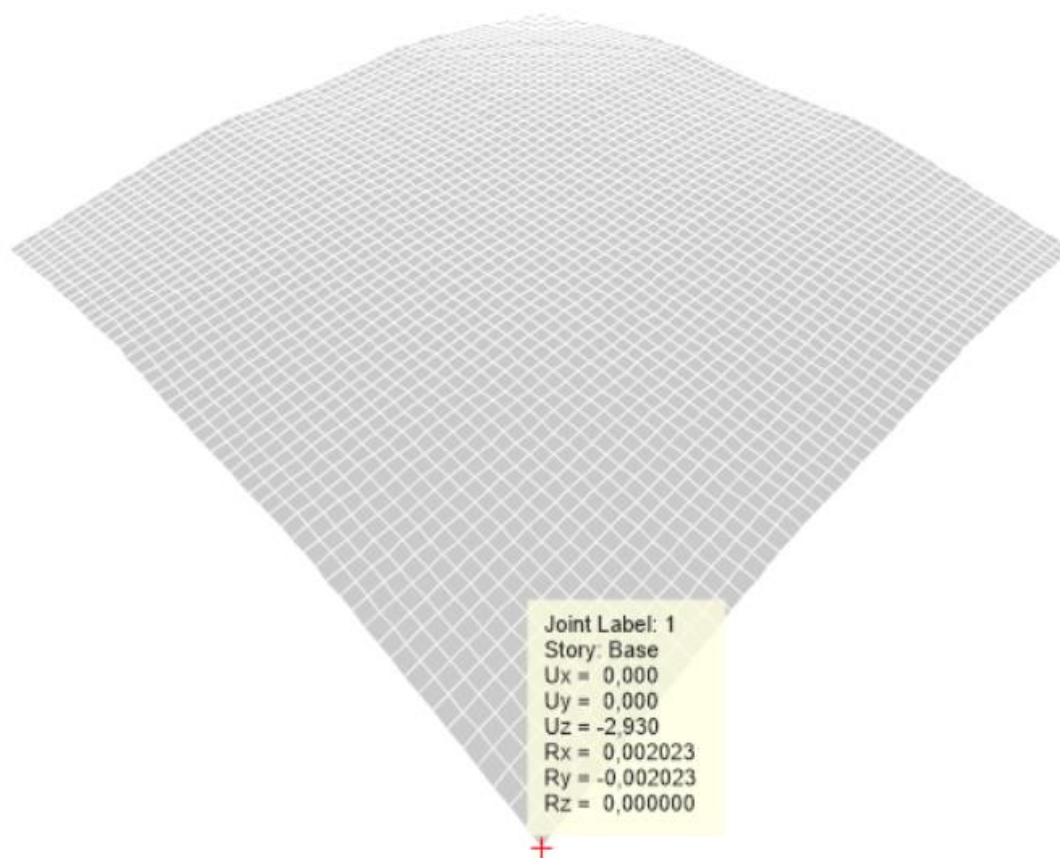
Tabla 46. Datos para modelo de pavimento PET3

Resistencia a compresión (MPa)	43.7
Resistencia a flexión – Modulo de rotura (kg/cm²)	53.7
Módulo de elasticidad (MPa)	24044.8

Fuente: Elaboración propia

Para la losa de pavimento de concreto PET3, en primer lugar, se obtienen las deflexiones de la losa, como se presentan en la siguiente figura:

Figura 39. Deflexiones de la losa de PET3

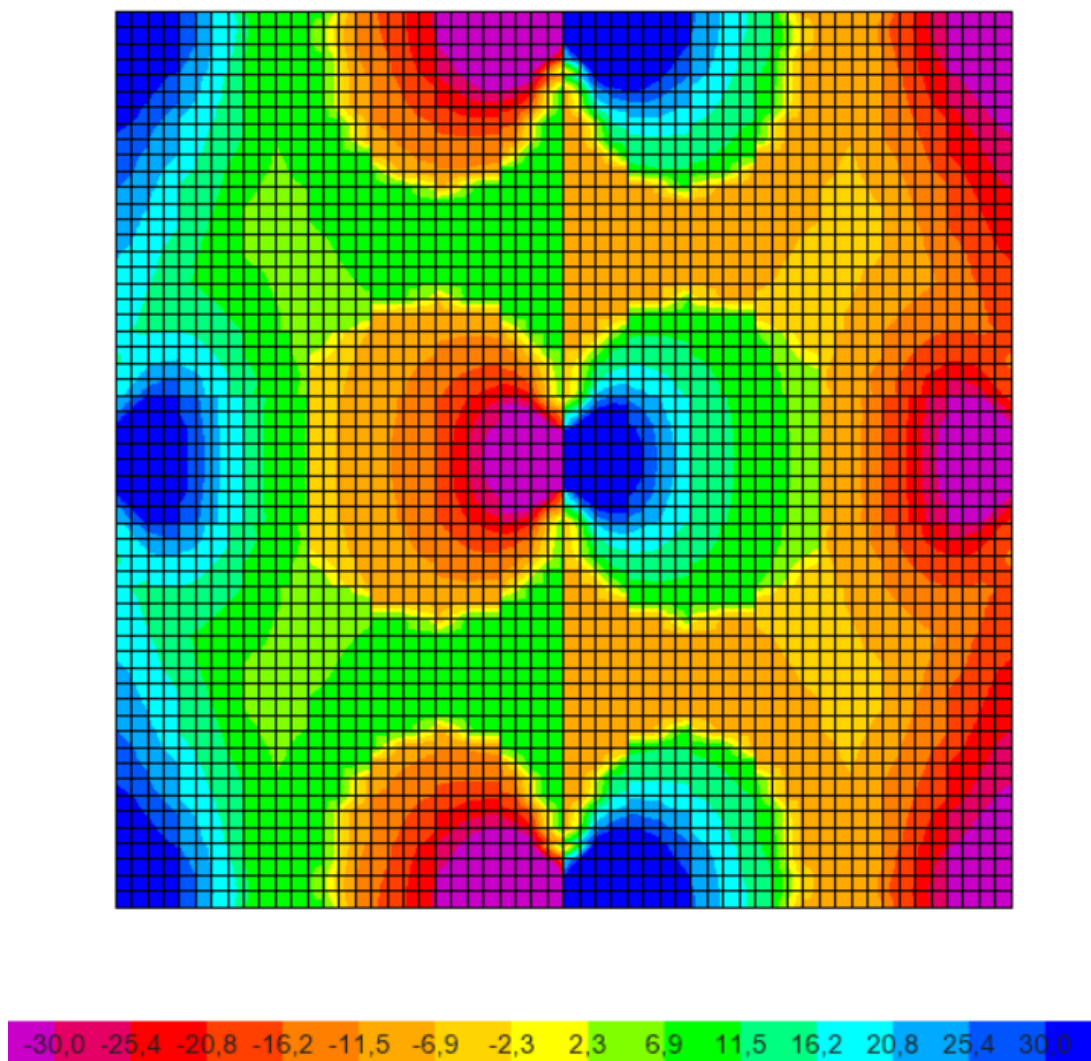


Fuente: Elaboración propia

En el caso de la losa de pavimento rígido de concreto PET3, la deflexión máxima de la losa en el rango elástico es de 2.930 mm en dirección perpendicular al eje de la losa de concreto. Esto significa que al adicionar 3 kg de fibras PET al concreto para losas de pavimento, se aumentan las deflexiones de la losa.

Posteriormente, se obtuvo el diagrama de distribución de valores de esfuerzos de tensión en la losa de concreto PET3 (de forma similar a lo que se ha realizado para las demás muestras), como se presenta a continuación:

Figura 40. Valores de esfuerzo de tensión en la losa PET3

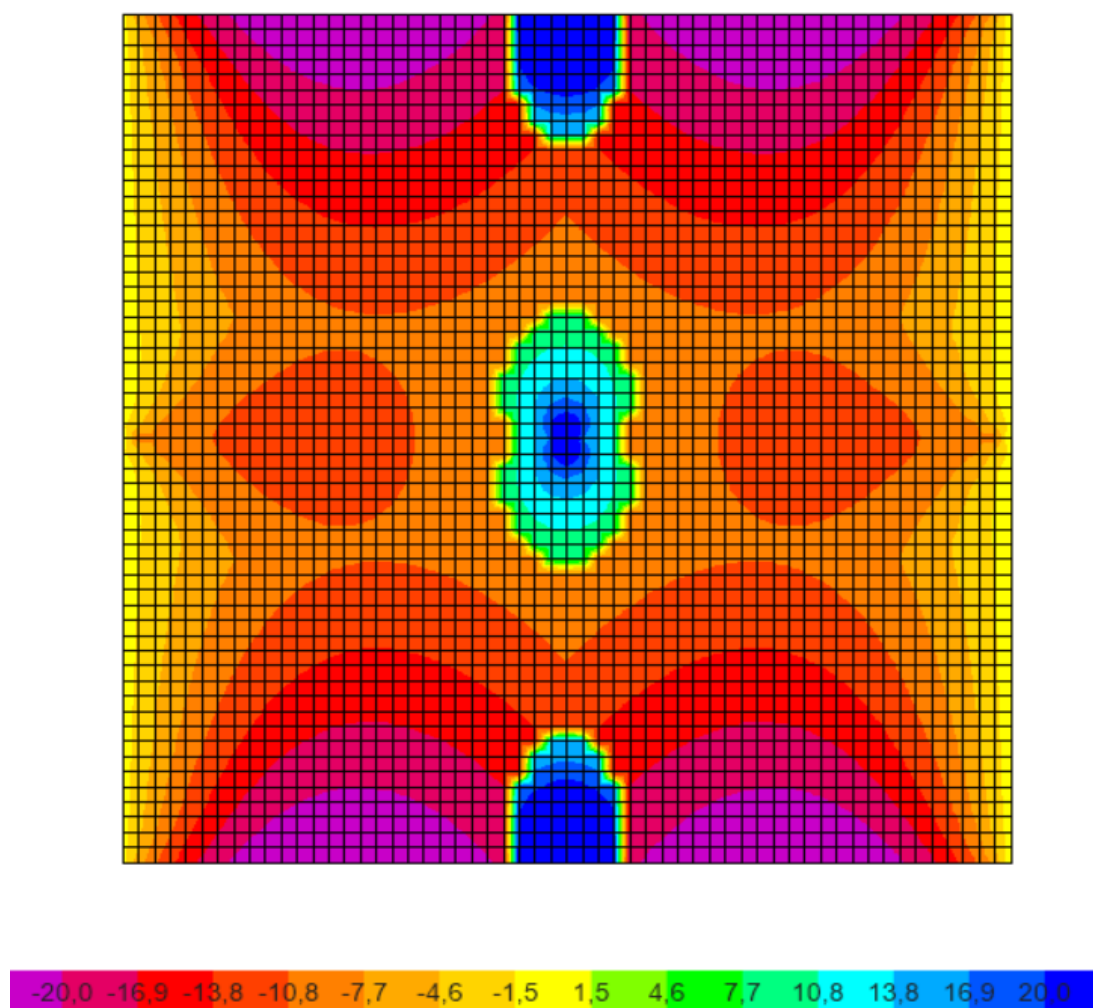


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el diagrama de esfuerzo de tensión mostrado en la figura, se puede observar que los máximos esfuerzos de tensión se encuentran en el rango de los 29 kN; en el diagrama las concentraciones de esfuerzos de tensión se pueden observar en color

azul y en color magenta, lo cual significa que los máximos esfuerzos de tensión se concentran en las esquinas, secciones laterales y centrales de la losa, debajo de las líneas de los ejes de carga. Posteriormente, se obtiene el diagrama de distribución de valores de momento flector en la losa de pavimento PET3, como se presenta a continuación:

Figura 41. Valores de momento en la losa PET3

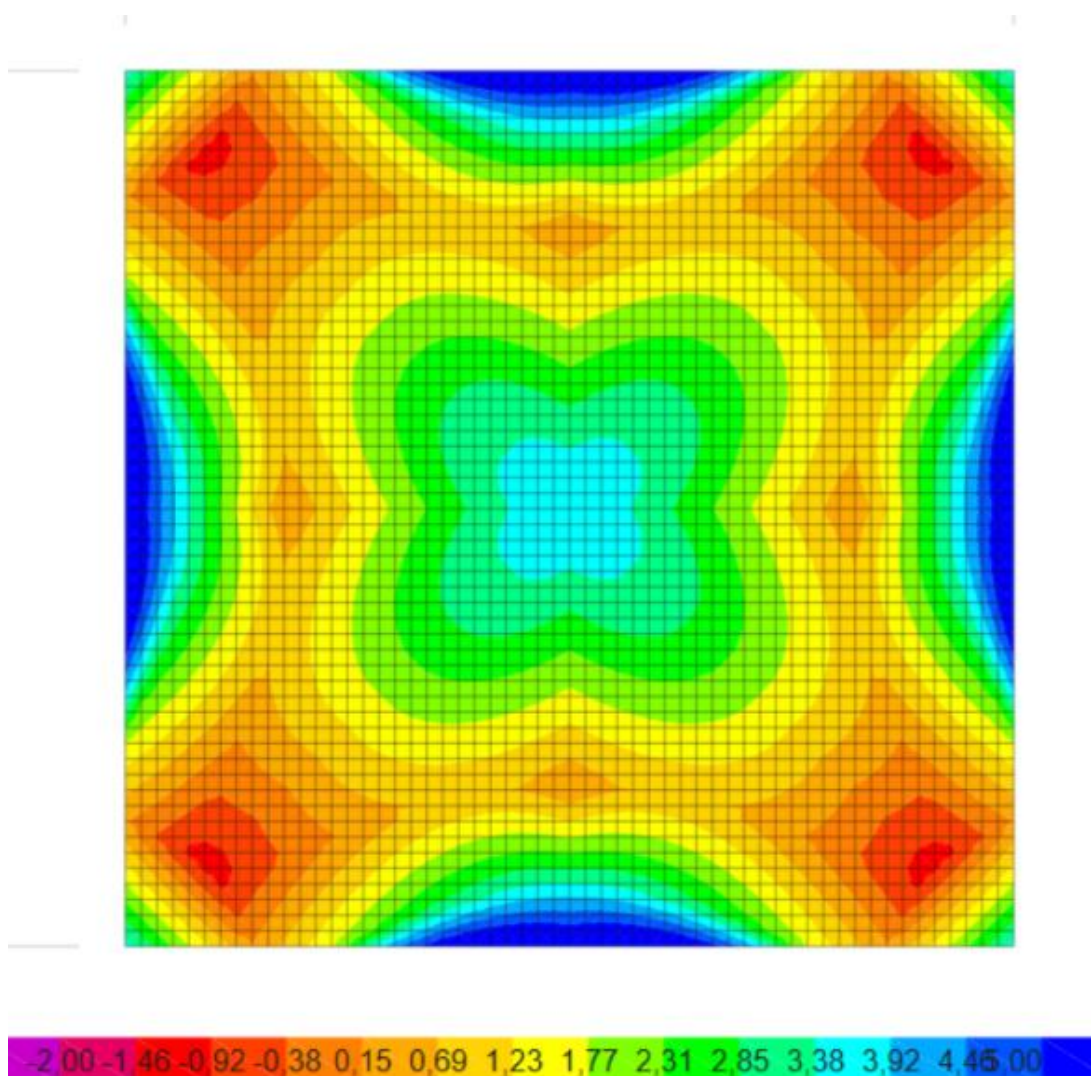


Fuente: Elaboración propia

En este caso, la distribución de valores de momento en la losa de pavimento se puede observar que los valores máximos de momento flector son de 20.0 kN.m, los cuales se presentan principalmente en la parte central de la losa, como se puede observan en color

azul y magenta en la figura. De forma similar a la losa de control, la distribución del momento flector en la losa no se concentra en las esquinas, sino tiende a concentrarse en la parte central de la misma, en la misma línea donde transitan las líneas de carga, y va disminuyendo hasta acercarse a zonas de momento flector cero. Finalmente, se obtuvo el diagrama de distribución de esfuerzos de compresión sobre la base granular para la losa de pavimento PET3 (3 kg de fibras PET), como se presenta a continuación:

Figura 42. Valores de esfuerzo sobre la base en la losa PET3



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados presentados en la figura, se puede observar que los mayores esfuerzos de compresión sobre la base granular se presentan en las esquinas y secciones laterales, coincidiendo nuevamente (como en el caso de momento flector y cortante) con las líneas de tránsito.

En este caso, los esfuerzos de compresión máximos son de 4.8 MPa, y se pueden observar en color azul en la figura. En la medida que el esfuerzo sobre la base granular se va disminuyendo, el diagrama tiende a volverse de color amarillo, hasta los tonos rojos donde el esfuerzo sobre la base granular es cero; en algunos casos puntuales se pone en tensión (aunque en valores muy bajos), que no afectan el comportamiento de la estructura de pavimento.

12.3.5 Resumen de resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los diferentes análisis de las losas de concreto:

Tabla 47. Resumen de resultado de los modelos

Muestra	Deflexión (mm)	Esfuerzo de tensión (kN)	Momento (kN.m)	Esfuerzo en base (MPa)
<i>Control</i>	2.902	36.0	25.0	5.1
<i>PET1</i>	2.914	33.0	23.5	5.0
<i>PET2</i>	2.917	31.0	21.0	4.9
<i>PET3</i>	2.930	29.0	20.0	4.8

Fuente: Elaboración propia

13 RESULTADOS.

En la presente sección se presentan los análisis de todos los resultados obtenidos en la presente investigación.

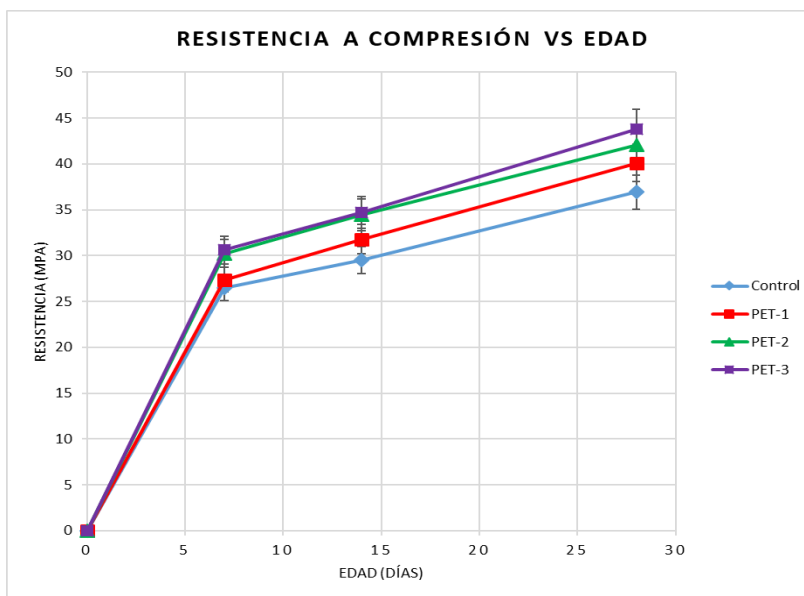
13.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presenta el análisis de los resultados obtenidos de: 1) los ensayos de caracterización mecánica de materiales, y 2) modelo de elementos finitos.

13.1.1 Resistencia a la compresión

En primer lugar, se relaciona la resistencia a compresión obtenida para cada una de las mezclas, con la edad (tiempo al cual se hizo el ensayo). Dicha relación se presenta en la figura 43.

Figura 43. Resistencia a compresión vs edad

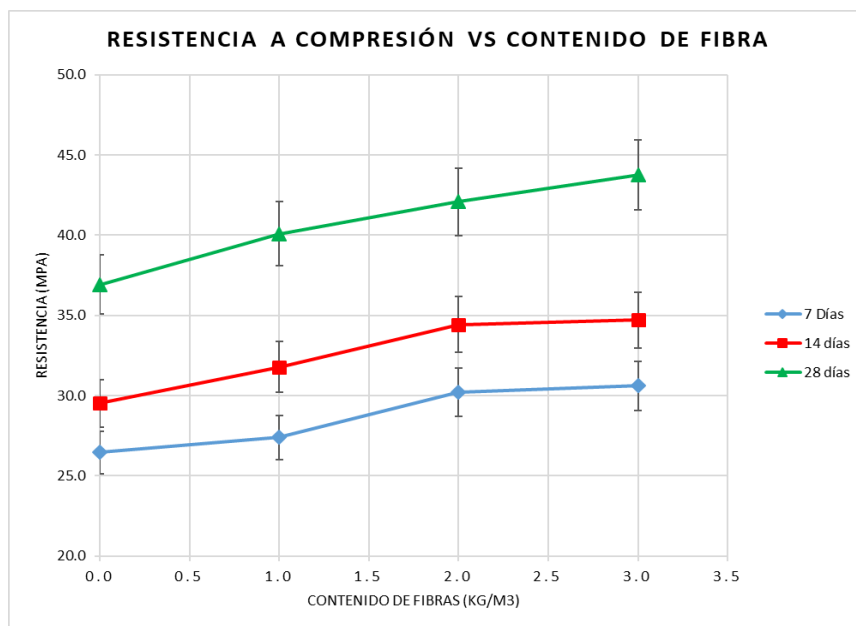


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que, a mayor edad, se obtiene una mayor resistencia a la compresión. Este comportamiento es característico del concreto, debido a que la resistencia del concreto evoluciona en función de las reacciones de hidratación del cemento; en ese orden de ideas, a mayor tiempo, mayor es la hidratación del cemento al interior de las muestras de concreto (Torrenti, Pijaudier-Cabot, & Reynouard, 2013).

De igual forma, se puede observar que la adición de fibras PET, generó un aumento de la resistencia a compresión de las muestras de concreto. En todos los casos el aumento fue sostenido, de tal forma que al aumentar en intervalos de 1 kg de fibra PET por m³ de concreto, se evidencian incrementos en la resistencia a compresión del material. Para poder observar mejor el comportamiento descrito anteriormente, se elaboró la gráfica de resistencia a la compresión en función del contenido de fibra en la mezcla de concreto, para diferentes edades. El resultado se puede observar en la figura 44:

Figura 44. Resistencia a compresión vs contenido de fibra



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la figura, a mayor contenido de fibras, se obtienen mayores resistencias a compresión del concreto. Respecto a la muestra control, para la edad de 28 días, se

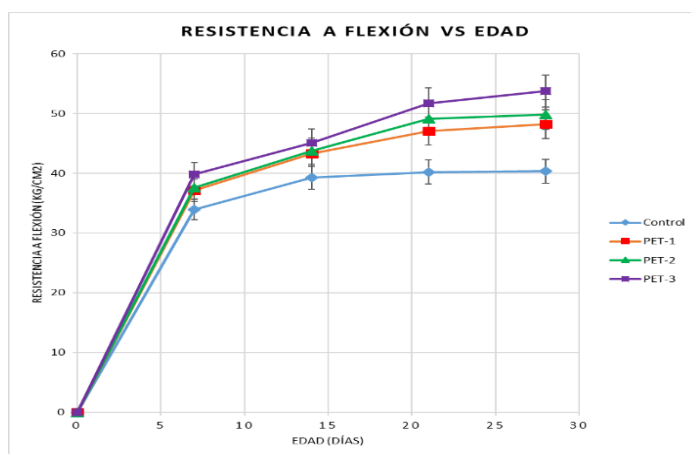
presenta para los valores de 1kg/m³, 2 kg/m³ y 3 kg/m³ de fibra adicionada, incrementos del 8.7%, 14.1% y 18.4%, respectivamente, en el valor de la resistencia a la compresión. Este comportamiento es similar al descrito por Pelisser et al, y por Cárdenas et al, quienes, en diferentes estudios indicaron que, a mayor contenido de fibras, mayor es la resistencia compresión del material. (Cardenas-Pulido, Rodriguez, & Higuera, 2020) (Pelisser, Klegues, Gleize, & Roman, 2012).

Este comportamiento se debe a que la resistencia individual de las fibras confinadas es mayor que al del concreto; sin embargo, solo se observa para contenidos bajos de fibras; en el caso de las fibras PET.

De igual, estudios realizados por Irwan et al, indican que pequeñas cantidades de fibras PET en concreto aumentan la resistencia compresión del material, sin embargo, a grandes contenidos de fibras, se presenta una reducción de la resistencia debido a que se produce una reducción en la manejabilidad de la mezcla en estado fresco, lo cual, a su vez, se ve reflejado en una disminución de sus propiedades mecánicas (Irwan, Asyraf, Othman, Koh, & Annas, 2013).

13.1.2 Resistencia a flexión

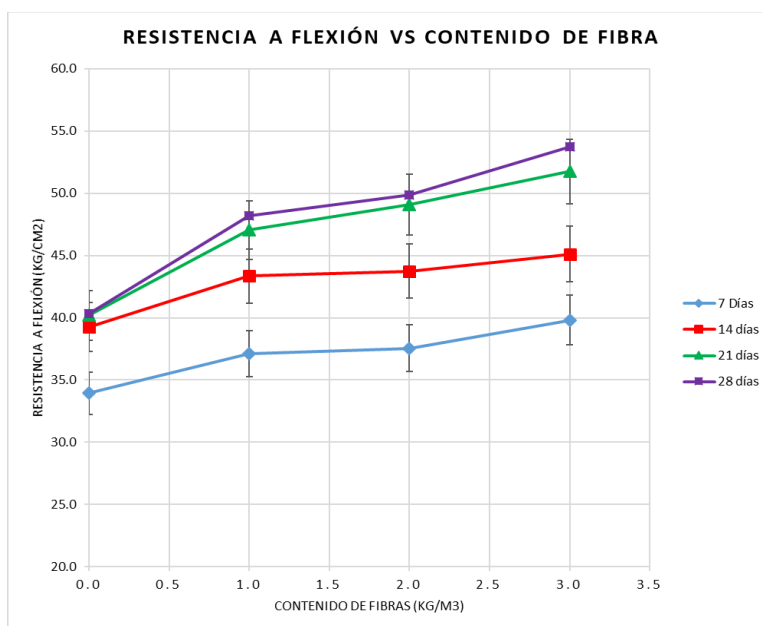
Ahora se analizan los datos obtenidos de resistencia a la flexión (módulo de rotura) en las muestras de concreto. En primer lugar, se relaciona la resistencia a la flexión (módulo de rotura) con la edad de las muestras, como se presenta en la siguiente figura:

Figura 45. Resistencia a flexión (MR) vs edad

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que, a mayor edad de las muestras, mayor es la resistencia a la flexión del material, respecto a la muestra control, para la edad de 28 días, se presenta para los valores de 1kg/m³, 2 kg/m³ y 3 kg/m³ de fibra adicionada, incrementos del 19.6%, 23.6% y 33.3%, respectivamente, en el valor del Módulo de rotura. La explicación de este comportamiento es la misma que la que se emitió para la resistencia a la compresión; a medida que el cemento de las mezclas de concreto reacciona, genera productos de hidratación que producen un aumento en su resistencia mecánica (Torrenti, Pijaudier-Cabot, & Reynouard, 2013).

Así mismo, se puede observar que un aumento del contenido de fibras PET en el concreto, producen un aumento significativo de la resistencia a flexión (módulo de rotura) del material. Esto se debe principalmente a que la adición de fibras al concreto le proporciona al material mayor resistencia a tracción, y retrasa la formación de fisuras que conducen a la falla. Para poder apreciar mejor la influencia de las fibras en el comportamiento a flexión del concreto, se desarrolla una gráfica que relaciona la resistencia a flexión con el contenido de fibra, como se presenta a continuación:

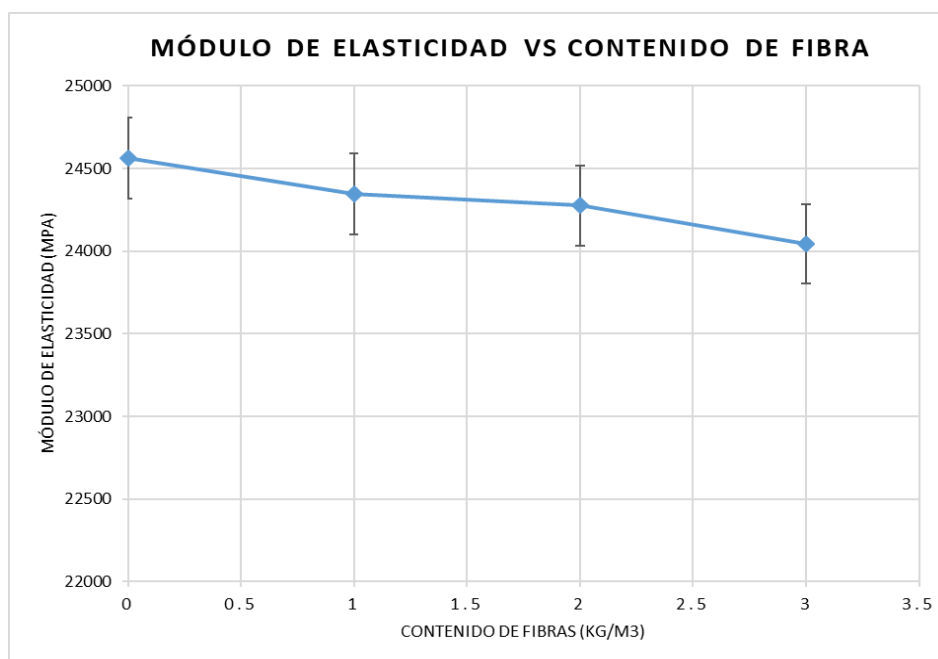
Figura 46. Resistencia a flexión (MR) vs contenido de fibras

Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar que a medida que aumenta el contenido de fibras en el concreto, aumenta su resistencia a la flexión; lo cual también se observa constante para todas las edades de ensayo del material. Este comportamiento es similar al descrito por Shamsudin et al, quienes encontraron que un aumento en el contenido de fibras PET dentro del concreto, conduce a mayores resistencias a la flexión del material (Shamsudin, Hamid, & Fauzi, 2021). Como se dijo anteriormente, esto se debe a que la presencia de fibras aumenta la resistencia en la zona a tracción del material durante el ensayo de flexión; sin embargo, es necesario limitar la cantidad de fibras que se adicionan a la mezcla de concreto, debido a que, para grandes contenidos de fibra, se pueden empezar a producir reducciones en la resistencia del material.

13.1.3 Módulo de elasticidad

Finalmente, se analiza el efecto de las fibras en el módulo de elasticidad del concreto; para tal fin se relaciona el módulo de elasticidad del material con el contenido de fibras en las mezclas, como se muestra a continuación:

Figura 47. Módulo de elasticidad (E) vs contenido de fibras

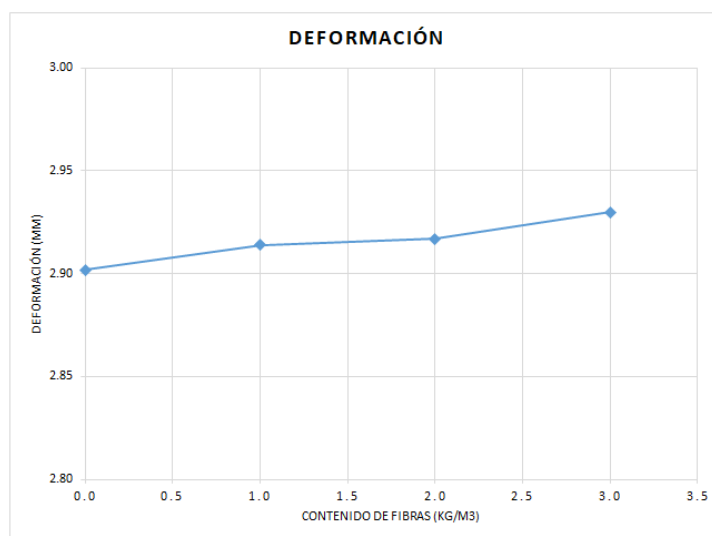
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, un aumento en el contenido de fibras PET en el concreto, produce una disminución del módulo de elasticidad del material. respecto a la muestra control, se presenta para los valores de 1kg/m³, 2 kg/m³ y 3 kg/m³ de fibra adicionada, decrecimientos del 0.9%, 1.2% y 2.1%, respectivamente, en el valor del módulo de elasticidad. Aunque la disminución es pequeña (inferior al 1% por cada kg de fibra por m³ de concreto), es sostenida y constante. Este comportamiento fue descrito por Mercante et al, quienes indicaron que el aumento en el contenido de PET (Tereftalato de polietileno) al interior de la matriz de concreto, bien sea en forma de fibras o en forma granular (para reemplazo de agregados), produce reducciones en el módulo de elasticidad del material (Mercante, Alejandrino, Ojeda, Chini, & Maroto, 2018). Esto se puede deber principalmente a que el módulo de elasticidad de las fibras de PET es inferior que el del concreto. En ese orden de ideas, de acuerdo con la ley de las mezclas, la inclusión de un material con módulo de elasticidad inferior producirá una reducción del módulo de elasticidad de todo el volumen del material (Meyers & Chawla, 2008).

13.1.4 Deflexiones en la losa

En primer lugar, se presenta la evolución de las deflexiones de la losa en función del contenido de fibras en el concreto, como se presenta a continuación:

Figura 48. Deflexiones (deformaciones) de la losa vs contenido de fibras



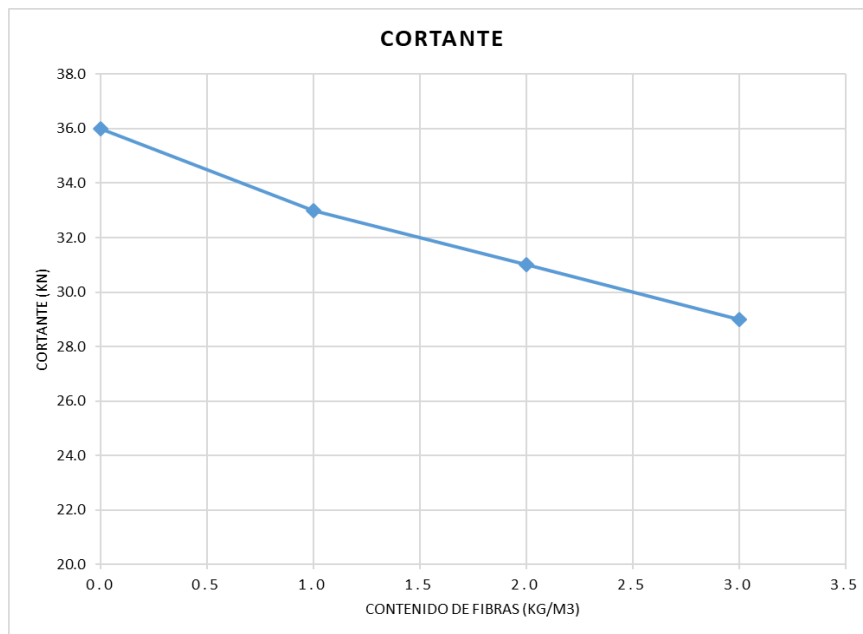
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la figura, se puede observar que a adición de fibras PET en el concreto, produce un pequeño aumento en las deflexiones, lo cual se debe principalmente a que el módulo de elasticidad del concreto adicionado con fibras PET es menor que el módulo de elasticidad sin fibras. Los resultados obtenidos, son consistentes con lo presentado por Díaz et al, quienes también identificaron un aumento en las deflexiones o deformaciones debido a la adición de fibras PET al concreto (Díaz, Torres-Ortega, Saba, & Berrocal, 2022). Así mismo, se debe indicar que el aumento de las deflexiones de la losa de pavimento rígido es del 0.96%, para la adición de fibras PET de 3 Kg/m³, razón por la cual se puede considerar que la afectación de la adición de fibras PET al concreto no es significativa para el comportamiento de la losa. Sin embargo, este comportamiento se debe tener en cuenta para establecer límites en el uso de las fibras, que no afecten la serviciabilidad de las losas.

13.1.5 Esfuerzo de tensión en la losa

Así mismo, se presenta la evolución de los esfuerzos de tensión al interior de la losa en función del contenido de fibras en el concreto, como se presenta a continuación:

Figura 49. Esfuerzos de tensión (cortante) en la losa vs contenido de fibras



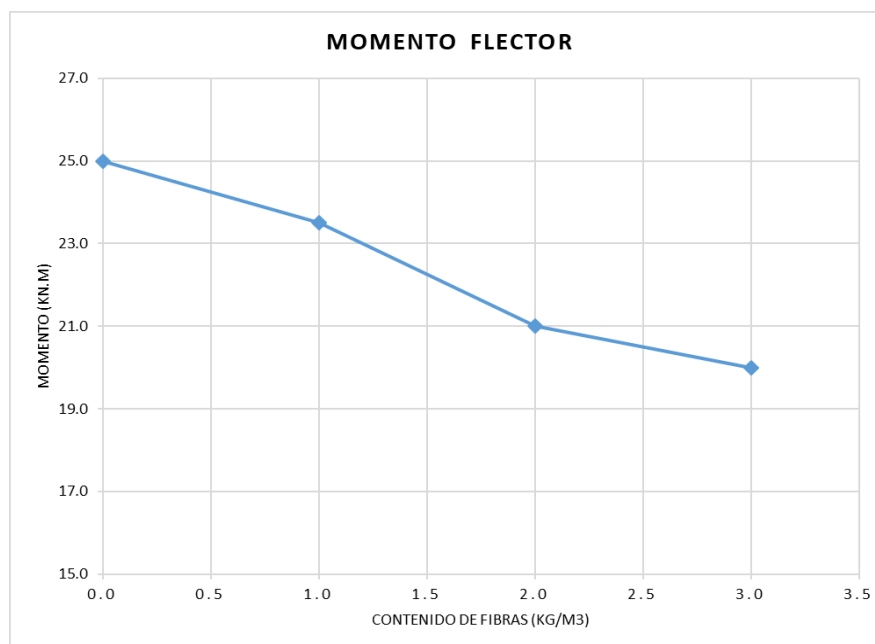
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la influencia de las fibras PET en la distribución de esfuerzos de tensión al interior de la losa de concreto, se puede apreciar una reducción en el valor del esfuerzo de tensión a medida que se aumenta la cantidad de fibras en el concreto. En total se puede apreciar una reducción del 19.4% del esfuerzo de tensión, para la muestra de concreto con 3 kg/m³ de fibras PET. Esto se debe principalmente, a que con la adición de fibras PET se aumentan las deflexiones o deformaciones en la losa, lo cual reduce los esfuerzos internos en el elemento. Este resultado es consistente con lo presentado por Karadelis y Lin, quienes también describieron una reducción de los esfuerzos internos de losas de concreto adicionadas con fibras poliméricas (Karadelis & Lin, 2015).

13.1.6 Momento flector en la losa

Posteriormente se presenta la evolución de los momentos flectores al interior de la losa en función del contenido de fibras en el concreto, como se presenta a continuación:

Figura 50. Momentos en la losa vs contenido de fibras



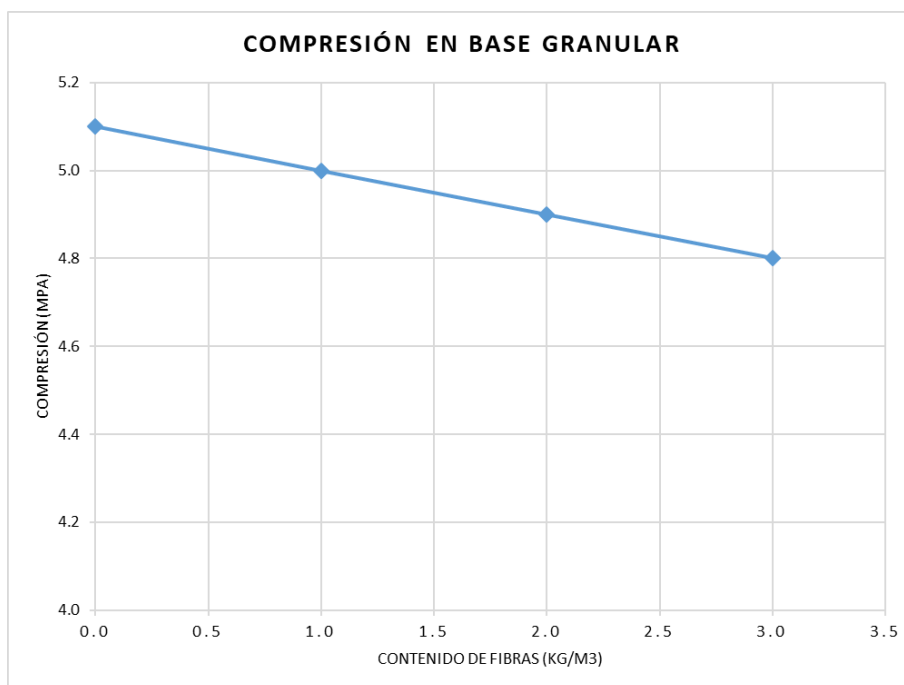
Fuente: Elaboración propia

De igual forma, se evaluó la influencia de las fibras PET en los momentos flectores al interior de losas de concreto. En este caso, se encontró que la adición de fibras PET, producía reducciones de hasta 20%, para una adición de fibras PET de 3kg/m³, en los momentos flectores al interior de la losa de concreto. Ese comportamiento es similar al presentado por la losa para el caso del cortante (discutido anteriormente), y la causa que lo origina corresponde básicamente a la misma: aumento de las deformaciones que genera una reducción en los esfuerzos internos. Así mismo, los resultados son consistentes con lo presentado por Karadelis y Lin, quienes también describieron una reducción de los esfuerzos internos de losas de concreto adicionadas con fibras poliméricas (Karadelis & Lin, 2015).

13.1.7 Esfuerzos de compresión en la base granular

Finalmente, se presenta la evolución de los esfuerzos de compresión sobre la base granular en función del contenido de fibras en el concreto, como se presenta a continuación:

Figura 51. Esfuerzos de compresión en la base vs contenido de fibras



Fuente: Elaboración propia

En este caso, también se observó una reducción en los esfuerzos de compresión que se transmiten a la base granular de la estructura de pavimento. En este caso, la adición de 3 kg/m³ de fibras PET generó una reducción de 5,9% en los esfuerzos de compresión que se transmiten a la base granular; esto se debería probablemente a la reducción del peso propio de la losa debido a la adición de fibras PET.

13.2 IMPACTOS SOCIALES.

En cuanto a los impactos sociales que se pueden aplicar de los resultados obtenidos del presente proyecto, se tienen dos de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la agenda 2030 de las Naciones Unidas; estos objetivos son (CEPAL, 2018):

- **9. Industria innovación e infraestructura:** Los resultados nos dan un avance en la aplicación de materiales sostenibles para construcción de infraestructura. Siendo la infraestructura de transporte, uno de los motores de desarrollo de las comunidades, el poder garantizar mejores materiales, va a impactar positivamente el desarrollo de la infraestructura vial en el contexto regional y Nacional.
- **11. Ciudades y comunidades sostenibles:** Así mismo, el poder reutilizar residuos de materiales que en la actualidad no tienen una aplicación práctica a gran escala, permite generar comunidades sostenibles, con base en la reducción de generación de desechos, así como en la reutilización de recursos no renovables y no biodegradables.

13.3 IMPACTOS AMBIENTALES.

Finalmente, en cuanto a los impactos ambientales, con los resultados del presente proyecto se puede impactar positivamente en cuatro de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, como se presenta a continuación (CEPAL, 2018):

- **12. Producción y consumo responsable:** Al reutilizar un material que no es biodegradable, se puede conducir a una producción responsable de productos con base en PET:
- **13. Acción por el clima:** Así mismo, la producción de concreto es uno de los factores más agresivos en términos de impacto ambiental. Por tal motivo, al mejorar el comportamiento del material mediante la reutilización de PET reciclado, reduce el impacto ambiental del concreto.
- **14. Vida submarina:** El PET es uno de los materiales que más contamina las fuentes de agua; esto se debe a que no es biodegradable, y en la actualidad no se reutiliza, ni se recicla a gran escala. Por tanto, encontrar una aplicación industrial a gran escala, permite reducir la contaminación de las fuentes de agua, lo que impacta positivamente la vida submarina en el planeta.

- **15. Vida de ecosistemas terrestres:** De igual forma, al reducir la acumulación de residuos sólidos de PET, se garantiza un impacto positivo sobre los ecosistemas terrestres.

14 CONCLUSIONES.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se tienen las siguientes conclusiones:

- Se implementó con éxito el reforzamiento del concreto con fibras PET recicladas, y se evaluaron algunas de sus propiedades mecánicas. Así mismo, se evaluó de forma preliminar su comportamiento para aplicación en construcción de losas de pavimento rígido.
- En el caso de la resistencia a compresión, se observó que el reforzamiento del concreto con pequeñas cantidades de fibras PET recicladas incrementa la resistencia del material. De acuerdo con los valores estudiados en el presente proyecto, cantidades de fibra hasta 3 kg/m^3 de concreto, generan un importante aumento en la resistencia a compresión del material. Sin embargo, la cantidad de fibras debe limitarse, porque contenidos mayores de fibras PET podrían empezar a generar reducciones en esta propiedad.
- Así mismo, se observó que el reforzamiento del concreto con fibras PET incrementa la resistencia a flexión (Módulo de rotura) del material. De acuerdo con los valores estudiados, cantidades de fibra hasta 3 kg/m^3 , generan aumentos de hasta 33% en la resistencia a flexión del concreto. La razón es que las fibras aumentan la resistencia a tracción del material, e impiden que se propaguen las fisura, lo cual mejora el comportamiento del concreto a flexión.
- En cuanto al módulo de elasticidad, se observó un aumento en el contenido de fibras PET, produce una pequeña reducción del módulo. Esto se debe a que el PET tiene un módulo de elasticidad inferior al del concreto. En principio, la reducción del módulo de elasticidad no es crítica, debido a que son reducciones porcentualmente pequeñas; sin embargo, es bueno limitar la cantidad de fibras en el concreto, para no generar efectos adversos sobre el material.
- Con base en los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de los materiales, se desarrolló un modelo numérico en un programa comercial de elementos finitos para ingeniería (SAP2000), para simular el comportamiento del concreto reforzado con fibras PET en losas de pavimento rígido. Este modelo

numérico se desarrolló con la finalidad de evaluar esfuerzos internos y deflexiones en los elementos de losas de pavimento rígido.

- En el caso de los esfuerzos internos de la losa, se observó una reducción tanto de los esfuerzos de tensión, como de los momentos flectores al interior del elemento. Esto se debe principalmente al aumento de las deflexiones que genera una reducción en los esfuerzos internos de la losa.
- Adicionalmente, se observó que es posible implementar las fibras PET recicladas en el reforzamiento del concreto para construcción de losas de pavimento rígido. Esto se debe a que, en pequeñas cantidades, la presencia de fibras PET mejora las resistencias de concreto, razón por la cual, se tendrían pavimentos rígidos más resistentes.
- Sin embargo, se produce un aumento en las deflexiones de las losas del pavimento. Esto se debe a que el material reforzado tiene un menor módulo de elasticidad, que el concreto sin reforzar. Lo anterior no es necesariamente perjudicial para las losas de pavimento rígido por varios motivos: En primer lugar, porque los aumentos de las deflexiones son pequeños, y en ningún caso excedieron el 1% de las deflexiones de referencia; en segundo lugar, porque el material reforzado con fibras PET es más tolerante a deflexiones (deformaciones) que el concreto sin reforzar; y, en tercer lugar, porque el aumento en las deflexiones va acompañado de una reducción de esfuerzos en la losa de concreto.
- Finalmente, de acuerdo con lo anterior, preliminarmente se recomienda la implementación de fibras PET recicladas en la construcción de losas de concreto para pavimento rígido. Sin embargo, su implementación se deberá hacer con cautela, debido a que algunos efectos asociados con el tiempo, la degradación de las fibras, el comportamiento mecánico de las losas a edades tardías, o el comportamiento de las losas sometidas a cargas cíclicas, no fueron contempladas en el presente proyecto ya que no se encontraban dentro del alcance de este.

15 RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES.

De acuerdo con los resultados y conclusiones obtenidas del presente proyecto de investigación, se tienen las siguientes recomendaciones:

- En primer lugar, se debe estudiar a profundidad el efecto que tiene el reforzamiento en las deflexiones de las losas de pavimento rígido. Esto es debido a que los aumentos de las deflexiones de las losas de pavimento rígido pueden producir alteraciones en la serviciabilidad de las estructuras de pavimento.
- También, se debe estudiar el efecto de mayores adiciones de fibras PET en la matriz de concreto. En el presente proyecto, dicho valor se limitó a 3kg/m^3 , sin embargo, se deben estudiar rangos mayores de reforzamiento de las losas de pavimento rígido.
- Así mismo, se debe estudiar el efecto del tiempo en las propiedades del material. En el presente estudio, las edades se limitaron a 28 días; por tal motivo se recomienda hacer estudios a mayores edades, para determinar cómo se comportan las fibras de PET en mayores tiempos. De igual forma, se recomienda desarrollar estudios con ensayos acelerados, para evaluar el comportamiento de las fibras PET en ambientes alcalinos similares al concreto.
- Adicionalmente, se recomienda evaluar el comportamiento de muestras de concreto reforzado con fibras PET recicladas sometidas a cargas cíclicas; en el presente estudio la evaluación se limitó a fuerzas estáticas y monotónicas, razón por lo cual se debe profundizar en dicho tema.
- Finalmente, se recomienda evaluar los resultados obtenidos de la presente investigación en modelos físicos de losas de pavimento rígido. En el presente trabajo, todas las evaluaciones de esfuerzos y deflexiones se hicieron mediante modelos numéricos por medio de un programa comercial (SAP2000), y por tal motivo, es necesario llevar a cabo ensayos físicos en laboratorio, para observar fenómenos distintos a los que se describieron en el presente proyecto.

16 BIBLIOGRAFÍA

- ACI. (2022). ACI PRC-211.1-22: Selecting Proportions for Normal-Density and High Density-Concrete - Guide.
- AIS. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)*. Bogotá D.C.: Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica - AIS.
- Alhozaimy, A., Soroushian, P., & Mirza, F. (1996). Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials. *Cement & Concrete Composites*, 85-92.
- Amato, I. (2013). Green cement: Concrete solutions. *Nature*, 300–301.
- Antillón, J. (2016). Uso de fibras en el concreto. *Construcción y tecnología en concreto*, 28-29.
- ASTM. (2013). ASTM C125 - Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.
- ASTM. (2013). ASTM D2130 - Standard Test Method for Diameter of Wool and Other Animal Fibers by Microprojection.
- ASTM. (2020). ASTM C1557 - Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers.
- ASTM. (2020). ASTM D792 - Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.
- Ayala, C., & Riaño, M. (2019). *Influencia de fibras tipo PET en las características de resistencia y durabilidad del mortero de cemento hidráulico (tesis)*. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia.
- Baricevic, A., Pezer, M., Rukavina, M., Serdar, M., & Stirmer, N. (2018). Effect of polymer fibers recycled from waste tires on properties of wet-sprayed concrete. *Construction and Building Materials*, 135-144.
- Bayasi, Z., & McIntyre, M. (2002). Application of Fibrillated Polypropylene Fibers for Restraint of Plastic Shrinkage Cracking in Silica Fume Concrete. *ACI materials journal*, 99(4), 337-344.

- Blettler, M. U. (2017). Plastic pollution in freshwater ecosystems: macro-, meso-, and microplastic debris in a floodplain lake. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189.
- Bostanci, S., Limbachiya, M., & Kew, H. (2018). Use of Recycled Aggregates for Low Carbon and Cost Effective Concrete Construction. *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2018.04.090
- Cardenas-Pulido, J., Rodriguez, S., & Higuera, C. (2020). Evaluación del comportamiento a compresión y propiedades físicas de morteros de cemento reforzados con fibras recicladas PET. *Scientia Et Technica*, 269 - 279.
- CEPAL. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago: Publicación de las Naciones Unidas.
- CSI. (2016). *CSI Analysis Reference Manual*. Berkeley: Computers & Structures Inc.
- Diaz, Y., Torres-Ortega, R., Saba, M., & Berrocal, A. (2022). Theoretical–Experimental Comparison of Behavior Between Deformations of Rigid Pavement Reinforced with Fibers and of Conventional Slabs. *International Journal of Pavement Research and Technology*. doi:10.1007/s42947-022-00200-y
- Figueiredo, A. (2000). *Concreto com Fibras*. Universidad de Sao Paulo.
- Gomes, T., Visconte, L., & Pacheco, E. (2019). Life Cycle Assessment of Polyethylene Terephthalate Packaging: An Overview. *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 533–548. doi:10.1007/s10924-019-01375-5
- Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: a critical review. *Waste Management*, 51, 19–42.
- Hermida, G., Garzón, O., & Lamilla, G. (2006). Concreto de 190 MPa (27685 PSI) nuevo record de resistencia en Colombia. *Boletín del ACI* #7, 4-9.
- ICONTEC. (2004). NTC 118 - Cementos : método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat. Bogotá D.C.
- ICONTEC. (2019). NTC 110 - Cantidad de agua requerida para la consistencia normal de una pasta de cemento hidráulico. Bogotá D.C.
- ICONTEC. (2019). NTC 1776 - Método de ensayo para determinar el contenido total de humedad evaporable por secado de los agregados.
- ICONTEC. (2019). NTC 221 - Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. Bogotá D.C.

- ICONTEC. (2019). NTC 33 - Cementos. Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire.
- ICONTEC. (2021). NTC 121 - Especificación de desempeño para cemento hidráulico. Bogotá D.C.
- ICPC; INVIAS. (2008). *Manual de diseño de pavimentos de concreto: para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito*. Medellín: ICPC.
- INVIAS. (2013). INV E – 213-13 - Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino.
- INVIAS. (2013). INV E - 217-13 - Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto.
- INVIAS. (2013). INV E – 222-13 - Densidad, Densidad relativa y Absorción del agregado fino.
- INVIAS. (2013). INV E - 402-13 - Elaboración y curado de especímenes de concreto en laboratorio para ensayos de compresión y flexión.
- INVIAS. (2013). INV E - 410-13 - Resistencia a la compresión de cilindros de concreto.
- INVIAS. (2013). INV E - 414-13 - Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz.
- INVIAS. (2013). INV E - 424-13 - Módulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto en compresión.
- Irwan, J., Asyraf, R., Othman, N., Koh, H., & Annas, M. (2013). The Mechanical Properties of PET Fiber Reinforced Concrete from Recycled Bottle Wastes. *Advanced Materials Research Volume*, 347-351.
- Johnston, C. (2010). *Fiber-Reinforced Cements and Concretes*. New York: Taylor & Francis.
- Karadelis, J., & Lin, Y. (2015). Flexural strengths and fibre efficiency of steel-fibre-reinforced, roller-compacted, polymer modified concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 498-505. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.04.059
- Iker Bekir Topçu, N. A. (1997). Analysis of rubberized concrete as a composite material. *Cement and Concrete Research*, 27(8), 1135-1139.
- Londoño, C., & Alvarez, J. (2008). *Manual de diseño de pavimentos de concreto : para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito*. Medellín: ICPC.

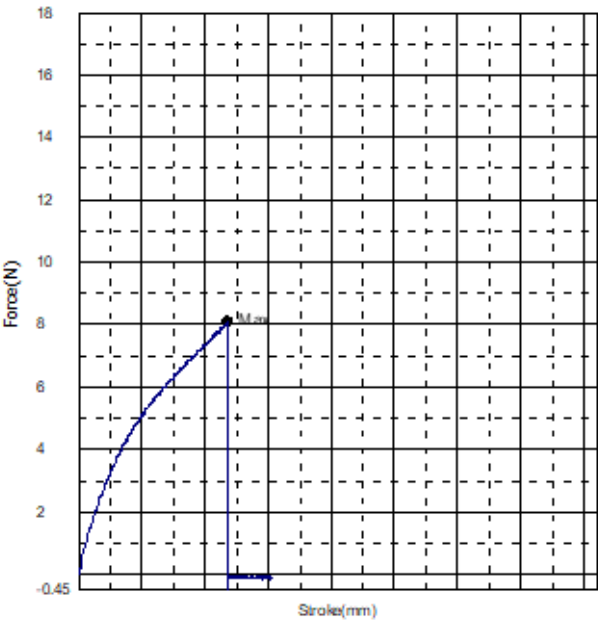
- Lopes, E., Oliveira, A., & Gomes, A. (2017). Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete. *Construction and Building Materials*, 837-848.
- Matallana, R. (2019). *El Concreto. Fundamentos y nuevas tecnologías*. Bogotá D.C.: Corona.
- Mendoza, C., Aire, C., & Dávila, P. (2011). Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido. *Concreto y cemento: Investigación y desarrollo*, 35 - 47.
- Mercante, I., Alejandrino, C., Ojeda, J., Chini, J., & Maroto, C. (2018). Mortar and concrete composites with recycled plastic: A review. *Science and Tecnology of Materials*, 69-79.
- Meyers, M., & Chawla, K. (2008). *Mechanical Behavior of Materials* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Monteiro, P., & Mehta, P. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th Edición. McGraw-Hill Education.
- Pelisser, F., Klegues, O., Gleize, P., & Roman, H. (2012). Mechanical Properties of Recycled PET Fibers in Concrete. *Materials Research*, 15(4), 679-686.
- Rodríguez, L. (2011). *Modelación numérica del concreto simple con elementos finitos usando un modelo constitutivo de Plasticidad (Tesis)*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Ruge Cardenas, J. C., Bastidas, J. G., & Torres, D. A. (2018). *Reinforced concrete with synthetic fibers (PET+PP) for rigid pavement structures*. Bogota: Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI), 2018.
- Sakulneya, A., & Wattanachai, P. (2018). A comparison study on elasticity of rubberized concrete with and without poly (ethylene terephthalate) fibre. *Songklanakarin Journal of Science and Technology (SJST)*, 484-731.
- Sánchez de Guzmán, D. (2002). *Durabilidad y patologia del concreto*. Bogotá D.C.: Asociación Colombiana de Productores de Concreto.
- Saucedo, J., Atoche, J., & Muñoz, S. (2021). Uso de los agregados PET en la elaboración del concreto: Revisión de la literatura. *Avances: Investigación En Ingeniería*, 18, 1-12. doi:0.18041/1794-4953/avances.2.6942
- Segura Franco, J. (2011). *Estructuras de concreto I*. Bogotá D.C. : Editorial Universidad Nacional de Colombia.

- Shamsudin, M., Hamid, N., & Fauzi, M. (2021). Compressive and Flexural Strength of Concrete Containing Recycled Polyethylene Terephthalate (PET). *Key Engineering Materials*, 13-21.
- Sika Colombia. (2014). *Concreto Reforzado con Fibras*. Tocancipá.
- Sika Colombia. (2017). Hoja de datos del producto: SikaPlast RM. Tocancipá, Colombia.
- Solorzano Ordinola, J. A., & Cerna Vasquez Junior, M. A. (2021). *Memoria Investigaciones en Ingeniería*; 7/1/2021, 2-8.
- Sosoi, G., Barbuta, M., Serbanoiu, A., & Babor, D. (2018). Wastes as aggregate substitution in polymer concrete. *Procedia Manufacturing*, 347-351.
- Suasnavas Flores, D. (2017). Degradación de materiales plásticos “PET” (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Torrenti, J., Pijaudier-Cabot, G., & Reynouard, J. (2013). *Mechanical Behavior of Concrete*. New Jersey: Wiley.
- Wang, J., Yuan, X., Deng, S., Zeng, X., & Yu, Z. (2020). Waste polyethylene terephthalate (PET) plastics-derived activated carbon for CO₂ capture: a route to a closed carbon loop. *Green Chemistry*, 22, 6836-6845.
- Zebua, B., Syukur, W., & Nursyamsi, N. (2017). The influence of PET plastic waste gradations as coarse aggregate towards compressive strength of light concrete. *Procedia engineering*, 2.

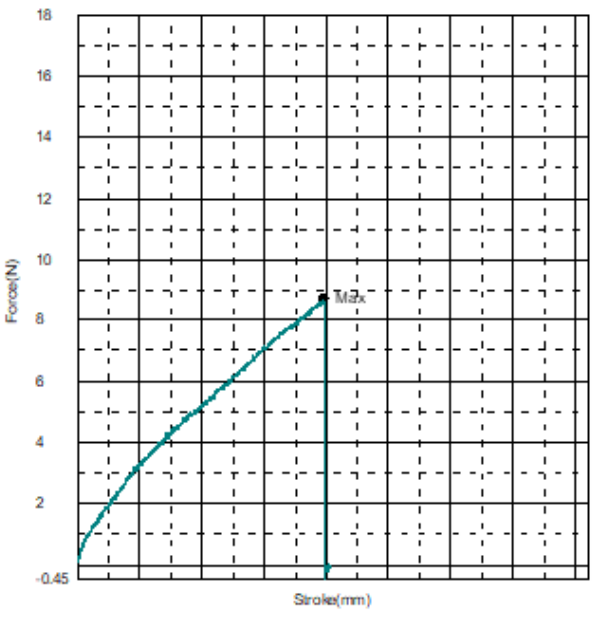
ANEXO 1 – RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ENSAYOS DE TENSIÓN – FIBRAS

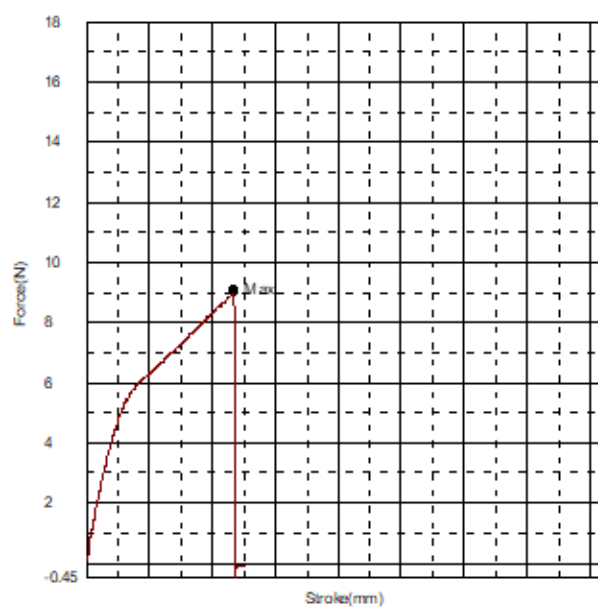
MUESTRA 1



MUESTRA 2



MUESTRA 3



	INFORME DE ENSAYO					
	RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO INV- E410/13					
Fecha de elaboración:	21-abr		Fecha desencofrado:		22-abr	
Referencia:	Concreto Hidraulico		Tipo de cemento		Cemento UG ARGOS	
Balanza utilizada	15000g Ohaus		Maquina a compresión utilizada:		Maquina Universal	
Calibrador utilizado:	Regla metalica SHINWA		Flexometro:		Stanley 3m	

CARACTERISTICA	CONTROL					
Edad en dias	7 DIAS		14 DIAS		28 DIAS	
Fecha de ensayo (falla)	29-abr		6-may		20-may	
Prueba Espécimen	1	2	1	2	1	2
Diametro (cm)	15,4	15,2	15,6	15,3	15,4	15,2
Diametro (pulg.)	6,0	6,0	6,1	6,0	6,1	6,0
Area (cm2)	185	182	190	183	186	181
Area (pulg2)	28,7	28,2	29,4	28,3	28,8	28,1
Altura (cm)	30,22	30,16	30,49	30,21	30,42	30,46
Peso del cilindro (g)	13241	13199	13403	13388	13225	12939
Tipo de falla	c	c	c	c	c	c
Carga maxima (kN)	489,2	481,8	555,2	544,4	672,1	681,3
Esfuerzo (kg/cm2)	264	265	292	298	362	376
Esfuerzo (PSI)	3747	3764	4149	4230	5141	5343
Promedio Esfuerzo (kg/cm2)	265		295		369	
Promedio esfuerzo (PSI)	3755		4190		5242	

CURVA ESFUERZO VS EDAD

a) Cónica b) Cónica y dividida
c) Cónica y transversal d) Transversal
e) Columnar

OBSERVACIONES:

Ejecutó:	Revisó:
----------	---------

		INFORME DE ENSAYO			
		RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO INV-E410/13			
Fecha de elaboración:	24-abr	Fecha desencofrado:	25-abr		
Referencia:	Concreto Hidraulico	Tipo de cemento	Cemento UG ARGOS		
Balanza utilizada	15000g Ohaus	Maquina a compresión utilizada:	Maquina Universal		
Calibrador utilizado:	Regla metalica SHINWA	Flexometro:	Stanley 3m		

CARACTERISTICA	PET-1					
Edad en dias	7 DIAS		14 DIAS		28 DIAS	
Fecha de ensayo (falla)	2-may		9-may		23-may	
Prueba Espécimen	1	2	1	2	1	2
Diametro (cm)	15,5	15,4	15,4	15,3	15,2	15,7
Diametro (pulg.)	6,1	6,1	6,1	6,0	6,0	6,2
Area (cm2)	188	186	186	184	182	193
Area (pulg2)	29,1	28,8	28,8	28,5	28,3	30,0
Altura (cm)	30,3	30,26	30,22	30,38	30,44	30,29
Peso del cilindro (g)	13427	13387	13363	13134	13008	13622
Tipo de falla	b	b	a	c	b	b
Carga maxima (kN)	515,7	507,1	581,7	593,6	739,5	727,1
Esfuerzo (kg/cm2)	275	273	313	322	405	376
Esfuerzo (PSI)	3899	3874	4444	4577	5754	5338
Promedio Esfuerzo (kg/cm2)	274		318		391	
Promedio esfuerzo (PSI)	3887		4510		5546	

CURVA ESFUERZO VS EDAD

The graph shows a linear relationship between the age of concrete in days (x-axis, 0 to 25) and the effort in PSI (y-axis, 0 to 4000). The curve starts at (0,0) and reaches approximately 4000 PSI at 7.5 days, then levels off slightly.

a) Cónica b) Cónica y dividida
c) Cónica y transversal d) Transversal
e) Columnar

OBSERVACIONES:	ADICIONADO CON PET	

Ejecutó: <i>J. go Ruben S.</i>	Revisó:
--------------------------------	---------

		INFORME DE ENSAYO					
		RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO INV- E410/13					
Fecha de elaboración:	26-abr	Fecha desencofrado:		27-abr			
Referencia:	Concreto Hidraulico	Tipo de cemento		Cemento UG ARGOS			
Balanza utilizada	15000g Ohaus	Maquina a compresión utilizada:		Maquina Universal			
Calibrador utilizado:	Regla metalica SHINWA	Flexometro:		Stanley 3m			

CARACTERISTICA	PET-2					
Edad en dias	7 DIAS		14 DIAS		28 DIAS	
Fecha de ensayo (falla)	4-may		11-may		25-may	
Prueba Espécimen	1	2	1	2	1	2
Diametro (cm)	15,2	15,2	15,3	15,4	15,4	15,4
Diametro (pulg.)	6,0	6,0	6,0	6,1	6,1	6,0
Area (cm2)	182	181	184	186	186	185
Area (pulg2)	28,2	28,1	28,5	28,9	28,9	28,7
Altura (cm)	30,38	30,3	30,5	30,32	30,06	15,36
Peso del cilindro (g)	13104	13204	13474	13402	13300	30,4
Tipo de falla	b	b	d	c	c	b
Carga maxima (kN)	540,5	556,44	640,15	633,5	772,7	791,5
Esfuerzo (kg/cm2)	297	307	349	340	415	427
Esfuerzo (PSI)	4222	4358	4948	4827	5888	6063
Promedio Esfuerzo (kg/cm2)	302		344		421	
Promedio esfuerzo (PSI)	4290		4888		5975	

CURVA ESFUERZO VS EDAD

ESFUERZO (PSI)

EDAD CONCRETO (DIAS)

a) Cónica b) Cónica y dividida

c) Cónica y transversal d) Transversal

e) Columnar

OBSERVACIONES:	ADICIONADO CON PET	
Ejecutó: Revisó:		

		INFORME DE ENSAYO					
		RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO INV- E410/13					
Fecha de elaboración:	29-abr	Fecha desencofrado:		30-abr			
Referencia:	Concreto Hidraulico	Tipo de cemento		Cemento UG ARGOS			
Balanza utilizada	15000g Ohaus	Maquina a compresión utilizada:		Maquina Universal			
Calibrador utilizado:	Regla metalica SHINWA	Flexometro:		Stanley 3m			

CARACTERISTICA	PET-1					
Edad en dias	7 DIAS		14 DIAS		28 DIAS	
Fecha de ensayo (falla)	7-may		14-may		28-may	
Prueba Espécimen	1	2	1	2	1	2
Diametro (cm)	15,5	15,3	15,3	15,3	15,4	15,2
Diametro (pulg.)	6,1	6,0	6,0	6,0	6,1	6,0
Area (cm2)	189	183	183	185	186	181
Area (pulg2)	29,3	28,3	28,3	28,6	28,8	28,0
Altura (cm)	30,25	30,18	30,16	30,21	30,47	30,28
Peso del cilindro (g)	13363	13287	13346	13342	13478	13068
Tipo de falla	b	b	c	b	b	b
Carga maxima (kN)	562,6	574,2	632,4	643,8	804,8	797,5
Esfuerzo (kg/cm2)	298	314	346	348	434	441
Esfuerzo (PSI)	4226	4462	4908	4944	6157	6263
Promedio Esfuerzo (kg/cm2)	306		347		437	
Promedio esfuerzo (PSI)	4344		4926		6210	

CURVA ESFUERZO VS EDAD

ESFUERZO (PSI)

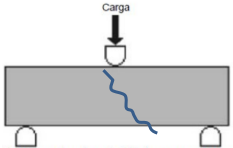
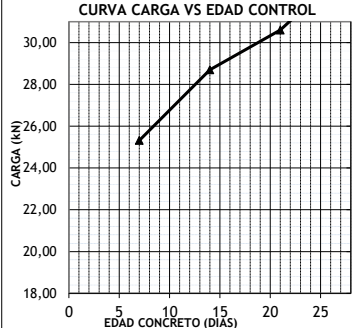
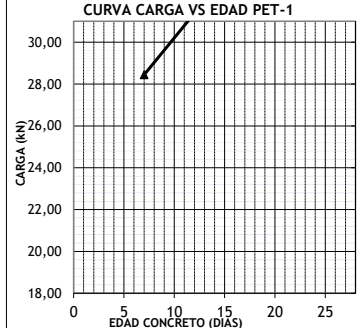
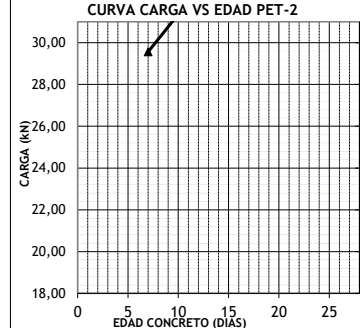
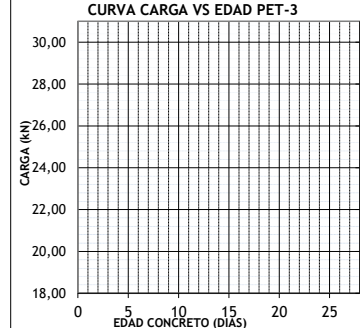
EDAD CONCRETO (DIAS)

a) Cónica b) Cónica y dividida

c) Cónica y transversal d) Transversal

e) Columnar

OBSERVACIONES:	ADICIONADO CON PET	
Ejecutó:  Revisó:		

		INFORME DE ENSAYO															
		RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO USANDO UNA VIGA SIMPLE APOYADA Y CARGADA EN EL PUNTO CENTRAL INV-415/13															
Referencia:	Concreto Hidraulico				Tipo de cemento				Cemento UG ARGOS								
Balanza utilizada					Maquina a compresión utilizada:				Maquina universal								
Calibrador utilizado:	Regla metalica SHINWA				Flexometro:				Stanley 3m								
CARACTERISTICA	CONTROL				PET-1				PET-2				PET-3				
Fecha de Elaboración:	21-abr				24-abr				26-abr				29-abr				
Fecha de Desencofrado:	22-abr				25-abr				27-abr				30-abr				
Edad en días	7	14	21	28	7	14	21	28	7	14	21	28	7	14	21	28	
Fecha de ensayo (fallo):	29-abr	6-may	13-may	20-may	2-may	9-may	16-may	23-may	4-may	11-may	18-may	25-may	7-may	14-may	21-may	28-may	
Ancho (cm)	14,6	14,5	14,5	15,1	14,4	14,5	14,9	14,9	14,6	14,7	14,5	14,4	14,7	14,7	14,7	14,8	
Altura (cm)	14,8	14,7	15,0	15,4	14,9	14,9	15,1	15,1	15,2	15,0	14,7	15,6	15,1	15,2	15,4	15,1	
Longitud (cm)	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	
Apariencia del concreto	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	
Fractura dentro del tercio de la luz libre	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Fractura fuera del tercio de la luz libre																	
Distancia entre línea de fractura y el soporte mas cercano (a) (cm)	19,5	20,1	19,1	19,5	20,2	19,3	18,9	19,5	20,4	18,7	20,0	19,9	20,4	19,0	20,3	18,6	
Carga máxima aplicada (kN)	25,32	28,70	30,60	33,71	28,44	32,56	37,30	38,20	29,56	33,76	35,90	40,76	31,14	35,76	39,40	42,30	
 CURVA CARGA VS EDAD CONTROL  CURVA CARGA VS EDAD PET-1  CURVA CARGA VS EDAD PET-2  CURVA CARGA VS EDAD PET-3 																	
OBSERVACIONES:		ADICIONADO CON PET 															
Ejecutó:																	
		Revisó:															

MÓDULO ELÁSTICO

Este ensayo se desarrolló de acuerdo con la Norma NTC 4025 (Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión):

Cilindro	Altura H - Cilindro [mm]	Diámetro [m]	Área [m ²]
1	0.311	0.154	0.0186
2	0.307	0.154	0.0186
3	0.308	0.156	0.0190
4	0.305	0.154	0.0186

Los resultados del ensayo para el cálculo del módulo elástico y de Poisson, permiten, como se ha mencionado anteriormente, determinar E (módulo de elasticidad secante), mediante la ecuación:

$$E = \frac{(s_2 - s_1)}{(\varepsilon_2 - 0.000050)}$$

De acuerdo con la norma NTC 4025, se presentan con significados de cada término:

E = Módulo de elasticidad Secante [Mpa]

s_2 = esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última

s_1 = esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal ε_1 , de las 50 millonesimas en [Mpa]

ε_2 = deformación longitudinal producida por el esfuerzo s_2 .

MÓDULO ELÁSTICO

MEZCLA 1

Mezcla 1 - Muestra 1		Mezcla 1 - Muestra 2	
s_2	5.621	s_2	5.717
s_1	1.998	s_1	1.971
ε_2	0.0002	ε_2	0.0002
E	24151.0	E	24976.7

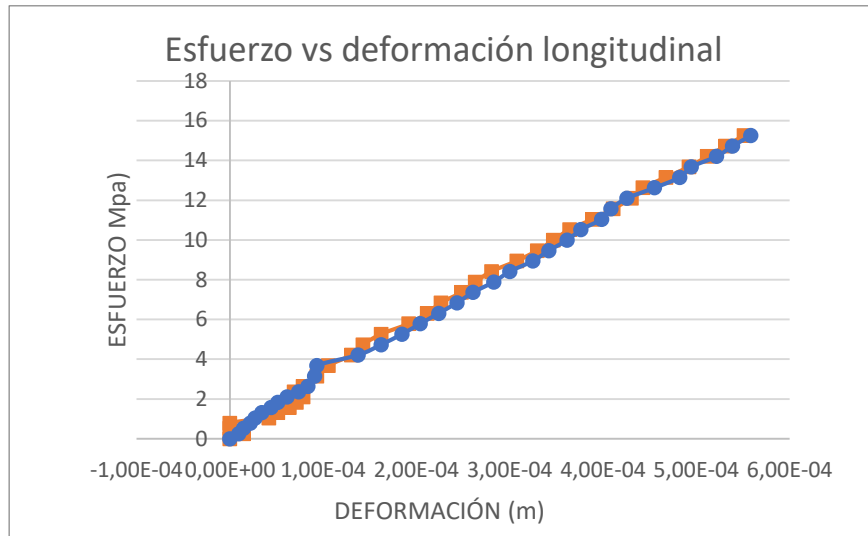


Figura 1. Gráfica esfuerzo – deformación Mezcla 1

MEZCLA 2

Mezcla 2 - Muestra 1		Mezcla 2 - Muestra 2	
s_2	5.703	s_2	5.574
s_1	1.995	s_1	1.987
ϵ_2	0.0002	ϵ_2	0.0002
E	24761.2	E	23933.7

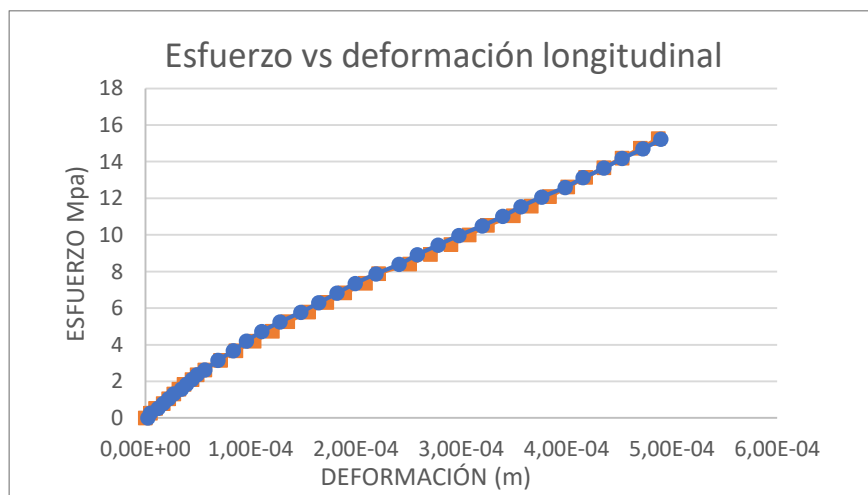


Figura 2. Gráfica esfuerzo – deformación Mezcla 2

MEZCLA 3

Mezcla 3 - Muestra 1		Mezcla 3 - Muestra 2	
s_2	5.710	s_2	5.602
s_1	2.007	s_1	2.019
ϵ_2	0.0002	ϵ_2	0.0002
E	24675.8	E	23876.5

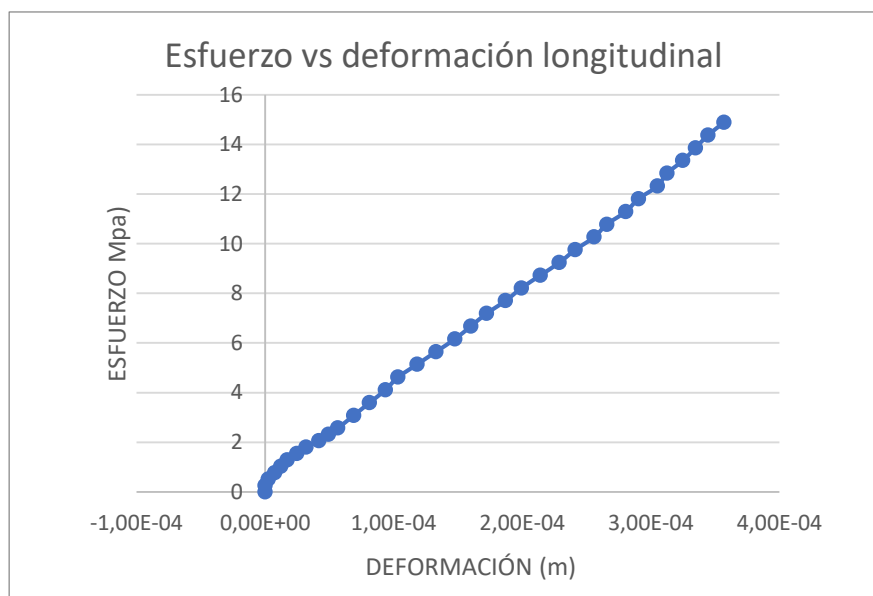


Figura 3. Gráfica esfuerzo – deformación Mezcla 3

MEZCLA 4

Mezcla 4 - Muestra 1		Mezcla 4 - Muestra 2	
s_2	5.554	s_2	5.627
s_1	2.008	s_1	1.961
ϵ_2	0.0002	ϵ_2	0.0002
E	23639.3	E	24450.3

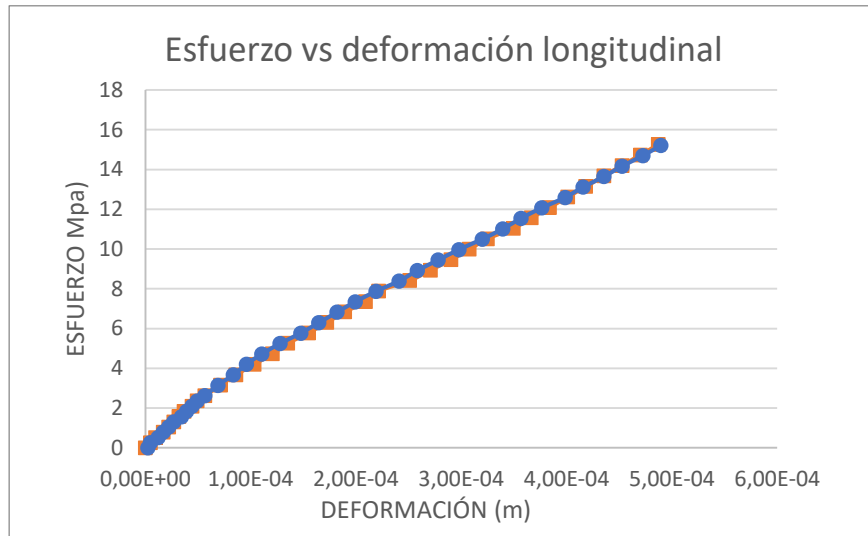


Figura 4. Gráfica esfuerzo – deformación Mezcla 4