



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO

Tesis: Elaboración de una matriz cementante fibratada con HDPE
para mejorar las propiedades a flexión del concreto hidráulico

F1 | FACULTAD
DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Facultad de Ingeniería

**“Elaboración de una matriz cementante fibratada con HDPE
para mejorar las propiedades a flexión del concreto
hidráulico”**

Tesis

Que como parte de los requisitos
para obtener el Grado de:

Maestro en Ciencias

Presenta:

Ing. Jorge Enrique Rodríguez Torres

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Santiago de Querétaro, Querétaro Noviembre 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Elaboración de una matriz cementante fibratada con
HDPE para mejorar las propiedades a flexión del
concreto hidráulico

por

Jorge Enrique Rodríguez Torres

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-309256



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO

Tesis: Elaboración de una matriz cementante fibratada con HDPE
para mejorar las propiedades a flexión del concreto hidráulico

FI | FACULTAD
DE INGENIERÍA



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias

**“Elaboración de una matriz cementante fibratada con HDPE para mejorar las
propiedades a flexión del concreto hidráulico”**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias con línea terminal en Construcción

Presenta

Ing. Jorge Enrique Rodríguez Torres

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Presidente

Firma

Dr. Jaime Horta Rangel
Secretario

Firma

M.I. Rubén Ramírez Jiménez
Vocal

Firma

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán
Suplente

Firma

Dra. Teresa López Lara
Suplente

Firma

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (noviembre 2023)
México



Dedicatorias

A Dios, mi mamá, mis papis, mis hermanos, mi esposa Rosa Ivett y a mis abuelos Pancho y Eva, Q.E.P.D., sin su apoyo incondicional no estaría viviendo estos momentos de crecimiento profesional y personal.

Jorge Enrique



Agradecimientos

A Dios por todas las bendiciones que me ha brindado durante mi carrera profesional, guiándome a tomar las decisiones correctas y corregir las incorrectas.

A mi madre, que a pesar de todo jamás me ha abandonado y me ha apoyado a seguir adelante en mi camino profesional.

A mis papis, por los consejos y los buenos deseos que me han brindado para continuar esforzándome y lograr mis metas.

A mi esposa Rosa Ivett, que desde que iniciamos nuestros estudios universitarios me ha apoyado incondicionalmente en cada decisión de mi vida y en mi carrera profesional.

A mis amigos, Daniel, Gio, Fernanda, Candelas saben que fueron importantes y porque nos ayudamos en nuestra experimentación y poder culminar este posgrado.

A mi director de tesis, el Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, así como a los profesores sinodales, por apoyarme y darme los consejos con el que pude finalizar este proyecto.

Al CONACyT ahora Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), por brindarme el apoyo económico con el cuál pude mantenerme durante este programa de posgrado.

Jorge Enrique Rodríguez Torres



Resumen

La resistencia a la flexión puede considerarse como una medida indirecta de la resistencia a la tracción del concreto, así como un factor determinante de la calidad para pavimentos, por el paso de vehículos y por la diferencia de temperatura un lado a otro de la losa. Es necesario pensar que aprovechar los residuos de productos elaborados de Polietileno de Alta Densidad (PEAD, HDPE por sus siglas en inglés) como un aditivo sustentable del concreto hidráulico ayude al aumento de su resistencia a flexión, y sea una opción utilizable en la industria de la construcción, además de ayudar a disminuir la contaminación ambiental generada por estos productos.

El plástico es un producto que contiene un alto rango de material sintético y semisintético extremadamente maleable y moldeable hecho con polímeros de compuestos orgánicos. Mundialmente se tiran a la basura 280 millones de toneladas de plástico al año, sólo el 9% se recicla y el 12% se incinera. En cuanto a México, la industria del plástico, produce más de 7 millones de toneladas al año; el 48% es destinado a envases y embalajes que no necesariamente terminan siendo reciclados ya que la capacidad real de reciclaje del total de residuos valorizables apenas llega al 6.07%.

Utilizando el diseño para mezclas del ACI y normas mexicanas (NMX), con las cuales se pueda elaborar y dosificar una mezcla de concreto, en el que se realicen los ensayos de compresión en especímenes de cilindros como punto de comparación y posteriormente ensayos de resistencia a flexión de vigas de concreto elaboradas con mezclas fibratadas con PEAD, en las que se obtengan como resultados favorables, un aumento de resistencia a flexión superior al teórico para un concreto adicionado con el 2.5, 5 y 7.5% de PEAD de al menos un 10 a 20%.

Palabras clave: Concreto hidráulico, matriz cementante, polietileno de alta densidad, contaminación ambiental, resistencia a flexión.



Abstract

Flexural strength can be considered as an indirect measure of the tensile strength of concrete, as well as a determinant of pavement quality, due to the passage of vehicles and the difference in temperature from one side of the slab to the other. It is necessary to think that taking advantage of the residues of products made of High-Density Polyethylene (HDPE) as a sustainable additive of hydraulic concrete helps to increase its flexural strength, and is a usable option in the construction industry, besides helping to reduce the environmental pollution generated by these products.

Plastic is a product that contains a high range of extremely malleable and moldable synthetic and semi-synthetic materials made from polymers of organic compounds. Worldwide, 280 million tons of plastic are thrown away each year, only 9% is recycled and 12% is incinerated. In Mexico, the plastics industry produces more than 7 million tons per year; 48% is destined for containers and packaging that do not necessarily end up being recycled, since the real recycling capacity of the total recoverable waste is only 6.07%.

Using the ACI mix design and Mexican standards (NMX), with which a concrete mix can be prepared and dosed, in which compression tests are performed on cylinder specimens as a point of comparison and later flexural strength tests of concrete beams prepared with HDPE fiber-reinforced mixes, in which favorable results are obtained, an increase in flexural strength higher than the theoretical for a concrete added with 2.5, 5 and 7.5% HDPE of at least 10 to 20%.

Keywords: Hydraulic concrete, cementitious matrix, high density polyethylene, environmental contamination, flexural strength.



Índice

Dedicatorias.....	I
Agradecimientos.....	II
Resumen	III
Abstract	IV
Índice.....	V
Índice de Tablas	VIII
Índice de Figuras	IX
Introducción	15
Capítulo 1: Antecedentes, planteamiento del problema y justificación	16
1.1 Antecedentes	16
1.2 Planteamiento del problema	20
1.3 Justificación.....	24
1.4 Hipótesis.....	25
1.5 Objetivos	25
1.5.1 Objetivo General.....	25
1.5.2 Objetivos específicos.....	25
Capítulo 2: Fundamentación Teórica	26
2.1 Materiales compuestos	26
2.2 Materiales compósitos reforzados con fibras	27
2.3 Concreto	28
2.4 Cemento.....	28
2.5 Agregados.....	28
2.6 Agua de mezclado	28
2.7 Resistencia a la flexión del concreto	29
2.8 Polietileno de Alta Densidad (PEAD).....	29
Capítulo 3: Metodología.....	31
3.1 Metodología general.....	31
3.2 Diseño y dosificación de la mezcla de concreto.....	32
3.2.1 Elección del Cemento Portland	32
3.2.2 Clasificación de los agregados y granulometría	32
3.2.3 Determinación de los pesos volumétricos de los agregados.....	33



3.2.4	Determinación de la densidad en los agregados	33
3.2.5	Determinación de humedad en los agregados	34
3.2.6	Determinación de absorción en los agregados	34
3.2.7	Determinación del módulo de ruptura o resistencia de flexión	34
3.3	Polietileno de Alta Densidad (PEAD).....	35
3.3.1	Reciclaje y corte del PEAD	36
3.3.2	Dimensiones y dosificación de PEAD.....	38
3.3.3	Proporciones en peso del PEAD.....	41
3.4	Elaboración de los especímenes de concreto (Especímenes de control)....	41
3.5	Elaboración de especímenes de concreto con matriz fibratada con PEAD	43
4	Capítulo 4: Propiedades de los materiales, diseño y dosificación de la mezcla de concreto	45
4.1	Propiedades del cemento	45
4.2	Propiedades del agregado grueso	45
4.2.1	Peso volumétrico	46
4.2.2	Granulometría	48
4.2.3	Densidad del agregado grueso	50
4.2.4	Absorción del agregado grueso	50
4.2.5	Humedad del agregado grueso	51
4.3	Propiedades de agregado fino.....	51
4.3.1	Peso volumétrico	51
4.3.2	Granulometría.....	53
4.3.3	Densidad del agregado fino	54
4.3.4	Absorción del agregado fino.....	55
4.3.5	Humedad del agregado fino.....	55
4.4	Diseño y dosificación de la mezcla de concreto.....	56
4.5	Dosificación de los especímenes de concreto (cilindros y vigas)	61
4.6	Dosificación de las fibras PEAD.....	62
	Capítulo 5: Resultados de experimentación	63
5.1	Mezclas de control.....	63
5.1.1	Cilindros de concreto.....	63
5.1.2	Vigas de concreto (control)	66



5.2	Resultados de vigas con matriz cementante fibrada con PEAD en 2x20mm	68
5.2.1	Vigas fibradas con 2.5% de PEAD en 2x20mm	68
5.2.2	Vigas fibradas con 5% de PEAD en 2x20mm	69
5.2.3	Vigas fibradas con 7.5% de PEAD en 2x20mm	71
5.2.4	Comparación general de resultados de vigas fibradas con PEAD en 2x20mm	72
5.3	Resultados de vigas con matriz cementante fibrada con PEAD en 4x20mm	74
5.3.1	Vigas fibradas con 2.5% de PEAD en 4x20mm	74
5.3.2	Vigas fibradas con 5% de PEAD en 4x20mm	76
5.3.3	Vigas fibradas con 7.5% de PEAD en 4x20mm	78
5.3.4	Comparación general de resultados de vigas fibradas con PEAD en 4x20mm	79
5.4	Resultados de vigas con matriz cementante fibrada con PEAD en 6x20mm	81
5.4.1	Vigas fibradas con 2.5% de PEAD en 6x20mm	81
5.4.2	Vigas fibradas con 5% de PEAD en 6x20mm	83
5.4.3	Vigas fibradas con 7.5% de PEAD en 6x20mm	85
5.4.4	Comparación general de resultados de vigas fibradas con PEAD en 6x20mm	86
5.5	Resultados de vigas con matriz cementante fibrada con PEAD en 1.5x30mm	88
5.5.1	Vigas fibradas con 2.5% de PEAD en 1.5x30mm	88
5.5.2	Vigas fibradas con 5% de PEAD en 1.5x30mm	90
5.6	Procedimiento de elaboración de vigas de concreto con fibras de PEAD	92
5.6.1	Mezclado mecánico del concreto con PEAD y elaboración de especímenes.	93
	Conclusiones	97
	Referencias Bibliográficas	100



Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación amplia de los materiales compuestos.....	26
Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas del PEAD.....	30
Tabla 3. Normas para propiedades de agregados y elaboración de concreto.....	31
Tabla 4. Dimensiones del molde cilíndrico para el agregado grueso.	46
Tabla 5. Pesos volumétricos del agregado grueso.	47
Tabla 6. Resultados de granulometría agregado grueso.....	48
Tabla 7. Dimensiones del molde para el agregado fino.....	52
Tabla 8. Pesos volumétricos del agregado fino.....	52
Tabla 9. Resultado granulometría agregado fino.	53
Tabla 10. Propiedades de los materiales a utilizar.	56
Tabla 11. Revenimientos recomendados según la tabla 6.3.2 para elementos constructivos	57
Tabla 12. Agua y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado ⁵	58
Tabla 13. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.	58
Tabla 14. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.	59
Tabla 15. Volumen de la mezcla sin agregado fino.	59
Tabla 16. Corrección de las cantidades de los agregados por humedad y absorción.....	60
Tabla 17. Volumen de concreto requerido para moldes cilíndricos y prismáticos.	61
Tabla 18. Dosificación de la mezcla de concreto para cilindros.	61
Tabla 19. Dosificación de la mezcla de concreto para vigas.	62
Tabla 20. Dosificación de fibras de PEAD en vigas.....	62
Tabla 21. Resistencia teórica del concreto diseñado.....	63
Tabla 22. Resistencia de los cilindros de control.....	64
Tabla 23. Resultados de las vigas de control.	66
Tabla 24. Resultados de vigas fibratadas con 2.5% PEAD con tamaño de 2x20mm.	68
Tabla 25. Resultados de vigas fibratadas con 5% PEAD con tamaño de 2x20mm.....	69
Tabla 26. Resultados de vigas fibratadas con 7.5% PEAD con tamaño de 2x20mm.....	71
Tabla 27. Comparación de pesos volumétricos en las proporciones de adición de PEAD en 2x20mm.	74
Tabla 28. Resultados de vigas fibratadas con 2.5% PEAD con tamaño de 4x20mm.....	75
Tabla 29. Resultados de vigas fibratadas con 5% PEAD con tamaño de 4x20mm.....	76
Tabla 30. Resultados de vigas fibratadas con 7.5% PEAD con tamaño de 4x20mm.....	78
Tabla 31. Comparación de pesos volumétricos en las proporciones de adición de PEAD en 4x20mm.	81
Tabla 32. Resultados de vigas fibratadas con 2.5% PEAD con tamaño de 6x20mm.....	82
Tabla 33. Resultados de vigas fibratadas con 5% PEAD con tamaño de 6x20mm.....	83
Tabla 34. Resultados de vigas fibratadas con 7.5% PEAD con tamaño de 6x20mm.....	85
Tabla 35. Comparación de pesos volumétricos en las proporciones de adición de PEAD en 6x20mm.	88
Tabla 36. Resultados de vigas fibratadas con 2.5% PEAD con tamaño de 1.5x30mm.....	89
Tabla 37. Resultados de vigas fibratadas con 5% PEAD con tamaño de 1.5x30mm.....	90

Índice de Figuras

Figura 1. Tipo de acomodo de fibras en materiales compuestos.	27
Figura 2. Código de resinas del PEAD.	30
Figura 3. Botellas de polietileno de alta densidad.....	36
Figura 4. Limpieza de botellas de PEAD.....	36
Figura 5. Lavado de botellas de PEAD.....	37
Figura 6. Equipo de corte utilizado (guillotina).....	37
Figura 7. Recorte de PEAD.....	38
Figura 8. Dimensiones de fibras de PEAD.	38
Figura 9. Fibra Tipo A - 2mm x 20mm.....	39
Figura 10. Fibra Tipo B - 4mm x 20mm.....	39
Figura 11. Fibra Tipo C - 6mm x 20mm.....	40
Figura 12. Fibra Tipo D - 1.5mm x 30mm.....	40
Figura 13. Proporciones de fibras de PEAD.	41
Figura 14. Dimensiones de espécimen cilindro de concreto.....	42
Figura 15. Nomenclatura de edades de especímenes.	42
Figura 16. Molde prismático para viga de concreto.....	43
Figura 17. Designación de fibras de PEAD.	44
Figura 18. Diagrama de flujo de experimentación general.	44
Figura 19. Cemento Portland utilizado en esta investigación.	45
Figura 20. Ubicación del banco de materiales donde se obtienen los agregados.	46
Figura 21. Muestreo y cuarteo del agregado grueso para su PV.....	47
Figura 22. Ensayo para la determinación PVSS y PVSC.	48
Figura 23. Curva granulométrica del agregado grueso. Fuente: Propia.....	49
Figura 24. Ensayo granulométrico del agregado grueso.....	49
Figura 25. Peso de agregado grueso (a), ensayo de densidad del agregado grueso (b).	50
Figura 26. Pesaje de agregado (a), Determinación de humedad del agregado grueso (b). ..	51
Figura 27. Ensayo de peso volumétrico del agregado fino.	52
Figura 28. Curva granulométrica de la arena. Fuente: Propia.....	53
Figura 29. Análisis granulométrico del agregado fino, vista en planta (a), vista lateral (b).54	
Figura 30. Determinación de densidad y absorción del agregado fino, prueba cono (a); prueba en matraz (b).	55
Figura 31. Peso de material (a); peso de charola (b).....	56
Figura 32. Resistencia teórica del concreto con $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$. Fuente: Propia.	63
Figura 33. Cilindros elaborados para su determinación de resistencia a compresión.....	64
Figura 34. Comparación de la resistencia de la mezcla de diseño con la teórica. Fuente: Propia.	65
Figura 35. Ensayos de resistencia a compresión de los cilindros de concreto.....	65
Figura 36. Comparación de la resistencia a flexión del concreto. Fuente: Propia.	67
Figura 37. Elaboración de especímenes (a) de vigas de control y curado (b).....	67
Figura 38. Gráfica de comparación de resultados de resistencia a flexión de vigas con 2.5% PEAD en 2x20mm y vigas de control. Fuente: Propia.	68



Figura 39. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 2.5% PEAD en 2x20mm.	69
Figura 40. Gráfica de comparación de resultados de resistencia a flexión de vigas con 5% PEAD en 2x20mm y vigas de control. Fuente: Propia.	70
Figura 41. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 5% PEAD en 2x20mm.	70
Figura 42. Gráfica de comparación de resultados de resistencia a flexión de vigas con 7.5% PEAD en 2x20mm y vigas de control. Fuente: Propia.	71
Figura 43. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 5% PEAD en 2x20mm.	72
Figura 44. Resultados de resistencia a flexión de vigas fibratadas con PEAD en 2x20mm en sus proporciones distintas. Fuente: Propia.	73
Figura 45. Se muestra la adherencia de las fibras 2x20mm.	73
Figura 46. Determinación de pesos volumétricos para vigas con fibras de 2x20mm.	74
Figura 47. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 2.5% PEAD en 4x20mm y vigas de control. Fuente: Propia.	75
Figura 48. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 2.5% PEAD en 4x20mm.	76
Figura 49. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 5% PEAD en 4x20mm y vigas de control. Fuente: Propia.	77
Figura 50. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 5% PEAD en 4x20mm.	77
Figura 51. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 7.5% PEAD en 4x20mm y vigas de control. Fuente: Propia.	78
Figura 52. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 7.5% PEAD en 4x20mm.	79
Figura 53. Resultados de resistencia a flexión de vigas fibratadas con PEAD en 4x20mm en sus proporciones distintas. Fuente: Propia.	80
Figura 54. Se muestra la adherencia de las fibras 4x20mm.	80
Figura 55. Determinación de pesos volumétricos para vigas con fibras de 4x20mm.	81
Figura 56. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 2.5% PEAD en 6x20mm y vigas de control. Fuente: Propia.	82
Figura 57. Montaje de viga en prensa (a), Ensayo de vigas fibratadas con 2.5% PEAD en 6x20mm (b).	83
Figura 58. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 5% PEAD en 6x20mm y vigas de control. Fuente: Propia.	84
Figura 59. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 5% PEAD en 6x20mm.	84
Figura 60. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 7.5% PEAD en 6x20mm y vigas de control. Fuente: Propia.	85
Figura 61. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 7.5% PEAD en 6x20mm.	86
Figura 62. Resultados de resistencia a flexión de vigas fibratadas con PEAD en 6x20mm en sus proporciones distintas. Fuente: Propia.	87



Figura 63. Se muestra la baja adherencia de las fibras 6x20mm.	87
Figura 64. Determinación de pesos volumétricos para vigas con fibras de 6x20mm.....	88
Figura 65. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 2.5% PEAD en 1.5x30mm y vigas de control. Fuente: Propia.....	89
Figura 66. Adherencia de las vigas fibratadas con PEAD en proporción de 2.5% de 1.5x30mm.	90
Figura 67. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 5% PEAD en 1.5x30mm y vigas de control. Fuente: Propia.....	91
Figura 68. Mezclado manual del concreto con PEAD.....	92
Figura 69. Mezclado mecánico del concreto con PEAD.	92
Figura 70. Agregados para la mezcla de concreto; cemento (a), arena (b), grava (c).....	93
Figura 71. Mezcla de concreto homogénea.....	94
Figura 72. Adición de PEAD en la mezcla de concreto.....	94
Figura 73. Elaboración de vigas de concreto con fibras de PEAD.....	95
Figura 74. Fraguado (a) y curado (b) de especímenes de concreto.....	95
Figura 75. Sección de la viga de concreto con PEAD.	96
Figura 76. Sección de viga homogeneizada con PEAD.....	96



Abreviaturas y Siglas

a	Distancia entre apoyos	mm	Milímetros
A	Absorción	Mpa	Megapascal
Aa	Absorción agregado fino	MR	Módulo de Ruptura
a/c	Agua/cemento	N/mm ²	Newton/milímetro cuadrado
ACI	American Concrete Institute	NMX	Norma Mexicana
Ag	Absorción agregado grueso	ONNCCE	Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación
ANIPAC	Asociación Nacional de la Industria del Plástico		
b	Base	ρ	Densidad
C	Concreto	PEAD	Polietileno de Alta Densidad
CA	Cantidad de Arena	PET	Polietileno Tereftalato
CC	Cantidad de Cemento	PP	Polipropileno
Cd.	Ciudad	PROY	Proyecto
CG	Cantidad de Grava	PV	Peso volumétrico
cm	Centímetros	PVSC	Peso volumétrico seco compacto
CO ₂	Bióxido de Carbono	PVSS	Peso volumétrico seco suelto
CPC	Concreto Portland Compuesto	RCA	Agregados de concreto reciclado
d	Peralte	RCD	Residuos de concreto demolido
f'c	Resistencia	RS	Resistencia a sulfatos
g/cm ³	Gramos/centímetro cúbico	t	Tonelada
g/g-mol	Peso molecular	TMG	Tamaño máximo de agregado
H	Humedad	TN	Terreno natural
HDPE	High Density Polyethylene	V	Volumen
in	Pulgada	W	Peso
ISO	International Organization for Standardization	wfm	Peso de matraz con agua
KV/cm	Kilovoltio/centímetro	wfwm	Peso de matraz con agua y suelo
kg	Kilogramo	wgs	Peso de grava seca
kg/cm ²	Kilogramo/centímetro cuadrado	wgss	Peso grava superficialmente seca
kg/m ³	Kilogramo/metro cúbico	wgssa	Peso grava superficialmente seca en agua
kN	Kilonewton	wm	Peso de muestra de suelo
L	Distancia o Litro	Ws	Peso seco
m	Metro	wsss	Peso de arena superficialmente seca
m ³	Metro cúbico	Ww	Peso húmedo
MF	Módulo de Finura	Ø	Diámetro
Mg	Miligramos		



Introducción

Conforme el tiempo pasa, vamos indagando y adquiriendo conocimientos que nos ayudan a entender el motivo de las cosas que vemos a nuestro alrededor en este mundo, aunque paralelamente hemos ido descuidándolo. Hoy en día la contaminación es un problema global que nos genera preocupación por que cada vez se hace más evidente en el ambiente, teniendo una probabilidad de que empeore cada vez más y sin darnos cuenta no se detiene a menos que se establezcan acciones y soluciones cuanto antes.

Uno de los factores que afecta al medio ambiente, es la contaminación por productos plásticos, estos son elaborados exponencialmente cada año, su uso se ha vuelto muy determinante en la labor diaria. Debido a la falta de cultura ambiental, estos productos terminan siendo desechados, generando contaminación en suelos, cuerpos de agua o en algún punto de la naturaleza. Por lo que, a causa de esta problemática, es necesario encontrar soluciones mediante el uso de estos productos, con el fin de obtener una adaptación, inclusión y aplicación dentro del ámbito de la industria de la construcción.

El uso del concreto hidráulico hoy en día, después del agua, es el material más usado en el mundo para la construcción de edificaciones y distintas obras civiles. A pesar de que este material es eficiente, tiene debilidades y para esta investigación se hace énfasis en una de ellas, la cual es su baja resistencia a flexión. Se ha buscado mejorarlo mediante el uso de otros materiales reciclables que se adicionan o sustituyen a los componentes normales del concreto (cemento, grava, arena), tal es el caso de plásticos como el PET, PEAD, PP, entre otros.

Existen distintos tipos de plástico y no todos son reciclados después de su uso. El PEAD (HDPE, por sus siglas en inglés) presenta características como rigidez, dureza y resistencia a la tensión; por lo que en esta investigación se pretende aprovechar los desechos de este producto (reciclándolos) e incluyéndolos en una mezcla de concreto en forma de macrofibras de dimensiones y proporciones determinadas que ayuden a un mejoramiento del concreto en su resistencia a flexión.



Capítulo 1: Antecedentes, planteamiento del problema y justificación

1.1 Antecedentes

a. Modificación de la composición del concreto para su mejoramiento

Las investigaciones han dado resultados positivos al sustituir materiales en la matriz cementante del concreto hidráulico convencional con el fin de obtener mejores beneficios y propiedades. Creando materiales compuestos a base de una matriz cementante con otros distintos materiales reciclables (Delvasto et al., 2011).

Un ejemplo de esto nos dan Fraire Cabral et al., (2014) en el que sustituyeron el agregado grueso y el agregado fino con escoria de fundición de desechos para obtener una resistencia igual a la de un concreto tradicional, en esta investigación realizaron diferentes mezclas de concreto con distintas combinaciones de materiales, en la que los resultados más favorables que determinaron fue la mezcla realizada con arena de río y grava de escoria igualando la resistencia de control del diseño que utilizaron para su dosificación de concreto, dando una referencia en que podemos usar una matriz de concreto distinta a lo convencional que nos puede ayudar a obtener resultados favorables en las propiedades del concreto hidráulico convencional (cemento, agregados y agua).

De igual manera se han utilizado como agregados a concretos que fueron reciclados, para saber si el cambiar la composición de un concreto convencional presentaba mejores resultados de resistencia de flexión y tensión, Martínez-Soto & Mendoza-Escobedo, (2006) como resultados obtuvieron que al utilizar agregados reciclados en mezclas para concretos clase II, este tiene una variedad de aplicaciones en la construcción poco despreciables, su mejor aplicación la encontraron en consumos de cemento bajos hasta 300 kg/m^3 , debido a que para consumos mayores pueden resultar mezclas antieconómicas.

Los residuos de construcción y demolición (RCD) utilizados de manera secundaria con el fin de apoyar la política ambiental han sido analizados mediante los efectos de reactividad de la pasta de cemento en el concreto hidráulico reemplazando el cemento



portland con RCD en finas partes ($<5\text{mm}$) teniendo resultados similares, dando paso al uso de este tipo de residuos para la mejora del concreto hidráulico (Frías et al., 2021).

Zhang et al., (2021), experimentaron con fibras de basalto para reforzar el concreto hidráulico, utilizando vigas y analizando el comportamiento de la resistencia a flexión de dichas vigas compuestas, así como la comparación de beneficios con una viga con refuerzo de acero, obteniendo resultados elevados para la viga con fibras de basalto.

El concreto hidráulico reforzado con fibras de materiales reciclables da paso a un material compuesto con mejores beneficios, tal es el caso de fibras como el polipropileno, las cuales presentan beneficios en sus propiedades mecánicas en estructuras de espacios públicos (Blazy & Blazy, 2021). Las fibras de acero presentan de igual manera beneficios para este propósito de mejoramiento de las propiedades del concreto hidráulico, agrupadas en forma de gancho con tres volúmenes de fibra diferentes al (0,5 %, 1,0 % y 1,5 %) a las mezclas por volumen de concreto. Determinando que la resistencia a la flexión, aumenta significativamente con respecto a un concreto hidráulico convencional (Yazici et al., 2007).

Krishna & Rao (2014), experimentaron con fibras de poliéster al 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4% en peso de cemento realizando una comparación ente un concreto hidráulico convencional y uno reforzado con estas fibras para evaluar la resistencia a compresión, tracción y flexión, obteniendo un aumento en estas propiedades conforme se adiciona más fibra, proponiendo un 0,3% de fibras en peso de cemento como óptimo.

La modificación del concreto hidráulico mediante fibras de materiales de acero o polímeros está siendo beneficiada en el mercado, sin embargo, existen desventajas como oxidación, presencia de erizos, o pérdida de ductilidad en el caso de las fibras de acero; o un bajo módulo de elasticidad, costo de producción elevados y baja adherencia a la matriz cementosa (Irías Pineda, 2013). Estas investigaciones nos demuestran que la modificación y/o adición de otros materiales a una matriz cementante de concreto puede favorecerlo, igualando o aumentando las propiedades en estos casos particulares de resistencia, teniendo con ello concretos que sean económicos, de fácil realización e incluso con características más benéficas que un concreto hidráulico convencional (McNeil & Kang, 2013).



b. Adición de plásticos en el concreto para su mejoramiento

Existen materiales en el mundo que perjudican al medio ambiente, ya sea por la falta de conciencia ambiental o la falta de normas más severas con consecuencias estrictas para los causantes (Rivera-Garibay et al., 2020). Tal es el caso de los plásticos, pese a que existen normas que protegen el ambiente, la cantidad de contaminación es muy grande. Los plásticos son uno de los materiales más contaminantes que se pueden encontrar en casi cualquier lugar siendo desechados y olvidados (García Linan, 2015). Esto ha despertado el interés de investigadores que han tratado de incluir este tipo de materiales desechados en el concreto hidráulico para obtener un material compuesto (concreto y plástico) que favorezca el medio ambiente y de igual manera a la industria de la construcción (Kangavar et al., 2022).

A pesar de los resultados de investigaciones anteriores en las que buscan materiales que terminan siendo costosos o de difícil obtención, se ha optado por materiales que sean menos costosos y fáciles de obtener buscando un beneficio tanto para la construcción como para el medio ambiente, tal es el caso de los plásticos como el Polietileno Tereftalato (PET) y Polietileno de Alta Densidad (PEAD, HDPE por sus siglas en inglés) (Infante-Alcalde & Valderrama-Ulloa, 2019). Se ha evaluado el uso del 15, 30 y 45% de PET adicionado y evaluado en una mezcla de concreto con el fin de aumentar la resistencia de compresión entre un concreto hidráulico convencional, obteniendo resultados en el que logra igualarse la resistencia con el 15% de PET utilizado (Peralta Guevara, 2014).

El uso del PEAD y PET en la industria de la construcción ha tenido una variedad de investigaciones en diferentes países del mundo, en los que destacamos algunos trabajos realizados, que toman a estos polímeros como un material adicional a lo que es una mezcla de concreto hidráulico convencional, o incluso se hacen algunas modificaciones de cantidades en el diseño de la mezcla en las que sustituyen en ciertos porcentajes los agregados o se disminuyen las cantidades de cemento adicionando estos materiales (Rivas, 2016).

En Chile se ha investigado la relación que tiene un mortero convencional (cemento, arena y agua) con un mortero adicionado con PEAD picado proveniente de bolsas en distintos porcentajes (0.2, 0.5 y 0.8%) que van a razón del peso de cemento, en esta investigación se hicieron distintas pruebas, en la que se destacan los ensayos de resistencia a flexión y



compresión, en ellas se obtuvieron como resultados bajas resistencias para los concretos adicionados con PEAD en porcentajes de 0.2 y 0.8%, aunque menos pronunciada para el 0.5% de adición, teniendo como conclusión que dicho concreto modificado puede ser utilizado en elementos no estructurales o que estén sometidos a cargas bajas (Gómez et al., 2011).

Hernández López & Santana Sánchez (2018), realizaron una investigación en la cual sustituyeron el 50% de agregado fino por Residuos sólidos de la Construcción y Demolición (RCD) en la elaboración de una mezcla de concreto, en la que obtuvieron como resultados positivos en la resistencia de compresión, de igual manera experimentaron con el PEAD en la mezcla de concreto lo que proporcionó beneficios en la resistencia de igual manera, pero en cantidades menores tratando de buscar una proporción óptima.

En Perú, evaluaron la resistencia de compresión entre un concreto convencional adicionado con PEAD y uno adicionado con PET, en dónde se llegó a la conclusión de que para un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ adicionado con 1, 2 y 3% de material PET aumenta efectivamente la resistencia a la compresión con respecto a un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ adicionado con 1, 2 y 3% de material PEAD en un 11, 18 y 19% respectivamente, sin embargo no se descarta la evaluación de la resistencia a flexión con dicho polímero pero en porcentajes menores (Valenzuela Ccahuana & Dennis Huaman, 2018).

El PEAD utilizado como un refuerzo en el concreto hidráulico y adicionado en macrofibras con distintas medidas se ha evaluado con el fin de ayudar al aumento de la resistencia a la flexión del concreto, elaborando vigas de concreto obteniendo resultados favorables para las tiras con dimensiones de 15x30 mm y un 15% de fibras en base al peso del cemento, teniendo un aumento en la resistencia a flexión del concreto de hasta un 9% aproximadamente en comparación con un concreto hidráulico convencional (Guzmán Burelos & Rodríguez Torres, 2020).

Derivado de las investigaciones mencionadas, se tiene la idea de hacer énfasis en que el PEAD es un material factible además de ser considerado sustentable si se ve desde el punto de vista del reciclaje.



1.2 Planteamiento del problema

a. Contaminación ambiental por plástico

En los inicios de la década del 2010 al 2020, la producción de residuos sólidos en el mundo se pudo estimar en al menos 1,300 millones de toneladas diarias, y se realizó una estimación en la cual nos dice que podría aumentarse hasta 2,200 millones de toneladas para el año 2025, creando un problema de contaminación aun mayor a lo que se tiene hoy en día (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012).

Según (Fuhr & Franklin, 2020), desde el nacimiento de los productos elaborados a base de polímeros, como son los plásticos, ha tenido un aumento en su solicitud que genera problemas en la logística de desechos de este tipo, aproximadamente se calcula que el 40% de estos productos tienen un tiempo de uso de al menos 30 días para después ser inutilizados. En el mundo se crean más de 400 millones de toneladas de plástico anualmente, produciendo cantidades enormes de desechos de plástico, y dan como resultado problemas en el medio ambiente. El reciclaje no se presenta como una opción de solución 100% favorable, debido a que no es eficiente por la gran producción y desechos del plástico que se generan, alrededor del 10% del plástico que se ha creado desde los años 50's hasta el 2020 se han reciclado, siendo una cifra extremadamente baja.

El uso de estos productos elaborados a base de polímeros y compuestos orgánicos, ha tenido un aumento debido a que es un material sintético con mucha maleabilidad y puede ser moldeado de tal forma que cumpla con la meta de diseño para la que será utilizado. En el año 2015, mundialmente se desecharon alrededor de 280 millones de toneladas de plástico de las cuáles se tiene un registro en el cual se reciclaba solo el 9% y un 12% se incineraba (García Linan, 2015).

La utilización del plástico es creciente conforme pasa el tiempo, esto se da de igual manera por las características que presentan al ser livianos, con facilidad de manipularlos y además de que los costos de producción se pueden optimizar, y elaborarse en distintas formas como botellas, bolsas, tuberías, frascos, mesas, entre muchos otros productos (Ortiz Hernández, 2013).



La mala conciencia ambiental conlleva a una utilización reprochable del uso de productos plásticos por parte de la sociedad teniendo como meta la contaminación en el ambiente, además de muchos otros contaminantes, encontrando depósitos de estos productos, en los océanos, cuerpos de agua (catalogados como basura marina a estos desechos que se originan en la superficie terrestre y terminan en los océanos), drenajes, áreas verdes, entre otros sitios que se tratan como recipientes de basura (García Linan, 2015).

Desde su nacimiento hasta su descomposición, los plásticos son los creadores de enormes cantidades de dióxido de carbono (CO_2), además otro tipo de gases de efecto invernadero, que son causantes del aceleramiento del calentamiento global en el mundo. De acuerdo con la Asociación Nacional de la Industria del Plástico (ANIPAC), en la República Mexicana se tiene una producción anual de más de 7 millones de toneladas de este producto, de los cuales un 48% son destinados a empresas que utilizan embalajes, empaques o envases (Rivera-Garibay et al., 2020). Cada año se registra que una sola persona consume alrededor de 49 kg de plástico solo en México. Debido a que es un país donde se genera petróleo, del cual el plástico es un derivado, por su composición y origen estos residuos son de alto valor, por su fácil recuperación y abundancia (Ortiz Hernández, 2013).

Contradictorio a lo mencionado en la línea anterior, esto no ha tenido un valor importante ya que no existe una organización en México que se dedique 100% a la recuperación, separación o recolección de plásticos para poder ser reciclado, a causa de la poca organización, estos desechos se convierten en agentes contaminantes para nuestro entorno, afectando principalmente a zonas urbanas, márgenes de ríos, lagos, arroyos o coladeras (Guzmán & Rodríguez, 2020).

Según lo publicado en la revista *Plastic & Climate: The Hidden Costs of a Plastic Planet* (2019), se ha pensado que las posibles soluciones para mitigar considerablemente la producción de plástico, es con prohibiciones nacionales o globales de casi todo el plástico desechable, así como resolver el problema de la contaminación plástica desde su origen, deteniendo la producción de plástico no esencial, sin embargo, esto no ha podido concretarse al 100%.



b. Concreto hidráulico en la construcción y su resistencia a flexión

Hoy en día el uso del concreto y sus derivados ha ido creciendo constantemente, es uno de los materiales que más se usan en el mundo actual, después del agua.

En la industria de la construcción se debe concientizar que, el cemento produce una tasa creciente de gases invernaderos siendo la tercera fuente generadora de dióxido de carbono con un promedio del 5 al 7% del total mundial. Además de que, para la elaboración del concreto, se utilizan del 25 al 50%, los recursos naturales vírgenes cada año, ocasionando un agotamiento de los bancos de materiales (Terán Gilmore, 2010).

Debido al uso excesivo de dichos recursos naturales, se han realizado propuestas desde años atrás, en las que se propone un reciclaje de los materiales de concreto desechados en la construcción, tal es el caso de los agregados de concreto reciclado (RCA), que son los componentes principales del concreto viejo, sin embargo muchas empresas no ven como alternativa esta opción (Oikonomou, 2005).

Algunos investigadores han realizado comentarios que apoyan al diseño innovador del concreto con la utilización de materiales sustentables que protejan el medio ambiente y apoyen la reducción de la contaminación, esto debido al crecimiento de la tasa de población en el mundo (Alcocer, 1998).

Es necesario investigar, proyectar, dosificar y construir estructuras de concreto, obteniendo el mayor aprovechamiento de este material en la construcción explotando al máximo su desempeño, sin perder de vista la protección ambiental y la búsqueda de sustentabilidad mediante materiales adicionales a la composición del concreto (Helene, 2008).

En el mundo se requiere una innovación en las prácticas del diseño y construcción de las estructuras de concreto, y que evite la disminución de los recursos naturales vírgenes de la tierra, estableciendo acciones que estimulen las prácticas ecológicas (Fischetti, 2009).

Como se mencionó anteriormente, se ha buscado mejorar las propiedades del concreto hidráulico en estado fresco (trabajabilidad, fluidez, tiempo de fraguado) o endurecido (resistencia a la flexión, compresión, tensión, torsión, entre otros), innovando con el uso de



aditivos, materiales adicionales e incluso con la sustitución de ciertos elementos del concreto hidráulico convencional, tratando de volverlo más resistente y ligero.

La resistencia a flexión se puede considerar como una medida indirecta de la resistencia a la tracción del concreto. La resistencia a la flexión es un factor determinante de la calidad del concreto para pavimentos, por el paso de vehículos y por la diferencia de temperatura de un lado a otro de la losa (Masías Mogollón, 2018).

Esta propiedad del concreto es útil para conocer la calidad del trabajo de hormigón realizado en la construcción de carreteras. El uso del concreto en pavimentos rígidos se debe tomar con el suficiente cuidado, ya que generalmente se prefiere la piedra caliza como agregados gruesos para este tipo de carreteras, pero a veces puede que no esté fácilmente disponible en todos los lugares cercanos, por lo que es necesario reemplazarla, por lo que el mejoramiento de ésta propiedad resulta ser significativo (Jayant & Gupta, 2014).



1.3 Justificación

En el ámbito de la ingeniería civil, existe la constante necesidad de innovar en la elaboración del concreto hidráulico, volviéndolo más ligero, resistente y económico, para que en el futuro pueda ser usado en el campo laboral como una opción factible en la construcción de estructuras y obras civiles con una mayor resistencia sin perder su calidad. Se pueden mencionar algunas de las propiedades que se ha intentado mejorar, como lo es la resistencia de flexión, mencionada al hablar de pavimentos rígidos, los cuáles tienden a tener fallas debido a la resistencia baja que se presenta en ocasiones.

Basándonos en los estudios experimentales mencionados anteriormente, se ha buscado el aumento de la resistencia de flexión, mediante el uso de agentes externos de lo que es una mezcla de concreto hidráulico convencional modificando la matriz, tal es el caso del PET o PEAD. En el caso del PET, resulta ser un material más liviano, pero la adherencia con los materiales de un concreto hidráulico convencional resulta muy bajo debido a las propiedades físicas de dicho polímero (Alesmar et al., 2008).

Por las propiedades del PEAD, con una mayor densidad y dureza que el PET, y mediante un proceso sencillo como es la trituración mecánica permite obtener partículas recicladas de PEAD de un tamaño óptimo para equipararlas con el agregado natural del concreto y adicionarlas a éste (Arcos Global, 2019).

La diferencia esencial entre el PET y el PEAD estriba en la densidad de cada uno. Existen intentos de incorporar el primero (PET) a concretos o morteros, pero han resultado limitados porque dicho material no logra adherirse adecuadamente a la pasta de cemento por su forma y baja densidad. En cambio, como se trata de un material con una mayor densidad y también más duro, el PEAD logra incorporarse mejor, y entre más se incluya, se obtiene un recurso más flexible (Hernández Guerrero, 2015).

Por lo que aprovechar este polímero puede ayudar al reciclaje y contribuir a la disminución de la contaminación causada por dicho material y con esto obtener una opción más que ayude a mejorar las propiedades del concreto hidráulico, tal es el caso de la resistencia a la flexión para esta investigación.



1.4 Hipótesis

Los especímenes elaborados de concreto con una matriz cementante fibratada con residuos de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) en proporciones y tamaños específicos, experimentarán un incremento de resistencia a flexión y reducción en su peso por unidad de volumen, con respecto al de un concreto hidráulico normal, sin disminuir las propiedades normales de resistencia de éste.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Aprovechar los residuos de productos elaborados de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) en proporciones y tamaños específicos de fibras en una matriz cementante de un concreto hidráulico para aumentar su resistencia de flexión en un 10% a 20% adicional y reduzca su peso por unidad de volumen, que pueda ser una opción utilizable para la industria de la construcción, además de ayudar a disminuir la contaminación ambiental generada por este polímero.

1.5.2 Objetivos específicos

- Obtener una mezcla de concreto hidráulico base a la cual se pueda incluir PEAD en la matriz cementante.
- Determinar el aumento de resistencia a flexión de un concreto con una matriz fibratada con PEAD, con respecto a un concreto hidráulico base.
- Establecer una densidad volumétrica con una matriz cementante fibratada con PEAD más baja que un concreto hidráulico base.
- Definir un procedimiento constructivo estándar de un concreto con una matriz cementante fibratada con PEAD.

Capítulo 2: Fundamentación Teórica

2.1 Materiales compuestos

Un material compuesto es un producto de dos o más materiales constituyentes. Pueden ser más resistentes a los daños y pseudodúctiles si se combinan diferentes refuerzos para obtener configuraciones híbridas.

Un objetivo de integrar dos tipos de fibras en un solo compuesto es mantener las ventajas de ambas fibras y solucionar los problemas individuales de cada una de ellas (Vanegas-Jaramillo et al., 2022). Esta combinación de materiales puede ser constituido a partir de una unión, que no necesariamente puede ser química, de dos o más componentes, dando lugar a un nuevo material con mejores características (Besednjak, 2005).

De igual manera un material compuesto puede definirse como un sistema de materiales constituido por una mezcla y combinación de dos o más micro o macrocomponentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí (Smith & Hashemi, 2013). Una clasificación útil y completa se muestra en la Tabla 1 con algunos ejemplos.

Tabla 1. Clasificación amplia de los materiales compuestos.¹

Materiales compuestos naturales	Madera
	Hueso
	Bambú
	Músculos y otros tejidos
Materiales microcompuestos	Aleaciones metálicas (aceros)
	Termoplásticos endurecidos (poliestireno de impacto)
	Hojas para moldeo continuo (SCM)
Macrocomposites (Productos Ingenieriles)	Termoplásticos reforzados
	Acero galvanizado
	Vigas de concreto armado
	Hélices de helicópteros

¹ Fuente: Hull, D., & Clyne, T. W. (2003). An introduction to composite materials.

Un material compuesto presenta dos elementos principales: fibra y matriz. La combinación adecuada de estos componentes origina materiales con mejoras en las propiedades en comparación con las partes que lo componen por separado (Miravete & Castejón, 2002).

2.2 Materiales compósitos reforzados con fibras

Estos son los materiales compuestos más conocidos por sus altas prestaciones mecánicas y el alto valor añadido del material final, son llamados así por su refuerzo con fibras. Las fibras presentan mejores prestaciones mecánicas porque la probabilidad de encontrar defectos disminuye y además se anclan en la matriz. La forma de las fibras puede ser continua o discontinua con una relación l/d elevada producen un mejor refuerzo (Tiryakioğlu et al., 1997).

El acomodo de las fibras lo podemos visualizar en la Figura 1. Estas pueden ser de manera unidireccional como las fibras largas (a); de manera aleatoria como las fibras cortas (b); con un acomodo ortogonal o mallas ortogonales (c); y en varias capas alternadas (d). Además de los acomodos de fibra mostrados, estas pueden tener varias orientaciones en el interior de la matriz del material compuesto. Y para poder ser eficientes con las cargas a las que se sometan pueden tener un acomodo aleatorio (Tiryakioğlu et al., 1997).

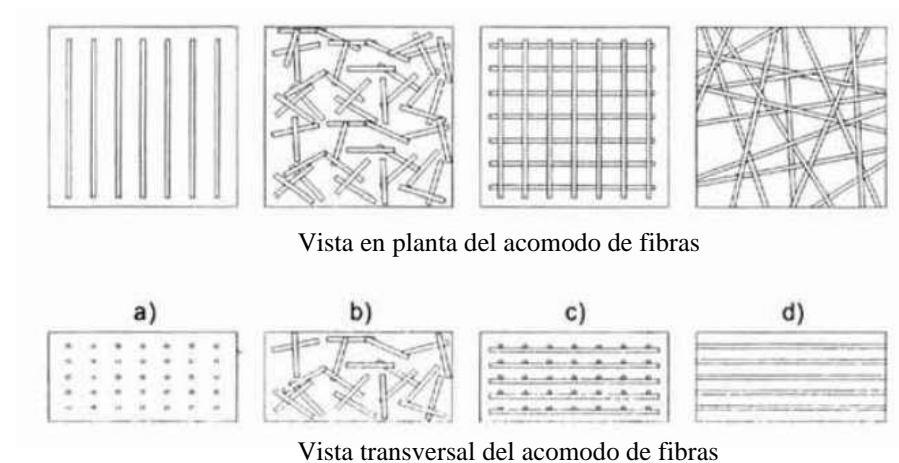


Figura 1. Tipo de acomodo de fibras en materiales compuestos².

² Fuente: Arteaga, María., (2018). Optimización geométrica y acomodo de fibras de PET reciclado para mejorar la resistencia a la flexión en morteros [Tesis Maestría].



2.3 Concreto

El concreto es una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta es un compuesto de cemento Portland y agua, que une a los agregados (arena y grava o piedra triturada) para formar una masa semejante a una roca que endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua (Polanco Rodríguez, 2012). El concreto en estado endurecido presenta propiedades entre las cuales encontramos a la resistencia que es la capacidad que tendrá el concreto de resistir netamente a las fuerzas de compresión, flexión y corte que se aplique al espécimen en estudio (NMX-C-251-ONNCCE, 2018).

2.4 Cemento

El cemento es un material inorgánico finamente pulverizado que, al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso con un contenido de agua en virtud de las reacciones químicas que existen durante la hidratación y que una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad (NMX-C-414-ONNCCE, 2017).

2.5 Agregados

En la elaboración del concreto convencional se implican a dos tipos de agregado, el agregado grueso que consiste en una grava natural y seleccionada u obtenida de una combinación de gravas o agregado triturado cuyo tamaño de partículas estén dentro de las dimensiones de 19 mm (3/4") y 75 mm (3"), pudiendo contener fragmentos de roca y arena: y el agregado fino siendo la mayoría de sus partículas comprendidas entre la malla de 75 mm (No. 200) y la malla de 4.75 mm (No.4), pudiendo contener finos de menor tamaño. Los agregados constituyen entre el 60% y 75% del concreto, por tal razón, la selección de estos materiales debe ser de mayor cuidado (Kosmatka et al., 2004).

2.6 Agua de mezclado

El agua juega un papel fundamental en la elaboración de la mezcla de concreto, por lo que su importancia radica más allá de lo normal. Se recomienda que el agua para la mezcla de concreto o mortero sea potable y que no tenga un sabor pronunciado, para garantizar así el comportamiento adecuado de la estructura. El agua de mezclado debe ser clara y



aparentemente limpia. Las impurezas excesivas en el agua no solo pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, si no también pueden ser causa de eflorescencia, manchado, corrosión del esfuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad. Si el agua no procede de una fuente de suministro de agua potable, se puede juzgar su aptitud como agua para concreto mediante los requisitos físico-químicos contenidos en la (NMX-C-122-ONNCCE, 2019), recomendados para aguas que no son potables.

2.7 Resistencia a la flexión del concreto

La resistencia a la flexión o Módulo de Rotura (MR) del concreto, es más baja si la comparamos con la resistencia de compresión. Según la norma (NMX-C-251-ONNCCE, 2018), es la oposición que presenta un elemento o miembro estructural a solicitaciones de fuerzas combinadas de tensión y compresión dadas en kg/cm^2 .

El Módulo de Rotura se encuentra cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión dependiendo de las dimensiones y el volumen del agregado grueso utilizado. Aunque la mejor manera de relacionar estos dos parámetros es mediante los ensayos de laboratorio de los materiales y un diseño eficiente de la mezcla de concreto (Augusto Delgado & Legarda Caicedo, 2011).

2.8 Polietileno de Alta Densidad (PEAD)

En el año de 1898, Von Pechmann obtiene un polímero de estructura equivalente al Polietileno llamada Polimetileno, derivado de esta síntesis se obtuvo por casualidad un polímero con un bajo peso molecular. Este descubrimiento fue aprovechado por Gibson para obtener Polietileno, derivado del mezclado del etileno y benzaldehído, y en el año 1953, Ziegler y sus colaboradores en el Instituto Max Planck, estudiaron el proceso de polimerización a baja presión con el cuál mediante un complejo catalítico de alquil aluminio y tetracloruro de titanio se fabricaba el de un Polietileno de mayor densidad, al cual nombraron Polietileno de Alta Densidad (PEAD) (Roca Girón, 2005).

El PEAD se produce normalmente con un peso molecular que se encuentra en el rango entre 200.000 g/g-mol y 500.000 g/g-mol , pero puede ser mayor. Es un polímero de cadena

lineal no ramificada, el cual podemos encontrar en envases con el código de identificación de resinas (Figura 2). Presenta mejores propiedades mecánicas como dureza, rigidez y resistencia a la tensión, suele ser un poco más pesado que el de baja densidad, pero es menos dúctil (Peacock, 2000).



Figura 2. Código de resinas del PEAD.

El Polietileno de alta densidad tiene una densidad de 0.941 – 0.965 g/cm³; presenta un alto grado de cristalinidad, siendo así un material opaco y aspecto ceroso, en la Tabla 2 se presentan algunas propiedades físicas y mecánicas del PEAD.

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas del PEAD³.

Propiedades	Unidades	Valor
Densidad	g/cm ³	0.941-0.965
Absorción de agua	Mg en 96h	<0.5
Contracción	%	1.5-3
Resistencia a la tracción en el rendimiento	N/mm ²	18-35
Punto de ruptura de elongación	%	1000
Resistencia dieléctrica	KV/cm	>600
Coefficiente de fricción		0.29
Resistencia a la tracción	Mpa	15-40

³ Roca Girón, I. E. (2005). Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del Polietileno de Alta Densidad (PEAD). *Journal of Chemical Information and Modeling*, 12 Suppl 1(9), 1–29.



Capítulo 3: Metodología

3.1 Metodología general

La metodología utilizada para la realización de esta investigación se realiza en 2 fases, la primera fase consistió en la recopilación de información de relevancia que nos permite tener un enfoque directo en la aplicación del PEAD al concreto; y una segunda fase de experimentación descrita para el diseño de un concreto hidráulico mediante lo establecido en el manual 211 del *American Concrete Institute* (ACI) “Proporcionamiento de mezclas de concreto normal, pesado y masivo”, al igual que para el cálculo de las propiedades de los agregados y elaboración de especímenes de concreto, se utilizaron normas mexicanas (NMX) según lo establecido por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) (Tabla 3).

Tabla 3. Normas para propiedades de agregados y elaboración de concreto

Tipo de prueba	Norma
Densidad y absorción del agregado fino	NMX-C-165-ONNCCE-2014
Densidad y absorción del agregado grueso	NMX-C-164-ONNCCE-2014
Granulometría	NMX-C-077-ONNCCE-2019
Contenido de humedad	NMX-C-166-ONNCCE-2018
Reducción de muestras de agregados	NMX-C-170-ONNCCE-2019
Masa volumétrica y compactada	NMX-C-073-ONNCCE-2004
Especificaciones de agregados para concreto hidráulico	NMX-C-111-ONNCCE-2018

Fuente: Propia.

Posteriormente se elaboraron especímenes de dicha mezcla de concreto con la inclusión de PEAD y con ello nos permita determinar un aumento en su resistencia a flexión en comparación con el concreto convencional.

3.2 Diseño y dosificación de la mezcla de concreto

El diseño de la mezcla se realizó mediante el método establecido por el manual del ACI antes mencionado. La dosificación de la mezcla se hace utilizando los valores de los resultados de todas las pruebas y ensayos de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, además de seguir los pasos del método ACI:

- Elección del revenimiento.
- Selección del tamaño máximo nominal del agregado.
- Estimación del agua de mezclado y contenido de aire.
- Selección de la relación Agua/Cemento.
- Cálculo del contenido de cemento Portland.
- Estimación del contenido de agregado grueso y fino.
- Correcciones por absorción y humedad de agregados.
- Cálculo de proporciones en peso.
- Cálculo de proporciones en volumen.

3.2.1 Elección del Cemento Portland

Se utilizó un Cemento Portland tipo II Compuesto (CPC) 30R RS marca Cruz Azul, debido a que es una de las marcas más utilizadas en el ramo de la construcción, como pueden ser estructuras de concreto simple: pisos, banquetas y guarniciones; y de igual manera en concreto armado: trabes, cadenas de desplante, columnas, losas y pavimentos.

Además de que la composición tiene características químicas que brindan mayor desempeño, durabilidad, resistencia al ataque químico y físico con bajo calor de hidratación. De igual manera garantiza sus resistencias mecánicas altas y uniformes, logrando un mayor rendimiento.

3.2.2 Clasificación de los agregados y granulometría

Para la clasificación de los agregados, es decir, la elección del tamaño en el caso del agregado grueso y la determinación del módulo de finura se elabora una tabla granulométrica conforme a lo indicado en la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018 y NMX-C-077-ONNCCE-

2018, ya que estos resultados son de gran importancia en el diseño de la mezcla de concreto a utilizar.

3.2.3 Determinación de los pesos volumétricos de los agregados

Se sabe que la mezcla de un concreto convencional está conformado por agregado grueso (grava), agregado fino (arena), cemento y agua. Las propiedades de los agregados se determinaron mediante su caracterización, se realizó el cálculo del peso volumétrico seco suelto (PVSS) y el peso volumétrico seco compactado (PVSC) con la Ecuación 1 y la Ecuación 2, respectivamente para cada agregado (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

$$PVSS = \frac{W}{V} \quad (1)$$

$$PVSC = \frac{W}{V} \quad (2)$$

Donde W es el promedio del peso (kg) del agregado después de 3 mediciones, y V (m³) es el volumen del molde donde se realizará la prueba.

3.2.4 Determinación de la densidad en los agregados

La densidad es una propiedad física de los agregados y está definida por la relación entre el peso (kg) y el volumen (m³) de una masa determinada, lo que significa que depende directamente de las características del grano de agregado (grava o arena), como se establece en la Ecuación 3 para agregado grueso (NMX-C-164-ONNCCE, 2014).

$$\rho = \frac{WGSS}{WGSS - WGSSA} \quad (3)$$

Donde ρ es la densidad, WGSS es el peso (kg) de la grava superficialmente seca que se dividirá por la diferencia de este mismo valor y el WGSSA que es el peso de la grava superficialmente seca en agua (kg), siguiendo el ensayo establecido por la norma antes mencionada para el agregado grueso.

Y conforme a la Ecuación 4 para agregados finos (NMX-C-165-ONNCCE, 2014), donde w_m es el peso (g) de la muestra, w_{fm} es el peso (g) de matraz con agua y w_{fwm} es el peso (g) del matraz con agua y con suelo.

$$\rho = \frac{wm}{wfw + wm} - wfw m \quad (4)$$

3.2.5 Determinación de humedad en los agregados

Es necesario determinar el porcentaje de humedad (H) de los agregados en porcentaje, ya que con este dato se puede realizar el ajuste de la cantidad de agua que se utiliza en el diseño de la mezcla de concreto. La humedad del agregado grueso y fino se determinó basándose en el método de ensayo establecido en la norma (NMX-C-166-ONNCCE, 2018), donde se utiliza la Ecuación 5 para determinar esta propiedad. Donde W_w es el peso (g) del recipiente con arena húmeda y W_s es el peso (g) del recipiente con arena seca.

$$H = \frac{W_w - W_s}{W_s} \times 100 \quad (5)$$

3.2.6 Determinación de absorción en los agregados

La absorción (A) en los agregados es el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, expresado como un porcentaje de la masa seca. Se determinó con la solución de la Ecuación 6 como lo establece la norma NMX-C-164-ONNCCE (2014). Donde w_{gss} es el peso (g) de la grava superficialmente seca y w_{gs} es el peso (g) de la grava seca. Esta ecuación se modifica para la arena (Ecuación 7), donde w_{sss} es el peso de la arena superficialmente seca y w_s donde es el peso de la arena secada al horno.

$$A_g = \frac{w_{gss} - w_{gs}}{w_{gs}} \times 100 \quad (6)$$

$$A_a = \frac{w_{sss} - w_s}{w_s} \times 100 \quad (7)$$

3.2.7 Determinación del módulo de ruptura o resistencia de flexión

La norma mexicana (NMX-C-191-ONNCE, 2015), establece el procedimiento para determinar la resistencia a la flexión del concreto hidráulico, mediante el uso de una viga simple libremente apoyada con carga en los tercios del claro. El módulo de ruptura se obtiene mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensayo a la flexión de una viga.



Hay dos maneras de calcular el módulo de ruptura:

Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro, se calcula mediante la siguiente

Ecuación 8:

$$\mathbf{MR} = \frac{\mathbf{P L}}{\mathbf{b d^2}} \quad (8)$$

Donde R es el módulo de ruptura (kg/cm^2), P es la carga máxima aplicada en (kg), L es la distancia entre apoyos (cm), b es el ancho promedio del espécimen (cm) y d es el peralte promedio del espécimen (cm).

Si la ruptura se presenta fuera del tercio medio del claro en no más del 5% de su longitud, se calcula mediante la siguiente Ecuación 9:

$$\mathbf{MR} = \frac{\mathbf{3 P a}}{\mathbf{b d^2}} \quad (9)$$

Donde a es la distancia promedio (mm) entre la línea de fractura y el apoyo más cercano en la superficie de la viga. Si la fractura ocurre fuera del tercio medio del claro en más del 5% se desecha el resultado de la prueba.

3.3 Polietileno de Alta Densidad (PEAD)

El Polietileno de Alta Densidad ha sido producto de la recolección de botellas o envases de desechos de productos de limpieza específicamente de botellas de cloro (CLORALEX), donde comúnmente el material con el que este hecho se utiliza la marcación de código de identificación de resina de plástico ⁴ el cual indica que es PEAD.

Para la utilización de este tipo de material fue necesario hacer una limpieza (lavado y secado), con la finalidad de desechar la materia orgánica que pudiera encontrarse dentro o residuos del líquido, al igual que etiquetas de los envases.

⁴ American Society for Testing and Materials, Códigos de identificación de resinas, Standardization News, Consultado el 24 de Julio de 2022. Recuperado de: <https://www.spg-pack.com/blog/codigos-identificacion-plasticos/>



Figura 3. Botellas de polietileno de alta densidad.

3.3.1 Reciclaje y corte del PEAD

Para la utilización de este tipo de material fue necesario hacer una recolección o reciclaje de los puntos de desechos en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, así como de puntos de acopio en donde sea fácil obtener materiales elaborados con PEAD. Una vez obtenido se realizó una limpieza (lavado y secado), esto para poder retirar cualquier materia orgánica y etiquetas (Figura 4 y Figura 5).



Figura 4. Limpieza de botellas de PEAD.



Figura 5. Lavado de botellas de PEAD.

Posteriormente se realizó el corte con la ayuda de un equipo de corte o guillotina (Figura 6), que nos permitió obtener las dimensiones requeridas de las fibras de PEAD, y de igual manera obtener la dosificación requerida para cada proporción propuesta en un tiempo menor.



Figura 6. Equipo de corte utilizado (guillotina).

Luego de conseguir el PEAD de manera limpia se continuó recortándolo en cada medida necesaria para la elaboración de la mezcla experimental correspondiente como se menciona en la Figura 7.



Figura 7. Recorte de PEAD.

3.3.2 Dimensiones y dosificación de PEAD

Las dimensiones empleadas se proponen, derivado a las investigaciones antes referenciadas, y siguiendo lo dicho en la norma (PROY-NMX-C-537-ONNCCE, 2016) para el valor del diámetro equivalente en macrofibras (fibras clase II). Dichas dimensiones de fibras se obtuvieron mecánicamente con el equipo de corte y conforme se observan de la Figura 8 a la Figura 12.

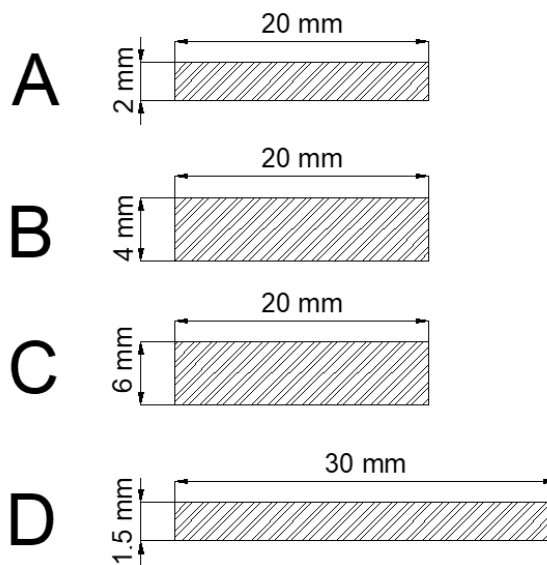


Figura 8. Dimensiones de fibras de PEAD.

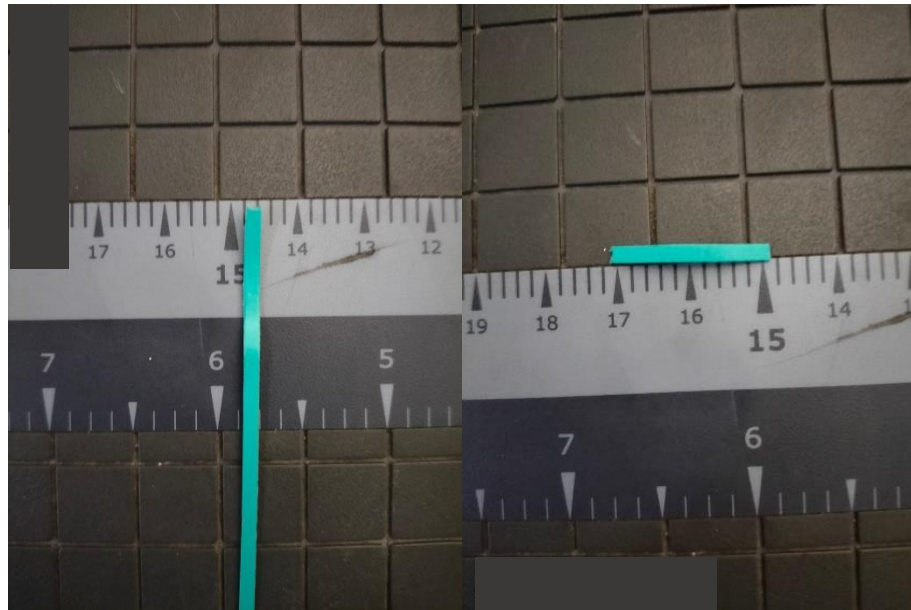


Figura 9. Fibra Tipo A - 2mm x 20mm.

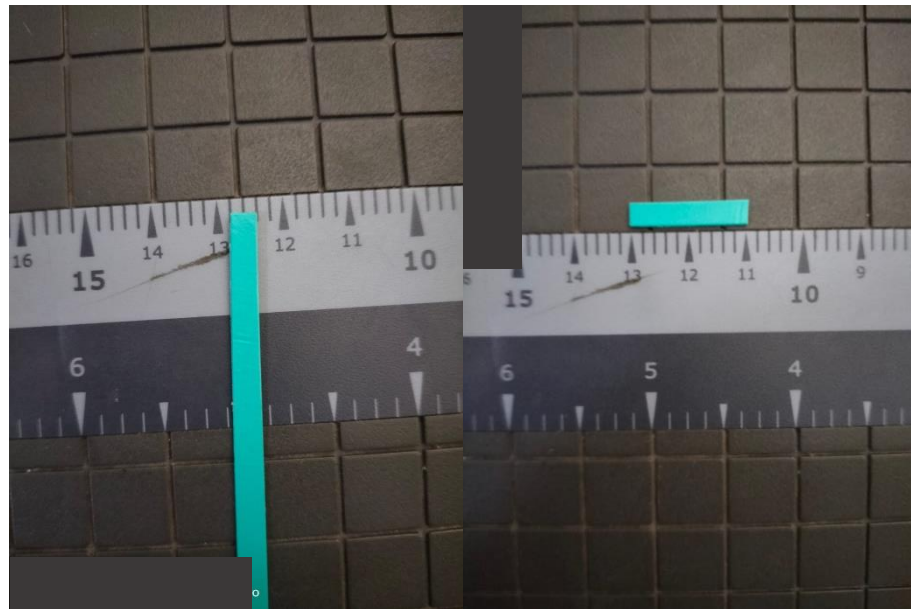


Figura 10. Fibra Tipo B - 4mm x 20mm

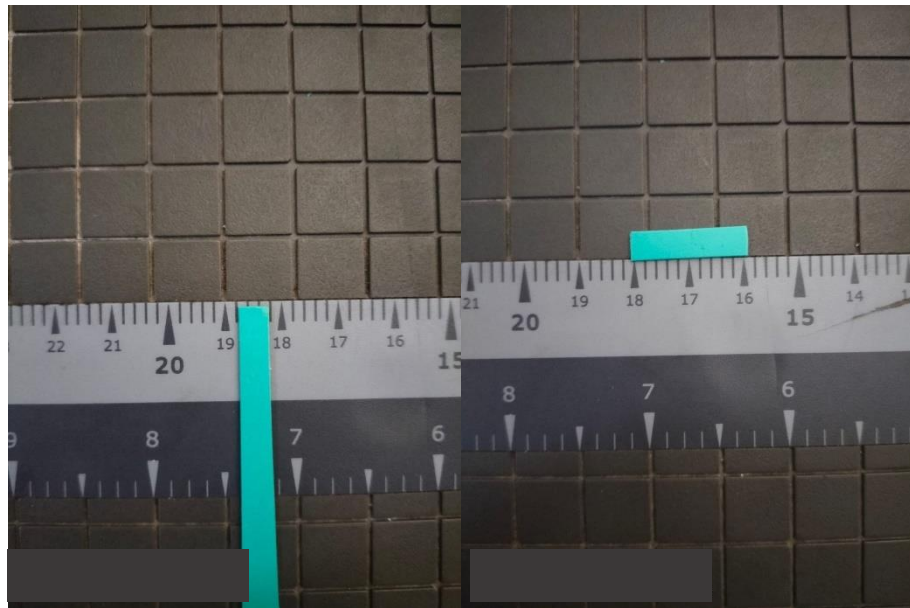


Figura 11. Fibra Tipo C - 6mm x 20mm

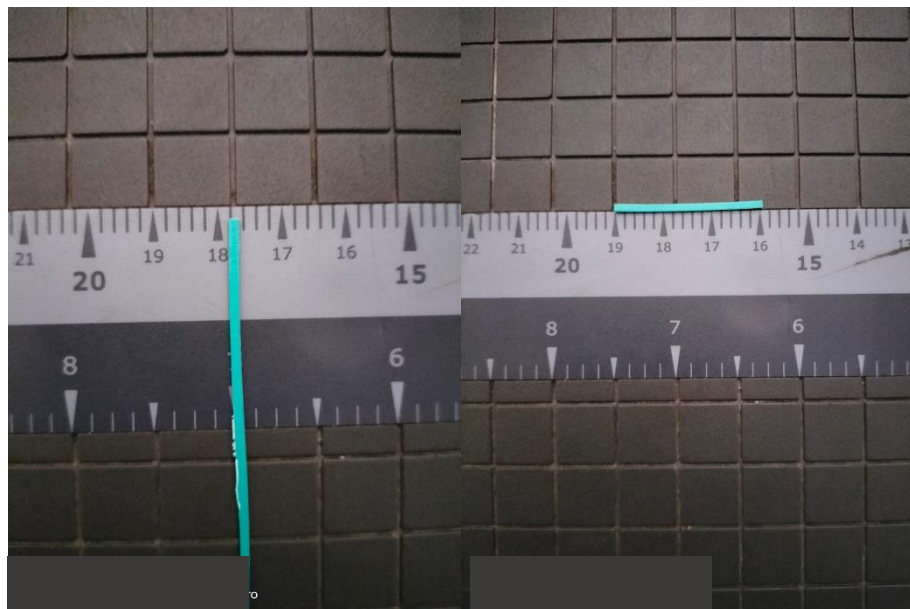


Figura 12. Fibra Tipo D - 1.5mm x 30mm

3.3.3 Proporciones en peso del PEAD

Las dosificaciones en términos de peso de las fibras poliméricas varían entre 2 kg/m^3 a 9 kg/m^3 según el polímero usado. Para el caso del PEAD usado en esta investigación se realizaron pruebas con proporciones derivadas de la cantidad de cemento dosificada según el diseño de la mezcla de concreto base.

Las proporciones en porcentaje para 2 y 9 kg/m^3 de fibras poliméricas equivalen a 1.8 y 8.6% respectivamente de la cantidad de cemento (105 kg aproximadamente) usado para un concreto con $f'c$ de 250 kg/cm^2 dependiendo del tipo de cemento utilizado. Por lo que la propuesta para esta investigación las proporciones serán de 2.5 , 5 y 7.5% , estando dentro del rango antes mencionado y cumpliendo con la norma PROY-NMX-C-537-ONNCCE (2016).

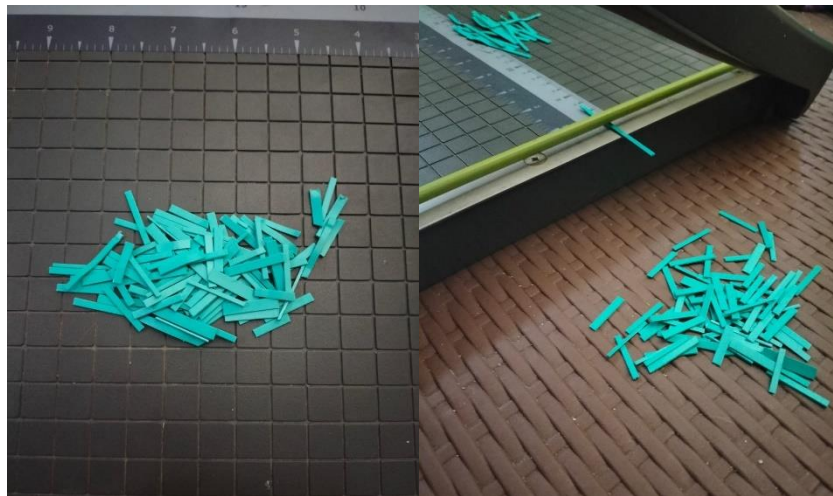


Figura 13. Proporciones de fibras de PEAD.

3.4 Elaboración de los especímenes de concreto (Especímenes de control)

Una vez obtenidas las propiedades de los agregados se procedió al diseño de la mezcla de concreto convencional utilizando el método del ACI para una resistencia a compresión de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, y la dosificación con la cual se obtuvieron las cantidades necesarias de cada material. Dicha resistencia se elige debido a que la investigación de igual manera se destina al uso de este concreto en pavimentos rígidos y/o elementos estructurales.

Como primer paso se requirió un volumen similar a 6 veces el volumen de un molde de cilindro con medidas de $10 \text{ cm } \varnothing$ y 20 cm de altura (Figura 14) como lo dicta la norma

(NMX-C-159-ONNCCE, 2016), esto para realizar ensayos de resistencia a compresión para cerciorarnos que el diseño de la mezcla de concreto se encuentre dentro de los parámetros teóricos permisibles de resistencia para la cuál será diseñada.

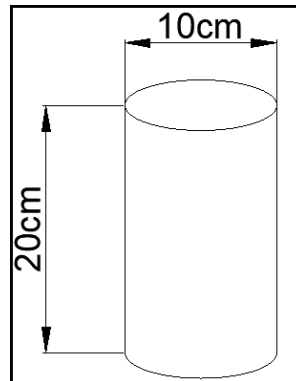


Figura 14. Dimensiones de espécimen cilindro de concreto.

Dichos cilindros pasan un proceso de curado de 7, 14 y 28 (Figura 15), y son ensayados conforme a lo establecido en la norma (NMX-C-083-ONNCCE, 2014), para obtener su resistencia a compresión en estas mismas edades.

No.	EDAD(días)
1	7
2	14
3	28

Figura 15. Nomenclatura de edades de especímenes.

Una vez obteniendo los resultados de resistencia a compresión en los cilindros de concreto y verificando que se encuentre dentro de los parámetros permitidos, se obtiene una dosificación necesaria de cada material de la mezcla de concreto diseñada para un volumen similar a 6 veces el volumen de un molde de prismático para vigas con medidas de 15x15 cm y una longitud de 50 cm (Figura 16).

Luego se tuvo un proceso de curado con edades de 7, 14 y 28 días, y se realizaron las pruebas de resistencia a flexión conforme lo escrito en la norma NMX-C-191-ONNCCE (2015).

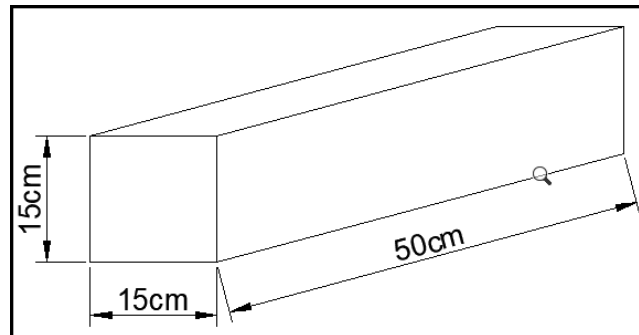


Figura 16. Molde prismático para viga de concreto.

Una vez obtenido los resultados de resistencia a flexión esto se compara con la resistencia a compresión, recordando que la primera debe encontrarse dentro del 10 a 20% de la segunda respectivamente. Siendo los resultados favorables estos especímenes de viga de concreto se nombraron como especímenes de control, que son el punto base de comparación con los especímenes con fibras de PEAD para esta investigación.

3.5 Elaboración de especímenes de concreto con matriz fibratada con PEAD

Una vez obteniendo los resultados satisfactorios en la comparación de resistencias (compresión y flexión), se procedió a realizar mezclas fibratadas con PEAD para la elaboración de vigas, a las cuáles se adicionaron proporciones distintas de (2.5, 5 y 7.5%) con respecto al peso del cemento Portland calculado en el diseño de la mezcla. Las fibras de PEAD tienen las dimensiones antes descritas (Figura 8).

De igual manera se realizó un proceso de curado y pruebas de resistencia de flexión en edades de 7, 14 y 28 días, conforme a las normas antes mencionadas. Las vigas con mezclas fibratadas se clasificaron mediante la designación mostrada en la Figura 17 para la facilidad de identificación de cada una de ellas.

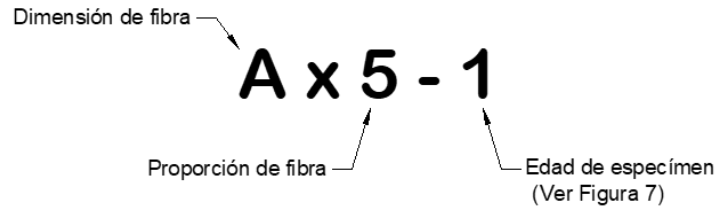


Figura 17. Designación de fibras de PEAD.

Una vez realizadas las pruebas, se procede al análisis de resultados y se elaboran las gráficas, tablas o figuras que nos permitan obtener las conclusiones pertinentes para esta investigación.

Se presenta a continuación en la Figura 18 un diagrama de flujo en el cual se muestran de manera gráfica los pasos mencionados anteriormente.

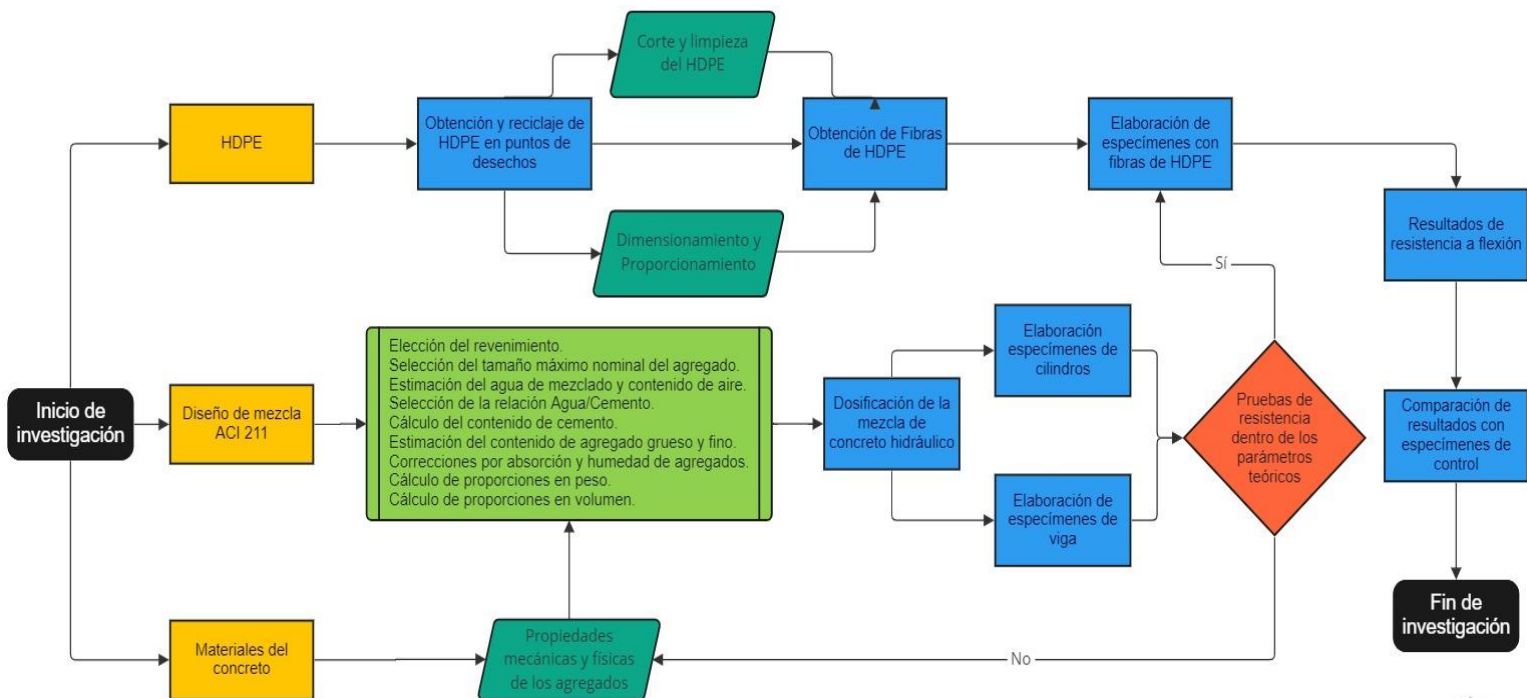


Figura 18. Diagrama de flujo de experimentación general.

Capítulo 4: Propiedades de los materiales, diseño y dosificación de la mezcla de concreto

4.1 Propiedades del cemento

Como se menciona anteriormente se utilizó un Cemento Portland tipo II Compuesto (CPC) 30R RS, fabricado en la Planta Cd. Cooperativa Cruz Azul, Municipio de Tula de Allende, Hidalgo; cuenta con un peso volumétrico de 332.18 kg/cm^3 y un peso específico de 3.15 kg/cm^2 . Bajo el esquema ISO 9001 y cuenta con el certificado de producto ONNCCE que cumple con la norma (NMX-C-414-ONNCCE, 2017), vigente para un cemento CPC 30 R RS. En las pruebas del material se tuvo cuidado de que la mezcla estuviera compuesto solamente de caliza natural para obtener la resistencia deseada.



Figura 19. Cemento Portland utilizado en esta investigación.

4.2 Propiedades del agregado grueso

Los agregados se obtuvieron de la tienda de materiales para construcción “Santa Anita” en el municipio de Santiago de Querétaro, Querétaro. El banco de materiales de donde los obtienen para su venta, es el Banco de materiales el “Nabo – Tiradero” localizado sobre el Anillo Vial Fray Junípero Serra en el estado de Querétaro (Figura 20).



Figura 20. Ubicación del banco de materiales donde se obtienen los agregados.

4.2.1 Peso volumétrico

En la Tabla 4 se muestran las dimensiones del molde utilizado para calcular los volúmenes del agregado grueso conforme lo establecido en la norma NMX-C-073-ONNCCE (2004).

Tabla 4. Dimensiones del molde cilíndrico para el agregado grueso.

Molde de peso volumétrico seco suelto (PVSS) y peso volumétrico seco compactado (PVSC)	
Diámetro (m)	0.25
Altura(m)	0.20
Peso (kg)	3.94
Volumen (m³)	0.00982

Fuente: Propia.

En la Figura 21 se muestra el material cuarteado para la realización de la prueba PVSS y PVSC, el cual se obtuvo de manera satisfactoria mediante el uso del molde mencionado anteriormente, los resultados se muestran posteriormente.



Figura 21. Muestreo y cuarteo del agregado grueso para su PV.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5, en dónde el resultado que se utilizará será el del Peso Volumétrico Seco Compactado (PVSC), sin embargo, de igual manera requerimos para un control del material su Peso Volumétrico Seco Suelto para las pruebas futuras y garantizar que el agregado tenga las mismas características y propiedades, así como cerciorarse que sea del mismo banco de materiales.

Tabla 5. Pesos volumétricos del agregado grueso.

Peso volumétrico seco suelto (PVSS)		Peso volumétrico seco compactado (PVSC)	
Muestra 1 (kg)	14.23	Muestra 1 (kg)	15.32
Muestra 2 (kg)	14.20	Muestra 2 (kg)	15.62
Muestra 3 (kg)	14.18	Muestra 3 (kg)	15.52
Promedio	14.20	Promedio	15.49
$PVSS = \frac{W}{V} = \frac{14.20 \text{ kg}}{0.00982 \text{ m}^3} = 1,446.74 \text{ kg/m}^3$		$PVSC = \frac{W}{V} = \frac{15.49 \text{ kg}}{0.00982 \text{ m}^3} = 1,577.46 \text{ kg/m}^3$	

Fuente: Propia.

Para la determinación de los pesos volumétricos se realizaron un total de 3 pruebas para la determinación de cada uno de los dos pesos requeridos, suelto y compacto.

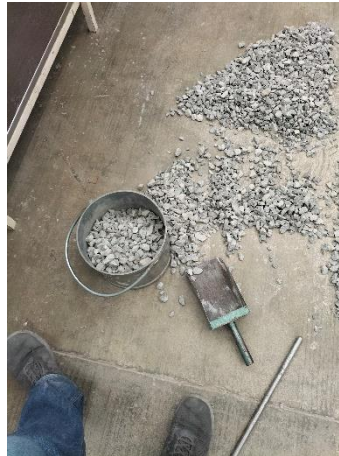


Figura 22. Ensayo para la determinación PVSS y PVSC.

4.2.2 Granulometría

El análisis granulométrico se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma (NMX-C-077-ONNCCE, 2019), el cual establece que para el agregado grueso se deben considerar 6 mallas comprendidas en los diámetros (\emptyset) de 38mm (1 ½”) a 4.75mm (No. 4) (Figura 24). En la Tabla 6 se muestran los resultados granulométricos para este agregado.

Tabla 6. Resultados de granulometría agregado grueso.

Granulometría del agregado grueso					
Malla (in)	\emptyset Malla (mm)	Retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
1 ½ “	38.1	0.00	0.00	0.00	100.00
1”	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
¾”	19.05	2.96	27.49	27.49	72.51
½”	12.7	5.89	54.71	82.21	17.79
3/8”	9.525	1.31	12.18	94.39	5.61
N. 4	4.75	0.59	5.52	99.91	0.09
Residuo		0.01	0.09	100.00	0.00
Total		10.76			

Fuente: Propia.

Se muestra la curva granulométrica que nos indica una buena graduación la cual nos muestra una buena distribución de tamaños de agregado (Figura 23).

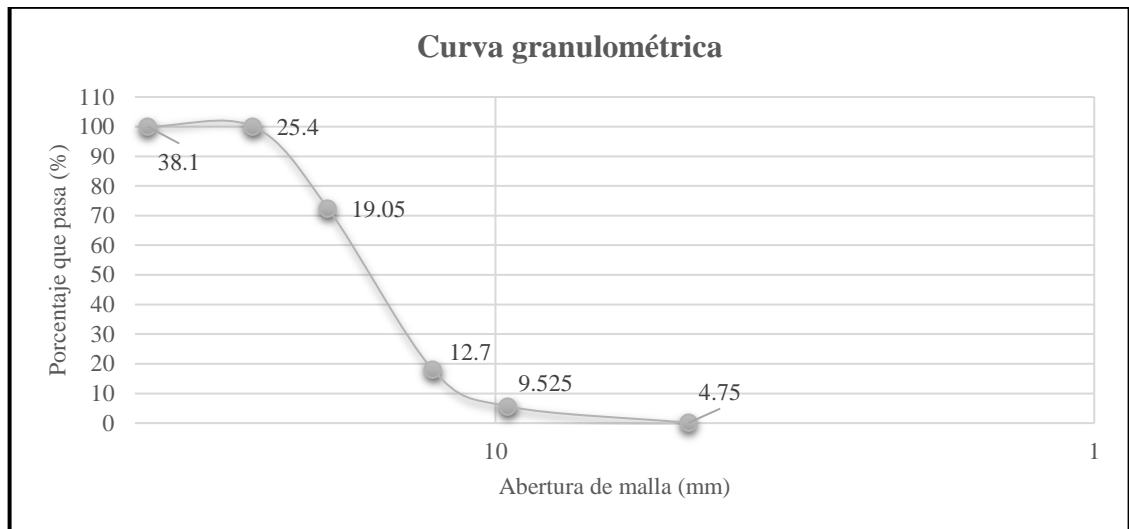


Figura 23. Curva granulométrica del agregado grueso. Fuente: Propia.

Con los resultados mostrados, podemos distinguir que el tamaño nominal (TN) del agregado es de $3/4" \text{Ø}$ (19mm), en la gráfica se muestra un comportamiento normal de la curva granulométrica y verificando los resultados con la normativa se identifica este TN como parámetro para el diseño de la mezcla.



Figura 24. Ensayo granulométrico del agregado grueso.

4.2.3 Densidad del agregado grueso

La densidad del agregado se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma NMX-C-164-ONNCCE-2014 y utilizando la Ecuación (3), en la que se obtiene el peso de la grava superficialmente seca en gramos, pesada en el aire (WGSS) y en agua (WGSSA), con estos dos valores se procede a realizar el cálculo, se realizó con la debida precaución ya que es un valor importante para la dosificación correcta de la mezcla (Figura 25).

$$\rho = \frac{WGSS}{WGSS - WGSSA} = \frac{4009.7 \text{ g}}{4009.7 \text{ g} - 2543 \text{ g}} = 2.73$$

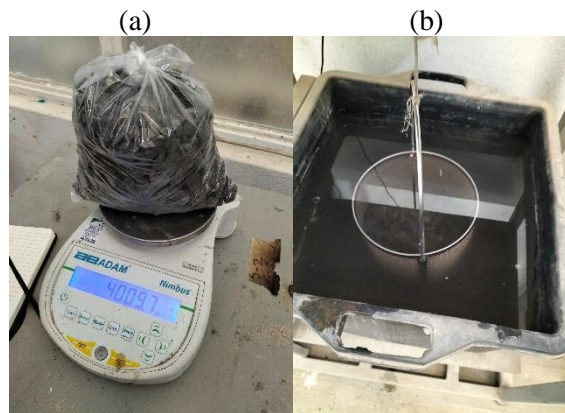


Figura 25. Peso de agregado grueso (a), ensayo de densidad del agregado grueso (b).

4.2.4 Absorción del agregado grueso

Para determinar el porcentaje de absorción del agregado grueso (A_g) se utiliza la Ecuación (6), la cual se le da solución empleando los valores de pesos como WGSS y el peso de la grava seca (WGS) en gramos, este procedimiento se realizó con el debido cuidado ya que es un parámetro de corrección para nuestro diseño de mezcla y siguiendo lo descrito en la norma NMX-C-164-ONNCCE-2014.

$$A_g = \frac{wgss - wgs}{wgs} \times 100 = \frac{4009.7 \text{ g} - 3925.6 \text{ g}}{3925.6 \text{ g}} \times 100 = 2.14 \%$$

4.2.5 Humedad del agregado grueso

La determinación de la humedad agregado grueso se realiza conforme la norma NMX-C-166-ONNCCE-2018, la cual nos indica el procedimiento seguido con precisión y nos proporciona la Ecuación (5), que al darle solución y obteniendo los valores como: W_w que es el peso (g) del recipiente con arena húmeda y W_s que es el peso (g) del recipiente con arena seca, se obtiene el valor de humedad (Figura 26).

$$H = \frac{W_w - W_s}{W_s} \times 100 = \frac{766 \text{ g} - 755 \text{ g}}{755 \text{ g}} \times 100 = 1.46 \%$$

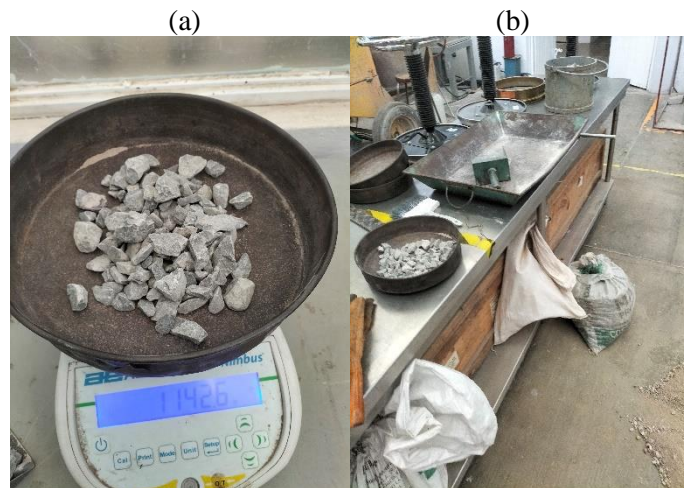


Figura 26. Pesaje de agregado (a), Determinación de humedad del agregado grueso (b).

4.3 Propiedades de agregado fino

4.3.1 Peso volumétrico

Para la determinación de los pesos volumétricos del agregado fino se siguieron los pasos descritos en la norma NMX-073-C-ONNCCE-2004, en la que nos proporciona las dimensiones del molde que debemos usar indicado en la Tabla 7, y una vez realizado el ensayo se obtuvieron los resultados de los pesos volumétricos seco y compactado respectivamente mostrados en la Tabla 8.

Tabla 7. Dimensiones del molde para el agregado fino.

Molde de peso volumétrico seco suelto (PVSS) y peso volumétrico seco compactado (PVSC)	
Diámetro (m)	0.179
Altura(m)	0.198
Peso (kg)	1.65
Volumen (m³)	0.004976

Fuente: Propia.

Tabla 8. Pesos volumétricos del agregado fino.

Peso volumétrico seco suelto (PVSS)		Peso volumétrico seco compactado (PVSC)	
Muestra 1 (kg)	5.49	Muestra 1 (kg)	6.15
Muestra 2 (kg)	5.60	Muestra 2 (kg)	6.20
Muestra 3 (kg)	5.63	Muestra 3 (kg)	6.13
Promedio	5.57	Promedio	6.16
$PVSS = \frac{W}{V} = \frac{5.57 \text{ kg}}{0.004976 \text{ m}^3} = 1,119.95 \text{ kg/m}^3$		$PVSC = \frac{W}{V} = \frac{6.16 \text{ kg}}{0.004976 \text{ m}^3} = 1,237.84 \text{ kg/m}^3$	

Fuente: Propia.

Como se puede observar en la tabla anterior se obtienen pesos similares en las tres pruebas realizadas, concluyendo que se realizaron correctamente y obteniendo un PVSS de 1,119.95 kg/cm² y un PVSC de 1,237.84 kg/cm² los cuáles podremos utilizar para el cálculo de dicho agregado fino.



Figura 27. Ensayo de peso volumétrico del agregado fino.

4.3.2 Granulometría

El análisis granulométrico se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma NMX-C-077-ONNCCE-2019, el cual establece que para el agregado grueso se deben considerar 6 mallas comprendidas en los diámetros (\emptyset) 4.75mm (No. 4) a la malla 0.075mm (No. 200). En la Tabla 9 se muestran los resultados granulométricos para este agregado.

Tabla 9. Resultado granulometría agregado fino.

Granulometría del agregado fino					
# Malla	\emptyset Malla (mm)	Retenido	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
4	4.75	82.70	8.35	8.35	91.65
8	2.36	94.20	9.51	17.85	82.15
16	1.18	116.50	11.76	29.61	70.39
30	0.6	148.50	14.98	44.59	55.41
50	0.3	158.70	16.01	60.61	39.39
100	0.15	208.30	21.02	81.62	18.38
200	0.075	82.50	8.32	89.95	10.05
Pasa 200		99.60	99.60	10.05	0.00
Total		991			

Fuente: Propia.

Como podemos observar en la curva granulométrica, se indica una buena graduación y procedimiento granulométrico en laboratorio obteniendo una buena distribución de los materiales con presencia de tamaños más finos (Figura 28).

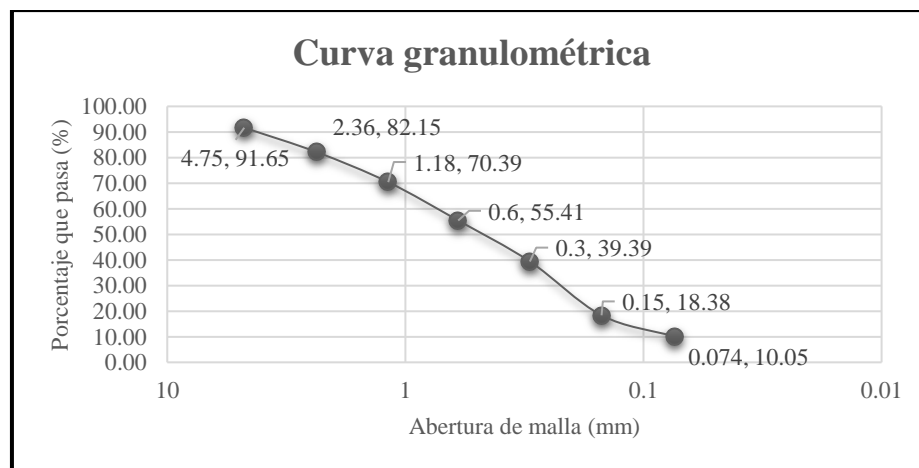


Figura 28. Curva granulométrica de la arena. Fuente: Propia.

c. Módulo de Finura

Según la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018), el cálculo del módulo de finura (MF) se realiza con los resultados obtenidos en la granulometría a partir de los porcentajes retenidos acumulados desde la malla No. 4 a la No. 100, estos resultados se suman y se dividen entre 100. El valor del MF no debe ser menor de 2.3 ni mayor de 3.2. El módulo de finura obtenido para la granulometría elaborada de este agregado según lo observado en la tabla anterior da como resultado 2.43, estando dentro del rango requerido (Figura 29).



Figura 29. Análisis granulométrico del agregado fino, vista en planta (a), vista lateral (b).

4.3.3 Densidad del agregado fino

La densidad del agregado se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma NMX-C-165-ONNCCE-2014 y utilizando la Ecuación (4), en la que se utiliza el ensaye del cono truncado y posteriormente el uso del matraz con el cual se realizan las mediciones del mismo en peso (g) con agua y después con arena saturada superficialmente seca para luego secarla al horno y obtener resultados dándole solución a la ecuación mencionada antes (Figura 30).

$$\rho = \frac{w_m}{w_{fw} + w_m - w_{fwm}} = \frac{200}{655 + 200 - 755.5} = 2.01$$

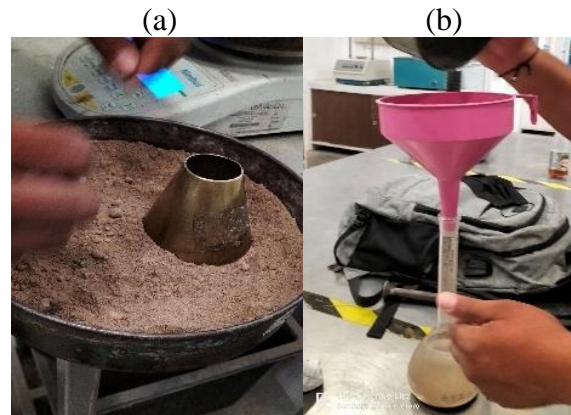


Figura 30. Determinación de densidad y absorción del agregado fino, prueba cono (a); prueba en matraz (b).

4.3.4 Absorción del agregado fino

Para determinar el porcentaje de absorción de los agregados se utiliza la Ecuación (7) para la arena, la cual se le da solución empleando los valores de peso superficialmente seca y seca de esta misma. Para la determinación se realiza con el procedimiento descrito en la norma NMX-C-165-ONNCCE-2014.

$$Aa = \frac{w_{sss} - w_s}{w_s} \times 100 = \frac{300 - 291.4}{291.4} \times 100 = 2.95 \%$$

4.3.5 Humedad del agregado fino

Para la determinación de la humedad de igual manera se realiza conforme la Ecuación (5) establecida por la norma NMX-C-166-ONNCCE-2015. Y dándole solución a la ecuación se obtiene el resultado de humedad con el cuál se corrige la dosificación del agregado fino en la mezcla de concreto diseñada (Figura 31).

$$H = \frac{W_w - W_s}{W_s} \times 100 = \frac{825.5 - 780.7}{780.7} \times 100 = 5.74 \%$$



Figura 31. Peso de material (a); peso de charola (b).

4.4 Diseño y dosificación de la mezcla de concreto

Una vez obtenidos los resultados y haciendo un resumen de las propiedades de los materiales, es decir, cemento, agregado grueso y agregado fino (Tabla 10), se procede a ingresar al diseño de mezclas por el método ACI.

Tabla 10. Propiedades de los materiales a utilizar.

Módulo de finura del agregado fino	2.43
Tamaño máximo del agregado grueso	3/4"
Peso específico del cemento	3.15
Peso específico del agregado fino	2.01
Peso específico del agregado grueso	2.73
Peso volumétrico del agregado grueso	1,577.46 kg/m ³
Absorción del agregado fino	2.95 %
Absorción del agregado grueso	2.14 %
Humedad del agregado fino	5.74 %
Humedad del agregado grueso	1.46 %

Fuente: Propia.

Como se ha mencionado el diseño de las mezclas se realizó con el método propuesto por el comité 211 del *American Concrete Institute* “Proporcionamiento de mezclas de concreto normal, pesado y masivo” (Muciño Vélez & Ana Lozada, 2017), que se describirá en los siguientes pasos:

- 1. Determinación de la resistencia.** La mezcla se realizó para tener una resistencia de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días, y destinarlo a uso estructural, este parámetro dado nos sirve para determinar la relación agua-cemento que corresponde a dicha resistencia.
- 2. Elección del revenimiento.** La dosificación de la mezcla se realizó para obtener un revenimiento de 10 cm que según la tabla 6.3.2 del manual 211 ACI corresponde a elementos estructurales como: columnas, vigas, muros, etc. El revenimiento se eligió considerando la integración de PEAD buscando obtener un concreto manejable, con buena consistencia y trabajabilidad en estado fresco. En la Tabla 11 se muestran los revenimientos recomendados por tipo de construcción y el revenimiento elegido para esta investigación.

Tabla 11. Revenimientos recomendados según la tabla 6.3.2 para elementos constructivos⁵.

Tipo de construcción	Revenimiento, cm	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas, cajones de cimentación y muros de sub-estructura sencillos	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificios	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	7.5	2.5

- 3. Elección de la cantidad de agua de mezclado.** Derivado de nuestro tamaño de agregado nominal, continuamos en el diseño con la obtención del agua ayudándonos de la Tabla 12⁵. Nuestra selección de cantidad de agua para 1 m^3 fue para un tamaño máximo nominal de 19mm Ø, obteniendo 205 kg/m^3 de agua en la mezcla, con un porcentaje de aire atrapado del 2%.

⁵ Fuente: Manual 211 del *American Concrete Institute* (ACI) “Proporcionamiento de mezclas de concreto normal, pesado y masivo”

Tabla 12. Agua y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado⁵.

Revenimiento, cm	Agua, kg/m ³ concreto para TMG, mm							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
	Concreto sin aire incluido							
De 2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	---
Cantidad aprox. Aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

4. **Determinación de la relación agua-cemento (a/c).** Para una resistencia a compresión de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días corresponde a un valor de 0.62, este valor fue obtenido mediante la interpolación de los valores que aparecen en la tabla 6.3.4(a) del manual 211 ACI con la cual se realiza a continuación la Tabla 13.

Tabla 13. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.

Relación agua / cemento por peso		
Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm ²	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	--
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
250	0.62	Valor interpolado
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Fuente: Propia

5. **Determinación de la cantidad de cemento de la mezcla.** Con los valores obtenidos en el paso 3 y en el paso 4 se realizó la siguiente operación divisoria para obtener la cantidad de cemento (CC) por m³ que se requiere para la mezcla de concreto diseñada.

$$CC = \frac{\text{cantidad de agua}}{a/c} = \frac{205 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.62} = 332.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

6. Determinación de la cantidad de agregado grueso. Para un módulo de finura de 2.43 de la arena y un tamaño máximo de agregado de 19 mm, se utilizó un coeficiente de 0.66 que se multiplica por el peso específico de la grava que es de 1,577.46 kg/m³. Debido a que en la tabla 6.3.6⁴ no hay un valor para este resultado de módulo de finura, se realizó una interpolación con la cual se obtuvo el coeficiente Tabla 14. Posteriormente se realiza la siguiente operación para obtener la cantidad de grava (CG) por m³ como se muestra en la siguiente.

Tabla 14. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Tamaño máximo de agregado grueso, mm	Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena				
	2.40	2.43	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8")	0.50	↓	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59		0.57	0.55	0.53
19 (3/4") →	0.66 →	0.66	0.64	0.62	0.60
25 (1")	0.71	Valor interpolado	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2")	0.75		0.73	0.71	0.69
50 (2")	0.78		0.76	0.74	0.72

Fuente: Propia.

$$CG = (0.66)(1,577.46 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) = 1,036.98 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Con la determinación de las cantidades de cemento, agua y agregado grueso obtenemos la Tabla 15 en la cual se obtienen los valores en volumen (L) de cada uno para 1 m³ de concreto. Esto se realiza con la división de cada cantidad entre su densidad para cada material respectivamente, con el fin de conocer la cantidad de arena (CA) a utilizar.

Tabla 15. Volumen de la mezcla sin agregado fino.

Material	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (L)
Agua	205.00	1.00	205.00
Cemento	332.18	3.15	105.45
Grava	1,036.98	2.73	379.32
Aire	0.02	1000	20.00
Total	1,547.18		709.77

Fuente: Propia.

7. Determinación de la cantidad de agregado fino. El cálculo de la CA se realizó mediante el método de volúmenes, esto es obteniendo el cálculo del volumen de

arena, con el resultado de la diferencia entre el volumen de la mezcla de concreto sin agregado fino (709.77 L, visto en la Tabla 15) y el volumen para 1m³ (1000 L), por lo que, realizando el cálculo nos queda:

$$\text{Volumen de arena} = 1,000 - 709.77 = 290.23 \text{ L}$$

Una vez teniendo el volumen requerido de la arena para 1m³, se procede a obtener la cantidad en kg:

$$CA = 290.23 \times 2.01 = 583.38 \text{ kg}$$

Con este cálculo se tienen los volúmenes requeridos de cada material, y se procede a la corrección de las cantidades del agregado grueso y fino por su absorción y humedad de cada uno.

- 8. Corrección de cantidad de agregados.** Con la obtención de las cantidades a utilizar en peso (kg) de cada material para 1m³, el siguiente paso es la corrección por humedad y absorción tal y como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Corrección de las cantidades de los agregados por humedad y absorción.

Material	Peso	Humedad		Absorción		Peso real
	kg	%	kg	%	kg	kg
Agua	205.00		-18.60		+39.43	225.83
Cemento	332.18	0.00	0.00	0.00	0.00	332.18
Grava	1,036.98	0.77	+8.03	2.14	-22.22	1022.80
Arena	583.38	1.81	+0.57	2.95	-17.22	576.73
Total	2,157.74					2,157.74

Fuente: Propia.

Derivado que la humedad que contienen los agregados es implícita se tiene que reducir en la cantidad de agua, sin embargo, la absorción que tienen como propiedad resta agua en la mezcla, por lo que, se tiene que adicionar en la cantidad de agua. Entonces en la Tabla 16 se presentan la dosificación exacta que se utilizó para la elaboración de los especímenes de concreto que se experimentaron para esta investigación (cilindros y vigas).

4.5 Dosificación de los especímenes de concreto (cilindros y vigas)

Para la realización de la experimentación se ajustó al volumen que ocupamos en los especímenes que se ensayarán, para esto se consideraron 2 especímenes por edad, teniendo 6 especímenes por cada experimentación, ya sea cilindro o viga. En el caso de los cilindros y vigas se requiere un volumen derivado de las dimensiones mostradas en la Tabla 17.

Tabla 17. Volumen de concreto requerido para moldes cilíndricos y prismáticos.

Dimensiones de cilindros		Dimensiones para las vigas	
Diámetro	0.10 m	Ancho	0.15 m
Altura	0.20 m	Peralte	0.15 m
Volumen	0.0053 m ³	Largo	0.50 m
Volumen corregido	0.0054 m ³	Volumen	0.0113 m ³
Cantidad de elementos	6	Volumen corregido	0.0115 m ³
Volumen total	0.0325 m ³	Cantidad de elementos	6
		Volumen total	0.0689 m ³

Fuente: Propia.

Una vez obtenidos los volúmenes requeridos para los especímenes de cilindros y vigas, se procede a ajustar la dosificación de cada uno de estos materiales para el volumen de concreto requerido en el espécimen respectivo. Para cada experimentación la dosificación se corrige para un 5% considerando que puede haber errores o algún tipo de desperdicio de material en el momento de la elaboración de la mezcla de concreto. Para los cilindros se muestran en la Tabla 18, y para las vigas se muestran en la Tabla 19.

Tabla 18. Dosificación de la mezcla de concreto para cilindros.

Material	Peso (kg)	Peso para volumen = 0.0325 m ³ (kg)	Peso corregido (kg)
Agua	225.83	2.17	2.28
Cemento	332.18	3.19	3.35
Grava	1022.80	9.83	10.32
Arena	576.73	5.54	5.82
Total	2157.54	20.74	21.78

Fuente: Propia.



Tabla 19. Dosificación de la mezcla de concreto para vigas.

Material	Peso (kg)	Peso para volumen = 0.0689 m ³ (kg)	Peso corregido (kg)
Agua	225.83	15.55	16.33
Cemento	332.18	22.87	24.01
Grava	1022.80	70.42	73.94
Arena	576.73	39.71	41.69
Total	2157.54	148.55	155.97

Fuente: Propia.

4.6 Dosificación de las fibras PEAD

Como se mencionó anteriormente en el capítulo 3, se utilizarán dosificaciones de fibra de PEAD con respecto al peso del cemento utilizado, para esta investigación el peso del cemento utilizado en las vigas es de 22.87 kg y las cantidades se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Dosificación de fibras de PEAD en vigas.

Dosificación de PEAD	
Porcentaje (%)	Peso (kg)
2.5	0.57
5.0	1.14
7.5	1.72

Fuente: Propia.

Capítulo 5: Resultados de experimentación

5.1 Mezclas de control

5.1.1 Cilindros de concreto

Una vez diseñada la mezcla se elaboraron cilindros de concreto para comprobar que el diseño estuviera en los rangos permitidos según la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014. El valor de la resistencia a compresión teórica para un concreto de 250 kg/cm² se muestra en la Tabla 21. de igual manera se presenta el gráfico del comportamiento teórico de dicha resistencia en las 3 edades (Figura 32).

Las dimensiones de los cilindros con los cuales se realizaron los cálculos del área se mostraron en la Figura 14. Recordando que los cilindros tuvieron dimensiones de 10cm Ø x 20cm de altura, manteniendo la relación 1:2 que nos indica la norma.

Tabla 21. Resistencia teórica del concreto diseñado.

Resistencia Teórica	Días de Curado	Carga Máxima (t)	Área Transversal (cm ²)	Resistencia	
				(%)	(kg/cm ²)
f'c 250 kg/cm²	7	27.83	78.54	60	150
	14	33.40	78.54	80	200
	28	36.74	78.54	100	250

Fuente: Propia.

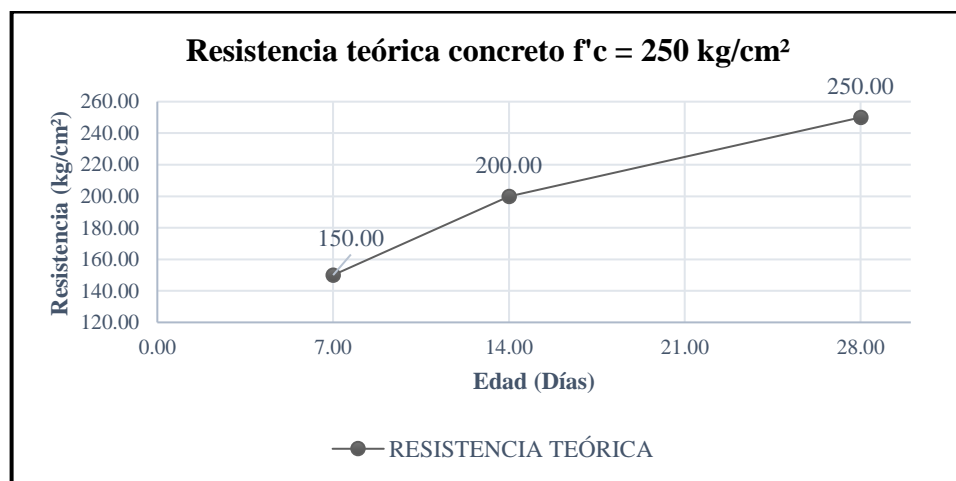


Figura 32. Resistencia teórica del concreto con f'c = 250 kg/cm². Fuente: Propia.

Una vez teniendo esta información se elaboraron los cilindros y se ensayaron en las 3 edades (7, 14 y 28 días), para saber si la mezcla para la resistencia a la que fue diseñada cumple en comparación con la teórica (Figura 33).



Figura 33. Cilindros elaborados para su determinación de resistencia a compresión.

En la Tabla 22, se muestran las características geométricas y resultados de los cilindros ensayados en las 3 edades, recordando que se realiza la prueba de compresión a dos cilindros para cada una de las edades. En dicha tabla podemos observar que la resistencia promedio alcanza un 93.61% de la teórica (250 kg/cm^2), la normativa nos permite hasta 33 kg/cm^2 por debajo por lo que se acepta dicha mezcla para las siguientes pruebas.

Tabla 22. Resistencia de los cilindros de control. Fuente: Propia.

CILINDROS BASE (AGUA, CEMENTO, GRAVA, ARENA)									
Edad	P (kg)	H (cm)	D (cm)	PV (kg/m^3)	Carga (kN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm^2)	Promedio (kg/cm^2)	% Teórico
7	3.31	20.07	10.04	2084.16	118.87	12121.57	153.02	149.03	59.61
7	3.38	20.06	10.05	2122.57	112.93	11515.35	145.04		
14	3.35	19.99	10.00	2134.22	153.12	15613.99	198.80	185.98	74.39
14	3.36	20.04	10.10	2093.50	135.97	13864.67	173.15		
28	3.23	20.06	10.03	2041.26	174.47	17790.58	225.16	234.01	93.61
28	3.18	20.00	10.03	2014.48	188.18	19188.91	242.86		

Los resultados de la resistencia de los cilindros se muestran en la Figura 34, y de igual manera se muestran en la la comparación de la resistencia teórica $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ con los cilindros de la mezcla diseñada para esta investigación.

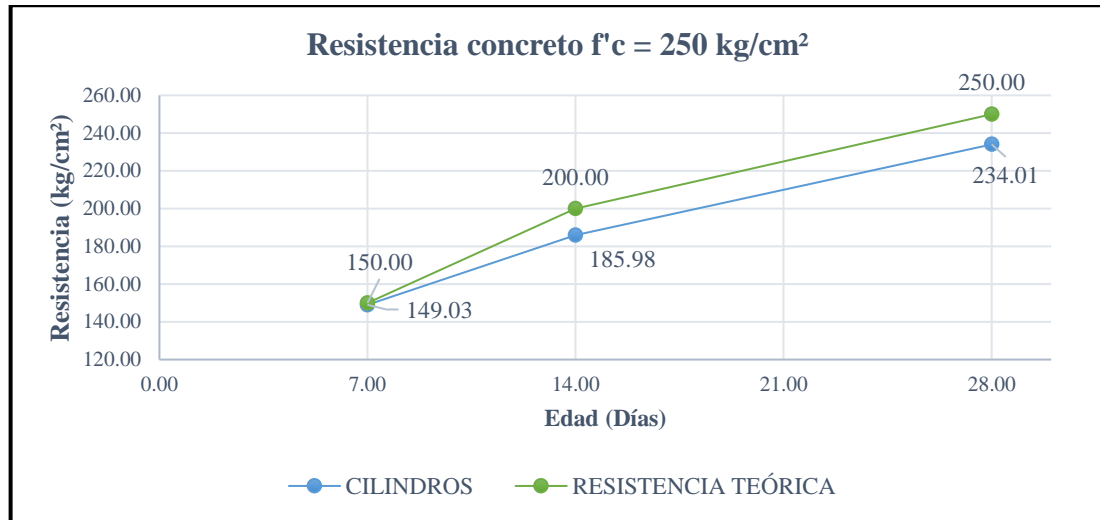


Figura 34. Comparación de la resistencia de la mezcla de diseño con la teórica. Fuente: Propia.

Como se puede observar de igual manera en la anterior figura la resistencia alcanzada fue de 234 kg/cm^2 , lo que nos da un 93.61 % de la resistencia teórica (250 kg/cm^2), el rango de resistencia permitida no debe ser menor en promedio de los especímenes ensayados a 28 días (2 especímenes para esta investigación) por más de 3.25 MPa (33.14 kg/cm^2), siendo una resistencia aceptable con apenas una resistencia menor de 15.99 kg/cm^2 , por lo que se acepta esta mezcla y se procede a realizar las vigas de control (Figura 35).



Figura 35. Ensayos de resistencia a compresión de los cilindros de concreto.

5.1.2 Vigas de concreto (control)

Se ha mencionado anteriormente que el valor de la resistencia a flexión está aproximado dentro de un 10% a 20% de la resistencia a compresión dependiendo de las dimensiones y el volumen del agregado grueso utilizado.

Partiendo de que la mezcla que diseñamos se encuentra validada con respecto a la resistencia a compresión, requerimos realizar vigas de concreto y definir su resistencia a flexión en 3 edades de igual manera (Figura 37).

En la Tabla 23 se muestran los resultados de las vigas de control elaboradas con la mezcla de control diseñada. Las dimensiones de viga fueron de 15 x 15 x 50cm con las cuales se realizaron los cálculos del área.

Tabla 23. Resultados de las vigas de control.

Vigas de control (agua, cemento, grava, arena)										
Edad (Días)	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	PV (kg/m ³)	Carga (KN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Respecto al 10% Teórico
7	23.87	50.05	15.09	15.05	2100.71	14.05	1432.70	18.87	18.87	75.50
7	23.87	50.05	15.09	15.05	2100.71	13.51	1377.64	18.15		
14	23.94	50.03	15.09	15.11	2098.28	20.54	2094.50	27.35	27.35	109.39
14	24.14	50.06	15.07	15.05	2126.16	20.88	2129.17	28.07		
28	23.98	50.09	15.09	15.13	2097.28	23.21	2366.76	30.85	31.04	124.16
28	23.70	50.05	15.07	15.04	2088.66	23.21	2366.76	31.23		

Fuente: Propia.

En la Figura 36 se puede ver el comportamiento de las resistencias a flexión obtenidas de los resultados de ensaye de las vigas de control mediante la carga a dos tercios del claro establecido en la norma NMX-C-191-ONNCCE-2015, haciendo una comparación con el 10 y 20% de la resistencia a compresión teórica.

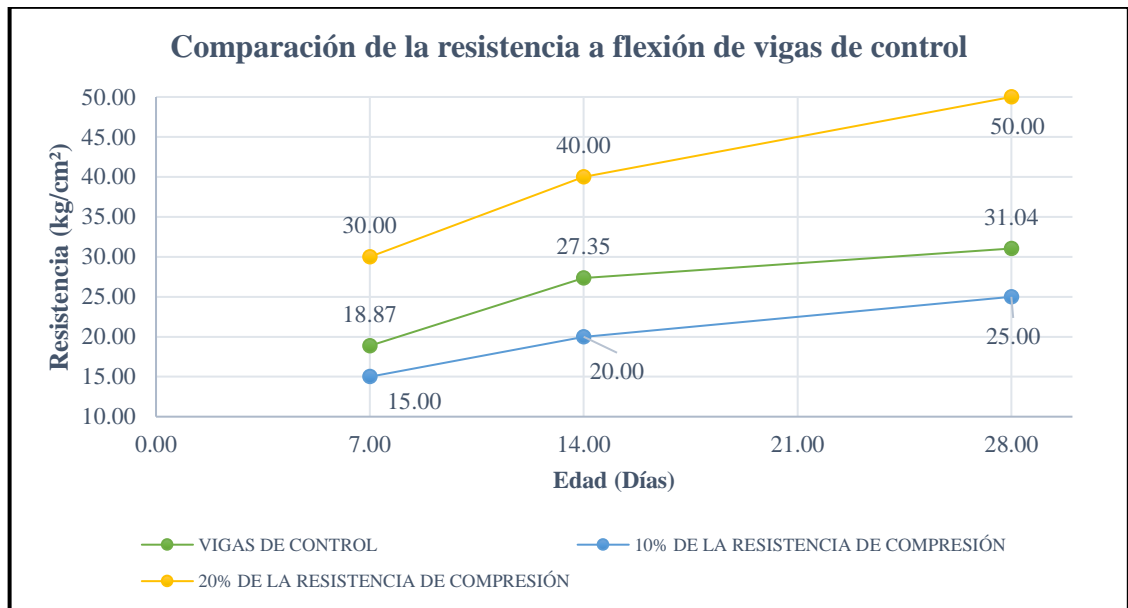


Figura 36. Comparación de la resistencia a flexión del concreto. Fuente: Propia.

Podemos determinar con este gráfico que las resistencias de flexión que se utilizó como base en las vigas de control están dentro de los parámetros aceptables. Por lo que se define que estos resultados de las vigas sirven como punto de comparación con los experimentos de concreto con matriz fibrada con PEAD que se mencionan más adelante.

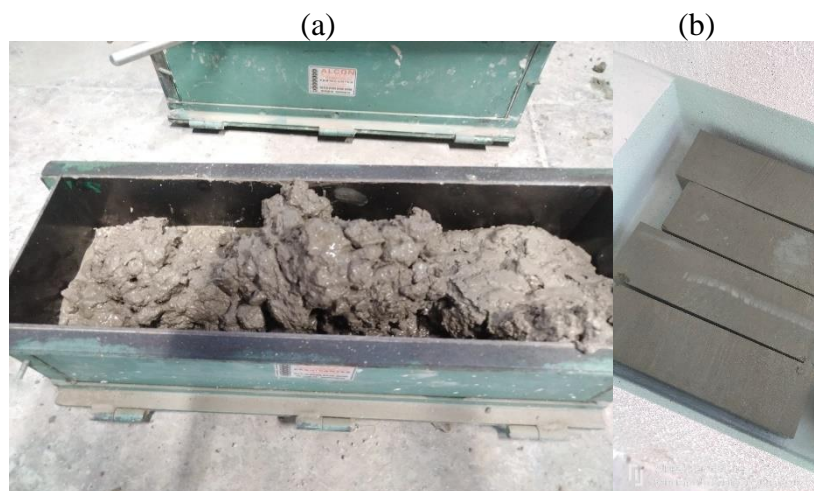


Figura 37. Elaboración de especímenes (a) de vigas de control y curado (b).

5.2 Resultados de vigas con matriz cementante fibratada con PEAD en 2x20mm

5.2.1 Vigas fibratadas con 2.5% de PEAD en 2x20mm

En la Tabla 24, se muestran los resultados de la resistencia de flexión de las vigas de concreto fibratadas con PEAD en dimensiones de 2x20mm en una proporción de 2.5%, de igual manera se observan los pesos volumétricos (PV) para cada espécimen, la carga aplicada en Kilonewton (kN), esto debido a que la prensa universal de la universidad otorga valores en esta unidad, sin embargo, se realizó una conversión a kilogramos (kg) (Figura 39).

Tabla 24. Resultados de vigas fibratadas con 2.5% PEAD con tamaño de 2x20mm.

Vigas con fibras de 2x20 mm; Proporción 2.5%										
Edad	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	PV (kg/m ³)	Carga (KN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Respecto al 10% Teórico
7	24.45	50.07	15.03	14.72	2207.75	15.18	1547.93	21.40	22.62	90.47
7	25.08	50.04	15.08	15.10	2201.06	17.86	1821.21	23.84		
14	25.22	50.11	15.07	15.04	2219.81	21.43	2185.25	28.83	27.64	110.56
14	25.00	50.09	15.08	15.03	2201.81	19.64	2002.72	26.45		
28	25.10	50.16	15.08	15.06	2203.14	29.46	3004.08	39.52	37.80	151.19
28	25.26	50.06	15.08	15.03	2225.60	26.79	2731.82	36.07		

Fuente: Propia.

La Figura 38 muestra el comportamiento de la resistencia de flexión de las vigas fibratadas con PEAD y la comparación con los resultados de las vigas de control.

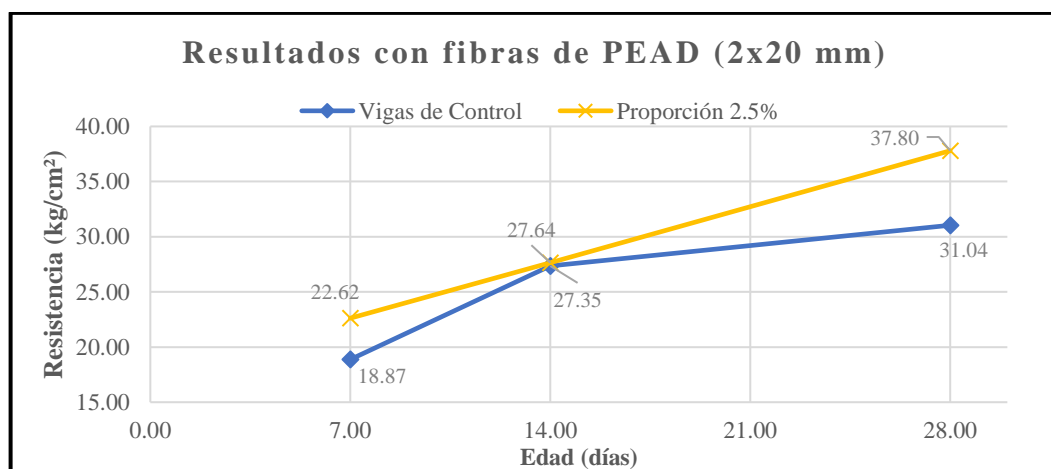


Figura 38. Gráfica de comparación de resultados de resistencia a flexión de vigas con 2.5% PEAD en 2x20mm y vigas de control. Fuente: Propia.

Como se puede observar los resultados en resistencia a flexión para esta proporción y dimensión de fibra de PEAD, es mayor a la edad de 28 días, de igual manera se observa como el comportamiento de la resistencia es ascendente en sus 3 edades y permanece por encima de las resistencias de las vigas de control. La aportación de esfuerzo de las fibras al concreto es beneficiosa, de igual manera se puede observar cómo existe una adherencia entre las fibras y la pasta de cemento. El peso volumétrico, sin embargo, es un poco confuso debido a que aumenta y según la teoría debería bajar; aun así, se verificará la tendencia de este resultado de PV con las demás pruebas experimentales.



Figura 39. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibradas con 2.5% PEAD en 2x20mm.

5.2.2 Vigas fibradas con 5% de PEAD en 2x20mm

En la Tabla 25, se muestran los resultados de la resistencia de flexión de las vigas de concreto fibradas con PEAD en dimensiones de 2x20mm en una proporción de 2.5%, de igual manera se observan los pesos volumétricos (PV) para cada espécimen.

Tabla 25. Resultados de vigas fibradas con 5% PEAD con tamaño de 2x20mm. Fuente: Propia.

Vigas con fibras de 2x20 mm; Proporción 5%										
Edad	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	PV (kg/m ³)	Carga (kN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Respecto al 10% Teórico
7	24.58	50.06	15.03	15.09	2164.92	15.23	1553.03	20.42	21.46	85.84
7	24.44	50.03	15.09	15.06	2149.59	16.78	1711.08	22.50		
14	24.66	50.04	15.05	15.10	2168.51	22.12	2255.61	29.58	30.02	120.10
14	24.77	50.06	15.02	15.04	2190.37	22.56	2300.48	30.47		
28	24.52	50.02	15.07	15.08	2157.62	27.34	2787.90	36.61	36.34	145.37
28	24.61	50.02	15.03	15.05	2175.27	26.75	2727.74	36.07		

La Figura 40 muestra el comportamiento de la resistencia de flexión de las vigas fibratadas con PEAD en 5% y la comparación con los resultados de las vigas de control.

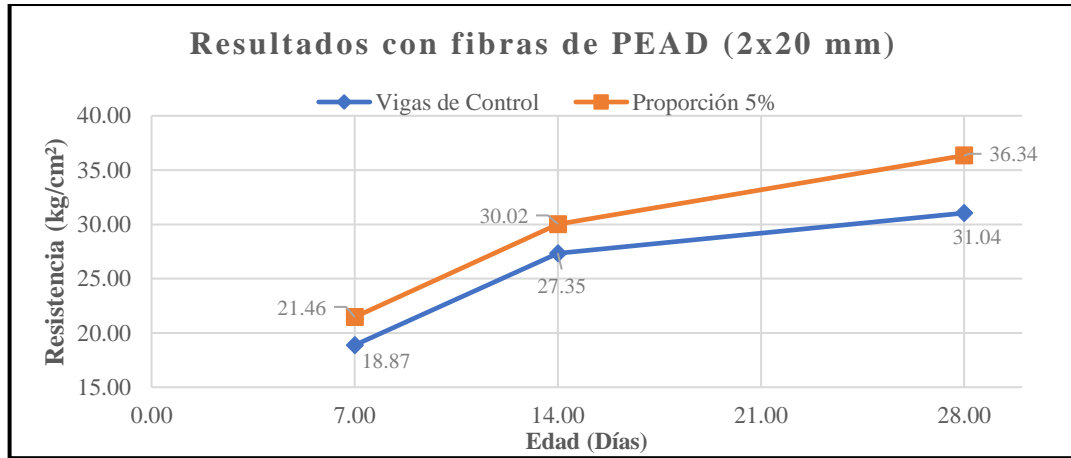


Figura 40. Gráfica de comparación de resultados de resistencia a flexión de vigas con 5% PEAD en 2x20mm y vigas de control. Fuente: Propia.

Los resultados de resistencia para las vigas fibratadas con 5% de PEAD en esta dimensión de 2x20mm presentan de igual manera resultados mayores de resistencia a flexión que las vigas de control en sus 3 edades, por lo que la tendencia de aumento de resistencia se está viendo evidente (Figura 41). Sin embargo, la resistencia a la edad de 28 días es menor que las vigas fibratadas con 2.5% de PEAD, aproximadamente en un 5% menor. El PV en estos especímenes se encuentra menor que el experimento anterior, teniendo una tendencia a disminuir conforme se aumenta la proporción de PEAD, se esperan resultados de la última proporción para tener una definición más exacta.



Figura 41. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 5% PEAD en 2x20mm.

5.2.3 Vigas fibratadas con 7.5% de PEAD en 2x20mm

En la Tabla 26, se muestran los resultados de la resistencia de flexión de las vigas de concreto fibratadas con PEAD en dimensiones de 2x20mm en su proporción más alta de 7.5%, de igual manera se observan los pesos volumétricos (PV) para cada espécimen en la que se observa una tendencia a disminuir conforme aumenta la proporción de PEAD.

Tabla 26. Resultados de vigas fibratadas con 7.5% PEAD con tamaño de 2x20mm.

Vigas con fibras de 2x20 mm; Proporción 7.5%										
Edad	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	PV (kg/m ³)	Carga (kN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Respecto al 10% Teórico
7	23.88	50.02	15.04	15.01	2114.76	15.11	1540.79	20.46	20.46	81.85
7	23.96	50.06	15.05	15.03	2115.93	15.36	1566.28	20.73		
14	24.15	50.08	15.07	15.05	2126.19	22.41	2285.18	30.13	30.13	120.51
14	24.33	50.03	15.03	15.02	2154.18	22.30	2273.97	30.18		
28	24.21	50.01	15.02	15.04	2142.99	25.12	2561.53	33.93	34.91	139.66
28	24.43	50.03	15.03	15.02	2163.04	26.53	2705.31	35.90		

Fuente: Propia.

La Figura 42 muestra el comportamiento de la resistencia de flexión de las vigas fibratadas con PEAD en 7.5% y la comparación con los resultados de las vigas de control.

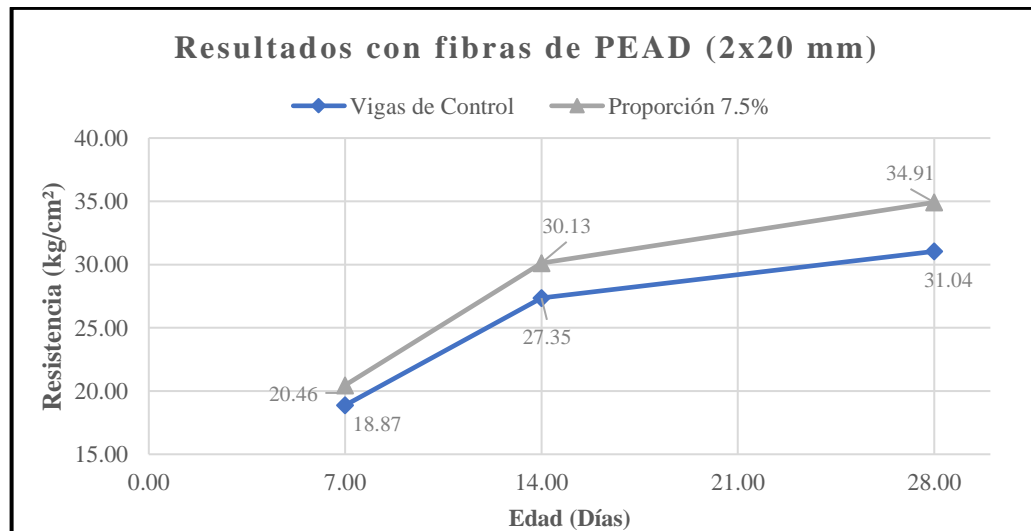


Figura 42. Gráfica de comparación de resultados de resistencia a flexión de vigas con 7.5% PEAD en 2x20mm y vigas de control. Fuente: Propia.

Los resultados de resistencia para las vigas fibratadas con 7.5% de PEAD en esta dimensión de 2x20mm presentan de igual manera resultados mayores que las vigas de control en sus 3 edades, el aumento de resistencia para las 3 proporciones es equivalente a la anterior proporción (Figura 43). La resistencia a la edad de 28 días es menor que las vigas fibratadas con 2.5 y 5% de PEAD, por lo que el resultado nos indica que las fibras en esta dimensión y proporciones si beneficia la resistencia a flexión, pero no es más eficiente que las proporciones antes mencionadas. El PV en estos especímenes se encuentra menor que los experimentos anteriores, confirmando la tendencia a disminuir conforme aumenta la proporción de PEAD.



Figura 43. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 5% PEAD en 2x20mm.

5.2.4 Comparación general de resultados de vigas fibratadas con PEAD en 2x20mm

Como se puede observar en la Figura 44, los resultados de resistencia a flexión son mayores en sus tres proporciones para esta dimensión de fibra (2x20mm), estando por encima de los resultados mostrados para las vigas de control en todas las edades ensayadas. La proporción de fibra que presenta mejores resultados es cuando se tiene un 2.5%, teniendo un aumento de resistencia hasta de 21.07% (37.80 kg/cm²) con respecto al resultado de 28 días de las vigas de control (31.04 kg/cm²).

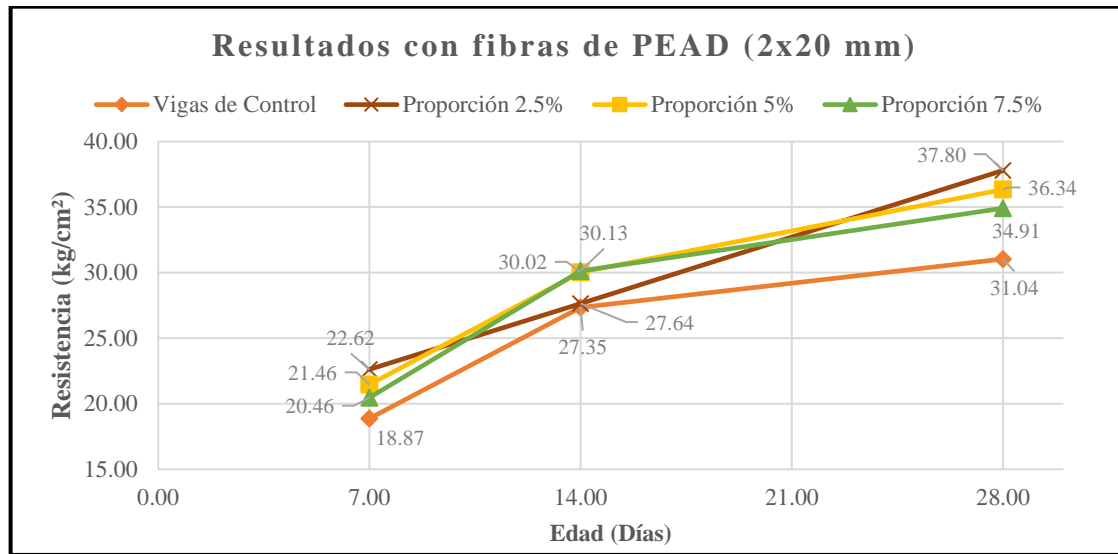


Figura 44. Resultados de resistencia a flexión de vigas fibradas con PEAD en 2x20mm en sus proporciones distintas. Fuente: Propia.



Figura 45. Se muestra la adherencia de las fibras 2x20mm.

Con respecto a los pesos volumétricos se realizó una comparación mostrada en la Tabla 27 donde se observa que a medida que se aumenta la proporción de PEAD el peso volumétrico del concreto va disminuyendo, de igual manera hacer mención que las fibras no disminuyen el peso volumétrico en comparación con respecto a las vigas de control, en el caso de la proporción 7.5% ésta logra igualar el PV (Figura 45).

Tabla 27. Comparación de pesos volumétricos en las proporciones de adición de PEAD en 2x20mm.

Pesos volumétricos de las proporciones de PEAD en 2x20mm en sus edades.			
Edad	Proporción 2.5%	Proporción 5%	Proporción 7.5%
7	2207.75	2164.92	2114.76
7	2201.06	2149.59	2115.93
14	2219.81	2168.51	2126.19
14	2201.81	2190.37	2154.18
28	2203.14	2157.62	2142.99
28	2225.60	2175.27	2163.04

Fuente: Propia.



Figura 46. Determinación de pesos volumétricos para vigas con fibras de 2x20mm.

5.3 Resultados de vigas con matriz cementante fibratada con PEAD en 4x20mm

5.3.1 Vigas fibratadas con 2.5% de PEAD en 4x20mm

En la Tabla 28, se muestran los resultados de la resistencia de flexión y PV de las vigas de concreto fibratadas con PEAD en dimensiones de 4x20mm en una proporción de 2.5%.

Tabla 28. Resultados de vigas fibratadas con 2.5% PEAD con tamaño de 4x20mm.

Vigas con fibras de 4x20 mm; Proporción 2.5%										
Edad	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	PV (kg/m ³)	Carga (kN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Respecto al 10% Teórico
7	24.36	50.01	15.02	15.05	2154.83	14.15	1442.90	19.09	19.09	76.34
7	24.57	50.03	15.03	15.01	2176.88	14.22	1450.04	19.27		
14	24.50	50.08	15.06	15.02	2162.75	19.44	1982.33	26.26	26.26	105.02
14	24.63	50.03	15.04	15.06	2173.51	18.78	1915.03	25.26		
28	24.41	50.02	15.02	15.04	2160.26	22.11	2254.59	29.86	29.70	118.81
28	24.29	50.05	15.01	15.05	2148.36	21.89	2232.16	29.54		

Fuente: Propia.

La Figura 47 muestra el comportamiento de la resistencia de flexión de las vigas fibratadas con PEAD en esta proporción y la comparación con los resultados de las vigas de control. Los resultados de resistencia a flexión para esta proporción y dimensión de fibra de PEAD, resulta más baja que la obtenida a la edad de 28 días en comparación con las vigas de control. La trabajabilidad con esta fibra es un poco menor, sin embargo, la mezcla se comporta homogénea. El PV se presenta mayor en comparación con las vigas de control, sin embargo, es similar a lo obtenido por las vigas con fibras de 2x20mm en la misma proporción.

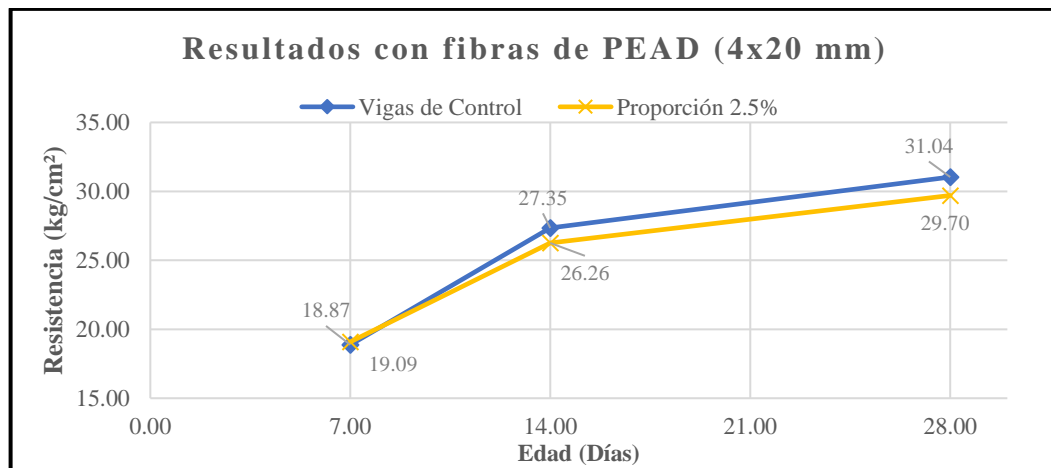


Figura 47. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 2.5% PEAD en 4x20mm y vigas de control.
Fuente: Propia.

En este experimento de igual manera se muestra una fractura limpia en el tercio medio de la viga, al momento de la ruptura hubo una separación del espécimen pronunciada, caso

que no se evidencio en los experimentos de las fibras de 4x20mm, sin embargo, se muestra adherencia de las fibras de PEAD con la mezcla de concreto (Figura 48).



Figura 48. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 2.5% PEAD en 4x20mm.

5.3.2 Vigas fibratadas con 5% de PEAD en 4x20mm

En la Tabla 29, se muestran los resultados de la resistencia de flexión y PV de las vigas de concreto fibratadas con PEAD en dimensiones de 4x20mm en una proporción de 5% (Figura 50).

Tabla 29. Resultados de vigas fibratadas con 5% PEAD con tamaño de 4x20mm.

Vigas con fibras de 4x20 mm; Proporción 5%										
Edad	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	PV (kg/m ³)	Carga (kN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Respecto al 10% Teórico
7	24.15	50.02	15.05	15.02	2135.83	14.36	1464.31	19.41	19.41	77.63
7	23.76	50.02	15.03	15.04	2101.34	14.87	1516.32	20.07		
14	23.64	50.01	15.04	15.04	2089.75	20.05	2044.53	27.04	27.04	108.17
14	23.58	50.03	15.02	15.02	2089.17	19.88	2027.20	26.92		
28	23.81	50.04	15.05	15.04	2102.12	22.44	2288.24	30.25	30.02	120.08
28	23.72	50.07	15.04	15.03	2095.71	22.06	2249.49	29.79		

Fuente: Propia.

La Figura 49 muestra el comportamiento de la resistencia de flexión de las vigas fibratadas con PEAD en esta proporción y la comparación con los resultados de las vigas de control. El comportamiento de la resistencia a flexión para esta proporción y dimensión de

fibra de PEAD, resulta más baja que la obtenida a la edad de 28 días en comparación con las vigas de control. Hay una resistencia mayor en su primera edad, pero posteriormente, se presenta un incremento de resistencia que se encuentra por debajo de lo obteniendo por nuestras vigas de control.

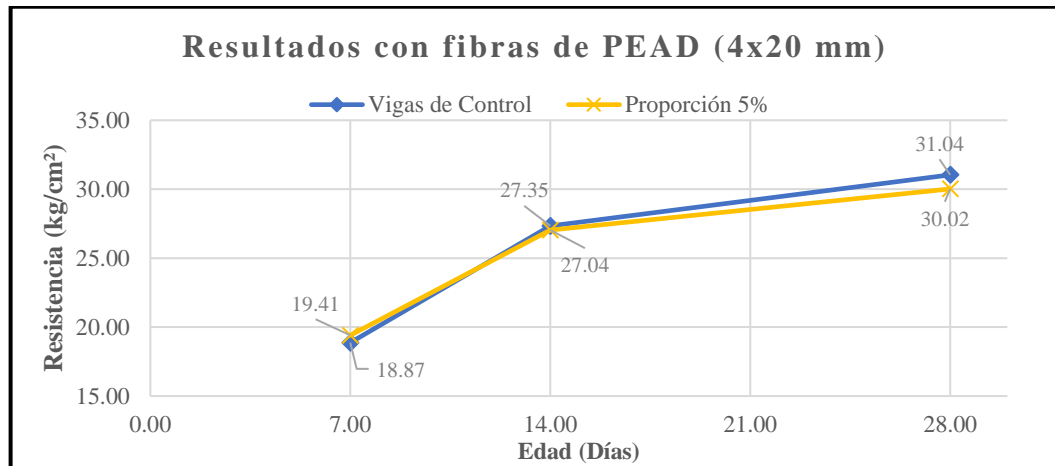


Figura 49. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 5% PEAD en 4x20mm y vigas de control.
Fuente: Propia.

La trabajabilidad con esta fibra tiende a ser menor, sin embargo, la mezcla se sigue comportando homogénea con esta fibra. El PV se presenta menor en comparación con el tamaño de fibra utilizado en la mezcla anterior como era de esperarse, e igualando al PV promedio de las vigas de control.



Figura 50. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 5% PEAD en 4x20mm.

5.3.3 Vigas fibratadas con 7.5% de PEAD en 4x20mm

En la Tabla 30, se muestran los resultados de la resistencia de flexión y PV de las vigas de concreto fibratadas con PEAD en dimensiones de 4x20mm en una proporción de 7.5% (Figura 52).

Tabla 30. Resultados de vigas fibratadas con 7.5% PEAD con tamaño de 4x20mm.

Vigas con fibras de 4x20 mm; Proporción 7.5%										
Edad	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	PV (kg/m ³)	Carga (kN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Respecto al 10% Teórico
7	23.18	50.01	15.02	15.01	2055.92	13.86	1413.33	18.79	18.79	75.18
7	23.34	50.02	15.01	15.01	2071.07	13.62	1388.85	18.48		
14	23.45	50.02	15.02	15.02	2078.07	19.41	1979.27	26.28	26.28	105.14
14	23.28	50.01	15.01	15.02	2064.79	19.56	1994.56	26.51		
28	23.52	50.02	15.03	15.02	2082.88	21.75	2217.88	29.43	29.50	117.99
28	23.47	50.02	15.02	15.02	2079.84	21.83	2226.04	29.56		

Fuente: Propia.

La Figura 51 muestra el comportamiento de la resistencia de flexión de las vigas fibratadas con PEAD en esta proporción y la comparación con los resultados de las vigas de control.

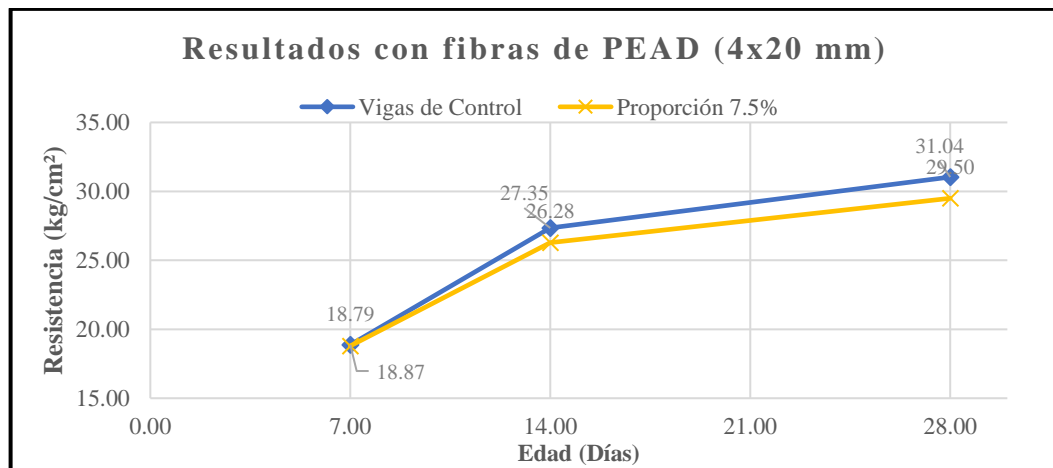


Figura 51. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 7.5% PEAD en 4x20mm y vigas de control.

Fuente: Propia.

Se observa que, para este experimento con fibras en este tamaño y proporción, su comportamiento es similar en comparación con las proporciones anteriores (2.5 y 5%), en la primera edad se torna mejor que los resultados de las vigas de control, sin embargo, esta incrementa estando por debajo del resultado máximo de dichas vigas a la edad de 14 y 28 días. La trabajabilidad con esta fibra sigue siendo menor, sin embargo, la mezcla se comporta con una consistencia homogénea, la presencia de las fibras se observa en toda la mezcla. El PV que se presenta disminuye en promedio 30 kg/m^3 en comparación con las vigas de control.



Figura 52. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 7.5% PEAD en 4x20mm.

5.3.4 Comparación general de resultados de vigas fibratadas con PEAD en 4x20mm

En la Figura 53, se observan los resultados de resistencia a flexión en sus tres proporciones para esta dimensión de fibra (4x20mm), estando por debajo de los resultados mostrados para las vigas de control. La proporción de fibra que presenta mejores resultados es cuando se tiene un 5%, teniendo un aumento de resistencia de hasta 30.02 kg/cm^2 , con respecto al resultado de 28 días de las vigas de control (31.04 kg/cm^2) está por debajo un 4% aproximadamente, aunque la resistencia alcanzada no es del todo negativa, ya que casi logra igualarla, no es mayor a la de control como se pretendía.

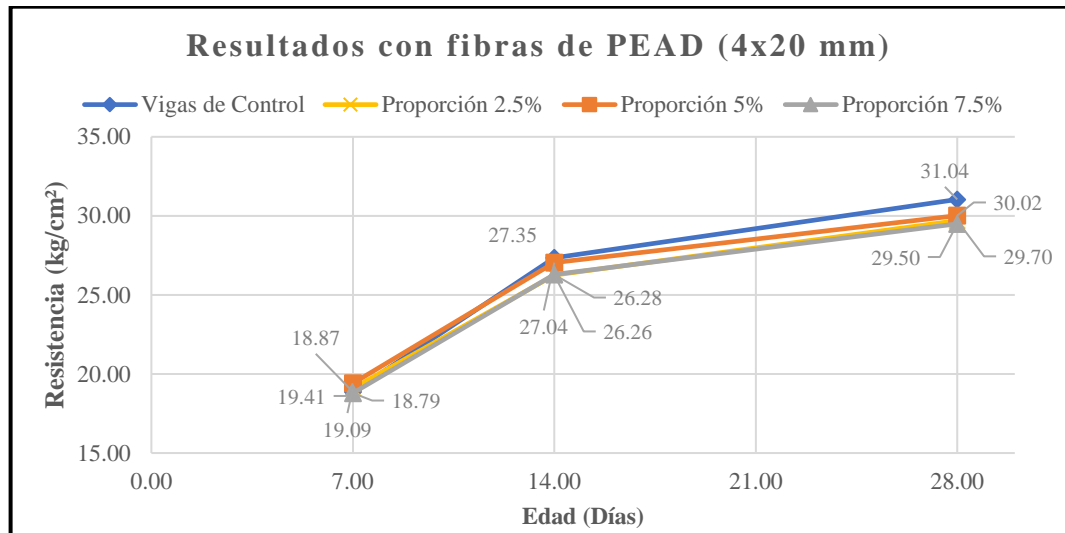


Figura 53. Resultados de resistencia a flexión de vigas fibratadas con PEAD en 4x20mm en sus proporciones distintas. Fuente: Propia.



Figura 54. Se muestra la adherencia de las fibras 4x20mm.

Con respecto a los pesos volumétricos se realizó una comparación mostrada en la Tabla 31 donde se observa que a medida que se aumenta la proporción de PEAD el peso volumétrico del concreto va disminuyendo, aunque para que se presenta una disminución más representativa es hasta la proporción de 7.5%. (Figura 54)

Tabla 31. Comparación de pesos volumétricos en las proporciones de adición de PEAD en 4x20mm.

Pesos volumétricos de las proporciones de PEAD en 4x20mm en sus edades.			
Edad	Proporción 2.5%	Proporción 5%	Proporción 7.5%
7	2154.83	2135.83	2055.92
7	2176.88	2101.34	2071.07
14	2162.75	2089.75	2078.07
14	2173.51	2089.17	2064.79
28	2160.26	2102.12	2082.88
28	2148.36	2095.71	2079.84

Fuente: Propia.

Como se menciona anteriormente, la conforme se aumenta la proporción de PEAD, el PV va disminuyendo, se puede observar esta diferencia notablemente y su comportamiento es similar al de las fibras de 2x20mm teniendo una tendencia a mayor porcentaje de PEAD es menor el PV del concreto con fibras (Figura 55).



Figura 55. Determinación de pesos volumétricos para vigas con fibras de 4x20mm.

5.4 Resultados de vigas con matriz cementante fibratada con PEAD en 6x20mm

5.4.1 Vigas fibratadas con 2.5% de PEAD en 6x20mm

En la Tabla 32, se muestran los resultados de la resistencia de flexión y PV de las vigas de concreto fibratadas con PEAD en dimensiones de 6x20mm en una proporción de 2.5% (Figura 57).

Tabla 32. Resultados de vigas fibratadas con 2.5% PEAD con tamaño de 6x20mm.

Vigas con fibras de 6x20 mm; Proporción 2.5%										
Edad	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	PV (kg/m ³)	Carga (kN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Respecto al 10% Teórico
7	24.66	50.01	15.01	15.01	2188.64	13.77	1404.15	18.68	18.68	74.74
7	24.48	50.02	15.01	15.01	2172.23	14.02	1429.64	19.02		
14	24.55	50.02	15.01	15.01	2178.44	19.92	2031.27	27.03	27.03	108.12
14	24.61	50.02	15.02	15.01	2182.31	19.65	2003.74	26.65		
28	24.64	50.01	15.01	15.01	2186.87	21.81	2224.00	29.59	29.51	118.02
28	24.71	50.01	15.01	15.01	2193.08	21.68	2210.74	29.42		

Fuente: Propia.

La Figura 56 muestra el comportamiento de la resistencia de flexión de las vigas fibratadas con PEAD en esta proporción y la comparación con los resultados de las vigas de control. El comportamiento que presenta la resistencia a flexión es bueno, es ascendente, sin embargo, no es lo esperado ya que se presentan por debajo de lo obtenido por las vigas de control. La trabajabilidad con esta fibra sigue siendo buena, sin embargo, la mezcla presenta una consistencia más áspera en comparación con las fibras anteriores.

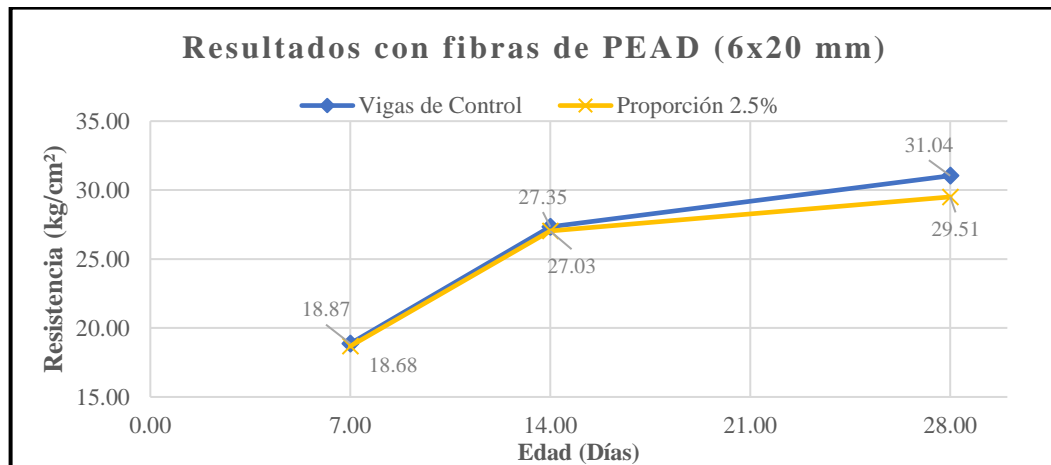


Figura 56. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 2.5% PEAD en 6x20mm y vigas de control.
Fuente: Propia.

El PV se presenta mayor en comparación con el tamaño de fibra utilizado en las mezclas anteriores alrededor de 20 kg/m³ en promedio, esto nos muestra una tendencia con esta proporción de fibra, en la que, al contrario de disminuir, este presenta un aumento en su PV en comparación con las vigas de control.

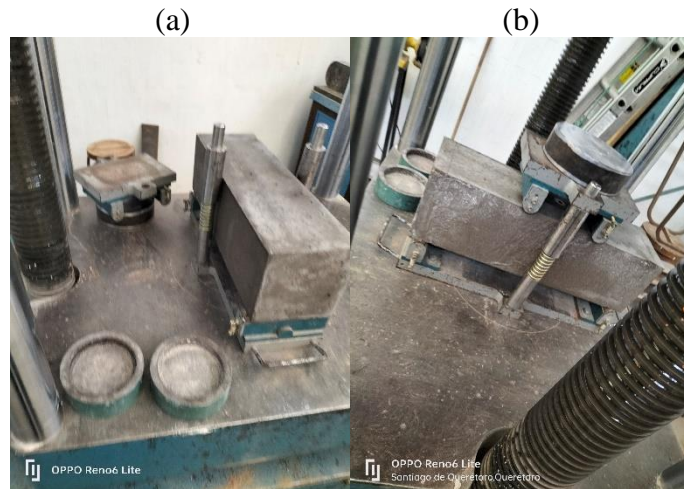


Figura 57. Montaje de viga en prensa (a), Ensayo de vigas fibradas con 2.5% PEAD en 6x20mm (b).

5.4.2 Vigas fibradas con 5% de PEAD en 6x20mm

En la Tabla 33, se muestran los resultados de la resistencia de flexión y PV de las vigas de concreto fibradas con PEAD en dimensiones de 6x20mm en una proporción de 5%.

Tabla 33. Resultados de vigas fibradas con 5% PEAD con tamaño de 6x20mm.

Vigas con fibras de 6x20 mm; Proporción 5%										
Edad	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	PV (kg/m ³)	Carga (kN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Respecto al 10% Teórico
7	22.92	50.01	15.01	15.01	2034.21	13.86	1413.33	18.81	18.81	75.23
7	23.15	50.01	15.02	15.01	2053.26	13.64	1390.89	18.50		
14	23.05	50.01	15.01	15.01	2045.75	19.52	1990.49	26.49	26.49	105.95
14	23.10	50.01	15.01	15.01	2050.19	19.46	1984.37	26.41		
28	23.12	50.01	15.01	15.01	2051.96	21.23	2164.86	28.81	28.93	115.71
28	23.08	50.01	15.02	15.01	2047.05	21.42	2184.23	29.05		

Fuente: Propia.

La Figura 58 muestra el comportamiento de la resistencia de flexión de las vigas fibradas con PEAD en esta proporción y la comparación con los resultados de las vigas de control.

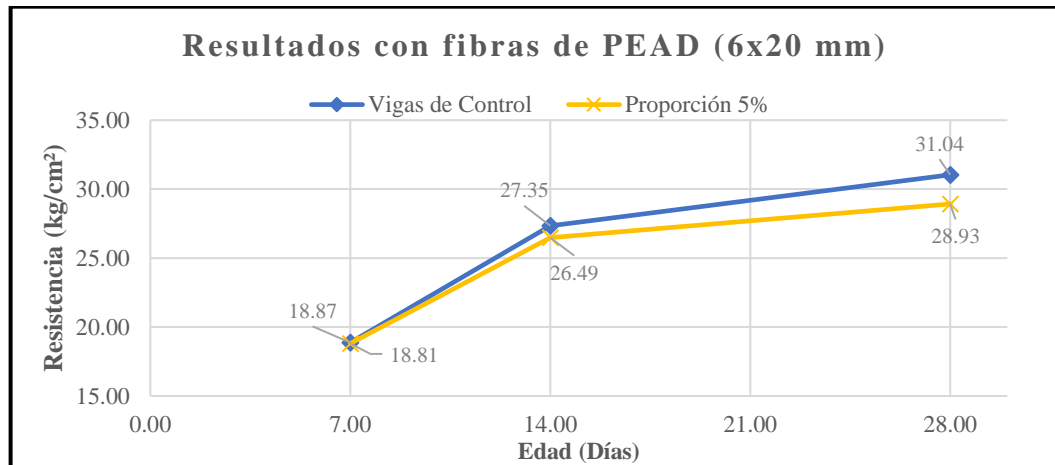


Figura 58. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 5% PEAD en 6x20mm y vigas de control.
Fuente: Propia.

Los resultados de resistencia a flexión para esta proporción y dimensión de fibra de PEAD, sigue presentando comportamientos de aumento de resistencia estables o normales, sin embargo, no son mayores a los de las vigas de control. La trabajabilidad con esta fibra es un poco más baja que la mezcla anterior, se determina que esta fibra vuelve a la mezcla áspera sigue siendo homogénea (Figura 59). El PV se presenta menor en comparación con la proporción de fibra utilizado en la mezcla anterior alrededor de 50 kg/cm^3 en promedio, es menor que las vigas de control.



Figura 59. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 5% PEAD en 6x20mm.

5.4.3 Vigas fibratadas con 7.5% de PEAD en 6x20mm

En la Tabla 34, se muestran los resultados de la resistencia de flexión y PV de las vigas de concreto fibratadas con PEAD en dimensiones de 6x20mm en una proporción de 7.5% (Figura 61).

Tabla 34. Resultados de vigas fibratadas con 7.5% PEAD con tamaño de 6x20mm.

Vigas con fibras de 6x20 mm; Proporción 7.5%										
Edad	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	PV (kg/m ³)	Carga (kN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Respecto al 10% Teórico
7	22.88	50.01	15.01	15.01	2030.66	12.85	1310.34	17.44	17.44	69.74
7	23.11	50.01	15.01	15.01	2051.08	13.21	1347.04	17.92		
14	22.96	50.01	15.01	15.01	2037.76	18.65	1901.77	25.31	25.31	101.23
14	22.78	50.01	15.02	15.02	2019.10	18.96	1933.38	25.68		
28	22.65	50.01	15.01	15.01	2010.25	20.88	2129.17	28.33	28.60	114.39
28	22.58	50.01	15.01	15.01	2004.04	21.27	2168.94	28.86		

Fuente: Propia.

La Figura 60 muestra el comportamiento de la resistencia de flexión de las vigas fibratadas con PEAD en esta proporción y la comparación con los resultados de las vigas de control. Los resultados de resistencia a flexión para esta proporción y dimensión de fibra de PEAD, resulta más baja que la obtenida en comparación con las vigas de control e incluso con las mezclas con proporciones anteriores a esta.

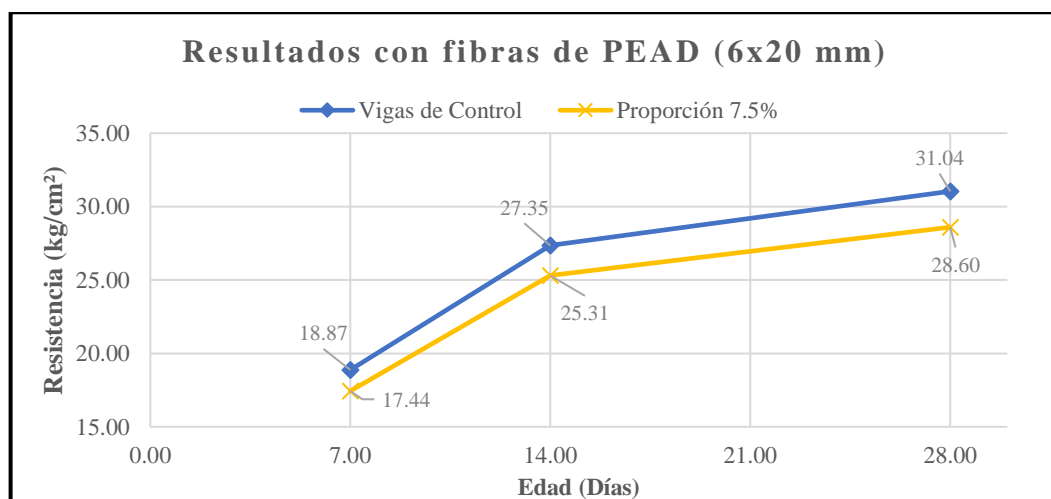


Figura 60. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 7.5% PEAD en 6x20mm y vigas de control.

Fuente: Propia.

La trabajabilidad con esta fibra se presentó más deficiente, las fibras no se incorporaban del todo bien a la pasta de cemento (Figura 63). El PV disminuye considerablemente en algunas vigas, esto en comparación con el tamaño de fibra utilizado en las mezclas anteriores. En este experimento de igual manera se muestra, que esta fibra no es una opción viable para añadir al concreto.



Figura 61. Ensayo de resistencia a flexión de vigas fibratadas con 7.5% PEAD en 6x20mm.

5.4.4 Comparación general de resultados de vigas fibratadas con PEAD en 6x20mm

Como se puede observar en la Figura 62, los resultados de resistencia a flexión son menores en sus tres proporciones para esta dimensión de fibra (6x20mm), en comparación con las vigas de control en las 3 edades ensayadas, se determina que esta fibra no es una opción para la mejora del concreto en su resistencia a flexión. La proporción de fibra que presenta mejores resultados es cuando se tiene un 2.5% (29.51 kg/cm²), sin embargo, es casi 10 % menor en su resistencia a flexión a la edad de 28 días con respecto al resultado de las vigas de control (31.04 kg/cm²).

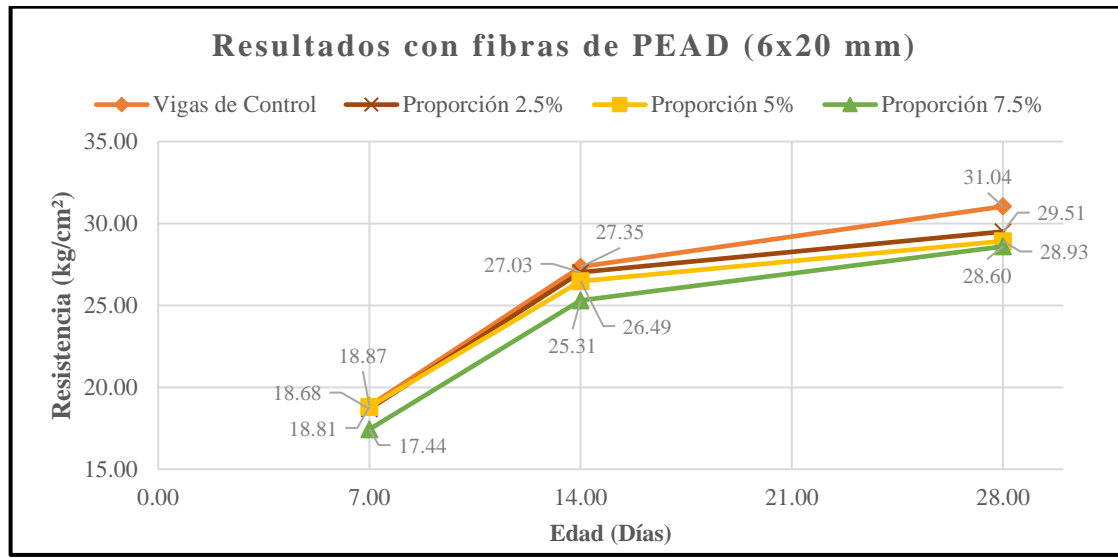


Figura 62. Resultados de resistencia a flexión de vigas fibratadas con PEAD en 6x20mm en sus proporciones distintas. Fuente: Propia.



Figura 63. Se muestra la baja adherencia de las fibras 6x20mm.

Con respecto a los pesos volumétricos se realizó una comparación mostrada en la Tabla 35 donde se observa que a medida que se aumenta la proporción de PEAD el peso volumétrico del concreto va disminuyendo (Figura 64).

Tabla 35. Comparación de pesos volumétricos en las proporciones de adición de PEAD en 6x20mm.

Pesos volumétricos de las proporciones de PEAD en 6x20mm en sus edades.			
Edad	Proporción 2.5%	Proporción 5%	Proporción 7.5%
7	2188.64	2034.21	→ 2030.66
7	2172.23	2053.26	→ 2051.08
14	2178.44	2045.75	→ 2037.76
14	2182.31	2050.19	→ 2019.10
28	2186.87	2051.96	→ 2010.25
28	2193.08	2047.05	→ 2004.04

Fuente: Propia.



Figura 64. Determinación de pesos volumétricos para vigas con fibras de 6x20mm.

5.5 Resultados de vigas con matriz cementante fibratada con PEAD en 1.5x30mm

5.5.1 Vigas fibratadas con 2.5% de PEAD en 1.5x30mm

En la Tabla 36, se muestran los resultados de la resistencia de flexión y PV de las vigas de concreto fibratadas con PEAD en dimensiones de 1.5x30mm en una proporción de 2.5%.

Tabla 36. Resultados de vigas fibratadas con 2.5% PEAD con tamaño de 1.5x30mm.

Vigas con fibras de 1.5x30 mm; Proporción 2.5%										
Edad	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	PV (kg/m ³)	Carga (kN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Respecto al 10% Teórico
7	22.68	50.01	15.01	15.01	2012.91	16.39	1671.31	22.68	22.24	88.96
7	22.49	50.01	15.01	15.01	1996.05	15.11	1540.79	22.49		
14	22.52	50.01	15.01	15.01	1998.71	21.12	2153.64	22.52	28.66	114.63
14	22.66	50.01	15.01	15.01	2011.14	20.38	2078.18	22.66		
28	22.41	50.01	15.01	15.01	1988.95	25.21	2570.70	22.41	34.78	139.11
28	22.58	50.01	15.01	15.01	2004.04	26.05	2656.36	22.58		

Fuente: Propia.

La Figura 65 muestra el comportamiento de la resistencia de flexión de las vigas fibratadas con PEAD en esta proporción y la comparación con los resultados de las vigas de control. La resistencia a flexión obtenida con esta proporción de fibras en este tamaño nos muestra un comportamiento por encima con respecto a las vigas de control, se logra ver un aumento en su resistencia conforme las edades ascendentemente marcadas.

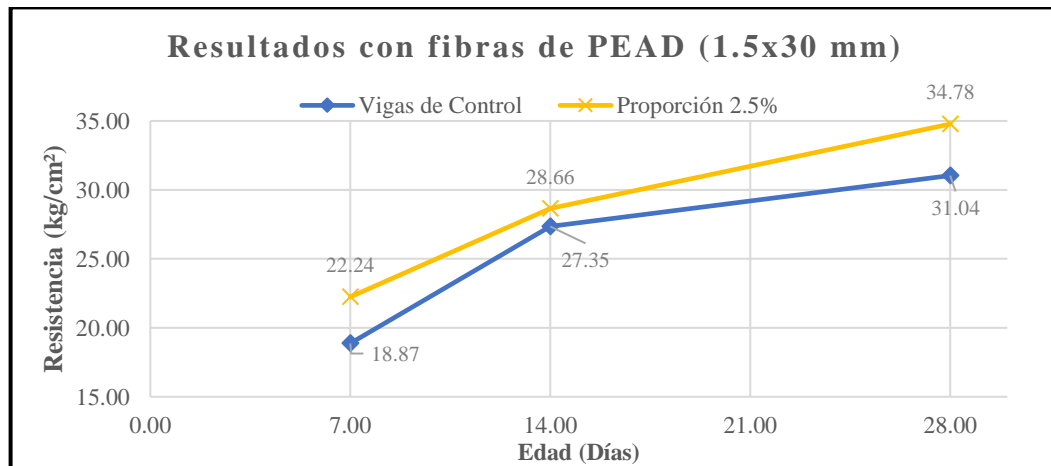


Figura 65. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 2.5% PEAD en 1.5x30mm y vigas de control.
Fuente: Propia.

La trabajabilidad con esta fibra es eficiente y se logra tener un mezclado homogéneo, se incorporan muy bien las fibras en este tamaño distinto, un poco más alargado. El PV se presenta menor en comparación con las vigas de control, un resultado esperado derivado de lo pequeño de las fibras, disminuye un 5% aproximadamente. Se muestra adherencia de las fibras de PEAD con la mezcla de concreto debido a lo alargado (Figura 66).



Figura 66. Adherencia de las vigas fibratadas con PEAD en proporción de 2.5% de 1.5x30mm.

5.5.2 Vigas fibratadas con 5% de PEAD en 1.5x30mm

En la Tabla 37, se muestran los resultados de la resistencia de flexión y PV de las vigas de concreto fibratadas con PEAD en dimensiones de 1.5x30mm en una proporción de 5%.

Tabla 37. Resultados de vigas fibratadas con 5% PEAD con tamaño de 1.5x30mm.

Vigas con fibras de 1.5x30 mm; Proporción 5%										
Edad	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	PV (kg/m ³)	Carga (kN)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Respecto al 10% Teórico
7	22.38	50.01	15.01	15.01	1986.29	13.58	1384.77	18.43	18.43	73.71
7	22.56	50.02	15.02	15.01	2000.53	14.21	1449.02	19.27		
14	22.44	50.01	15.02	15.01	1990.29	19.66	2004.76	26.66	26.66	106.64
14	22.25	50.01	15.02	15.01	1973.43	18.55	1891.57	25.15		
28	22.28	50.01	15.01	15.01	1977.41	22.35	2279.07	30.33	29.78	119.11
28	22.51	50.01	15.01	15.01	1997.82	21.54	2196.47	29.23		

Fuente: Propia.

La Figura 67 muestra el comportamiento de la resistencia de flexión de las vigas fibratadas con PEAD en esta proporción y la comparación con los resultados de las vigas de control.

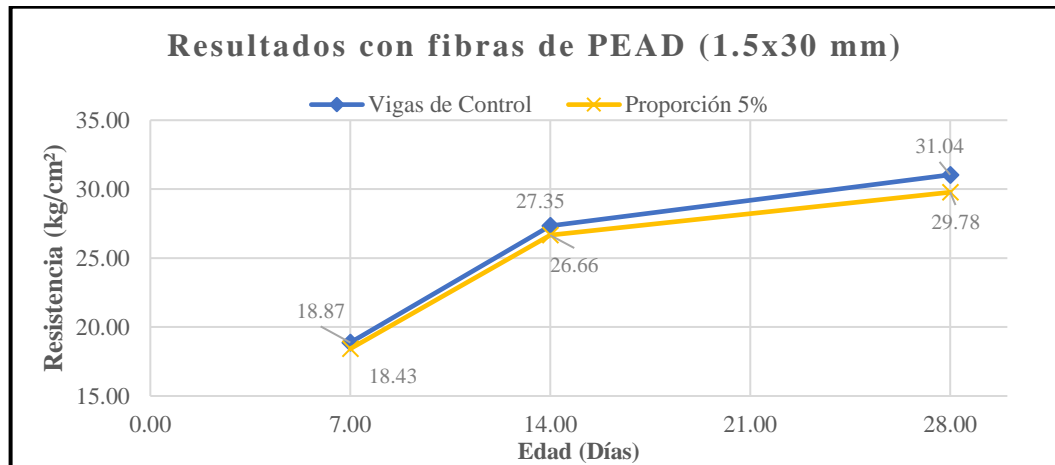


Figura 67. Gráfica de comparación de resultados de vigas con 5% PEAD en 1.5x30mm y vigas de control.
Fuente: Propia.

Los resultados de resistencia a flexión para esta proporción y dimensión de fibra de PEAD, presentó un comportamiento similar al experimento con la proporción de 2.5%, sin embargo, esta proporción no supera lo obtenido en las vigas de control, estando por debajo apenas un 4%. La trabajabilidad con esta fibra es un poco menor, debido al volumen, la mezcla no garantiza la homogeneidad. El PV si logra disminuir en comparación con el experimento anterior en hasta un 1.5% aproximadamente. Se muestra adherencia de las fibras de PEAD con la mezcla de concreto de igual manera que la proporción anterior.

5.6 Procedimiento de elaboración de vigas de concreto con fibras de PEAD

Para la elaboración de las vigas de concreto con matriz cementante fibrada con PEAD, se realizó un análisis de los procedimientos constructivos que se utilizaron, teniendo que, el mezclado manual, no te garantiza una buena homogeneidad (Figura 68), se prefirió realizar el mezclado por medio de una revolvedora mecánica (Figura 69) mediante un proceso constructivo establecido y derivado de lo establecido en la bibliografía. Conforme a esto se garantizó una mezcla homogénea y que pudiera ser lo más trabajable posible, respetando nuestro diseño (revenimiento elegido 10 cm) dentro de los rangos establecidos.

Los siguientes pasos describen el proceso de mezclado y elaboración de las vigas de concreto con matriz cementante fibrada con PEAD, con el cuál se obtuvo un mejor control de los materiales y elaboración de la mezcla.



Figura 68. Mezclado manual del concreto con PEAD.



Figura 69. Mezclado mecánico del concreto con PEAD.

5.6.1 Mezclado mecánico del concreto con PEAD y elaboración de especímenes.

1. Se eligen los agregados, previamente analizados y secados, el cemento y agua para posteriormente pesarlos según la dosificación obtenida en el diseño para las vigas de concreto.

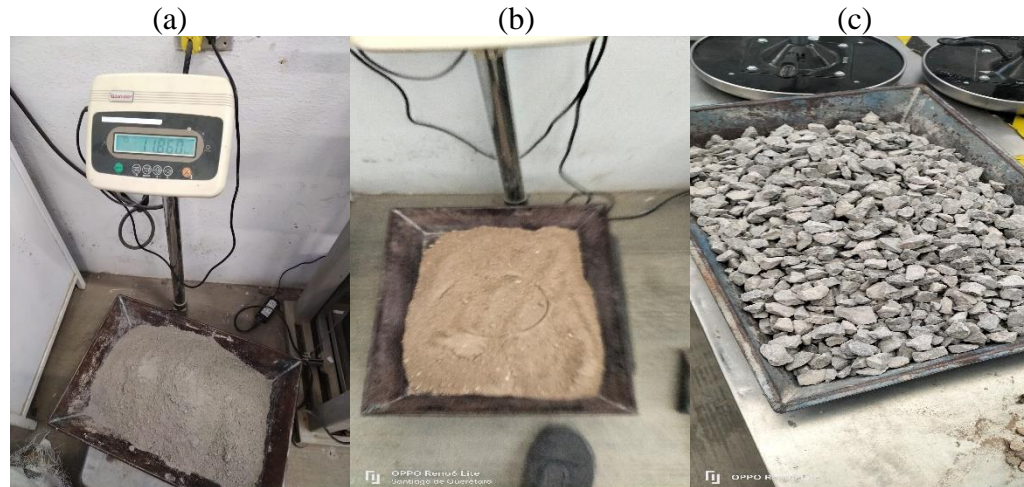


Figura 70. Agregados para la mezcla de concreto; cemento (a), arena (b), grava (c).

2. Se limpia el lugar donde se elaborará la mezcla, que se debe encontrar cerca de la zona donde se fraguarán y curarán los elementos de concreto. La revolvedora debe humedecerse para evitar pérdida de humedad en la mezcla.
3. Se le adiciona el agregado grueso con un 30% del agua de diseño y se mezcla durante 30 segundos.
4. Posteriormente se adiciona el agregado fino y de igual manera se adiciona el 30% de agua aproximadamente y se mezcla por 30 segundos.
5. Por último, se adiciona el cemento y se agregan los últimos 40% de agua, aquí se mezcla durante 1 minuto garantizando la homogeneidad de la mezcla de concreto (Figura 71).



Figura 71. Mezcla de concreto homogénea.

6. Una vez que la mezcla se presente con una consistencia suave y un tanto fluida se adiciona el PEAD, y se mezcla durante 30 a 40 segundos, con el fin que el PEAD se note distribuido en toda la mezcla se va adicionando poco a poco (Figura 72).



Figura 72. Adición de PEAD en la mezcla de concreto.

7. Antes de pasarlo a los moldes se prosigue a realizar la prueba de revenimiento de acuerdo con la norma NMX-C-156-ONNCCE-2010.
8. Se vacía el concreto en los moldes sobre una superficie nivelada y firme cerca de la zona de mezclado y se procede a la elaboración conforme a lo establecido en la norma NMX-C-159-ONNCE-2016 (Figura 73).



Figura 73. Elaboración de vigas de concreto con fibras de PEAD

9. Para evitar la evaporación del agua se cubren las vigas con una película de plástico y se ajustan con una liga de hule.
10. El fraguado de los especímenes será durante un tiempo de 24 horas, desmoldando e inmediatamente introduciéndolos a la pileta donde cumplirán los tiempos establecidos de curado 7, 14 y 28 días (Figura 74).

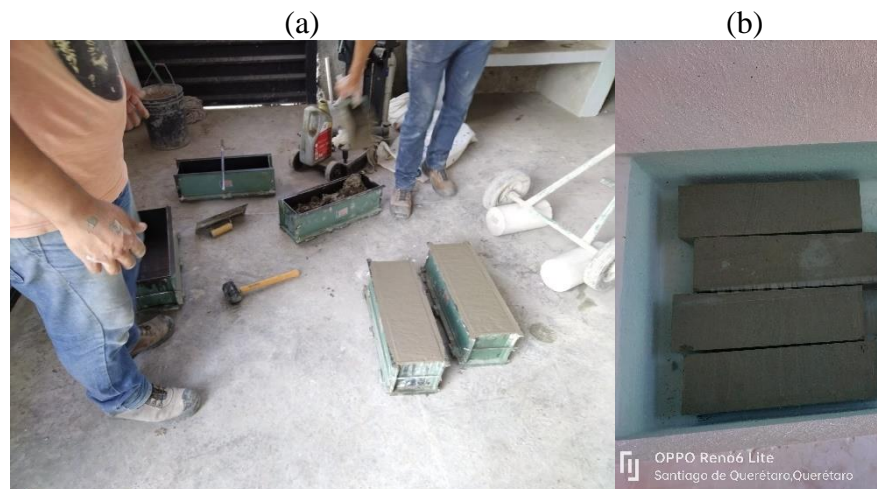


Figura 74. Fraguado (a) y curado (b) de especímenes de concreto.

d. Homogeneidad del concreto usando método mecánico.



Figura 75. Sección de la viga de concreto con PEAD.

Como se puede observar en la Figura 75, la distribución del PEAD se puede apreciar en toda la sección de la viga, demostrando que este acomodo aleatorio de las fibras en la viga de concreto tiene una aportación importante, ya que los esfuerzos internos que se presentan se transmiten a dichas fibras, que soportan estas cargas a las cuáles son sometidas y aportando resistencia a la flexión de la viga. Se observa que la orientación de las fibras en la viga igual es distinta, ya que, al momento de homogeneizar la mezcla de concreto, éstas tratan de ocupar los espacios que no son ocupados por los agregados, tratando de disminuir las oquedades que se presentan en la viga, obteniendo un mejor confinamiento en esta sección del concreto Figura 76.



Figura 76. Sección de viga homogeneizada con PEAD.



Conclusiones

Los ensayos de resistencia a compresión simple de los 6 cilindros de comparación mencionados en el Capítulo 5 y los ensayos de resistencia a flexión de las vigas de concreto elaboradas con las diferentes proporciones y tamaños de fibra de PEAD, fueron ensayados en la Prensa eléctrica digital marca DAVI con alcance de medición de 120 toneladas, adaptada con el molde utilizado para los ensayos de resistencia de las vigas.

Con los resultados presentados se determinó que la mezcla base de concreto resulta eficiente teniendo una capacidad de resistencia a compresión de 234 kg/cm^2 teniendo un 93.61% con respecto a la resistencia de diseño (250 kg/cm^2), estando dentro de los rangos permisibles según la normativa de diseño. Derivado de este diseño de mezcla se realizaron las vigas de control las cuales obtuvieron una resistencia a flexión o módulo de ruptura dentro de los parámetros teóricos con respecto a la resistencia de compresión ($10 < MR < 20\%$) la cuál fue de 31.04 kg/cm^2 , logrando tener una mezcla de control que pudo ser base para la comparación de vigas de concreto fibratado con PEAD. Al realizar las pruebas de resistencia de las vigas fibratadas con PEAD se pudo observar que al suceder la fractura no existe un desprendimiento brusco del concreto.

Los resultados de las vigas de concreto fibratado con PEAD demostraron que las fibras con medidas de $2 \times 20 \text{ mm}$ con una proporción de 2.5% (con respecto al peso seco del cemento) tiene una mejora de resistencia a la flexión de hasta 21.7%, siendo el experimento con mejores resultados en sus 3 proporciones, alcanzando hasta 37.80 kg/cm^2 .

Las fibras con medidas de $1.5 \times 30 \text{ mm}$ en la proporción de 2.5% obtuvieron los segundos mejores resultados con un aumento de resistencia a la flexión de hasta 12.04% teniendo 34.78 kg/cm^2 .

El comportamiento de mezclado, al realizar un proceso constructivo mediante el uso de una revolvedora mecánica, demostró que las fibras logran distribuirse en toda la mezcla, teniendo una homogeneidad de la pasta de cemento, agregados y dichas fibras de PEAD. Después de realizar las pruebas de resistencia se puede distinguir que el acomodo aleatorio de las fibras se presenta en toda la sección de la viga lo que permite que los esfuerzos internos



se transmitan a éstas y con ello permite obtener mejores resultados de resistencia a flexión que una viga de concreto sin adición de PEAD.

Al obtener estos resultados podemos pensar en las distintas aplicaciones que le podemos dar derivado de las resistencias máximas obtenidas, en el mercado se utilizan concretos MR de 30 a 50 kg/cm². Por lo que teniendo un concreto con un MR superior a 30 kg/cm² puede destinarse al uso en pisos industriales, estacionamientos, plataformas de carga e incluso en pavimentos rígidos con un alto flujo vehicular.

El peso volumétrico del concreto adicionado con fibras de PEAD disminuye conforme se aumenta la proporción añadida a la mezcla base (2.5, 5 y 7.5%), de igual manera la resistencia a flexión del concreto va disminuyendo y se obtienen resultados menores a los de la mezcla base, esto hace evidente que las fibras de PEAD se hacen presentes en el concreto homogéneamente. De igual manera la trabajabilidad que se presenta en la elaboración de los especímenes es buena y va disminuyendo conforme aumenta la proporción de PEAD, sin embargo, esto no impide que la elaboración se realice correctamente.

A pesar de que los experimentos con fibras en tamaños de 4x20 mm, 1.5x30 mm y 6x20 mm no presentaron resultados por encima de las resistencias de las vigas de control, dichas vigas de concreto fibrado alcanzaron una resistencia a la flexión que logra estar por debajo en máximo un 8%, teniendo hasta un mínimo de 28.60 kg/cm² equivalente a un concreto con un MR-30. Este tipo de concreto fibrado con PEAD en estas resistencias puede tener aplicaciones en plataformas de rodamiento de bajos esfuerzos como pueden ser banquetas, ciclovías, rampas para personas con discapacidad, pisos firmes con bajos esfuerzos aplicados y pavimentos con un tránsito vehicular bajo.

Al obtener estos resultados se demuestra que el PEAD logra ayudar al aumento de una propiedad en el concreto hidráulico como lo es su MR, con ello se presenta este polímero que tenemos hoy en día contaminando del medio ambiente como una opción distinta para la elaboración del concreto modificando su matriz, creando un material compuesto utilizable en la industria de la construcción a la vez que vaya disminuyendo la presencia del PEAD como contaminante e impulsando a una conciencia de reciclaje de dicho polímero.



Líneas futuras de investigación

A pesar de los buenos resultados de esta investigación, se considera que es necesario explorar otras opciones de elaboración y adición del PEAD en el concreto.

- Realizar diseños para concretos de alta resistencia a la compresión y comparar su comportamiento a la flexión con la proporción de fibra de PEAD de 2.5% en el tamaño de 2x20 mm.
- Sustituir en proporción los agregados pétreos de la mezcla con fibra de PEAD en el tamaño de 2x20 mm y proporción de 2.5% comparando resultados con un concreto hidráulico convencional.
- Definir otros distintos tamaños de fibras de PEAD al igual que variar los espesores.
- Aplicar la mezcla de concreto con fibras de PEAD en vigas de concreto armado y comparar su comportamiento con distintos tamaños de varillas de acero.



Referencias Bibliográficas

- Alesmar, L., Rendón, N., & María Eugenia, K. (2008). Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (pet) – cemento. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 23(1), 76–86.
- Augusto Delgado, J. C., & Legarda Caicedo, P. V. (2011). Correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a compresión del concreto fabricado con materiales pétreos de la mina “Las Terrazas” y cantera “La Victoria” del municipio de Pasto. En *Facultad de Ingeniería*. Universidad de Nariño.
- Besednjak, A. (2005). *Materiales compuestos. Procesos de fabricación de embarcaciones*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Blazy, J., & Blazy, R. (2021). Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces. *Case Studies in Construction Materials*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00549>
- Delvasto, S., Perdomo, F., & Mejía de Gutiérrez, R. (2011). Ecolaminados de Pead-Fibras de Fiques. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, 3(1), 43–49. <https://doi.org/10.25100/iyc.v3i1.2335>
- Fischetti, M. (2009). *Better Materials Could Build a Green Construction Industry*. Scientific American. <https://www.scientificamerican.com/article/better-materials-green-construction-industry/>
- Fraire Cabral, C. F., Padilla Molina, F. L., & Flores Alaniz, E. (2014). Dosificaciones de concreto con escoria de fundición como agregado grueso y fino. En *Facultad de Ingeniería en Ciencias y Arquitectura*. Universidad Juárez Del Estado De Durango.
- Frías, M., Martínez-Ramírez, S., de la Villa, R. V., Fernández-Carrasco, L., & García, R. (2021). Reactivity in cement pastes bearing fine fraction concrete and glass from construction and demolition waste: Microstructural analysis of viability. *Cement and Concrete Research*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106531>
- Fuhr, L., & Franklin, M. (2020, diciembre). Atlas del plástico, Datos y cifras sobre el mundo de los polímeros sintéticos. *Break Free From Plastic (Rompe del Plástico)*, 1, 56.
- García Linan, S. (2015). *Contaminación por el plástico Salvador García Liñán Salvador García Liñán* (pp. 1–6).
- Gómez, M. S., Carvajal, A. M., & Santelices, V. (2011). Influencia del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) usado como adición en el mortero de cemento. *Revista de la Construcción*, 10(3), 110–121. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2011000300011>
- Guzmán Burelos, L., & Rodríguez Torres, J. E. (2020). *Determinación de longitud óptima de PEAD para aumentar la resistencia a flexión del concreto*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Helene, P. (2008). *El arte de proyectar y construir estructuras*. Universidadde Sao Pulo.



- Hernández Guerrero, E. (2015). *Aprovechan plástico de desecho en concretos arquitectónicos*. Boletín UNAM-DGCS-635.
- Hernández López, I. G., & Santana Sánchez, M. (2018). *Diseño de una mezcla de concreto empleando Residuos Sólidos de la Construcción y Demolición (RCD) mejorada con aditivos sustentables*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Hoorweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012, marzo). What a waste: A Global Review of Solid Waste Management. *Urban Development & Local Government Unit World Bank Group*, 116. <https://doi.org/10.1201/9781315593173-4>
- Infante-Alcalde, J., & Valderrama-Ulloa, C. (2019). Análisis Técnico, Económico y Medioambiental de la Fabricación de Bloques de Hormigón con Polietileno Tereftalato Reciclado (PET). *Información tecnológica*, 30(5), 25–36. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000500025>
- Irías Pineda, A. S. (2013). *Refuerzo de elementos estructurales con hormigones con fibras o solo fibras*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA.
- Jayant, D. S., & Gupta, D. M. K. (2014). Flexural Strength – a Measure To Control Quality of Rigid Concrete Pavements. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(11), 46–57.
- Kangavar, M. E., Lokuge, W., Manalo, A., Karunasena, W., & Frigione, M. (2022). Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00934>
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. En *Portland Cement Association: Vol. Primera Ed.* Portland Cement Association.
- krishna, K. V., & Rao, J. V. (2014). Experimental study on behavior of fiber reinforced concrete for rigid pavements. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11(4), 49–53. <https://doi.org/10.9790/1684-11474953>
- Martínez-Soto, I. E., & Mendoza-Escobedo, C. J. (2006). Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 7(3), 151–164. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2006.07n3.012>
- Masías Mogollón, K. A. (2018). Resistencia a la flexión y tracción en el concreto usando ladrillo triturado como agregado grueso. *Universidad de Piura*, 2, 125.
- McNeil, K., & Kang, T. H. K. (2013). Recycled Concrete Aggregates: A Review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1), 61–69. <https://doi.org/10.1007/S40069-013-0032-5/FIGURES/6>
- Miravete, A., & Castejón, L. (2002). Materiales compuestos. *Temas de disseny*, 20, 123–138.
- Muciño Vélez, A., & Ana Lozada, P. S. (2017). Diseño de mezclas de concreto. En *Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México*.



- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción - Agregados - Masa volumétrica - Método de prueba* (p. 8).
- NMX-C-077-ONNCCE. (1997). *Industria De La Construcción - Agregados Para Concreto - Análisis Granulométrico - Método De Prueba* (p. 5).
- NMX-C-083-ONNCCE. (2008). *Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto-Método de prueba* (pp. 67–71).
- NMX-C-111-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción - Agregados para concreto hidráulico - Especificaciones y métodos de prueba* (p. 17).
- NMX-C-122-ONNCCE. (2004). *Industria De La Construcción - Agua Para Concreto - Especificaciones* (p. 8).
- NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción-Concreto-Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio* (p. 15).
- NMX-C-164-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso* (p. 11).
- NMX-C-165-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino - método de ensayo* (p. 8).
- NMX-C-166-ONNCCE. (2010). *Industria de la construcción - Agregados - Contenido de agua por secado. Método de prueba* (pp. 87–91).
- NMX-C-191-ONNCE. (2015). *Industria de la construcción - Concreto - Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro* (p. 14).
- NMX-C-251-ONNCCE. (2018). *Industria de la construcción - Concreto - Terminología* (p. 17).
- NMX-C-414-ONNCCE. (2017). *Industria de la construcción - Cementos hidráulicos - Especificaciones y métodos de prueba* (p. 2).
- Oikonomou, N. D. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 315–318. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020>
- Ortiz Hernández, M. L. (2013). El impacto de los plásticos. *Centro de Investigación en Biotecnología de la UAEM*, 5. https://www.revistahypatia.org/~revistah/index.php?option=com_content&view=article&id=304:el-impacto-de-los-plasticos&catid=26&Itemid=430
- Peacock, A. (2000). *Handbook of Polyethylene: Structures: Properties, and Applications* (Marcel Dek). CRC Press.
- Peralta Guevara, R. (2014). Evaluación de la resistencia a la compresión de un concreto convencional $f'_c=210$ kg/cm² y el concreto con material reciclado Polietileno Tereftalato (PET) en la ciudad de Jaén-Cajamarca. En *Escuela Académico Profesional De Ingeniería Civil Sede Jaén*. Universidad Nacional de Cajamarca.



- Polanco Rodríguez, A. (2012). *Manual De Laboratorio De Practicas Del Concreto* (Vol. 1, pp. 3–71). <https://www.mendeley.com/viewer/?fileId=4af9d954-1628-e49f-5978-5569e4fe2f9b&documentId=0e1748c8-6ae6-3c63-a45d-7202b271811c>
- PROY-NMX-C-537-ONNCCE. (2016). *Industria de la construcción - Fibras poliméricas para concreto – Especificaciones y métodos de ensayo* (p. 23).
- Rivas, B. (2016). *Polímeros, plásticos y medioambiente*. el mostrador. <https://www.elmostrador.cl/cultura/2016/08/16/polimeros-plasticos-y-medioambiente/>
- Rivera-Garibay, O. O., Álvarez-Filip, L., Rivas, M., Garelli-Ríos, O., Pérez-Cervantes, E., & Estrada-Saldívar, N. (2020). Impacto de la contaminación por plásticos en Áreas Naturales Protegidas mexicanas. *Green-Peace*, 53(9), 1689–1699.
- Roca Girón, I. E. (2005). Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del Polietileno de Alta Densidad (PEAD). *Journal of Chemical Information and Modeling*, 12 Suppl 1(9), 1–29.
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2013). *Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais* (1a ed.). McGraw Hill Brasil.
- Terán Gilmore, A. (2010). El futuro del diseño sismorresistente de las edificaciones de concreto reforzado: una visión basada en la sustentabilidad. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo.*, 2(1), 2–16.
- Tiryakioğlu, M., Tiryakioğlu, E., & Askeland, D. R. (1997). The effect of casting shape and size on solidification time: A new approach. *International Journal of Cast Metals Research*, 9(5), 259–267. <https://doi.org/10.1080/13640461.1997.11819667>
- Valenzuela Ccahuana, M. F., & Dennis Huaman, C. G. (2018). *Evaluación comparativa de la resistencia a compresión entre un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ adicionado con material PEAD y un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ adicionado con material PET, elaborados con material procedente de las canteras de Cunyac y Vicho*. Universidad Andina del Cusco.
- Vanegas-Jaramillo, J. D., Cruz-Riaño, L. J., & Patiño-Arcila, I. D. (2022). Fragmentation model for tensile behavior of intermingled hybrid composites and optimal mixing ratio. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 103(2022–2844), 96–115. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210423>
- Yazici, S., Inan, G., & Tabak, V. (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21, 1250–1253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025>
- Zhang, Z., Abbas, E. M. A., Wang, Y., Yan, W., Cai, X., Yao, S., Tang, R., Cao, D., Lu, W., & Ge, W. (2021). Experimental study on flexural behavior of the BFRC-concrete composite beams. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00738>