

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Análisis comparativo técnico y económico de hormigones reforzados en diferentes proporciones de fibras de acero y polipropileno mediante ensayos de tenacidad a la fractura conforme a las especificaciones establecidas por la EFNARC, para aplicaciones en obras de Ingeniería Civil.

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

Máster en Ingeniería Civil Mención en Construcción y Saneamiento

Presentado por:

Marlon Ezequiel Pacaji Ulloa

Edwin Ronaldo Vera Navarrete

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

A Dios por su constante bendición, permitiéndome cumplir una meta más en vida, aun cuando sentía que era demasiado para mí y todo parecía complicado.

A mis padres, por su apoyo, sus oraciones y sus buenos deseos hacia mí. Demostrándome que el amor de un padre y una madre a su hijo es incondicional.

A mi hermana, por siempre estar pendiente de mí. Y brindarme su ayuda sin pensarlo dos veces, cuando más lo necesité.

Ing. Marlon Ezequiel Pacaji Ulloa

Dedico este proyecto a mis padres y de manera especial a mi pareja, por todo el apoyo, paciencia y confianza brindada, el cual ha sido la fuerza que me ha sostenido y guiado durante todo este proceso. Este logro también es para ustedes.

Ing. Edwin Ronaldo Vera Navarrete

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento al PhD. Eduardo Santos, tutor de este proyecto de graduación. Por su valiosa guía y brindarnos su tiempo, sus conocimientos, que fueron de gran ayuda para el desarrollo y culminación de este proyecto.

Al personal del Laboratorio de Materiales, donde se realizó los ensayos necesarios para este proyecto. Su profesionalismo, compromiso y apoyo constante, fueron esenciales para llevar a cabo esta etapa del proyecto con éxito.

Ing. Marlon Pacaji & Ing. Edwin Vera

DECLARACIÓN EXPRESA

Nosotros Marlon Ezequiel Pacaji Ulloa y Edwin Ronaldo Vera Navarrete acordamos y reconocemos que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 20 de noviembre del 2025.

Ing. Marlon Pacaji Ulloa

Ing. Edwin Vera Navarrete

EVALUADORES

Ing. Fernanda Mejía. Msc

Profesora de Materia

Ing. Samantha Jiménez. PhD

Profesora de Materia

Ing. Eduardo Santos Baquerizo. PhD

Tutor de Proyecto

RESUMEN

El presente proyecto analiza comparativamente el desempeño técnico y económico de hormigones reforzados con fibras de acero y polipropileno en diferentes proporciones, mediante ensayos de tenacidad a la fractura bajo la normativa EFNARC. El objetivo es determinar la viabilidad de estas mezclas en obras de ingeniería civil, considerando tanto su resistencia y capacidad de absorción de energía como el costo por metro cúbico. La hipótesis plantea que la combinación adecuada de fibras puede mejorar significativamente el comportamiento mecánico del hormigón y resultar económicamente competitiva. Y cuya justificación se sustenta en la necesidad de aportar lineamientos técnicos y económicos que favorezcan la innovación y optimización de recursos en el sector constructivo ecuatoriano.

Para el desarrollo del proyecto se elaboraron mezclas de hormigón con distintas proporciones de fibras de acero y polipropileno. Se prepararon probetas y se aplicaron ensayos de tenacidad a la fractura, siguiendo las directrices de la EFNARC. Los equipos empleados permitieron registrar curvas carga-deflexión, mientras que el análisis económico se efectuó con base en los precios locales de materiales, lo que permitió comparar costos de producción entre las mezclas propuestas.

Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias en la capacidad de absorción de energía y en la tenacidad entre las dosificaciones evaluadas. Se identificó que la combinación de fibras de acero y polipropileno ofrece un mejor desempeño mecánico en comparación con mezclas que emplean una sola fibra, aunque el costo varía según la proporción utilizada.

Se concluye que el hormigón reforzado con fibras constituye una alternativa técnica viable y con potencial de aplicación en el ámbito constructivo local, siempre que se definan criterios claros de dosificación que equilibren rendimiento y costo.

Palabras clave: Hormigón Reforzado, Fibras de Acero, Fibras de Polipropileno, EFNARC, Análisis Técnico-Económico.

ABSTRACT

This project comparatively analyzes the technical and economic performance of concretes reinforced with steel and polypropylene fibers in different proportions, using fracture toughness tests under the EFNARC. The objective is to determine the viability of these mixtures in civil engineering projects, considering both their strength and energy absorption capacity, as well as the cost per cubic meter. The hypothesis is that the appropriate combination of fibers can significantly improve the mechanical behavior of concrete and prove economically competitive. The justification is based on the need to provide technical and economic guidelines that promote innovation and resource optimization in the Ecuadorian construction sector.

For the development of the project, concrete mixtures with different proportions of steel and polypropylene fibers were prepared and fracture toughness tests were performed, following the guidelines of the EFNARC regulations. The equipment used allowed for the recording of load-deflection curves, while the economic analysis was carried out based on local material prices, allowing for a comparison of production costs between the proposed mixtures. The results showed differences in energy absorption capacity and toughness between the dosages evaluated. The combination of steel fibers and polypropylene was found to offer better mechanical performance compared to mixtures using a single fiber, although the cost varies depending on the proportion used.

It is concluded that fiber-reinforced concrete is a viable technical alternative with potential application in local construction, provided that clear dosage criteria are defined that balance performance and cost.

Keywords: Reinforced Concrete, Steel Fibers, Polypropylene Fibers, EFNARC, Technical-Economic Analysis.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE ANEXOS	XII
CAPÍTULO 1	14
1. Introducción	14
1.1 Antecedentes.....	15
1.2 Localización	15
1.3 Estudios Previos	16
1.4 Problemática a resolver	17
1.5 Justificación	18
1.6 Objetivos.....	19
1.6.1 Objetivo General	19
1.6.2 Objetivos Específicos.....	19
CAPÍTULO 2	20
2. Desarrollo del proyecto	20
2.1 Marco conceptual	20
2.1.1 Hormigón reforzado con fibras (Fiber Reinforced Concrete – FRC).....	20
2.1.2 Fibras de acero.....	21
2.1.3 Hormigón reforzado con fibras de acero.	22
2.1.4 Fibras de polipropileno.....	23
2.1.5 Hormigón reforzado con fibras de polipropileno.....	23

2.1.6	Elaboración de mezclas de hormigón.	24
2.1.7	Propiedades mecánicas de hormigones reforzados con fibras de acero y fibras de polipropileno.	24
2.1.8	Tenacidad y Resistencia a la fractura.	25
2.1.9	Análisis Comparativo.	26
2.1.10	Aspectos económicos.	26
2.1.11	Especificaciones EFNARC.	27
2.1.12	Ensayo de absorción de energía.	27
2.1.13	Máquina empleada en el ensayo de absorción de energía.	28
2.1.14	Usos y aplicaciones en obras de ingeniería civil de las fibras de acero.	29
2.1.15	Usos y aplicaciones en obras de ingeniería civil de las fibras de polipropileno.	29
2.1.16	Losas colaborantes, pisos industriales y pavimentos.	30
2.2	Marco metodológico	30
2.2.1	Investigación experimental.	31
2.2.2	Planteamiento de hipótesis.	31
2.2.3	Variables de la investigación.	32
2.2.4	Procedimiento de investigación	32
2.3	Trabajo de campo	34
2.3.1	Diseño de mezclas.	34
2.3.2	Planificación con el laboratorio de materiales.	37
2.3.3	Preparación de materiales.	38
2.4	Trabajo de laboratorio o gabinete	39
2.4.1	Materiales, equipos	39
2.4.2	Preparación previa y control de materiales	44
2.4.3	Dosificación para cada mezcla	44
2.4.4	Protocolo de mezclado.	47
2.4.5	Moldeo y curado.	51

2.4.6	Plan de muestreo y tamaño muestral.....	54
2.4.7	Configuración de ensayo de tenacidad a la fractura (placas EFNARC)	55
2.4.8	Procesamiento de resultados en laboratorio	56
2.4.9	Ensayos complementarios	57
2.5	Tabulación de datos	61
2.6	Solución a diseñar	91
CAPÍTULO 3		92
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	92
3.1	Resultados.....	92
3.1.1	Ensayo de tenacidad (placas EFNARC):	92
3.1.2	Ensayos complementarios:	106
3.1.3	Comparación de Mezclas:.....	108
3.1.4	Determinación del costo unitario de las mezclas:	110
3.2	Análisis de resultados	112
3.3	Diseño de la solución.....	115
3.3.1	Selección de la mezcla óptima.....	115
3.3.2	Recomendaciones de aplicación.....	121
3.3.3	Limitaciones	121
3.4	Especificaciones técnicas	123
CAPÍTULO 4		129
Conclusiones Y Recomendaciones		129
Conclusiones		129
Recomendaciones		130
BIBLIOGRAFÍA		131
ANEXOS		133

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ODS	Objetivos de desarrollo sostenible
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
NTE	Norma técnica ecuatoriana
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
HRF	Hormigones reforzados con fibras
PP	Polipropileno
GU	Uso general

SIMBOLOGÍA

mm	Milímetro
cm	Centímetro
m	Metro
cm ²	Centímetro cuadrado
cm ²	Centímetro cuadrado
m ³	Metro cúbico
kg	Kilogramo
kg/m ³	Kilogramo por metro cúbico
kN	Kilonewton
kg/cm ²	Kilogramo por centímetro cuadrado
Ø	Diámetro
δ	Deformación
f _c	Resistencia a la compresión
R ₂₅	Resistencia residual a 25mm de deformación
E ₂₅	Energía total absorbida a 25mm de deformación

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Localización del Laboratorio de Materiales.	16
Figura 2.1 Tipología de fibras en el hormigón reforzado con fibras.....	21
Figura 2.2 Fibras de Acero.	22
Figura 2.3 Hormigón reforzado con fibras de acero.	22
Figura 2.4 Fibras de polipropileno.....	23
Figura 2.5 Hormigón reforzado con fibras de polipropileno	24
Figura 2.6 Gráfica de Carga-Deformación	26
Figura 2.7 Panel cuadrado para ensayo según EFNARC	28
Figura 2.8 Máquina para la realización del ensayo de absorción de energía	28
Figura 2.9 Diagrama de flujo de las fases de la investigación	33
Figura 2.10 Acopio de materiales (cemento, agregado grueso, agregado fino, fibras).....	38
Figura 2.11 Cemento Holcim Tipo GU y ficha técnica.....	39
Figura 2.12 Agregado grueso y agregado fino	39
Figura 2.13 Fibras de acero y macrofibras de polipropileno	40
Figura 2.14 Aditivos: Super plastificante (izquierda), Desencofrante (medio), Curador(derecha)	40
Figura 2.15 Concretera	41
Figura 2.16 Balanza para fibras y aditivos (izquierda), Balanza para agregados (derecha) ..	41
Figura 2.17 Molde metálico para las placas	42
Figura 2.18 Molde metálico para los cilindros	42
Figura 2.19 Cono de Abrams	43
Figura 2.20 Piscina de curado de cilindros.....	43
Figura 2.21 Máquina de ensayo de compresión	44
Figura 2.22 Mezcla de agregados en seco	48
Figura 2.23 Incorporación de agua a los agregados	48
Figura 2.24 Incorporación del cemento.....	49
Figura 2.25 Incorporación de fibras de acero (izquierda) y fibras de polipropileno (derecha)	49
Figura 2.26 Incorporación del superplastificante	50
Figura 2.27 Medición de trabajabilidad según ensayo de Cono de Abrams	50
Figura 2.28 Moldeo de cilindros. Vertido del hormigón (izquierda), golpes con martillo (derecha)	51
Figura 2.29 Moldeo de placas. Desencofrante (superior izquierda), vertido del hormigón (superior derecha), apisonamiento con varilla (inferior izquierda), golpes con martillo (inferior derecha)	52

Figura 2.30 Acabado de cilindro (izquierda), acabado de placas (derecha)	53
Figura 2.31 Curado inicial de placas y cilindros	53
Figura 2.32 Desencofrado de placas y cilindros.....	54
Figura 2.33 Curado de cilindros (izquierda), curado de placas (derecha)	54
Figura 2.34 Montura de placa para el ensayo	55
Figura 2.35 Instalación del deformímetro	55
Figura 2.36 Registro de datos durante el ensayo.....	56
Figura 2.37 Terminación del ensayo a $\delta=25\pm 1\text{mm}$	56
Figura 2.38 Colocación del cilindro en la prensa.....	57
Figura 2.39 Ajuste de prensa (izquierda), aplicación de la fuerza (derecha)	58
Figura 2.40 Preparación para realizar el ensayo de trabajabilidad.....	59
Figura 2.41 Vertido de cada capa de hormigón en el cono	59
Figura 2.42 Apisonado de cada capa de hormigón con la varilla metálica	60
Figura 2.43 Enrasado de la superficie con la varilla metálica	60
Figura 2.44 Medición del asentamiento	61
Figura 3.1 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Patrón	92
Figura 3.2 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 1.....	93
Figura 3.3 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 2.....	94
Figura 3.4 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 3.....	95
Figura 3.5 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 4.....	96
Figura 3.6 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 5.....	97
Figura 3.7 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 6.....	98
Figura 3.8 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 7.....	99
Figura 3.9 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Patrón	100
Figura 3.10 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 1.....	100
Figura 3.11 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 2.....	101
Figura 3.12 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 3.....	101
Figura 3.13 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 4.....	102
Figura 3.14 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 5.....	102
Figura 3.15 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 6.....	103
Figura 3.16 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 7.....	103
Figura 3.17 Puntos notables de la gráfica Carga vs Deformación.....	104
Figura 3.18 Puntos notables de la gráfica Energía absorbida vs Deformación.....	105
Figura 3.19 Resultados de Carga Residual promedio a 25mm (R_{25}) de las mezclas ensayadas	106

Figura 3.20 Resultados de Energía absorbida total a 25mm (E_{25}) de las mezclas ensayadas	106
Figura 3.21 Resultados de Resistencia a la compresión promedio de las mezclas ensayadas	107
Figura 3.22 Resultados de asentamiento promedio de las mezclas ensayadas.....	107
Figura 3.23 Comparación de la curva carga vs deformación promedio para todas las mezclas	108
Figura 3.24 Comparación de la curva energía absorbida vs deformación promedio para todas las mezclas.....	109
Figura 3.25 Comparación de $f'c$ a 28 días vs E_{25} para todas las mezclas	109
Figura 3.26 Comparación de trabajabilidad vs E_{25} para todas las mezclas	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Posibles dosificaciones de fibras a utilizar	34
Tabla 2.2 Dosificaciones de fibras a utilizar	36
Tabla 2.3 Planificación de fundición y rotura de placas.....	37
Tabla 2.4 Planificación de fundición y rotura de cilindros.....	38
Tabla 2.5 Dosificación Mezcla A (PATRON).....	45
Tabla 2.6 Dosificación Mezcla 1 (100% fibras de acero y 0% fibras de PP).....	45
Tabla 2.7 Dosificación Mezcla 2 (75% fibras de acero y 25% fibras de PP).....	45
Tabla 2.8 Dosificación Mezcla 3 (50% fibras de acero y 50% fibras de PP).....	46
Tabla 2.9 Dosificación Mezcla 4 (25% fibras de acero y 75% fibras de PP).....	46
Tabla 2.10 Dosificación Mezcla 5 (0% fibras de acero y 100% fibras de PP).....	46
Tabla 2.11 Dosificación Mezcla 6 (100% fibras de acero y 100% fibras de PP).....	47
Tabla 2.12 Dosificación Mezcla 7 (75% fibras de acero y 75% fibras de PP).....	47
Tabla 2.13 Identificación de muestras para las placas.....	62
Tabla 2.14 Identificación de muestras para los cilindros	64
Tabla 2.15 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Patrón A-1.....	65
Tabla 2.16 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Patrón A-2.....	66
Tabla 2.17 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Patrón A-3.....	66
Tabla 2.18 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 1-1	67
Tabla 2.19 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 1-2	68
Tabla 2.20 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 1-3	68
Tabla 2.21 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 2-1	69
Tabla 2.22 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 2-2	70
Tabla 2.23 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 2-3	70
Tabla 2.24 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 3-1	71
Tabla 2.25 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 3-2	72
Tabla 2.26 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 3-3	72
Tabla 2.27 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 4-1	73
Tabla 2.28 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 4-2	74
Tabla 2.29 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 4-3	74
Tabla 2.30 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 5-1	75
Tabla 2.31 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 5-2	76
Tabla 2.32 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 5-3	76
Tabla 2.33 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 6-1	77
Tabla 2.34 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 6-2	78

Tabla 2.35 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 6-3	78
Tabla 2.36 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 7-1	79
Tabla 2.37 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 7-2	80
Tabla 2.38 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 7-3	80
Tabla 2.39 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla A.....	82
Tabla 2.40 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 1	83
Tabla 2.41 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 2	83
Tabla 2.42 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 3	84
Tabla 2.43 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 4	85
Tabla 2.44 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 5	86
Tabla 2.45 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 6	86
Tabla 2.46 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 7	87
Tabla 2.47 Resultados del ensayo de Trabajabilidad.....	88
Tabla 2.48 Resultados de ensayo de resistencia a la compresión a diferentes edades.	90
Tabla 3.1 Costos unitarios por metro cúbico de las mezclas propuestas	110
Tabla 3.2 Evaluación económica de las mezclas propuestas	111
Tabla 3.3 Tabla resumen de los resultados obtenidos para todas las mezclas.	112
Tabla 3.4 Datos de la Mezcla Óptima.	116
Tabla 3.5 Materiales de la Mezcla Óptima.	118
Tabla 3.6 Datos de la Mezcla Alternativa.....	118
Tabla 3.7 Materiales de la Mezcla Alternativa.....	120
Tabla 3.8 Costo unitario por metro cúbico de la mezcla óptima: Mezcla 7	125
Tabla 3.9 Costo unitario por metro cúbico de la mezcla alternativa: Mezcla 3	128

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO 1 Ficha técnica fibra de acero
- ANEXO 2 Ficha técnica fibra de polipropileno
- ANEXO 3 Fichas técnicas de aditivos (super plastificante, desmoldante y curador)
- ANEXO 4 Ensayos de masas unitarias de áridos (ASTM C-29)
- ANEXO 5 Ensayos de análisis granulométrico de áridos (ASTM C-33)
- ANEXO 6 Análisis de precios unitarios de mezclas propuestas

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de infraestructura en países en desarrollo como Ecuador ha impulsado la búsqueda de materiales que no solo mejoren el desempeño mecánico de las construcciones, sino que también contribuyan a una mayor eficiencia económica y funcional. En este contexto, el empleo de fibras de acero y polipropileno ha cobrado relevancia como refuerzo secundario en elementos de hormigón. En la actualidad, el uso del hormigón reforzado con fibras se ha convertido en una alternativa innovadora frente al hormigón convencional, debido a la necesidad de estructuras más duraderas, resistentes y sostenibles (Neville A. M., 2011).

La justificación de este proyecto radica en que, mediante la aplicación de ensayos de tenacidad a la fractura conforme a la EFNARC, es posible cuantificar de manera objetiva el comportamiento de las mezclas utilizando ambas fibras tanto de acero como de polipropileno. Esto permitirá no solo optimizar el diseño de materiales en función de su capacidad de absorción de energía, sino también evaluar la viabilidad económica de cada alternativa, aportando información relevante para ingenieros y proyectistas en el contexto local.

En correspondencia con lo anterior, el objetivo principal de este proyecto es realizar un análisis comparativo técnico y económico de hormigones reforzados en diferentes proporciones de fibras de acero y polipropileno, mediante ensayos de tenacidad a la fractura conforme a las especificaciones establecidas por la EFNARC, para su aplicación en obras de ingeniería civil. Para alcanzar este fin, se plantean los siguientes objetivos específicos: elaborar mezclas de hormigón con distintas proporciones de fibras, determinar las curvas carga-deflexión a través de ensayos, analizar el desempeño mecánico en términos de tenacidad y establecer el costo por metro cúbico de las mezclas en base al mercado ecuatoriano.

El presente proyecto se centra en la caracterización experimental de mezclas de hormigón mediante ensayos de placas conforme a EFNARC. Se limita a la comparación de fibras de acero Dramix y macrofibras de polipropileno SikaForce 48 en diferentes proporciones, considerando dosificaciones representativas recomendadas por los fabricantes y adaptadas al contexto local. Los resultados estarán dirigidos a

proponer aplicaciones prácticas en obras de ingeniería civil en el Ecuador, particularmente en elementos como losas colaborantes, pisos industriales y pavimentos.

1.1 Antecedentes

En la industria de la construcción en Ecuador, el uso de hormigones reforzados con fibras aún es poco conocido, pese a su creciente aplicación en el ámbito internacional. Diversos estudios han demostrado que la incorporación de fibras mejora significativamente el comportamiento post-fisura del hormigón, además de incrementar su durabilidad, tenacidad y capacidad de carga. Por ejemplo, se ha observado que las fibras reducen el ancho de fisura y la distancia entre ellas, mejorando tanto la durabilidad como el comportamiento en el estado límite de falla (Revista Hormigón, 2021).

En particular, las fibras de acero y polipropileno se utilizan ampliamente en proyectos de infraestructura a nivel internacional como en túneles, pisos y pavimentos; debido a su efectividad para mejorar la tenacidad del hormigón y controlar la formación y propagación de fisuras (Bentur & Mindess, 2007).

No obstante, en el contexto nacional, persiste un limitado conocimiento técnico sobre su desempeño, costos y aplicabilidad constructiva. En un estudio local sobre hormigón reforzado con fibras metálicas, se evidenció mejoras en la resistencia a la compresión y el módulo de rotura, así como una transición de fracturas frágiles a condiciones más dúctiles (Campoverde Cajamarca, 2017).

En este sentido, este proyecto tiene como objetivo generar datos técnicos y económicos adaptados al mercado local, que permita evaluar de forma objetiva la incorporación de estos materiales. Con ello, se busca fomentar su aceptación y uso en la industria nacional, promoviendo soluciones constructivas más eficientes, sostenibles y alineadas con las tendencias internacionales.

1.2 Localización

Para la ejecución de este proyecto se seleccionó el laboratorio de materiales de una empresa de amplia trayectoria en el país, el cual facilitó los equipos e instalaciones requeridos para la elaboración de las mezclas de hormigón reforzado con fibras y la realización de los ensayos correspondientes. Se empleó una máquina de ensayo que

cumple con las especificaciones técnicas establecidas por la EFNARC, garantizando la confiabilidad en la determinación de la tenacidad a la fractura, mediante la rotura controlada para cada una de las probetas.

Ubicación: Km 3.5 vía Durán-Tambo, Duran, Guayas, Ecuador.

Coordenadas: 2°11'1.74"S, 79°49'50.83"W



Figura 1.1 Localización del Laboratorio de Materiales.

Fuente: Elaboración propia

1.3 Estudios Previos

Los estudios previos nos permitieron establecer una base de información técnica y económica que justifica la relevancia del uso de fibras en hormigón, sirviendo como sustento para el desarrollo de este proyecto.

Se consideran dos tipos de fuentes. Por un lado, las proporcionadas por los fabricantes, como fichas técnicas de fibras de acero Dramix que nos dice que sus dosificaciones recomendadas varían entre 8 a 15kg/m³ y sus aplicaciones podrían ser: pisos livianos, pavimentos, losas colaborantes (Bekaert, 2020); y las fibras de polipropileno SikaForce48 que nos dice que sus dosificaciones recomendadas varían entre 2 a 10 kg/m³ y sus posibles aplicaciones van desde concreto para losas/pisos industriales, estabilización de taludes/terrenos y elementos prefabricados de concreto (Sika, 2022). Por otro lado, se incluyen las obtenidas por la revisión documental de la EFNARC el cual nos dictamina el procedimiento a seguir para la ejecución del ensayo a la tenacidad a la fractura para hormigones reforzados con fibras (EFNARC, 1996).

En una investigación realizada sobre losas de hormigón reforzadas con fibras de acero, se demostró que el uso de 30 kg/m^3 de fibras metálicas permitió incrementar significativamente la resistencia residual y la capacidad de absorción de energía frente a cargas de impacto. Los autores concluyeron que este tipo de refuerzo puede sustituir parcialmente a la armadura tradicional en elementos de losas y pavimentos, optimizando tanto el desempeño mecánico como los costos de mantenimiento a largo plazo (Meda & Plizzari, 2004).

Por su parte, (Serna-Ros, Martí-Vargas, & Gil, 2009) evaluaron el comportamiento de hormigones con fibras de polipropileno en aplicaciones de pisos industriales. Los resultados evidenciaron que, aun con bajas dosificaciones ($4\text{--}6 \text{ kg/m}^3$), se logró una notable reducción en la fisuración por retracción plástica y una mejora en la ductilidad post-fisuración. Los autores señalaron que las macrofibras sintéticas representan una alternativa eficaz para aumentar la durabilidad y disminuir los costos asociados a reparaciones en infraestructuras sometidas a esfuerzos dinámicos.

1.4 Problemática a resolver

Pese a la existencia de investigaciones sobre hormigones reforzado con fibras (HRF) en Ecuador, se identifican algunos vacíos importantes que limitarían su implementación práctica. Diversos estudios se han enfocado en ensayos mecánicos tradicionales para evaluar los esfuerzos de compresión y de flexión, los cuales nos permite determinar la resistencia inicial del material, pero no refleja su capacidad de disipación de energía (Inga Bacuilima & Paredes León, 2019). La ausencia de investigaciones que apliquen el ensayo establecido por la EFNARC en el contexto local impide que se conozca la tenacidad del HRF, en condiciones comparables con los estándares internacionales.

A nivel internacional, diversos estudios han demostrado que la incorporación de fibras como las de acero y polipropileno, mejora sustancialmente la tenacidad del hormigón. Estas fibras permiten controlar de manera más efectiva la formación y propagación de fisuras, incrementan la capacidad de carga post-agrietamiento y prologan la vida útil de los elementos estructurales, posicionándose como una alternativa técnica viable. Se ha comprobado que el hormigón reforzado con fibras de acero y fibras de polipropileno presenta una resistencia a tracción residual entre un 40% y un 150% superior a la del hormigón convencional, incluso cuando se expone a altas temperaturas, mostrando además una mayor energía de fractura (Bošnjak, Sharma, & Grauf, 2019).

Sin embargo, en el país el uso de hormigones reforzados con fibras es aún muy limitado, la carencia de estudios aplicados al contexto ecuatoriano condiciona la transferencia de sus resultados a la práctica constructiva. El hormigón proyectado, los pavimentos y las losas delgadas son aplicaciones en las que el ensayo establecido por la EFNARC es ampliamente usado a nivel internacional para especificar los requisitos de absorción de energía y tenacidad. Sin embargo, en Ecuador aún no se dispone de datos locales de referencia, lo que impide establecer criterios normativos o de diseño basados en desempeño.

1.5 Justificación

La fisuración del hormigón y la baja capacidad de absorción de energía representan problemas críticos en la durabilidad y seguridad de estructuras civiles. Resolver esta problemática es fundamental para optimizar el desempeño estructural y reducir costos de mantenimiento en obras de ingeniería civil. Por otro lado, la comparación técnica y económica del uso de fibras de acero y polipropileno permitirá identificar alternativas eficientes que atiendan tanto la resistencia como la viabilidad financiera de los proyectos.

Los principales beneficiarios serán ingenieros, proyectistas, investigadores y empresas constructoras que buscan soluciones costo-eficientes para mejorar la durabilidad de estructuras. Asimismo, instituciones académicas y entidades normativas podrán emplear los resultados como base para fortalecer la regulación y la formación profesional. Finalmente, se espera que la sociedad en general se beneficie de obras más seguras, sostenibles y de menor costo de mantenimiento.

El proyecto se alinea con la industria ecuatoriana de la construcción, la innovación (ODS 9: Industria, innovación e infraestructura), al impulsar el uso de materiales más eficientes, para poder contar con una ciudad y comunidades sostenibles (ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles), al contribuir a infraestructuras más resilientes. También guarda relación con la producción y consumo responsables (ODS 12: Producción y consumo responsables), pues fomenta un uso más racional de materiales de construcción.

Si bien el estudio se enfoca en el medio ecuatoriano, los resultados poseen valor internacional, dado que las fibras de acero y polipropileno son ampliamente utilizadas en la construcción global. De este modo, la metodología aplicada y los criterios

comparativos podrán replicarse en otros países, otras proporciones, con condiciones técnicas y económicas similares, ampliando la relevancia de este proyecto.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Realizar un análisis comparativo técnico y económico de hormigones reforzados en diferentes proporciones de fibras de acero y polipropileno, mediante ensayos de tenacidad a la fractura conforme a las especificaciones establecidas por la EFNARC, para su aplicación en obras de ingeniería civil.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Elaborar mezclas de hormigón reforzado con distintas proporciones de fibras de acero y polipropileno para la determinación de su capacidad de absorción de energía.
- Determinar las curvas carga-deflexión mediante ensayos de tenacidad a la fractura para el análisis del comportamiento mecánico de las mezclas propuestas.
- Analizar el desempeño mecánico de los materiales propuestos en función de su tenacidad, mediante la comparación de los resultados procesados, para la determinación de la mezcla óptima y su aplicación en obras de ingeniería civil.
- Calcular costo de la mezcla óptima de hormigón reforzado con fibras de acero y polipropileno, cumpliendo con las especificaciones establecidas por la EFNARC, para evaluación de la viabilidad económica en obras de ingeniería civil.

CAPÍTULO 2

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Hormigón reforzado con fibras (Fiber Reinforced Concrete – FRC)

El hormigón reforzado con fibras (FRC, por sus siglas en inglés) es un material compuesto en el cual se incorporan fibras cortas, discretas y distribuidas de manera aleatoria, con el fin de mejorar la integridad estructural y el desempeño mecánico del concreto convencional (Texdelta, 2023; MtCopeland, 2022). Dichas fibras actúan como puentes de unión en la matriz de concreto, retrasando la propagación de grietas y aumentando la ductilidad del material (MtCopeland, 2022; Tenabrix, 2023).

La inclusión de fibras tiene como objetivo principal contrarrestar la debilidad inherente del hormigón frente a esfuerzos de tracción. Mientras que el acero en barras refuerza el concreto en una dirección específica, las fibras distribuidas en tres dimensiones ofrecen resistencia en múltiples direcciones, lo que resulta particularmente útil en aplicaciones como túneles, pavimentos industriales, prefabricados, elementos expuestos a impactos y estructuras sujetas a cargas dinámicas (Concreteonline, 2020).

La tipología de fibras más empleadas incluye: metálicas (acero), sintéticas (polipropileno, polietileno, nylon), minerales (vidrio, carbono) y naturales (sisal, coco) como se puede observar en la **Figura 2.1**. Entre ellas las que más destacan son las fibras de acero y de polipropileno (PP) que (Constrofacilitator, 2020) se han consolidado como las de mayor relevancia para aplicaciones estructurales y de ingeniería civil, por su disponibilidad, costo razonable y propiedades específicas (Psiconcreto, 2021).

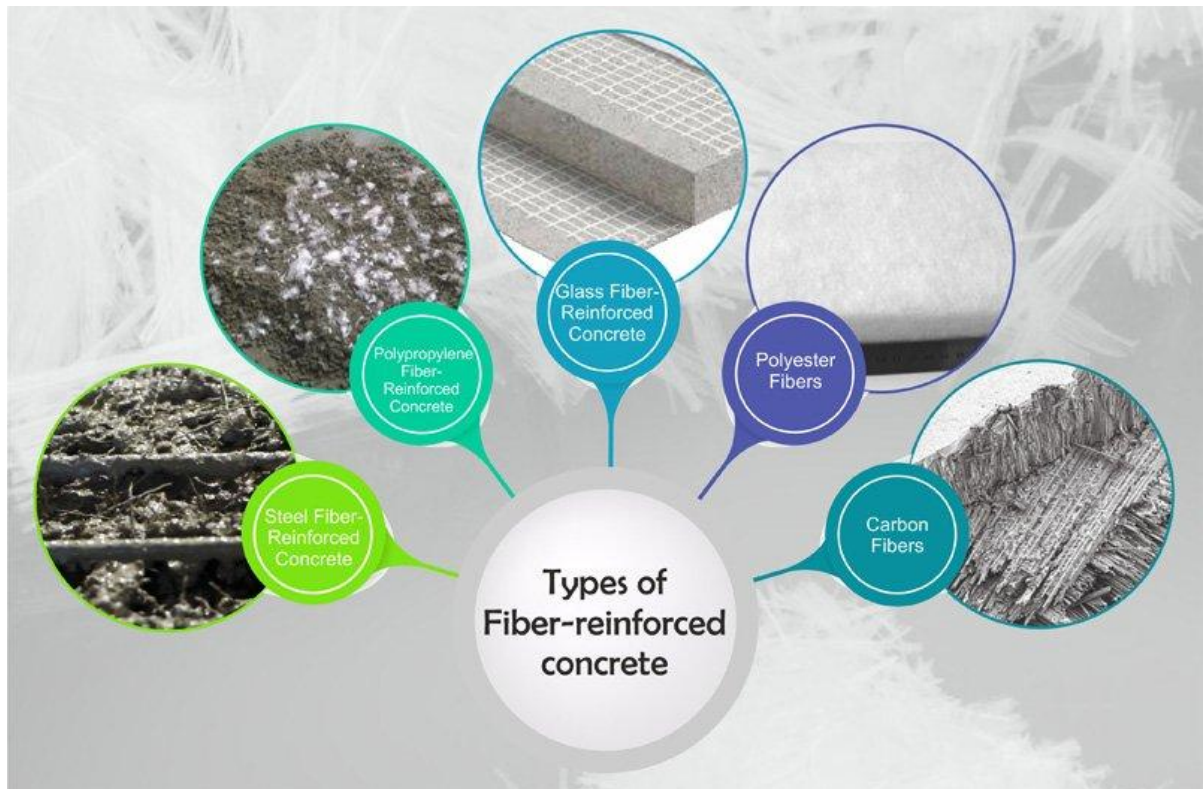


Figura 2.1 Tipología de fibras en el hormigón reforzado con fibras.

Fuente: Fiber-Reinforced concrete - Advantages, types and applications, 2020

2.1.2 Fibras de acero.

Las fibras de acero son elementos metálicos de forma corta y delgada, con secciones circulares o rectangulares, que se adicionan al hormigón para mejorar su desempeño post-fisuración. Estas fibras poseen diferentes formas (onduladas, ganchos en los extremos, rectas) diseñadas para mejorar la adherencia a la matriz de concreto. Su función principal es aumentar la tenacidad y la capacidad de absorción de energía, reduciendo la propagación de fisuras y proporcionando resistencia residual después de que el concreto ha comenzado a agrietarse (MtCopeland, 2022).

Para el desarrollo de este proyecto se usó fibras metálicas como se observa en la **Figura 2.2**; cuyas características son las siguientes:

- Para la mezcla los materiales que se utilizan son polvo de arena color azul, ripio triturado de preferencia que sea de tres octavos a media pulgada
- La resistencia de 18000 kilos por cm^2
- Se utiliza para espesores de 8 a 15 cm
- Su carga es de 800 libras por metro cuadrado
- Puede llegar a reemplazar una malla electrosoldada por las fibras metálicas cuando las mismas sean de 3,5 – 4,15 – y 5,15m



Figura 2.2 Fibras de Acero.

Fuente: Elaboración propia

2.1.3 Hormigón reforzado con fibras de acero.

El hormigón reforzado con fibras de acero constituye uno de los sistemas más estudiados y aplicados dentro de los HRF. Las fibras metálicas incrementan significativamente la capacidad del concreto para absorber energía después de la fisuración, aportando resistencia residual y mayor ductilidad. Este material es utilizado con éxito en pavimentos industriales, pisos de aeropuertos, túneles y tableros de puentes, donde se requieren altas prestaciones mecánicas. Además, al distribuirse tridimensionalmente, las fibras de acero reducen la dependencia de refuerzos tradicionales como las mallas electrosoldadas, optimizando costos de colocación y tiempos de obra (Hormigón, 2021; MtCopeland, 2022).



Figura 2.3 Hormigón reforzado con fibras de acero.

Fuente: (Compraco, 2024)

2.1.4 Fibras de polipropileno.

Las fibras de polipropileno son aditivos poliméricos diseñados para reforzar concretos y morteros. Presentan ventajas como la resistencia a la corrosión, bajo peso, facilidad de dosificación y dispersión homogénea en la mezcla. Se utilizan tanto en elementos estructurales como en acabados superficiales, al mejorar la resistencia al agrietamiento por retracción y al impacto. En comparación con las fibras metálicas, las de polipropileno son más económicas, aunque su aporte a la resistencia post-fisuración suele ser menor (Psiconcreto, 2021).

Para el desarrollo de este proyecto se usó macrofibras de polipropileno como se observa en la **Figura 2.4**; cuyas características son las siguientes:

- Mejora resistencias del concreto endurecido, en especial la residual.
- Alto rango de absorción de energía para shotcrete.
- Capacidad de puenteo de fisuras, especialmente en grandes aberturas.
- Superficies sin óxido.



Figura 2.4 Fibras de polipropileno

Fuente: Elaboración propia

2.1.5 Hormigón reforzado con fibras de polipropileno.

El hormigón reforzado con fibras de polipropileno utiliza fibras sintéticas derivadas del petróleo, caracterizadas por su ligereza, resistencia química y bajo costo. Estas fibras pueden clasificarse en microfibras y macrofibras: las primeras reducen la fisuración temprana por retracción plástica, mientras que las segundas ofrecen un comportamiento similar al de las fibras metálicas en términos de resistencia post-fisuración. Este material es muy empleado en pavimentos, elementos prefabricados y obras hidráulicas, debido a su excelente resistencia a ambientes agresivos y su nula susceptibilidad a la corrosión (Psiconcreto, 2021; MtCopeland, 2022).



Figura 2.5 Hormigón reforzado con fibras de polipropileno.

Fuente: Elaboración propia

2.1.6 Elaboración de mezclas de hormigón.

La elaboración de mezclas de hormigón simple consiste en la combinación homogénea de cemento, agua, agregados finos y gruesos, además de posibles aditivos. Este proceso busca garantizar la adecuada trabajabilidad, resistencia y durabilidad del concreto en estado fresco y endurecido. La mezcla se produce generalmente en plantas dosificadoras o en obra, y aunque en este apartado no se incluyen proporciones, es importante señalar que el procedimiento requiere un control riguroso de materiales y condiciones de mezclado para obtener un concreto de calidad (Neville A. M., 2010).

2.1.7 Conceptos fundamentales de hormigones reforzados con fibras de acero y fibras de polipropileno.

Carga aplicada: Es la fuerza que se aplica a un material (hormigón) para medir su capacidad de absorber energía antes de fracturarse.

Deformación: Es el cambio en forma o tamaño de un material (hormigón) causado por la aplicación de una fuerza externa.

Ductilidad: Es la capacidad que tiene un material (hormigón) de deformarse plásticamente bajo la acción de una carga, sin llegar a romperse repentinamente y tener una pérdida brusca de resistencia.

Fragilidad: La adición de fibras reduce la fragilidad típica del concreto. En particular, el PP logra reducciones cercanas al 20% en la fragilidad comparada con el hormigón convencional (Banthia & Trottier).

Energía absorbida por el material (hormigón): Es la cantidad de energía que es capaz de acumular el hormigón, tanto en su fase elástica como plástica antes de alcanzar la fractura o rotura.

Resistencia a la compresión: Es la capacidad del hormigón para soportar cargas de compresión axial que tienden a reducir su tamaño antes de fallar.

Resistencia a la abrasión: Tanto fibras de acero (15–31 %) como PP (19–35 %) mejoran la resistencia al desgaste superficial, siendo el PP más eficiente en menores cantidades (Yao, Li, & Wu, 2003).

Trabajabilidad: La incorporación de fibras, especialmente de acero, disminuye significativamente la fluidez (slump) de la mezcla, lo que exige ajustes en la dosificación y en el uso de aditivos superplastificantes (Bentur & Mindess, 2007).

Durabilidad: Las fibras de polipropileno confieren resistencia frente a ambientes agresivos, mientras que las fibras de acero requieren medidas de protección contra la corrosión (Bentur & Mindess, 2007).

2.1.8 Tenacidad y Resistencia a la fractura.

La tenacidad se define como la capacidad de un material para absorber energía después de fracturarse y seguir deformándose sin pérdida brusca de resistencia. En el caso del hormigón, este parámetro se evalúa a través de ensayos de tenacidad a la fractura, en los cuales se mide el área bajo la curva carga–desplazamiento o carga–deformación (Mindess, Young, & Darwin, 2003). Cuanto mayor es el área, más dúctil y tenaz es el hormigón.

El concreto tradicional, por su naturaleza frágil, presenta una baja capacidad de absorción de energía después de la fisuración inicial (Bentur & Mindess, 2007). La incorporación de fibras cambia esta condición al proporcionar un mecanismo de “puenteo de grietas”, que permite al material continuar soportando esfuerzos incluso después de iniciada la fractura (Naaman, 2007), como se observa en la **Figura 2.6**.

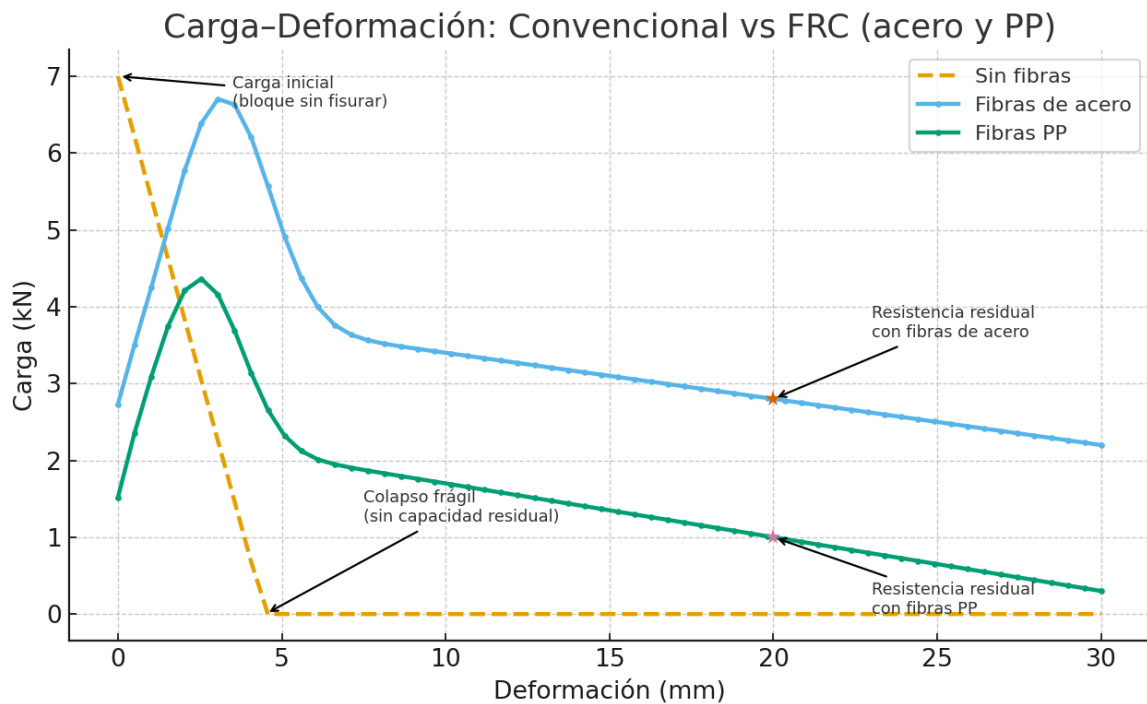


Figura 2.6 Gráfica de Carga-Deformación

Fuente: Elaboración propia

2.1.9 Análisis Comparativo.

Un análisis comparativo es una herramienta metodológica que consiste en contrastar dos o más elementos, procesos o materiales con el fin de identificar similitudes, diferencias y ventajas relativas. En el contexto del hormigón con fibras, este tipo de análisis permite evaluar parámetros como resistencia mecánica, absorción de energía, durabilidad, costo y facilidad de aplicación en obra. Al establecer una comparación sistemática, es posible tomar decisiones fundamentadas respecto al material más adecuado para una determinada aplicación. En la investigación científica, este enfoque resulta útil porque facilita justificar hipótesis y obtener conclusiones prácticas (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

2.1.10 Aspectos económicos.

El análisis económico resulta crucial en la selección de materiales.

Costos de fibras:

- El polipropileno tiene un costo unitario más elevado (\$5/kg), pero se utiliza en menores cantidades (2–10 kg/m³), con un impacto de \$10 a \$15 por m³ de concreto.
- El acero, más barato por kilogramo (\$1,5/kg), requiere dosis de 8–15 kg/m³, generando un incremento de \$22,5 a \$37,5 por m³

Costo total del Hormigón reforzado con fibras:

- En general, el HRF con fibras de acero puede incrementar el costo del HRF entre un 10 % y 30 % con respecto al hormigón tradicional.
- Por otro lado, el HRF con fibras sintéticas (como PP) es más barato (entre \$0,5 y \$1,5 por kg), resultando más económico que el acero.
- El PP suele ser 15 –20 % más caro que un hormigón simple al inicio, pero puede reducir los costos de mantenimiento hasta en un 35 %, además de ahorrar en instalación porque no requiere mano de obra especializada.

Beneficios indirectos:

- El propileno, al ser más liviano, reduce el peso propio de las estructuras (aproximadamente entre el 5-8%), con ahorros adicionales en transporte.
- Ambos tipos de fibras reducen el uso de refuerzo convencional en ciertas aplicaciones, lo que también se traduce en beneficios económicos.

2.1.11 Especificaciones EFNARC.

La EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems) constituyen un conjunto de guías técnicas desarrolladas principalmente para el hormigón proyectado. Estas especificaciones han servido para introducir métodos estandarizados de ensayo, como los paneles cuadrados de 600 mm, para medir la energía absorbida por hormigones reforzados con fibras.

El cumplimiento de la EFNARC es fundamental, ya que proporciona criterios estandarizados para comparar resultados y validar la idoneidad de un material en proyectos de infraestructura. Dichos ensayos permiten establecer curvas carga–deflexión que sirven de referencia para calcular los índices de tenacidad, asegurando un desempeño confiable en obra (EFNARC, 1996).

2.1.12 Ensayo de absorción de energía.

El ensayo de absorción de energía definido por EFNARC consiste en la aplicación de una carga en el centro de un panel cuadrado de 600 mm x 100 mm de espesor apoyado en sus bordes (ver **Figura 2.7**). El ensayo se lo realizará a los 28 días y las placas de hormigón deberán curarse durante un mínimo de 3 días antes de realizarse el ensayo. En el ensayo el equipo mide la carga y la deflexión en tiempo real, generando una curva que permite calcular la energía absorbida hasta distintos niveles de deformación (EFNARC, 1996).

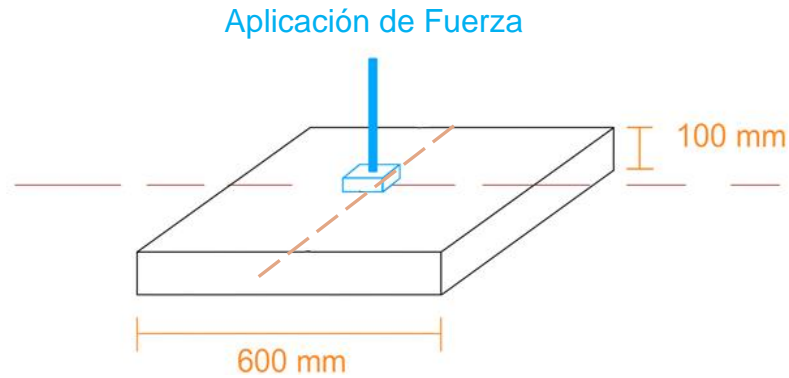


Figura 2.7 Panel cuadrado para ensayo según EFNARC

Fuente: Elaboración propia

2.1.13 Máquina empleada en el ensayo de absorción de energía.

La máquina cuenta con un actuador hidráulico, celdas de carga y sistemas de registro de datos. Además, el dispositivo para la aplicación de la carga debe consistir en:

- Un bastidor provisto de un soporte rígido de forma cuadrada, con un espesor de (160 ± 1) mm y dimensiones internas de (500 ± 2) mm \times (500 ± 2) mm, diseñado para sostener adecuadamente la placa durante el ensayo.
- Un bloque de carga, también cuadrado y fabricado en acero, cuya superficie de contacto mida (100 ± 1) mm \times (100 ± 1) mm, con un espesor de (30 ± 1) mm. Este bloque debe ubicarse en el punto medio de la cara superior de la probeta.
- Un transductor electrónico o deformímetro previamente calibrado, con capacidad de lectura mínima de 0,02 mm, para registrar con precisión las deflexiones.
- Software de adquisición de datos para generar las curvas carga-deflexión y calcular la energía de fractura.

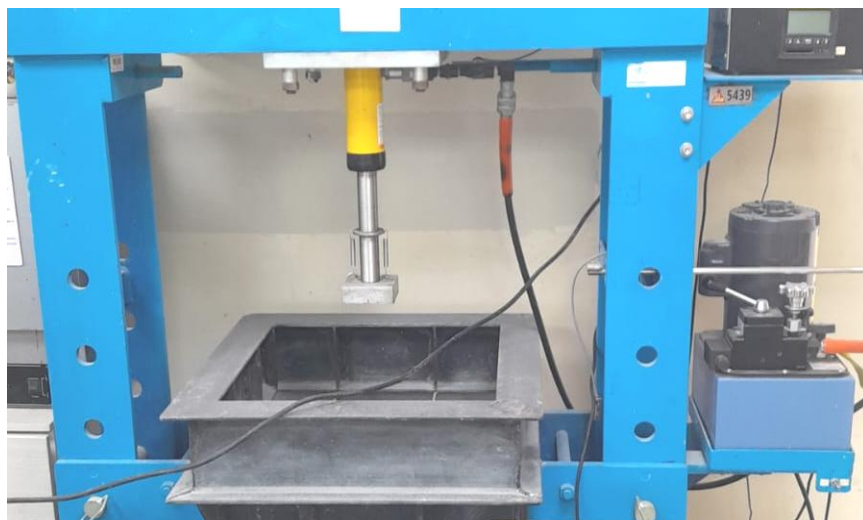


Figura 2.8 Máquina para la realización del ensayo de absorción de energía

Fuente: Laboratorio de Materiales (2025)

2.1.14 Usos y aplicaciones en obras de ingeniería civil de las fibras de acero.

Sus usos y aplicaciones dependerán de las dosificaciones y fibras de acero utilizada. Entre sus aplicaciones más comunes están:

- **Túneles y galerías:** para reforzar el revestimiento primario de túneles y galerías, aportando resistencia residual y capacidad de absorción de energía frente a cargas dinámicas y desprendimientos de roca (BarChip, 2018).
- **Losas de contrapiso:** aumentan la resistencia al agrietamiento por retracción y a impactos de maquinaria en interiores (Bekaert, 2020).
- **Pisos ligeros e industriales:** proporcionan alta capacidad portante y menor mantenimiento frente a tráfico pesado (Bekaert, 2020)
- **Losa de parqueaderos:** mejoran la durabilidad y la resistencia a cargas repetitivas de vehículos (Bekaert, 2020).
- **Losa de terrazas:** controlan fisuras y facilitan la impermeabilización al reducir grietas (Bekaert, 2020).
- **Losa de pavimento rígido para vías de acceso y camineras:** aportan tenacidad y mayor vida útil ante cargas dinámicas y variaciones térmicas (Bekaert, 2020).
- **Aceras de hormigón:** limitan la fisuración superficial y prolongan la vida útil del pavimento (Bekaert, 2020).

2.1.15 Usos y aplicaciones en obras de ingeniería civil de las fibras de polipropileno.

Sus usos y aplicaciones dependerán de las dosificaciones y fibras de polipropileno utilizada. Entre sus aplicaciones más comunes están:

- **Sustitución parcial de malla de acero en concreto proyectado:** las macrofibras de PP proporcionan resistencia residual que permite disminuir o eliminar el uso de mallas electrosoldadas en túneles y galerías, mejorando la productividad y la seguridad en obra (Sika, 2022).
- **Concreto para losas y pavimentos industriales:** incrementan la tenacidad, reducen la fisuración temprana y mejoran la resistencia al impacto y a la abrasión en superficies sometidas a tráfico intenso (Sika, 2022).

- **Estabilización de taludes y terrenos:** las fibras ayudan a cohesionar el mortero o el hormigón proyectado, aportando soporte superficial y reduciendo el desprendimiento de partículas en taludes de suelo o roca (Sika, 2022)
- **Concretos que requieren alta resistencia a la abrasión:** las macrofibras de PP mejoran la durabilidad superficial en pisos de alto tránsito y en obras expuestas a desgaste mecánico (Sika, 2022).

2.1.16 Losas colaborantes, pisos industriales y pavimentos.

- Losas colaborantes son sistemas mixtos en los que el acero y el hormigón trabajan en conjunto, reduciendo el peso estructural y mejorando la eficiencia constructiva.
- Pisos industriales y los pavimentos requieren concretos de alta durabilidad y resistencia al impacto, abrasión y cargas cíclicas.

En estos casos, la incorporación de fibras en el hormigón ha demostrado ser una solución eficaz para incrementar la vida útil, reducir mantenimientos y optimizar el comportamiento frente a esfuerzos dinámicos (Concretonline, 2020).

2.2 Marco metodológico

La investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo y experimental, dado que busca obtener datos medibles a partir de ensayos de laboratorio para comparar el comportamiento técnico y económico de hormigones reforzados con fibras de acero y polipropileno en distintas proporciones. Según (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014), los estudios experimentales permiten establecer relaciones causa-efecto mediante la manipulación deliberada de variables independientes e independientes, lo cual se adecúa al objetivo de este trabajo: analizar cómo varía la tenacidad a la fractura del hormigón en función del tipo y la proporción de fibras incorporadas.

El diseño adoptado corresponde a un estudio experimental de laboratorio con carácter comparativo, en el cual se elaborarán probetas de hormigón reforzado con diferentes porcentajes de fibras de acero y polipropileno. Posteriormente, estas probetas serán sometidas a ensayos de tenacidad a la fractura, conforme a la normativa EFNARC para determinar la tenacidad a la fractura y la absorción de energía, y se compararán los resultados obtenidos tanto en términos de desempeño técnico como de viabilidad económica.

2.2.1 Investigación experimental

Para que una investigación pueda considerarse experimental, debe cumplir con ciertos criterios clave que la diferencian de otros tipos de estudios (como los descriptivos o correlacionales). En términos generales, se podría decir que debe contar con lo siguiente:

- **Manipulación de variables:** En una investigación experimental el investigador controla y modifica deliberadamente una o más variables independientes, para observar el efecto que producen en la variable dependiente (Kerlinger & Lee, 2002).
- **Control de condiciones:** Se desarrolla en un entorno donde el investigador procura mantener constantes las demás variables que podrían influir en los resultados. Esto permite aislar el efecto de la variable que se está probando (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).
- **Observación y medición de efectos:** Se registran los cambios producidos en la variable dependiente mediante procedimientos de medición objetivos y repetibles. Los resultados se expresan en datos cuantitativos que pueden ser analizados estadísticamente (Campbell & Stanley, 1963).
- **Comparación de grupos o condiciones:** La investigación experimental suele implicar comparación entre grupos o tratamientos, como un grupo control (hormigón sin fibras) y varios grupos experimentales (hormigón con fibras de diferentes tipos y dosificaciones) (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).
- **Posibilidad de replicación:** El diseño experimental debe estar descrito de forma tal que otros investigadores puedan repetirlo en condiciones similares, validando o refutando los hallazgos. (Kerlinger & Lee, 2002)

2.2.2 Planteamiento de hipótesis.

- **Hipótesis general:**

Las mezclas con una combinación de fibras de acero y de polipropileno, mejoran la capacidad de absorción de energía del hormigón, a comparación con aquellas que incorporan únicamente un tipo de fibra.
- **Hipótesis específicas:**
 - Las mezclas híbridas con proporciones iguales de fibras de acero y polipropileno tienen una mayor capacidad de absorción de energía que las mezclas con 100% fibras de acero o 100% fibras de polipropileno.

- La combinación con proporciones de 75% fibras de acero y 75% fibras de polipropileno presenta un comportamiento mecánico más balanceado, optimizando tanto la resistencia como la ductilidad del hormigón.

- **Hipótesis nula:**

La variación en el tipo o proporción de fibras no produce diferencias significativas en la capacidad de absorción de energía del hormigón.

2.2.3 Variables de la investigación

De acuerdo con (Kerlinger y Lee, 2002), las variables constituyen elementos fundamentales en un diseño experimental. En este estudio se definen las siguientes:

- Variable independiente: tipo y proporción de fibras incorporadas al hormigón (fibras de acero en diferentes porcentajes vs. fibras de polipropileno en diferentes porcentajes).
- Variable dependiente: tenacidad a la fractura, medida mediante la curva carga-deflexión en los ensayos de flexión.
- Variables de control: relación agua/cemento, tipo de cemento, granulometría de los agregados, condiciones de curado y edad de ensayo (28 días), con el fin de evitar que factores externos alteren los resultados.

2.2.4 Procedimiento de investigación

El procedimiento metodológico se desarrollará en las siguientes fases:

- 1) **Diseño de mezclas:** Se define la dosificación de los hormigones, considerando una resistencia a compresión base (f'_c) e incorporando fibras en los porcentajes definidos.
- 2) **Preparación de materiales:** Se compran, seleccionan y caracterizan el cemento, agregados y fibras, verificando el cumplimiento de normas ASTM y ACI.
- 3) **Fabricación de probetas:** Se elaboran placas cuadrada de 600mm de lado y 100mm de espesor (EFNARC, 1996).
- 4) **Ejecución de ensayos de tenacidad:** Con la prensa hidráulica se aplica la carga en la placa hasta la fractura de acuerdo con la especificación EFNARC (EFNARC, 1996).

- 5) **Tabulación de datos e interpretación de resultados:** Se organizan en tablas las lecturas de carga y deflexión obtenidas en cada ensayo, registrando todos los valores necesarios para el análisis posterior. (EFNARC, 1996).
- 6) **Determinación de curvas carga-deflexión:** A partir de los datos tabulados se elaboran las curvas carga-deflexión de cada probeta, que se utilizan para calcular la tenacidad a la fractura y la absorción de energía según los lineamientos de la EFNARC (EFNARC, 1996).
- 7) **Cálculo del costo de las mezclas ensayadas:** Se estiman los costos por m³ de las mezclas en función de la proporción utilizada para cada tipo de fibra.
- 8) **Determinación de la mezcla óptima:** En este apartado se realiza el análisis técnico-económico de las mezclas ensayadas. Se identifica la mezcla que presenta el mejor desempeño en tenacidad a la fractura en relación con un costo adecuado para su aplicación.
- 9) **Identificación de las aplicaciones en obras de ingeniería civil:** Se proponen posibles aplicaciones de la mezcla óptima en obras de ingeniería civil.

A continuación, se presenta a manera de diagrama de flujo el procedimiento metodológico anteriormente descrito.

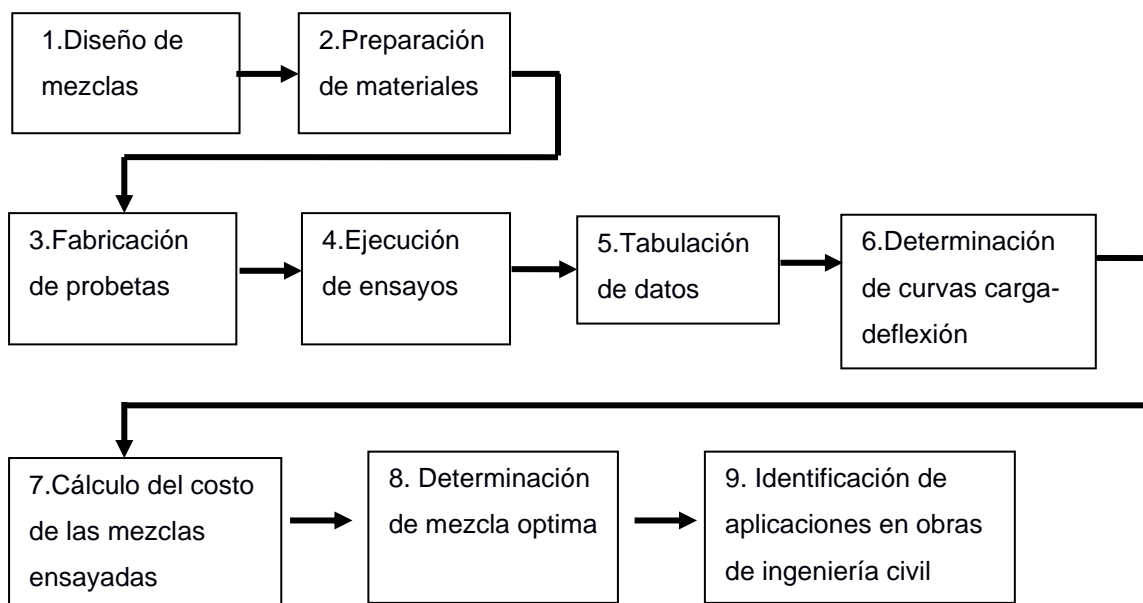


Figura 2.9 Diagrama de flujo de las fases de la investigación

Fuente: Elaboración propia

2.3 Trabajo de campo

2.3.1 Diseño de mezclas.

Para el diseño de mezclas se seleccionan las fibras a utilizar y se analizan las posibles combinaciones con diferentes proporciones de la dosificación base.

Selección de las fibras

- **Fibra de acero Dramix (15 kg/m³):** Para este proyecto se eligió este tipo de fibra aun cuando Bekaert dispone de gamas de mayores prestaciones (3D, 4D y 5D). La decisión responde a criterios de representatividad de la práctica constructiva local y viabilidad económica, más que a la búsqueda de la máxima resistencia.

También debido a su disponibilidad y uso extendido en obras de pequeña y mediana escala en el mercado ecuatoriano. La dosificación de 15 kg/m³ corresponde al rango superior, lo cual asegura un efecto significativo en la tenacidad sin comprometer la trabajabilidad del hormigón. Su precio en el mercado nacional es de \$41.52 la bolsa de 10 kg.

- **Fibra de polipropileno SikaForce-48 (5 kg/m³):** La macrofibra de polipropileno se eligió por su disponibilidad en el medio local, su resistencia química a la corrosión, y su frecuente uso en pisos y losas industriales. La dosificación de 5 kg/m³ representa un valor medio dentro del rango recomendado (2–10 kg/m³), permitiendo comparar su desempeño frente a la fibra de acero. Su precio en el mercado nacional es de \$53.37 la bolsa de 5 kg.

Luego se procede a analizar las posibles combinaciones de fibras a utilizar en las mezclas.

➤ Combinaciones de mezclas seleccionadas

Hay que tener en cuenta que, para las dosificaciones de fibras a utilizar, existe en un sin número de posibles combinaciones; pero para nuestro proyecto se plantearon las siguientes:

Mezclas	Fibra de Acero 15kg/m ³	Fibra de Polipropileno 5kg/m ³
Dosificación 1		
A (Patrón)	0%	0%
1	100%	0%

Mezclas	Fibra de Acero 15kg/m ³	Fibra de Polipropileno 5kg/m ³
2	75%	0%
3	50%	0%
4	25%	0%
5	0%	0%
Dosificación 2		
A (Patrón)	0%	0%
1	0%	100%
2	0%	75%
3	0%	50%
4	0%	25%
5	0%	0%
Dosificación 3		
A (Patrón)	0%	0%
1	100%	0%
2	75%	25%
3	50%	50%
4	25%	75%
5	0%	100%
Dosificación 4		
A (Patrón)	0%	0%
1	100%	100%
2	75%	75%
3	50%	50%
4	25%	25%
5	0%	0%

Tabla 2.1 Posibles dosificaciones de fibras a utilizar

Fuente: Elaboración propia

Como se observó, se plantearon diversas combinaciones de porcentajes de fibras de acero y polipropileno. Entre todas las posibles, se seleccionaron las marcadas con celeste en la anterior **Tabla 2.1**, por las siguientes razones:

1. Se incluyeron los extremos de referencia, mezcla 100/0 de fibras de acero y mezcla 0/100 de fibras de polipropileno. Y porcentajes intermedios (75/25, 50/50 y 25/75) presentadas en la dosificación 3, ya que permiten evaluar de manera gradual el efecto de la sustitución de un tipo de fibra por otra en las propiedades mecánicas.

2. Estas proporciones facilitan la identificación de una mezcla híbrida óptima, en la que se balanceen la tenacidad a la fractura y se complementen las propiedades de ambas fibras, considerando también los costos de incorporación de estas fibras, tal como se exige en el objetivo del estudio.
3. No se eligió las dosificaciones 1 y 2 porque estaríamos evaluando individualmente las propiedades de cada fibra y no cubrirían de forma progresiva el rango de porcentajes de fibras. Además, que no aportaban información adicional relevante para el análisis comparativo en conjunto.
4. Se escogieron algunas combinaciones de la dosificación 4, ya que incluían porcentajes equilibrados que complementan el análisis técnico. Estas proporciones permiten observar el desempeño cuando ambos tipos de fibras se encuentran especialmente en niveles elevados de incorporación, condición de interés para contrastar la respuesta mecánica frente a las dos mezclas puras, del punto 1.

Dando como resultado las siguientes mezclas, como mezclas a realizarse en este proyecto de investigación:

Proporción de Dosificación Base		
Mezclas	Fibra de Acero 15kg/m ³	Fibra de Polipropileno 5kg/m ³
A (Patrón)	0%	0%
1	100%	0%
2	75%	25%
3	50%	50%
4	25%	75%
5	0%	100%
6	100%	100%
7	75%	75%

Tabla 2.2 Dosificaciones de fibras a utilizar

Fuente: Elaboración propia

Teniendo por ejemplo que para la Mezcla 1 se utilizará 15 kg/m³ de fibra de acero y 0kg/m³ de fibra de acero, para la Mezcla 2 se utilizará 11.25 kg/m³ de fibra de acero y 1.25 kg/m³ de fibra de polipropileno y así sucesivamente con todas las mezclas.

- **Diseño de mezcla con una resistencia a la compresión base de $f'c=210\text{kg/cm}^2$**

Para el diseño de cada una de las mezclas se procede a tomar en cuenta el porcentaje de fibras propuestos, y mantener nuestras variables de control como:

- La relación agua/cemento=0.49
- Tipo de cemento: Holcim GU
- Granulometría de los agregados
- Condiciones de curado
- Edad de ensayo.

Cabe recalcar que al principio se elabora un diseño base, y posteriormente se realiza la respectiva corrección debido al contenido de agua en los agregados que se obtuvo mediante los ensayos de:

- Determinación de la densidad y absorción del agregado grueso (ASTM C-127, INEN 857)
- Determinación de la densidad y absorción del agregado fino (ASTM C-128 o INEN 856)
- Masas unitarias de agregados (ASTM C – 29)

2.3.2 Planificación con el laboratorio de materiales.

Se lleva a cabo la coordinación con el laboratorio de materiales para programar la fabricación de las placas (3 por mezcla) para determinar su tenacidad a la fractura mediante las especificaciones EFNARC y cilindros (9 por mezcla) para determinar su resistencia a la compresión a los 7,14 y 28 días (ver **Tabla 2.3** y **Tabla 2.4**). También se contempla la autorización para el registro fotográfico de las actividades ejecutadas.

PLACAS						
Mezclas	% Fibras de Acero	% Fibras de PP	Kg/m ³ de Fibra de Acero	Kg/m ³ de Fibra de PP	Fecha de fundición	Fecha de ensayo (28 días)
A (Patrón)	0%	0%	0	0	28/08/25	25/09/25
1	100%	0%	15	0	29/08/25	26/09/25
2	75%	25%	11.25	1.25	29/08/25 y 1/09/25	26/09/25 y 29/09/25
3	50%	50%	7.5	2.5	1/9/2025	29/09/25
4	25%	75%	3.75	3.75	2/9/2025	30/09/25
5	0%	100%	0	5	28/08/25	25/09/25
6	100%	100%	15	5	2/09/25 y 3/09/25	30/09/25 y 1/10/25
7	75%	75%	11.25	3.75	3/9/2025	1/10/2025

Tabla 2.3 Planificación de fundición y rotura de placas

Fuente: Elaboración propia

CILINDROS						
Mezclas	% Fibras de Acero	% Fibras de PP	Fecha de fundición	Fecha de ensayo (7 días)	Fecha de ensayo (14 días)	Fecha de ensayo (28 días)
A (Patrón)	0%	0%	28/08/2025	4/9/2025	11/9/2025	25/9/2025
1	100%	0%	29/08/2025	5/9/2025	12/9/2025	26/9/2025
2	75%	25%	1/9/2025	8/9/2025	15/9/2025	29/9/2025
3	50%	50%	1/9/2025	8/9/2025	15/9/2025	29/9/2025
4	25%	75%	2/9/2025	9/9/2025	16/9/2025	30/9/2025
5	0%	100%	28/08/25	4/9/2025	11/9/2025	25/9/2025
6	100%	100%	2/9/2025	9/9/2025	16/9/2025	30/9/2025
7	75%	75%	3/9/2025	10/9/2025	17/9/2025	1/10/2025

Tabla 2.4 Planificación de fundición y rotura de cilindros

Fuente: Elaboración propia

Debido a que el laboratorio solo contaba con 5 moldes de placas para fundir, para algunas mezclas la fecha de fundición y rotura de las placas constan dentro de 2 días.

2.3.3 Preparación de materiales.

Una vez contada con la aprobación del laboratorio de materiales, se procede a la recolección y transporte de materiales necesarios para la ejecución de las mezclas propuestas. Se realizó el acopio de cemento tipo GU, agregados finos y gruesos, así como de las fibras de acero Dramix y las macrofibras de polipropileno SikaForce. Todos estos materiales se mantuvieron almacenados en el laboratorio de materiales hasta el día de la elaboración de las mezclas.



Figura 2.10 Acopio de materiales (cemento, agregado grueso, agregado fino, fibras)

Fuente: Elaboración propia

2.4 Trabajo de laboratorio o gabinete

En el laboratorio se realizó la preparación de mezclas, caracterización de materiales, fundición de placas y cilindros, ensayos de tenacidad a la fractura y ensayos de compresión respectivamente.

2.4.1 Materiales, equipos

Materiales.

Los materiales utilizados en el presente estudio son los siguientes:

- **Cemento:** Cemento Holcim Tipo GU

	Datos técnicos	CUMPLE CON ESTÁNDARES DE INEN 2380
	Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0.8
	Tiempo de fraguado, método de Vicat	
	Inicial, no menos de, minutos	45
	Inicial, no más de, minutos	420
	Contenido de aire mortero, en volumen, %	---
	Resistencia a la compresión, mínimo MPa	
	1 día	---
	3 días	13
	7 días	20
28 días	28	
Expansión en barras de mortero 14 días, % máx.	0.02	
Resistencia a sulfatos, 6 meses	---	

Figura 2.11 Cemento Holcim Tipo GU y ficha técnica.

Fuente: Holcim (2025)

- **Agregados:** Agregado grueso (grava triturada de 3/4") y agregado fino (arena con un módulo de finura de 1.63).



Figura 2.12 Agregado grueso y agregado fino.

Fuente: Elaboración propia

- **Agua:** Se utiliza agua potable, la misma que se consigue directamente de la red de suministro en el laboratorio de materiales.
- **Fibras:** Fibras de acero malla en bolsa y macrofibras de polipropileno, descritas anteriormente en el apartado 2.3.1. Las fichas técnicas se incluyen en ANEXO 1 y ANEXO 2.



Figura 2.13 Fibras de acero y macrofibras de polipropileno

Fuente: Elaboración propia

- **Aditivos:** Super plastificante/estabilizador de contenido de aire, agente de desencofrado utilizado en los moldes y un curador para hormigón en estado fresco (ver Figura 2.14). Las fichas técnicas se incluyen en ANEXO 3.



Figura 2.14 Aditivos: Super plastificante (izquierda), Desencofrante (medio), Curador(derecha).

Fuente: Elaboración propia

Equipos.

Dentro de los equipos principales utilizados tenemos:

- **Concreteira:** Mezcladora mecánica que combina cemento, agua y agregados para producir hormigón fresco de forma homogénea. Este equipo tiene una capacidad de 1 saco de cemento. (ver Figura 2.15)



Figura 2.15 Concreteira

Fuente: Elaboración propia

- **Balanzas calibradas:** Básculas verificadas y certificadas para medir con precisión el peso de los materiales. En nuestro proyecto se usaron dos una para pesar las fibras y aditivos y otra para pesar los agregados del hormigón. (ver Figura 2.16)



Figura 2.16 Balanza para fibras y aditivos (izquierda), Balanza para agregados (derecha)

Fuente: Elaboración propia

- **Moldes de 600×600×100 mm:** Moldes metálicos utilizados para fabricar las placas utilizadas en el ensayo de tenacidad a la fractura, de acuerdo con las especificaciones de la EFNARC. (ver Figura 2.17)



Figura 2.17 Molde metálico para las placas
Fuente: Elaboración propia

- **Moldes de cilindros:** Recipientes normalizados de 10×20cm para preparar probetas cilíndricas de hormigón para ensayos de resistencia a la compresión. (ver Figura 2.18)



Figura 2.18 Molde metálico para los cilindros
Fuente: Elaboración propia

- **Cono de Abrams:** Equipo conformado por dispositivo troncocónico, varilla y base metálica usado para medir la trabajabilidad o asentamiento (slump) del hormigón fresco. (ver Figura 2.19)



Figura 2.19 Cono de Abrams
Fuente: Elaboración propia

- **Piscina de curado de cilindros:** Piscina de agua con temperatura controlada que mantiene los cilindros en condiciones adecuadas de curado. (ver Figura 2.20)

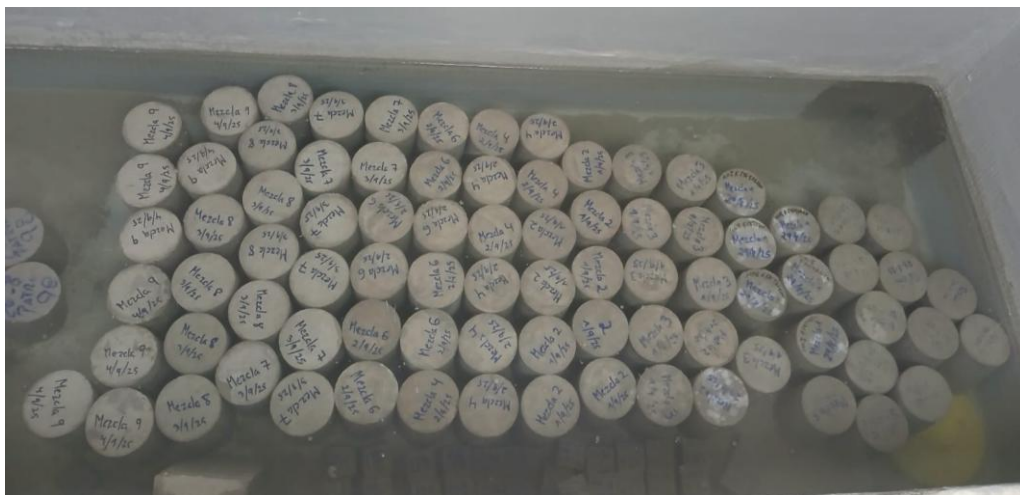


Figura 2.20 Piscina de curado de cilindros
Fuente: Elaboración propia

- **Prensa/actuador con control de desplazamiento:** Máquina de ensayo que aplica una carga controlada y mide el desplazamiento o la deformación, usada en las pruebas de tenacidad a la fractura según lo establecido en la EFNARC. (ver Figura 2.8)
- **Máquina de ensayo de compresión de cilindros:** Equipo hidráulico que aplica una carga axial controlada a los cilindros de hormigón hasta su rotura, es utilizado para determinar su resistencia a compresión. (ver Figura 2.21)



Figura 2.21 Maquina de ensayo de compresión

Fuente: Elaboración propia

2.4.2 Preparación previa y control de materiales

- **Agregados:** Se determinó las masas unitarias según la ASTM C-29, densidad y absorción tanto del agregado grueso como el agregado fino según ASTM C-127/ INEN 857, para corregir la cantidad de agua utilizada en la mezcla. Los resultados se encuentran en ANEXO 4.
- **Curva granulométrica:** Se realizó el ensayo de granulometría para verificar que los agregados cumplan las normas INEN 696 y ASTM C33, garantizando una adecuada distribución de tamaños para la trabajabilidad y calidad del hormigón. Los resultados completos se presentan en ANEXO 5.

2.4.3 Dosificación para cada mezcla

Una vez definidas las variables de control y de caracterización de los materiales, se procedió a determinar la dosificación por parada y por metro cúbico correspondiente a cada una de las mezclas. Se realizaron tres repeticiones para cada mezcla, obteniendo así por parada una placa para romper a los 28 días y tres cilindros para romper a los 7,14 y 28 días respectivamente, con un volumen total aproximado de 0.04 m³ (40 litros) por cada parada. Tal como se muestra en las tablas que se presentan a continuación:

MEZCLA A (PATRÓN)						
Materiales	Masa seca (kg)	Humedad (%)	Absorción (%)	Agua corregida (litros)	Masa saturada (kg)	
					V= 0.04 m ³	V= 1 m ³
Cemento	14.80				14.80	370
Agua	7.20				7.52	188
Arena	37.12	5.00 %	3.50 %	-0.55	37.68	942
Grava	35.00	0.00 %	2.50 %	0.87	34.13	853.25
Fibra de PP	0				0	0
Fibra Metálica	0				0	0
Super plastificante	0.118				0.118	2.95

Tabla 2.5 Dosificación Mezcla A (PATRON)

Fuente: Elaboración propia

MEZCLA 1						
Materiales	Masa seca (kg)	Humedad (%)	Absorción (%)	Agua corregida (litros)	Masa saturada (kg)	
					V= 0.04 m ³	V= 1 m ³
Cemento	14.80				14.80	370
Agua	7.20				7.52	188
Arena	36.20	5.00 %	3.50 %	-0.54	36.74	918.5
Grava	34.40	0.00 %	2.50 %	0.86	33.54	838.5
Fibra de PP	0				0	0
Fibra Metálica	0.60*				0.60	15
Super plastificante	0.118				0.118	2.95

* Se obtiene de la siguiente operación: $100\% \times 15 \text{ kg/m}^3 = 15.00 \text{ kg/m}^3 \times 0.04 \text{ m}^3 = 0.60 \text{ kg}$

Tabla 2.6 Dosificación Mezcla 1 (100% fibras de acero y 0% fibras de PP)

Fuente: Elaboración propia

MEZCLA 2						
Materiales	Masa seca (kg)	Humedad (%)	Absorción (%)	Agua corregida (litros)	Masa saturada (kg)	
					V= 0.04 m ³	V= 1 m ³
Cemento	14.80				14.80	370
Agua	7.20				7.52	188
Arena	36.20	5.00 %	3.50 %	-0.54	36.74	918.5
Grava	34.40	0.00 %	2.50 %	0.86	33.54	838.5
Fibra de PP	0.05*				0.05	1.25
Fibra Metálica	0.45**				0.45	11.25
Super plastificante	0.118				0.118	2.95

* Se obtiene de la siguiente operación: $25\% \times 5 \text{ kg/m}^3 = 1.25 \text{ kg/m}^3 \times 0.04 \text{ m}^3 = 0.05 \text{ kg}$

** Se obtiene de la siguiente operación: $75\% \times 15 \text{ kg/m}^3 = 11.25 \text{ kg/m}^3 \times 0.04 \text{ m}^3 = 0.45 \text{ kg}$

Tabla 2.7 Dosificación Mezcla 2 (75% fibras de acero y 25% fibras de PP)

Fuente: Elaboración propia

MEZCLA 3						
Materiales	Masa seca (kg)	Humedad (%)	Absorción (%)	Agua corregida (litros)	Masa saturada (kg)	
					V= 0.04 m ³	V= 1 m ³
Cemento	14.80				14.80	370
Agua	7.20				7.52	188
Arena	36.20	5.00 %	3.50 %	-0.54	36.74	918.5
Grava	34.40	0.00 %	2.50 %	0.86	33.54	838.5
Fibra de PP	0.10*				0.10	2.5
Fibra Metálica	0.30**				0.30	7.5
Super plastificante	0.118				0.118	2.95
* Se obtiene de la siguiente operación: $50\% \times 5 \text{ kg/m}^3 = 2.50 \text{ kg/m}^3 \times 0.04 \text{ m}^3 = 0.10 \text{ kg}$						
** Se obtiene de la siguiente operación: $50\% \times 15 \text{ kg/m}^3 = 7.50 \text{ kg/m}^3 \times 0.04 \text{ m}^3 = 0.30 \text{ kg}$						

Tabla 2.8 Dosificación Mezcla 3 (50% fibras de acero y 50% fibras de PP)

Fuente: Elaboración propia

MEZCLA 4						
Materiales	Masa seca (kg)	Humedad (%)	Absorción (%)	Agua corregida (litros)	Masa saturada (kg)	
					V= 0.04 m ³	V= 1 m ³
Cemento	14.80				14.80	370
Agua	7.20				7.52	188
Arena	36.20	5.00 %	3.50 %	-0.54	36.74	918.5
Grava	34.40	0.00 %	2.50 %	0.86	33.54	838.5
Fibra de PP	0.15*				0.15	3.75
Fibra Metálica	0.15**				0.15	3.75
Super plastificante	0.118				0.118	2.95
* Se obtiene de la siguiente operación: $75\% \times 5 \text{ kg/m}^3 = 3.75 \text{ kg/m}^3 \times 0.04 \text{ m}^3 = 0.15 \text{ kg}$						
** Se obtiene de la siguiente operación: $25\% \times 15 \text{ kg/m}^3 = 3.75 \text{ kg/m}^3 \times 0.04 \text{ m}^3 = 0.15 \text{ kg}$						

Tabla 2.9 Dosificación Mezcla 4 (25% fibras de acero y 75% fibras de PP)

Fuente: Elaboración propia

MEZCLA 5						
Materiales	Masa seca (kg)	Humedad (%)	Absorción (%)	Agua corregida (litros)	Masa saturada (kg)	
					V= 0.04 m ³	V= 1 m ³
Cemento	14.80				14.80	370
Agua	7.20				7.52	188
Arena	36.80	5.00 %	3.50 %	-0.55	37.35	933.75
Grava	34.80	0.00 %	2.50 %	0.87	33.93	848.25
Fibra de PP	0.20*				0.20	5
Fibra Metálica	0				0	0
Super plastificante	0.118				0.118	2.95
* Se obtiene de la siguiente operación: $100\% \times 5 \text{ kg/m}^3 = 5 \text{ kg/m}^3 \times 0.04 \text{ m}^3 = 0.20 \text{ kg}$						

Tabla 2.10 Dosificación Mezcla 5 (0% fibras de acero y 100% fibras de PP)

Fuente: Elaboración propia

MEZCLA 6						
Materiales	Masa seca (kg)	Humedad (%)	Absorción (%)	Agua corregida (litros)	Masa saturada (kg)	
					V= 0.04 m ³	V= 1 m ³
Cemento	14.80				14.80	370
Agua	7.20				7.51	187.75
Arena	36.00	5.00 %	3.50 %	-0.54	36.54	913.5
Grava	34.12	0.00 %	2.50 %	0.85	33.27	831.75
Fibra de PP	0.20*				0.20	5
Fibra Metálica	0.60**				0.60	15
Super plastificante	0.118				0.118	2.95
* Se obtiene de la siguiente operación: $100\% \times 5 \text{ kg/m}^3 = 5.00 \text{ kg/m}^3 \times 0.04 \text{ m}^3 = 0.20 \text{ kg}$						
** Se obtiene de la siguiente operación: $100\% \times 15 \text{ kg/m}^3 = 15.00 \text{ kg/m}^3 \times 0.04 \text{ m}^3 = 0.60 \text{ kg}$						

Tabla 2.11 Dosificación Mezcla 6 (100% fibras de acero y 100% fibras de PP)

Fuente: Elaboración propia

MEZCLA 7						
Materiales	Masa seca (kg)	Humedad (%)	Absorción (%)	Agua corregida (litros)	Masa saturada (kg)	
					V= 0.04 m ³	V= 1 m ³
Cemento	14.80				14.80	370
Agua	7.20				7.51	187.75
Arena	36.00	5.00 %	3.50 %	-0.54	36.54	913.5
Grava	34.12	0.00 %	2.50 %	0.85	33.27	831.75
Fibra de PP	0.15*				0.15	3.75
Fibra Metálica	0.45**				0.45	11.25
Super plastificante	0.118				0.118	2.95
* Se obtiene de la siguiente operación: $75\% \times 5 \text{ kg/m}^3 = 3.75 \text{ kg/m}^3 \times 0.04 \text{ m}^3 = 0.15 \text{ kg}$						
** Se obtiene de la siguiente operación: $75\% \times 15 \text{ kg/m}^3 = 11.25 \text{ kg/m}^3 \times 0.04 \text{ m}^3 = 0.45 \text{ kg}$						

Tabla 2.12 Dosificación Mezcla 7 (75% fibras de acero y 75% fibras de PP)

Fuente: Elaboración propia

2.4.4 Protocolo de mezclado

1. Mezclado en seco de agregados.

Se vierte los agregados debidamente pesados según la dosificación, a la concreteira y se procede a mezclarlos por 1 minuto, como se observa en la Figura 2.22.



Figura 2.22 Mezcla de agregados en seco

Fuente: Elaboración propia

2. Adición del ~70% del agua.

Se vierte alrededor del 70% del agua según la dosificación, a los agregados y se vuelve a mezclar de 1 a 2 minutos aproximadamente, como se observa en la Figura 2.23.



Figura 2.23 Incorporación de agua a los agregados

Fuente: Elaboración propia

3. Adición del cemento.

Se detiene la concreteira para verter todo cemento y luego se pone un protector para evitar pérdidas por el movimiento de la concreteira y procedemos a mezclar

por 30 segundos, como se observa en la Figura 2.24. Luego quitamos el protector y seguimos con el siguiente paso.



Figura 2.24 Incorporación del cemento

Fuente: Elaboración propia

4. Incorporación gradual de fibras.

Añadimos primero las fibras de acero, luego fibras de polipropileno en híbridas, mientras la mezcla sigue en marcha, como se observa en la Figura 2.25.



Figura 2.25 Incorporación de fibras de acero (izquierda) y fibras de polipropileno (derecha)

Fuente: Elaboración propia

5. Anadir agua restante y super plastificante.

Añadimos el 30% restante del agua y el super plastificante según la dosificación para cada mezcla y se deja mezclar por 2 minutos más, como se observa en la Figura 2.26.



Figura 2.26 Incorporación del superplastificante

Fuente: Elaboración propia

6. Control del asentamiento/trabajabilidad.

Se procede a realizar el ensayo de cono de Abrams para medir el asentamiento de cada mezcla, como se observa en la Figura 2.27.



Figura 2.27 Medición de trabajabilidad según ensayo de Cono de Abrams

Fuente: Elaboración propia

2.4.5 Moldeo y curado.

- **Moldeo de cilindros**

Se vierte el concreto en moldes metálicos limpios y con desencofrante (ver Figura 2.28); se compacta en tres capas y cada capa se apisona con una varilla lisa en diferentes partes de la superficie del hormigón, para evitar orientación preferencial excesiva de fibras. Cuando las capas se han llenado, se dan unos golpes con un martillo de goma en la parte exterior del cilindro con el fin de eliminar las burbujas de aire (ver Figura 2.28).



Figura 2.28 Moldeo de cilindros. Vertido del hormigón (izquierda), golpes con martillo (derecha)

Fuente: Elaboración propia

- **Moldeo de placas**

Se vierte el concreto en moldes metálicos limpios y con desencofrante; se apisona con una varilla lisa en diferentes partes de la superficie del hormigón, para evitar orientación preferencial excesiva de fibras. Se dan unos golpes con un martillo de goma en la parte exterior del molde con el fin de eliminar las burbujas de aire, como se observa en la Figura 2.29.



Figura 2.29 Moldeo de placas. Desencofrante (superior izquierda), vertido del hormigón (superior derecha), apisonamiento con varilla (inferior izquierda), golpes con martillo (inferior derecha)

Fuente: Elaboración propia

- **Acabado.**

Superficie nivelada para no alterar la transferencia de carga (ver Figura 2.30), se lo puede hacer con un bailejo o con la misma varilla metálica que se usó para el apisonamiento.



Figura 2.30 Acabado de cilindro (izquierda), acabado de placas (derecha)

Fuente: Elaboración propia

- **Curado inicial.**

Protección durante las primeras 24 horas. Para ello aplicamos el aditivo curador tanto en las placas como en los cilindros para evitar una pérdida drástica de agua y la formación de fisuras por acción del calor (ver Figura 2.31). También se cubrieron con planchas de zinc hasta el siguiente día en el que se procedió al desencofrado.



Figura 2.31 Curado inicial de placas y cilindros

Fuente: Elaboración propia

- **Desencofrado.**

Después de 24 horas se procede a desencofrar tanto los cilindros como las placas con cuidado, protegiendo las aristas para no despostillarlos. Y se procede

a marcarlas con un marcador para su posterior identificación, como se observa en la Figura 2.32.



Figura 2.32 Desencofrado de placas y cilindros

Fuente: Elaboración propia

- **Curado.**

Los cilindros se colocaron dentro de la piscina de curado hasta alcanzar la edad de ensayo (7,14,28 días) como se observa en la Figura 2.33. Las placas se regaron con agua potable al menos una vez al día durante 28 días.



Figura 2.33 Curado de cilindros (izquierda), curado de placas (derecha)

Fuente: Elaboración propia

2.4.6 Plan de muestreo y tamaño muestral

- Por cada mezcla (incluida la mezcla patrón), se fabricaron 3 placas, con el propósito de disponer de una base que permita realizar un análisis estadístico básico (promedio, desviación estándar, etc.). Dándonos un total de 24 placas.

- Se fabricó 9 cilindros complementarios por cada mezcla, para poder observar si existe una posible correlación y constatar la resistencia de diseño. Dando un total de 72 cilindros.

2.4.7 Configuración de ensayo de tenacidad a la fractura (placas EFNARC)

- **Apoyo y carga:** se monta la placa en el sistema de apoyo y el dispositivo de carga conforme a los lineamientos de EFNARC, cuidando que esté debidamente centrada. Ver Figura 2.34.



Figura 2.34 Montura de placa para el ensayo.

Fuente: Elaboración propia

- **Medición de deformación:** se instalará el deformímetro en el centro, para obtener datos de deformación según la carga aplicada. Ver Figura 2.35.

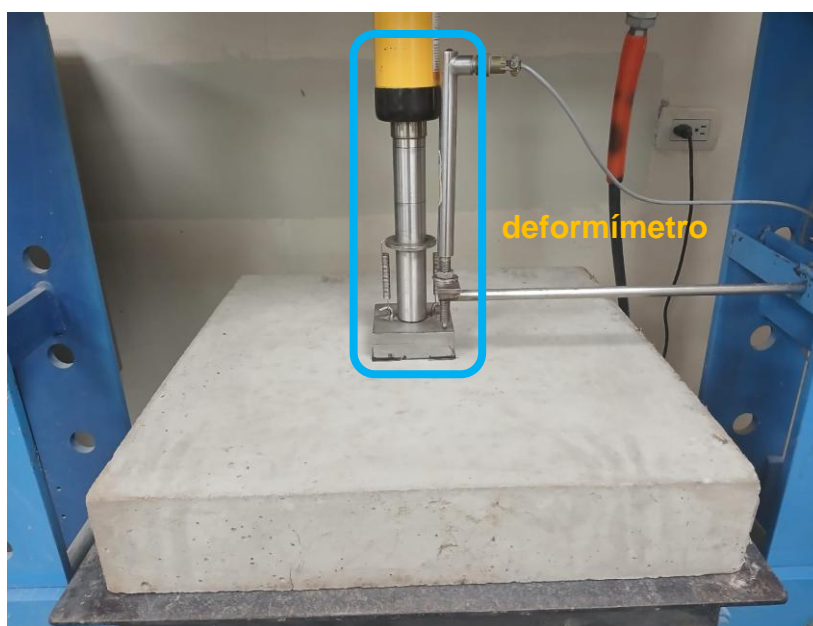


Figura 2.35 Instalación del deformímetro.

Fuente: Elaboración propia

- **Registro:** se registra la carga, desplazamiento y el tiempo a una frecuencia de muestreo adecuada, garantizando la precisión necesaria para determinar el área bajo la curva. Para este proceso se utilizó una computadora portátil con el software instalado. Ver Figura 2.36.



Figura 2.36 Registro de datos durante el ensayo.

Fuente: Elaboración propia

- **Criterio de terminación:** se ensaya hasta una deformación objetivo (δ_t) en nuestro caso se tomó lo que recomienda la EFNARC es decir $\delta=25\pm 1\text{mm}$. Ver Figura 2.37.



Figura 2.37 Terminación del ensayo a $\delta=25\pm 1\text{mm}$.

Fuente: Elaboración propia

2.4.8 Procesamiento de resultados en laboratorio

Para el procesamiento de los datos se considerarán los siguientes criterios:

- **Curvas carga–deflexión:** Corregir offsets de cero y se verificará la tendencia de las curvas.

- **Energía absorbida (tenacidad):** Calculado como el área bajo la curva hasta $\delta=25\pm 1\text{mm}$; se reportará energía por placa y promedio \pm desviación estándar por mezcla.
- **Puntos característicos en curvas:** Identificación de puntos característicos (pico de carga, caída, meseta).
- **Criterios de calidad:** Evaluación de coeficientes de variación; si un resultado es atípico (p. ej. por defecto de fabricación o fisura accidental fuera de zona), se justificará su exclusión.

2.4.9 Ensayos complementarios

Resistencia a compresión

- **Colocación del cilindro:** Colocar el cilindro a ensayar en la prensa, asegurándose que este bien centrado y alineado. Ver Figura 2.38.



Figura 2.38 Colocación del cilindro en la prensa.

Fuente: Elaboración propia

- **Ajustar la prensa e iniciar el ensayo:** Ajustar la prensa para que el cilindro quede fijo, damos inicio al ensayo aplicando la fuerza. Ver Figura 2.39.



Figura 2.39 Ajuste de prensa (izquierda), aplicación de la fuerza (derecha).

Fuente: Elaboración propia

- **Registro de datos:** Anotar la carga máxima alcanzada por cada cilindro ensayado.
- **Retiro del cilindro y limpieza:** Luego de la rotura del cilindro y del apagado de la máquina, se procede a retirar el cilindro y limpiar el equipo. Por último, se retira cualquier tipo de escombros.

Trabajabilidad

Este ensayo el cual fue mencionado previamente en el protocolo de mezclado se realizó con el hormigón en estado fresco. A continuación, se describen los pasos seguidos durante su ejecución.

- **Preparación:** Se humedece el molde, la base y la varilla con agua; y nos preparamos ubicándonos encima de la placa y de los soportes del cono. Ver Figura 2.40.



Figura 2.40 Preparación para realizar el ensayo de trabajabilidad

Fuente: Elaboración propia

- **Llenado en 3 capas:** Se vierte el hormigón en capas. Cada capa $\approx \frac{1}{3}$ de la altura del molde. Ver Figura 2.41.



Figura 2.41 Vertido de cada capa de hormigón en el cono.

Fuente: Elaboración propia

- **Apisonado:** Se aplica 25 golpes por capa con la varilla metálica ($\varnothing \approx 16$ mm), penetrando la capa inferior.



Figura 2.42 Apisonado de cada capa de hormigón con la varilla metálica.

Fuente: Elaboración propia

- **Enrase:** Nivelar la superficie con la varilla metálica. Ver Figura 2.43.



Figura 2.43 Enrasado de la superficie con la varilla metálica.

Fuente: Elaboración propia

- **Levantamiento del cono:** Se levanta el cono de manera vertical y continua en aproximadamente 5 segundos.

- **Medición del slump:** Medir la diferencia entre la altura del molde invertido del cono y la altura del centro de la muestra. Ver Figura 2.44.



Figura 2.44 Medición del asentamiento

Fuente: Elaboración propia

- **Registro:** Registrar el valor del asentamiento en centímetros.

2.5 Tabulación de datos

Se presenta la organización sistemática de la información obtenida en el trabajo de campo y de laboratorio, antes de realizar el análisis de resultados.

- **Identificación de placas:** Identificación de cada muestra, porcentaje por tipo de fibra y dosificación para cada mezcla. Ver Tabla 2.13.

PLACAS						
Muestras	Dosificación Base Kg/m ³		Proporción Fibras		Dosificación Mezcla Kg/m ³	
	Fibras de Acero	Fibras de PP	Fibras de Acero	Fibras de PP	Fibra de Acero	Fibra de PP
Patrón A-1	15	5	0%	0%	0	0
Patrón A-2	15	5	0%	0%	0	0
Patrón A-3	15	5	0%	0%	0	0
Mezcla 1-1	15	5	100%	0%	15	0
Mezcla 1-2	15	5	100%	0%	15	0
Mezcla 1-3	15	5	100%	0%	15	0
Mezcla 2-1	15	5	75%	25%	11.25	1.25
Mezcla 2-2	15	5	75%	25%	11.25	1.25
Mezcla 2-3	15	5	75%	25%	11.25	1.25
Mezcla 3-1	15	5	50%	50%	7.5	2.5
Mezcla 3-2	15	5	50%	50%	7.5	2.5

PLACAS						
Muestras	Dosificación Base Kg/m ³		Proporción Fibras		Dosificación Mezcla Kg/m ³	
	Fibras de Acero	Fibras de PP	Fibras de Acero	Fibras de PP	Fibra de Acero	Fibra de PP
Mezcla 3-3	15	5	50%	50%	7.5	2.5
Mezcla 4-1	15	5	25%	75%	3.75	3.75
Mezcla 4-2	15	5	25%	75%	3.75	3.75
Mezcla 4-3	15	5	25%	75%	3.75	3.75
Mezcla 5-1	15	5	0%	100%	0	5
Mezcla 5-2	15	5	0%	100%	0	5
Mezcla 5-3	15	5	0%	100%	0	5
Mezcla 6-1	15	5	100%	100%	15	5
Mezcla 6-2	15	5	100%	100%	15	5
Mezcla 6-3	15	5	100%	100%	15	5
Mezcla 7-1	15	5	75%	75%	11.25	3.75
Mezcla 7-2	15	5	75%	75%	11.25	3.75
Mezcla 7-3	15	5	75%	75%	11.25	3.75

Tabla 2.13 Identificación de muestras para las placas

Fuente: Elaboración propia

- **Identificación de cilindros:** Identificación de cada muestra, porcentaje por tipo de fibra y dosificación para cada mezcla. Ver Tabla 2.14.

CILINDROS							
Muestras	Edad para prueba de rotura	Dosificación Base Kg/m ³		Proporción Fibras		Dosificación Mezcla Kg/m ³	
		Fibras de Acero	Fibras de PP	Fibras de Acero	Fibras de PP	Fibra de Acero	Fibra de PP
Patrón A-1	7 días	15	5	0%	0%	0	0
Patrón A-2	7 días	15	5	0%	0%	0	0
Patrón A-3	7 días	15	5	0%	0%	0	0
Patrón A-4	14 días	15	5	0%	0%	0	0
Patrón A-5	14 días	15	5	0%	0%	0	0
Patrón A-6	14 días	15	5	0%	0%	0	0
Patrón A-7	28 días	15	5	0%	0%	0	0
Patrón A-8	28 días	15	5	0%	0%	0	0
Patrón A-9	28 días	15	5	0%	0%	0	0
Mezcla 1-1	7 días	15	5	100%	0%	15	0
Mezcla 1-2	7 días	15	5	100%	0%	15	0
Mezcla 1-3	7 días	15	5	100%	0%	15	0
Mezcla 1-4	14 días	15	5	100%	0%	15	0
Mezcla 1-5	14 días	15	5	100%	0%	15	0
Mezcla 1-6	14 días	15	5	100%	0%	15	0
Mezcla 1-7	28 días	15	5	100%	0%	15	0
Mezcla 1-8	28 días	15	5	100%	0%	15	0
Mezcla 1-9	28 días	15	5	100%	0%	15	0
Mezcla 2-1	7 días	15	5	75%	25%	11.25	1.25
Mezcla 2-2	7 días	15	5	75%	25%	11.25	1.25
Mezcla 2-3	7 días	15	5	75%	25%	11.25	1.25

CILINDROS							
Muestras	Edad para prueba de rotura	Dosificación Base Kg/m ³		Proporción Fibras		Dosificación Mezcla Kg/m ³	
		Fibras de Acero	Fibras de PP	Fibras de Acero	Fibras de PP	Fibra de Acero	Fibra de PP
Mezcla 2-4	14 días	15	5	75%	25%	11.25	1.25
Mezcla 2-5	14 días	15	5	75%	25%	11.25	1.25
Mezcla 2-6	14 días	15	5	75%	25%	11.25	1.25
Mezcla 2-7	28 días	15	5	75%	25%	11.25	1.25
Mezcla 2-8	28 días	15	5	75%	25%	11.25	1.25
Mezcla 2-9	28 días	15	5	75%	25%	11.25	1.25
Mezcla 3-1	7 días	15	5	50%	50%	7.5	2.5
Mezcla 3-2	7 días	15	5	50%	50%	7.5	2.5
Mezcla 3-3	7 días	15	5	50%	50%	7.5	2.5
Mezcla 3-4	14 días	15	5	50%	50%	7.5	2.5
Mezcla 3-5	14 días	15	5	50%	50%	7.5	2.5
Mezcla 3-6	14 días	15	5	50%	50%	7.5	2.5
Mezcla 3-7	28 días	15	5	50%	50%	7.5	2.5
Mezcla 3-8	28 días	15	5	50%	50%	7.5	2.5
Mezcla 3-9	28 días	15	5	50%	50%	7.5	2.5
Mezcla 4-1	7 días	15	5	25%	75%	3.75	3.75
Mezcla 4-2	7 días	15	5	25%	75%	3.75	3.75
Mezcla 4-3	7 días	15	5	25%	75%	3.75	3.75
Mezcla 4-4	14 días	15	5	25%	75%	3.75	3.75
Mezcla 4-5	14 días	15	5	25%	75%	3.75	3.75
Mezcla 4-6	14 días	15	5	25%	75%	3.75	3.75
Mezcla 4-7	28 días	15	5	25%	75%	3.75	3.75
Mezcla 4-8	28 días	15	5	25%	75%	3.75	3.75
Mezcla 4-9	28 días	15	5	25%	75%	3.75	3.75
Mezcla 5-1	7 días	15	5	0%	100%	0	5
Mezcla 5-2	7 días	15	5	0%	100%	0	5
Mezcla 5-3	7 días	15	5	0%	100%	0	5
Mezcla 5-4	14 días	15	5	0%	100%	0	5
Mezcla 5-5	14 días	15	5	0%	100%	0	5
Mezcla 5-6	14 días	15	5	0%	100%	0	5
Mezcla 5-7	28 días	15	5	0%	100%	0	5
Mezcla 5-8	28 días	15	5	0%	100%	0	5
Mezcla 5-9	28 días	15	5	0%	100%	0	5
Mezcla 6-1	7 días	15	5	100%	100%	15	5
Mezcla 6-2	7 días	15	5	100%	100%	15	5
Mezcla 6-3	7 días	15	5	100%	100%	15	5
Mezcla 6-4	14 días	15	5	100%	100%	15	5
Mezcla 6-5	14 días	15	5	100%	100%	15	5
Mezcla 6-6	14 días	15	5	100%	100%	15	5
Mezcla 6-7	28 días	15	5	100%	100%	15	5
Mezcla 6-8	28 días	15	5	100%	100%	15	5
Mezcla 6-9	28 días	15	5	100%	100%	15	5
Mezcla 7-1	7 días	15	5	75%	75%	11.25	3.75
Mezcla 7-2	7 días	15	5	75%	75%	11.25	3.75

CILINDROS							
Muestras	Edad para prueba de rotura	Dosificación Base Kg/m ³		Proporción Fibras		Dosificación Mezcla Kg/m ³	
		Fibras de Acero	Fibras de PP	Fibras de Acero	Fibras de PP	Fibra de Acero	Fibra de PP
Mezcla 7-3	7 días	15	5	75%	75%	11.25	3.75
Mezcla 7-4	14 días	15	5	75%	75%	11.25	3.75
Mezcla 7-5	14 días	15	5	75%	75%	11.25	3.75
Mezcla 7-6	14 días	15	5	75%	75%	11.25	3.75
Mezcla 7-7	28 días	15	5	75%	75%	11.25	3.75
Mezcla 7-8	28 días	15	5	75%	75%	11.25	3.75
Mezcla 7-9	28 días	15	5	75%	75%	11.25	3.75

Tabla 2.14 Identificación de muestras para los cilindros

Fuente: Elaboración propia

- **Datos obtenidos del ensayo de tenacidad a la fractura:** Datos obtenidos tras realizar el ensayo de tenacidad a la fractura / absorción de energía según lo establecido por la EFNARC, para cada una de las placas.

El conjunto original de datos, obtenido a partir del ensayo de absorción de energía, estuvo conformado por aproximadamente 2000 puntos registrados a lo largo de la curva carga–deformación de cada una de las placas ensayadas. Sin embargo, para facilitar el procesamiento y la representación gráfica, estos datos fueron reducidos a 25 puntos representativos, sin pérdida de información relevante, conservando con precisión los valores clave como: la carga máxima registrada, la meseta postpico y la forma general de la curva.

La reducción de datos se realizó mediante un muestreo representativo no uniforme, que consistió en conservar los puntos críticos de la curva y aplicar un submuestreo uniforme en los segmentos intermedios. Este procedimiento permitió disminuir el número de puntos de 2000 a 25 sin afectar la forma general ni los valores característicos de la curva, manteniendo constante la energía total obtenida mediante el cálculo del área bajo la curva.

Dichos datos se presentan desde la Tabla 2.15 a la Tabla 2.38.

Mezcla A-1 (Patrón) 0% fibras de acero y 0% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.15
2	1.10	11.88
3	2.28	5.39
4	3.14	3.93
5	4.17	3.93
6	5.21	2.64
7	6.25	1.19
8	7.30	0.77
9	8.34	0.32
10	9.38	0.15
11	10.42	0.09
12	11.46	0.00
13	12.50	0.00
14	13.55	0.00
15	14.59	0.00
16	15.63	0.00
17	16.67	0.00
18	17.71	0.00
19	18.75	0.00
20	19.79	0.00
21	20.83	0.00
22	21.87	0.00
23	22.91	0.00
24	23.95	0.00
25	25.00	0.00

Tabla 2.15 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Patrón A-1

Fuente: Elaboración propia

Mezcla A-2 (Patrón) 0% fibras de acero y 0% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.26
2	1.10	10.33
3	2.28	6.57
4	3.14	5.02
5	4.17	3.16
6	5.21	1.73
7	6.25	1.36
8	7.30	1.09
9	8.34	0.91
10	9.38	0.67
11	10.42	0.67
12	11.46	0.67
13	12.50	0.51
14	13.55	0.50

Mezcla A-2 (Patrón) 0% fibras de acero y 0% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
15	14.59	0.46
16	15.63	0.46
17	16.67	0.40
18	17.71	0.40
19	18.75	0.40
20	19.79	0.40
21	20.83	0.40
22	21.87	0.40
23	22.91	0.40
24	23.95	0.40
25	25.00	0.40

Tabla 2.16 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Patrón A-2

Fuente: Elaboración propia

Mezcla A-3 (Patrón) 0% fibras de acero y 0% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.22
2	1.10	11.65
3	2.28	6.13
4	3.14	4.48
5	4.17	3.52
6	5.21	1.93
7	6.25	1.27
8	7.30	0.93
9	8.34	0.58
10	9.38	0.46
11	10.42	0.38
12	11.46	0.34
13	12.50	0.26
14	13.55	0.23
15	14.59	0.23
16	15.63	0.23
17	16.67	0.20
18	17.71	0.20
19	18.75	0.20
20	19.79	0.20
21	20.83	0.20
22	21.87	0.20
23	22.91	0.20
24	23.95	0.20
25	25.00	0.20

Tabla 2.17 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Patrón A-3

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 1-1 100% fibras de acero y 0% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.05	8.11
3	2.09	12.70
4	3.13	16.48
5	4.17	20.11
6	5.21	23.75
7	6.25	27.22
8	7.30	30.46
9	8.34	29.18
10	9.38	27.92
11	10.42	26.63
12	11.46	26.30
13	12.50	26.08
14	13.55	25.50
15	14.59	25.38
16	15.66	26.48
17	16.68	26.47
18	17.71	25.87
19	18.77	24.89
20	19.80	24.01
21	20.84	23.22
22	21.90	22.85
23	22.92	22.76
24	23.97	22.51
25	25.00	21.96

Tabla 2.18 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 1-1

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 1-2 100% fibras de acero y 0% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.05	11.64
3	2.09	15.27
4	3.13	16.85
5	4.17	19.26
6	5.21	21.53
7	6.25	23.83
8	7.30	25.90
9	8.34	24.95
10	9.38	24.19
11	10.42	23.30
12	11.46	23.01
13	12.50	22.62
14	13.55	22.12

Mezcla 1-2 100% fibras de acero y 0% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
15	14.59	22.05
16	15.66	22.60
17	16.68	22.51
18	17.71	22.16
19	18.77	21.46
20	19.80	20.87
21	20.84	20.32
22	21.90	20.02
23	22.92	19.94
24	23.97	19.74
25	25.00	19.42

Tabla 2.19 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 1-2

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 1-3 100% fibras de acero y 0% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.05	16.93
3	2.09	19.12
4	3.13	17.40
5	4.17	17.98
6	5.21	18.21
7	6.25	18.75
8	7.30	19.06
9	8.34	18.62
10	9.38	18.58
11	10.42	18.30
12	11.46	18.07
13	12.50	17.44
14	13.55	17.06
15	14.59	17.06
16	15.66	16.79
17	16.68	16.56
18	17.71	16.59
19	18.77	16.30
20	19.80	16.16
21	20.84	15.98
22	21.90	15.79
23	22.92	15.71
24	23.97	15.59
25	25.00	15.62

Tabla 2.20 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 1-3

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 2-1 75% fibras de acero y 25% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.10	3.13
3	2.09	7.40
4	3.13	11.17
5	4.17	15.46
6	5.21	17.94
7	6.25	17.33
8	7.30	17.12
9	8.34	16.88
10	9.38	16.97
11	10.42	16.74
12	11.46	16.66
13	12.50	16.13
14	13.55	16.02
15	14.59	15.52
16	15.63	15.49
17	16.67	15.20
18	17.71	14.90
19	18.76	14.49
20	19.80	14.13
21	20.84	14.14
22	21.88	14.02
23	22.92	13.85
24	23.96	13.72
25	25.00	13.69

Tabla 2.21 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 2-1

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 2-2 75% fibras de acero y 25% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.10	6.41
3	2.09	10.17
4	3.13	14.17
5	4.17	18.18
6	5.21	22.47
7	6.25	19.51
8	7.30	19.83
9	8.34	19.42
10	9.38	19.24
11	10.42	18.30
12	11.46	16.99
13	12.50	16.38
14	13.55	16.53
15	14.59	16.42

Mezcla 2-2 75% fibras de acero y 25% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
16	15.63	16.29
17	16.67	15.92
18	17.71	15.82
19	18.76	15.54
20	19.80	15.14
21	20.84	14.70
22	21.88	14.25
23	22.92	13.73
24	23.96	13.40
25	25.00	13.17

Tabla 2.22 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 2-2

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 2-3 75% fibras de acero y 25% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.04
2	1.10	11.38
3	2.09	19.30
4	3.13	17.19
5	4.17	17.52
6	5.21	17.97
7	6.25	17.62
8	7.30	17.53
9	8.34	17.02
10	9.38	16.53
11	10.42	16.28
12	11.46	15.77
13	12.50	15.42
14	13.55	15.19
15	14.59	14.72
16	15.63	14.51
17	16.67	14.11
18	17.71	13.86
19	18.76	13.88
20	19.80	13.69
21	20.84	13.81
22	21.88	13.23
23	22.92	13.51
24	23.96	13.65
25	25.00	13.78

Tabla 2.23 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 2-3

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 3-1 50% fibras de acero y 50% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.96
2	1.04	9.68
3	2.08	15.34
4	3.11	21.38
5	4.16	24.63
6	5.18	24.58
7	6.22	23.78
8	7.27	23.17
9	8.29	22.51
10	9.33	21.78
11	10.36	21.11
12	11.40	19.78
13	12.43	19.45
14	13.47	18.73
15	14.51	18.72
16	15.54	19.02
17	16.60	18.90
18	17.62	18.15
19	18.66	17.75
20	19.70	17.77
21	20.73	17.76
22	21.77	17.84
23	22.80	17.71
24	23.83	17.34
25	25.00	16.97

Tabla 2.24 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 3-1

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 3-2 50% fibras de acero y 50% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.88
2	1.04	15.51
3	2.08	18.48
4	3.11	22.68
5	4.16	23.39
6	5.18	23.24
7	6.22	22.55
8	7.27	21.98
9	8.29	21.29
10	9.33	20.74
11	10.36	20.22
12	11.40	19.37
13	12.43	19.01
14	13.47	18.45

Mezcla 3-2 50% fibras de acero y 50% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
15	14.51	18.43
16	15.54	18.75
17	16.60	18.45
18	17.62	17.86
19	18.66	17.51
20	19.70	17.43
21	20.73	17.31
22	21.77	17.29
23	22.80	17.18
24	23.83	17.10
25	25.00	16.79

Tabla 2.25 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 3-2

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 3-3 50% fibras de acero y 50% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.76
2	1.04	24.27
3	2.08	23.18
4	3.11	24.64
5	4.16	21.54
6	5.18	21.22
7	6.22	20.70
8	7.27	20.20
9	8.29	19.46
10	9.33	19.18
11	10.36	18.89
12	11.40	18.77
13	12.43	18.34
14	13.47	18.03
15	14.51	17.99
16	15.54	18.33
17	16.60	17.77
18	17.62	17.43
19	18.66	17.16
20	19.70	16.93
21	20.73	16.64
22	21.77	16.47
23	22.80	16.38
24	23.83	16.73
25	25.00	16.52

Tabla 2.26 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 3-3

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 4-1 25% fibras de acero y 75% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.05	16.03
3	2.09	17.25
4	3.13	21.91
5	4.17	25.23
6	5.21	26.04
7	6.25	25.31
8	7.29	24.34
9	8.33	23.84
10	9.37	22.32
11	10.41	21.28
12	11.46	20.57
13	12.49	20.69
14	13.54	20.34
15	14.58	20.34
16	15.62	20.36
17	16.66	20.00
18	17.70	19.25
19	18.74	18.91
20	19.79	18.05
21	20.82	18.05
22	21.87	17.99
23	22.91	17.28
24	23.95	17.54
25	25.00	16.93

Tabla 2.27 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 4-1

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 4-2 25% fibras de acero y 75% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.05	16.00
3	2.09	33.45
4	3.13	29.38
5	4.17	25.09
6	5.21	24.46
7	6.25	23.68
8	7.29	22.56
9	8.33	21.24
10	9.37	20.86
11	10.41	20.66
12	11.46	20.18
13	12.49	19.90
14	13.54	19.14

Mezcla 4-2 25% fibras de acero y 75% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
15	14.58	19.60
16	15.62	18.65
17	16.66	17.81
18	17.70	17.11
19	18.74	16.46
20	19.79	16.20
21	20.82	16.02
22	21.87	15.49
23	22.91	15.18
24	23.95	14.33
25	25.00	14.25

Tabla 2.28 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 4-2

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 4-3 25% fibras de acero y 75% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.05	24.67
3	2.09	24.47
4	3.13	26.17
5	4.17	25.23
6	5.21	23.47
7	6.25	22.16
8	7.29	20.59
9	8.33	19.67
10	9.37	17.95
11	10.41	17.55
12	11.46	16.53
13	12.49	16.41
14	13.54	16.03
15	14.58	15.95
16	15.62	16.91
17	16.66	16.20
18	17.70	16.17
19	18.74	16.54
20	19.79	15.85
21	20.82	15.00
22	21.87	14.70
23	22.91	15.05
24	23.95	15.68
25	25.00	16.68

Tabla 2.29 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 4-3

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 5-1 0% fibras de acero y 100% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.05	10.04
3	2.12	16.86
4	3.13	10.32
5	4.17	11.80
6	5.21	10.66
7	6.25	9.84
8	7.30	9.11
9	8.34	8.82
10	9.38	8.57
11	10.42	7.85
12	11.48	7.27
13	12.50	7.29
14	13.55	6.95
15	14.60	7.16
16	15.64	6.81
17	16.67	7.08
18	17.72	6.75
19	18.76	6.54
20	19.82	5.85
21	20.84	5.90
22	21.90	5.24
23	22.93	4.68
24	23.96	4.97
25	25.00	5.14

Tabla 2.30 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 5-1

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 5-2 0% fibras de acero y 100% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.05	15.17
3	2.12	18.96
4	3.13	16.09
5	4.17	15.68
6	5.21	14.07
7	6.25	12.89
8	7.30	12.43
9	8.34	11.68
10	9.38	11.22
11	10.42	10.54
12	11.48	10.77
13	12.50	10.53
14	13.55	10.12

Mezcla 5-2 0% fibras de acero y 100% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
15	14.60	9.96
16	15.64	9.74
17	16.67	9.59
18	17.72	9.31
19	18.76	9.52
20	19.82	8.83
21	20.84	8.67
22	21.90	7.89
23	22.93	7.90
24	23.96	8.22
25	25.00	8.13

Tabla 2.31 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 5-2

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 5-3 0% fibras de acero y 100% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.05	18.59
3	2.12	20.36
4	3.13	19.93
5	4.17	18.27
6	5.21	16.34
7	6.25	14.92
8	7.30	14.65
9	8.34	13.58
10	9.38	12.99
11	10.42	12.33
12	11.48	13.11
13	12.50	12.69
14	13.55	12.23
15	14.60	11.83
16	15.64	11.70
17	16.67	11.27
18	17.72	11.01
19	18.76	11.51
20	19.82	10.81
21	20.84	10.51
22	21.90	9.65
23	22.93	10.05
24	23.96	10.38
25	25.00	10.12

Tabla 2.32 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 5-3

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 6-1 100% fibras de acero y 100% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.05	20.73
3	2.09	33.52
4	3.14	35.75
5	4.17	30.57
6	5.21	30.50
7	6.25	31.03
8	7.30	30.95
9	8.34	30.69
10	9.38	30.95
11	10.43	30.14
12	11.46	29.25
13	12.50	28.48
14	13.56	27.69
15	14.59	27.00
16	15.64	26.62
17	16.67	26.15
18	17.71	25.24
19	18.75	24.53
20	19.81	23.93
21	20.85	23.15
22	21.88	22.88
23	22.92	22.83
24	23.97	21.46
25	25.00	20.91

Tabla 2.33 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 6-1

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 6-2 100% fibras de acero y 100% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	2.02
2	1.05	27.55
3	2.09	37.74
4	3.14	38.70
5	4.17	38.49
6	5.21	38.13
7	6.25	37.22
8	7.30	36.27
9	8.34	35.17
10	9.38	34.45
11	10.43	33.00
12	11.46	31.67
13	12.50	30.69
14	13.56	29.74

Mezcla 6-2 100% fibras de acero y 100% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
15	14.59	28.85
16	15.64	27.73
17	16.67	26.83
18	17.71	26.00
19	18.75	25.04
20	19.81	24.35
21	20.85	23.24
22	21.88	22.82
23	22.92	22.11
24	23.97	21.24
25	25.00	20.45

Tabla 2.34 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 6-2

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 6-3 100% fibras de acero y 100% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.05	27.62
3	2.09	29.68
4	3.14	28.13
5	4.17	28.32
6	5.21	27.08
7	6.25	26.31
8	7.30	25.69
9	8.34	24.74
10	9.38	24.73
11	10.43	23.85
12	11.46	23.42
13	12.50	22.78
14	13.56	22.64
15	14.59	22.14
16	15.64	21.59
17	16.67	21.09
18	17.71	20.50
19	18.75	20.09
20	19.81	19.10
21	20.85	18.59
22	21.88	18.10
23	22.92	17.78
24	23.97	16.85
25	25.00	16.71

Tabla 2.35 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 6-3

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 7-1 75% fibras de acero y 75% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.23
2	1.04	15.76
3	2.08	24.17
4	3.12	28.09
5	4.16	30.75
6	5.20	33.19
7	6.24	30.44
8	7.28	30.10
9	8.32	30.17
10	9.36	28.93
11	10.40	27.96
12	11.44	27.28
13	12.48	25.91
14	13.51	25.21
15	14.56	24.48
16	15.59	24.16
17	16.63	23.00
18	17.68	22.50
19	18.72	21.85
20	19.75	21.02
21	20.79	20.43
22	21.83	19.81
23	22.87	19.72
24	23.91	19.34
25	25.00	18.78

Tabla 2.36 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 7-1

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 7-2 75% fibras de acero y 75% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.18
2	1.04	16.60
3	2.08	23.73
4	3.12	28.24
5	4.16	30.72
6	5.20	33.54
7	6.24	31.20
8	7.28	31.00
9	8.32	31.04
10	9.36	29.89
11	10.40	28.90
12	11.44	28.23
13	12.48	26.97
14	13.51	26.41

Mezcla 7-2 75% fibras de acero y 75% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
15	14.56	25.72
16	15.59	25.35
17	16.63	24.24
18	17.68	23.72
19	18.72	23.21
20	19.75	22.32
21	20.79	21.77
22	21.83	21.17
23	22.87	20.95
24	23.91	20.63
25	25.00	20.24

Tabla 2.37 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 7-2

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 7-3 75% fibras de acero y 75% fibras de PP		
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada (kN)
1	0.00	0.00
2	1.04	19.96
3	2.08	21.96
4	3.12	28.82
5	4.16	30.60
6	5.20	34.93
7	6.24	34.22
8	7.28	34.60
9	8.32	34.51
10	9.36	33.74
11	10.40	32.68
12	11.44	32.05
13	12.48	31.20
14	13.51	31.19
15	14.56	30.69
16	15.59	30.10
17	16.63	29.19
18	17.68	28.61
19	18.72	28.64
20	19.75	27.52
21	20.79	27.14
22	21.83	26.63
23	22.87	25.86
24	23.91	25.81
25	25.00	26.08

Tabla 2.38 Resultados de ensayo de tenacidad a la fractura de la muestra: Mezcla 7-3

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de la tenacidad total a la fractura: A partir de los datos obtenidos de carga aplicada y deformación, se determinaron los valores promedio de carga aplicada para cada mezcla, utilizando los datos de las tres probetas ensayadas. Se realizó el cálculo de la energía absorbida total de todas las mezclas, considerando que, en el caso de la Mezcla 2, se excluyó la muestra 2-3 por presentar datos atípicos en relación con las demás probetas del mismo lote.

Durante el ensayo de tenacidad, la energía proveniente de la carga aplicada es absorbida por la placa y almacenada como energía potencial elástica en la matriz del hormigón. Dicha energía es liberada una vez que la carga es retirada. Cuando el material supera su límite elástico, la energía se transforma en energía de deformación plástica a medida que se generan y propagan las fisuras. Una parte de esta energía ocasiona daños en la matriz del hormigón (micro fisuración), mientras que otra parte es absorbida por los mecanismos de refuerzo y se disipa en forma de calor, lo que contribuye a evitar una falla repentina del material.

En el caso del hormigón convencional, este proceso generalmente culmina en una falla brusca, con una escasa absorción de energía. En cambio, en el hormigón reforzado con fibras, estas actúan deteniendo la propagación de fisuras y la generación de grietas, disipando energía y aumentando significativamente la tenacidad del material.

La tenacidad total del material (energía absorbida total) corresponde a la suma de la energía de deformación plástica y de la energía potencial elástica, la cual se determina a partir del área bajo la curva de carga vs deformación. Esta energía es calculada mediante la sumatoria acumulativa de las áreas de los trapecios formados entre cada intervalo de deformación, hasta alcanzar el punto de falla o una deformación objetivo. Los valores de carga aplicada promedio y energía absorbida acumulada de todas las mezclas ensayadas, se presentan desde la Tabla 2.39 a la Tabla 2.46.

Mezcla A (Patrón) 0% fibras de acero y 0% fibras de PP				
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada promedio (kN)	Energía Absorbida parcial (N·m)	Energía Absorbida acumulada (N·m)
1	0.00	0.21	---	0.00
2	1.10	11.29	6.34	6.34
3	2.28	6.03	10.22	16.56
4	3.14	4.48	4.48	21.04
5	4.17	3.54	4.14	25.18
6	5.21	2.10	2.93	28.11

Mezcla A (Patrón)				
0% fibras de acero y 0% fibras de PP				
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada promedio (kN)	Energía Absorbida parcial (N·m)	Energía Absorbida acumulada (N·m)
7	6.25	1.27	1.75	29.87
8	7.30	0.93	1.16	31.02
9	8.34	0.60	0.79	31.82
10	9.38	0.43	0.54	32.35
11	10.42	0.38	0.42	32.78
12	11.46	0.34	0.37	33.15
13	12.50	0.26	0.31	33.46
14	13.55	0.24	0.26	33.72
15	14.59	0.23	0.25	33.96
16	15.63	0.23	0.24	34.20
17	16.67	0.20	0.22	34.43
18	17.71	0.20	0.21	34.63
19	18.75	0.20	0.21	34.84
20	19.79	0.20	0.21	35.05
21	20.83	0.20	0.21	35.26
22	21.87	0.20	0.21	35.47
23	22.91	0.20	0.21	35.68
24	23.95	0.20	0.21	35.88
25	25.00	0.20	0.21	36.09

Tabla 2.39 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla A

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 1				
100% fibras de acero y 0% fibras de PP				
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada promedio (kN)	Energía Absorbida parcial (N·m)	Energía Absorbida acumulada (N·m)
1	0.00	0.00	---	0.00
2	1.05	12.23	6.42	6.42
3	2.09	15.70	14.52	20.94
4	3.13	16.91	16.96	37.89
5	4.17	19.12	18.73	56.63
6	5.21	21.16	20.95	77.57
7	6.25	23.27	23.10	100.68
8	7.30	25.14	25.41	126.09
9	8.34	24.25	25.68	151.77
10	9.38	23.56	24.86	176.64
11	10.42	22.74	24.08	200.72
12	11.46	22.46	23.51	224.22
13	12.50	22.05	23.14	247.37
14	13.55	21.56	22.97	270.33
15	14.59	21.50	22.32	292.65
16	15.66	21.96	23.18	315.82

Mezcla 1				
100% fibras de acero y 0% fibras de PP				
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada promedio (kN)	Energía Absorbida parcial (N·m)	Energía Absorbida acumulada (N·m)
17	16.68	21.85	22.41	338.24
18	17.71	21.54	22.34	360.58
19	18.77	20.88	22.41	383.00
20	19.80	20.35	21.30	404.30
21	20.84	19.84	20.90	425.19
22	21.90	19.55	20.81	446.01
23	22.92	19.47	20.03	466.04
24	23.97	19.28	20.28	486.32
25	25.00	19.00	19.71	506.03

Tabla 2.40 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 1

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 2				
75% fibras de acero y 25% fibras de PP				
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada promedio (kN)	Energía Absorbida parcial (N·m)	Energía Absorbida acumulada (N·m)
1	0.00	0.00	---	0.00
2	1.10	4.77	2.62	2.62
3	2.09	8.79	6.71	9.33
4	3.13	12.67	11.16	20.49
5	4.17	16.82	15.33	35.82
6	5.21	20.21	19.25	55.08
7	6.25	18.42	20.09	75.16
8	7.30	18.48	19.37	94.53
9	8.34	18.15	19.05	113.58
10	9.38	18.11	18.85	132.43
11	10.42	17.52	18.53	150.96
12	11.46	16.83	17.86	168.81
13	12.50	16.26	17.20	186.02
14	13.55	16.28	17.08	203.09
15	14.59	15.97	16.77	219.86
16	15.63	15.89	16.57	236.43
17	16.67	15.56	16.35	252.78
18	17.71	15.36	16.08	268.86
19	18.76	15.02	15.87	284.73
20	19.80	14.64	15.49	300.22
21	20.84	14.42	15.11	315.33
22	21.88	14.14	14.85	330.18
23	22.92	13.79	14.52	344.70
24	23.96	13.56	14.22	358.92
25	25.00	13.43	14.03	372.96

Tabla 2.41 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 2

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 3 50% fibras de acero y 50% fibras de PP				
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada promedio (kN)	Energía Absorbida parcial (N·m)	Energía Absorbida acumulada (N·m)
1	0.00	0.87	---	0.00
2	1.04	16.49	9.02	9.02
3	2.08	19.00	18.45	27.48
4	3.11	22.90	21.58	49.06
5	4.16	23.19	24.12	73.17
6	5.18	23.01	23.72	96.89
7	6.22	22.34	23.51	120.40
8	7.27	21.78	23.09	143.49
9	8.29	21.09	21.94	165.43
10	9.33	20.57	21.73	187.16
11	10.36	20.07	20.86	208.02
12	11.40	19.31	20.54	228.56
13	12.43	18.93	19.63	248.19
14	13.47	18.40	19.42	267.61
15	14.51	18.38	19.13	286.73
16	15.54	18.70	19.10	305.83
17	16.60	18.37	19.59	325.42
18	17.62	17.81	18.58	343.99
19	18.66	17.47	18.23	362.23
20	19.70	17.38	18.18	380.41
21	20.73	17.24	17.77	398.17
22	21.77	17.20	17.91	416.08
23	22.80	17.09	17.66	433.74
24	23.83	17.06	17.64	451.38
25	25.00	16.76	19.78	471.16

Tabla 2.42 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 3

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 4 25% fibras de acero y 75% fibras de PP				
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada promedio (kN)	Energía Absorbida parcial (N·m)	Energía Absorbida acumulada (N·m)
1	0.00	0.00	---	0.00
2	1.05	18.90	9.89	9.89
3	2.09	25.06	22.93	32.82
4	3.13	25.82	26.37	59.19
5	4.17	25.18	26.52	85.71
6	5.21	24.66	25.92	111.63
7	6.25	23.72	25.23	136.87
8	7.29	22.50	24.11	160.97
9	8.33	21.58	22.92	183.90
10	9.37	20.38	21.82	205.71

Mezcla 4				
25% fibras de acero y 75% fibras de PP				
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada promedio (kN)	Energía Absorbida parcial (N·m)	Energía Absorbida acumulada (N·m)
11	10.41	19.83	20.91	226.62
12	11.46	19.09	20.31	246.93
13	12.49	19.00	19.75	266.67
14	13.54	18.50	19.63	286.30
15	14.58	18.63	19.25	305.55
16	15.62	18.64	19.38	324.93
17	16.66	18.00	19.05	343.98
18	17.70	17.51	18.53	362.51
19	18.74	17.30	18.04	380.55
20	19.79	16.70	17.91	398.46
21	20.82	16.36	17.08	415.54
22	21.87	16.06	16.91	432.45
23	22.91	15.84	16.69	449.14
24	23.95	15.85	16.42	465.57
25	25.00	15.95	16.70	482.26

Tabla 2.43 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 4

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 5				
0% fibras de acero y 100% fibras de PP				
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada promedio (kN)	Energía Absorbida parcial (N·m)	Energía Absorbida acumulada (N·m)
1	0.00	0.00	---	0.00
2	1.05	14.60	7.69	7.69
3	2.12	18.73	17.83	25.52
4	3.13	15.45	17.20	42.72
5	4.17	15.25	15.96	58.68
6	5.21	13.69	15.05	73.73
7	6.25	12.55	13.64	87.38
8	7.30	12.06	12.92	100.30
9	8.34	11.36	12.18	112.48
10	9.38	10.93	11.59	124.07
11	10.42	10.24	11.01	135.07
12	11.48	10.38	10.90	145.97
13	12.50	10.17	10.52	156.49
14	13.55	9.77	10.47	166.95
15	14.60	9.65	10.16	177.11
16	15.64	9.42	9.95	187.06
17	16.67	9.31	9.65	196.71
18	17.72	9.02	9.60	206.30
19	18.76	9.19	9.50	215.80
20	19.82	8.50	9.34	225.15

Mezcla 5				
0% fibras de acero y 100% fibras de PP				
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada promedio (kN)	Energía Absorbida parcial (N·m)	Energía Absorbida acumulada (N·m)
21	20.84	8.36	8.62	233.77
22	21.90	7.59	8.43	242.20
23	22.93	7.54	7.82	250.02
24	23.96	7.86	7.93	257.95
25	25.00	7.80	8.14	266.09

Tabla 2.44 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 5

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 6				
100% fibras de acero y 100% fibras de PP				
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada promedio (kN)	Energía Absorbida parcial (N·m)	Energía Absorbida acumulada (N·m)
1	0.00	0.67	---	0.00
2	1.05	25.30	13.64	13.64
3	2.09	33.65	30.75	44.39
4	3.14	34.19	35.39	79.78
5	4.17	32.46	34.55	114.33
6	5.21	31.90	33.47	147.79
7	6.25	31.52	32.98	180.77
8	7.30	30.97	32.81	213.58
9	8.34	30.20	31.71	245.29
10	9.38	30.04	31.43	276.71
11	10.43	29.00	30.80	307.51
12	11.46	28.11	29.60	337.12
13	12.50	27.32	28.73	365.85
14	13.56	26.69	28.53	394.38
15	14.59	26.00	27.31	421.69
16	15.64	25.31	26.94	448.63
17	16.67	24.69	25.75	474.38
18	17.71	23.91	25.19	499.57
19	18.75	23.22	24.51	524.08
20	19.81	22.46	24.21	548.29
21	20.85	21.66	22.87	571.16
22	21.88	21.27	22.25	593.41
23	22.92	20.91	21.86	615.27
24	23.97	19.85	21.33	636.60
25	25.00	19.36	20.26	656.86

Tabla 2.45 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 6

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 7 75% fibras de acero y 75% fibras de PP				
N.-	Deformación (mm)	Carga Aplicada promedio (kN)	Energía Absorbida parcial (N·m)	Energía Absorbida acumulada (N·m)
1	0.00	0.14	---	0.00
2	1.04	17.44	9.17	9.17
3	2.08	23.29	21.18	30.35
4	3.12	28.38	26.87	57.22
5	4.16	30.69	30.52	87.74
6	5.20	33.89	33.58	121.32
7	6.24	31.95	34.24	155.55
8	7.28	31.90	33.42	188.97
9	8.32	31.91	32.97	221.94
10	9.36	30.85	32.84	254.78
11	10.40	29.85	31.46	286.24
12	11.44	29.19	30.70	316.94
13	12.48	28.03	29.66	346.60
14	13.51	27.60	28.83	375.43
15	14.56	26.96	28.56	403.99
16	15.59	26.54	27.64	431.63
17	16.63	25.48	27.05	458.68
18	17.68	24.94	26.30	484.98
19	18.72	24.57	25.83	510.81
20	19.75	23.62	24.90	535.70
21	20.79	23.11	24.22	559.93
22	21.83	22.54	23.66	583.59
23	22.87	22.18	23.40	606.99
24	23.91	21.93	22.93	629.92
25	25.00	21.70	23.70	653.63

Tabla 2.46 Cargas aplicadas promedio y energía absorbida total de la Mezcla 7

Fuente: Elaboración propia

- **Resultados de ensayos complementarios.**

Trabajabilidad: Resultados del ensayo de trabajabilidad (asentamiento) del hormigón, realizado para cada una de las placas y cilindros, en el cual se mide la diferencia entre la altura del cono de Abrams y la altura del hormigón desplazado.

Para los valores de asentamiento obtenidos en las mezclas, se permite una tolerancia de +/-4mm respecto al asentamiento de diseño de 21cm, conforme a lo establecido en la norma NTE INEN 1855-2. Ver Tabla 2.47.

N.-	Muestras	Asentamiento (cm)
1	Mezcla A-1	21
2	Mezcla A-2	21
3	Mezcla A-3	22
4	Mezcla 1-1	20
5	Mezcla 1-2	20
6	Mezcla 1-3	21
7	Mezcla 2-1	21
8	Mezcla 2-2	20
9	Mezcla 2-3	21
10	Mezcla 3-1	21
11	Mezcla 3-2	21
12	Mezcla 3-3	20
13	Mezcla 4-1	20
14	Mezcla 4-2	20
15	Mezcla 4-3	19
16	Mezcla 5-1	19
17	Mezcla 5-2	19
18	Mezcla 5-3	20
19	Mezcla 6-1	17
20	Mezcla 6-2	17
21	Mezcla 6-3	18
22	Mezcla 7-1	18
23	Mezcla 7-2	18
24	Mezcla 7-3	19

Tabla 2.47 Resultados del ensayo de Trabajabilidad

Fuente: Elaboración propia

Resistencia a compresión: Resultados del ensayo a la compresión para cada uno de los cilindros, según la edad de rotura (7,14,28 días). Para un hormigón diseñado con una resistencia a la compresión de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días, se estima alcanzar aproximadamente el 60% de dicha resistencia a los 7 días y alrededor del 85% a los 14 días. Asimismo, se permite una variación en la resistencia de los cilindros individuales de hasta un 10.6 % respecto al valor esperado, en función de la edad del hormigón, de conformidad a lo establecido en la norma NTE INEN 1573. Ver Tabla 2.48.

N.-	Muestras	Resistencia esperada (kg/cm ²)	Variación (kg/cm ²)	Edad de rotura cilindro	Fuerza (kN)	Resistencia obtenida (kg/cm ²)
1	Mezcla A-1	126.00	13.36	7 días	89.88	114.44
2	Mezcla A-2	126.00	13.36	7 días	90.34	115.02
3	Mezcla A-3	126.00	13.36	7 días	113.44	144.44
4	Mezcla A-4	178.50	18.92	14 días	127.09	161.82
5	Mezcla A-5	178.50	18.92	14 días	122.94	156.53
6	Mezcla A-6	178.50	18.92	14 días	140.96	179.48
7	Mezcla A-7	210.00	22.26	28 días	158.57	201.90
8	Mezcla A-8	210.00	22.26	28 días	158.05	201.24
9	Mezcla A-9	210.00	22.26	28 días	167.95	213.84
10	Mezcla 1-1	126.00	13.36	7 días	106.82	136.01
11	Mezcla 1-2	126.00	13.36	7 días	99.84	127.12
12	Mezcla 1-3	126.00	13.36	7 días	103.33	131.56
13	Mezcla 1-4	178.50	18.92	14 días	127.73	162.63
14	Mezcla 1-5	178.50	18.92	14 días	124.22	158.16
15	Mezcla 1-6	178.50	18.92	14 días	137.14	174.61
16	Mezcla 1-7	210.00	22.26	28 días	163.24	207.84
17	Mezcla 1-8	210.00	22.26	28 días	153.84	195.87
18	Mezcla 1-9	210.00	22.26	28 días	153.42	195.34
19	Mezcla 2-1	126.00	13.36	7 días	101.21	128.86
20	Mezcla 2-2	126.00	13.36	7 días	104.68	133.28
21	Mezcla 2-3	126.00	13.36	7 días	95.23	121.25
22	Mezcla 2-4	178.50	18.92	14 días	86.60	110.26
23	Mezcla 2-5	178.50	18.92	14 días	156.37	199.10
24	Mezcla 2-6	178.50	18.92	14 días	126.93	161.61
25	Mezcla 2-7	210.00	22.26	28 días	149.21	189.98
26	Mezcla 2-8	210.00	22.26	28 días	130.26	165.85
27	Mezcla 2-9	210.00	22.26	28 días	179.02	227.93
28	Mezcla 3-1	126.00	13.36	7 días	93.13	118.58
29	Mezcla 3-2	126.00	13.36	7 días	122.89	156.47
30	Mezcla 3-3	126.00	13.36	7 días	116.75	148.65
31	Mezcla 3-4	178.50	18.92	14 días	115.82	147.47
32	Mezcla 3-5	178.50	18.92	14 días	145.38	185.10
33	Mezcla 3-6	178.50	18.92	14 días	148.81	189.47
34	Mezcla 3-7	210.00	22.26	28 días	120.26	153.12
35	Mezcla 3-8	210.00	22.26	28 días	135.74	172.83
36	Mezcla 3-9	210.00	22.26	28 días	172.41	219.52
37	Mezcla 4-1	126.00	13.36	7 días	102.63	130.67
38	Mezcla 4-2	126.00	13.36	7 días	113.06	143.95

N.-	Muestras	Resistencia esperada (kg/cm ²)	Variación (kg/cm ²)	Edad de rotura cilindro	Fuerza (kN)	Resistencia obtenida (kg/cm ²)
39	Mezcla 4-3	126.00	13.36	7 días	100.59	128.07
40	Mezcla 4-4	178.50	18.92	14 días	99.82	127.09
41	Mezcla 4-5	178.50	18.92	14 días	144.88	184.47
42	Mezcla 4-6	178.50	18.92	14 días	102.84	130.94
43	Mezcla 4-7	210.00	22.26	28 días	180.00	229.18
44	Mezcla 4-8	210.00	22.26	28 días	183.43	233.55
45	Mezcla 4-9	210.00	22.26	28 días	177.95	226.57
46	Mezcla 5-1	126.00	13.36	7 días	115.75	147.38
47	Mezcla 5-2	126.00	13.36	7 días	112.53	143.28
48	Mezcla 5-3	126.00	13.36	7 días	101.43	129.14
49	Mezcla 5-4	178.50	18.92	14 días	149.81	190.74
50	Mezcla 5-5	178.50	18.92	14 días	119.33	151.94
51	Mezcla 5-6	178.50	18.92	14 días	123.80	157.63
52	Mezcla 5-7	210.00	22.26	28 días	162.62	207.05
53	Mezcla 5-8	210.00	22.26	28 días	160.62	204.51
54	Mezcla 5-9	210.00	22.26	28 días	168.75	214.86
55	Mezcla 6-1	126.00	13.36	7 días	116.60	148.46
56	Mezcla 6-2	126.00	13.36	7 días	103.27	131.49
57	Mezcla 6-3	126.00	13.36	7 días	112.39	143.10
58	Mezcla 6-4	178.50	18.92	14 días	139.01	176.99
59	Mezcla 6-5	178.50	18.92	14 días	107.84	137.31
60	Mezcla 6-6	178.50	18.92	14 días	121.43	154.61
61	Mezcla 6-7	210.00	22.26	28 días	165.00	210.08
62	Mezcla 6-8	210.00	22.26	28 días	148.16	188.64
63	Mezcla 6-9	210.00	22.26	28 días	171.87	218.83
64	Mezcla 7-1	126.00	13.36	7 días	139.84	178.05
65	Mezcla 7-2	126.00	13.36	7 días	145.20	184.87
66	Mezcla 7-3	126.00	13.36	7 días	130.38	166.00
67	Mezcla 7-4	178.50	18.92	14 días	134.16	170.82
68	Mezcla 7-5	178.50	18.92	14 días	137.83	175.49
69	Mezcla 7-6	178.50	18.92	14 días	174.15	221.73
70	Mezcla 7-7	210.00	22.26	28 días	200.34	255.08
71	Mezcla 7-8	210.00	22.26	28 días	197.40	251.34
72	Mezcla 7-9	210.00	22.26	28 días	210.10	267.51

Tabla 2.48 Resultados de ensayo de resistencia a la compresión a diferentes edades.

Fuente: Elaboración propia

Se descartaron algunos valores de fuerza y resistencia (marcados con rojo), por presentar incongruencias evidentes respecto al resto del lote. Esto puede ser por diferentes motivos entre los más comunes están: acabado de caras, alineación en la prensa o detención del ensayo de manera pronta.

Considerando que el diseño de las mezclas se realizó para una resistencia a la compresión $f'c=210\text{kg/cm}^2$, se observa que la mayoría de las muestras se encuentran dentro del rango permitido, y en algunos casos se logra superar la resistencia de diseño establecida.

2.6 Solución a diseñar

La mezcla óptima (solución propuesta) consiste en definir una mezcla de hormigón con un determinado porcentaje de fibras de acero y polipropileno, que ofrezca el mejor equilibrio entre desempeño y costo, para su aplicación en obras de ingeniería civil en Ecuador.

Con base en los resultados de tenacidad / absorción de energía y los costos de las mezclas ensayadas, se seleccionará la mezcla óptima, especificando la dosificación de cada fibra que garantice una mayor resistencia a la fractura y ductilidad. Para detallar la mezcla óptima, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- **Objetivo de la solución:** el cumplimiento de nuestro objetivo “Analizar el desempeño mecánico de los materiales propuestos en función de su tenacidad, mediante la comparación de los resultados procesados, para la determinación de la mezcla óptima y su aplicación en obras de ingeniería civil” e hipótesis general planteada “Las mezclas con una combinación de fibras de acero y de polipropileno, mejoran la capacidad de absorción de energía del hormigón, a comparación con aquellas que incorporan únicamente un tipo de fibra”; permitirá obtener una dosificación óptima de fibras, que garantice a un costo razonable un buen desempeño en términos de tenacidad.
- **Criterios de selección:** evaluación de los parámetros técnicos (resistencia, energía absorbida, menor variabilidad, mejor trabajabilidad) y parámetros económicos (costo por m^3).
- **Descripción de la solución:** Tipo de mezcla y dosificación de la mezcla óptima.
- **Potenciales aplicaciones:** Aplicaciones de obras de ingeniería civil en Ecuador donde la solución sería factible.
- **Ventajas y limitaciones:** fortalezas de la propuesta y precauciones a tomar en cuenta para su implementación.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

En esta sección se presentan los resultados derivados del procesamiento de los datos, así como las principales observaciones obtenidas a partir de su tabulación.

3.1.1 Ensayo de tenacidad (placas EFNARC):

- **Curvas Carga-Deformación:** Se presentan las respectivas curvas promedio de carga vs deformación, para cada una de las mezclas ensayadas.

Mezcla A (Patrón): En el intervalo de 0 a 1.1 mm de deformación, la carga aumenta de forma lineal (fase elástica) hasta alcanzar la carga máxima registrada de 11.29 kN, el cual corresponde el límite de resistencia del hormigón antes de iniciar su fisuración. Después la carga disminuye rápidamente hasta un valor de 0.20 kN a una deformación de 25mm, evidenciando una pérdida de rigidez y capacidad estructural, producto de la formación y propagación de grietas. Para esta mezcla se observa una curva corta y abrupta en la zona post-fisura, lo que evidencia un comportamiento frágil y una baja tenacidad, característicos del hormigón convencional. Ver **Figura 3.1**.

Curva promedio Carga-Deformación

Mezcla A - Patrón

0% fibras de acero y 0% fibras de polipropileno

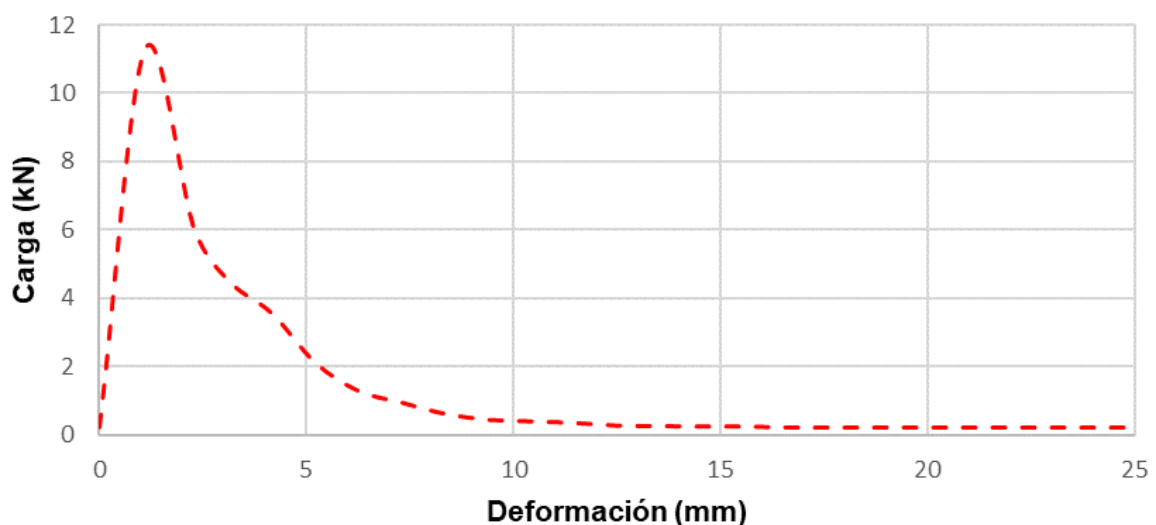


Figura 3.1 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Patrón

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 1: En el intervalo de 0 a 7.3 mm de deformación, la carga aumenta de forma lineal (fase elástica) hasta alcanzar la carga máxima registrada de 25.14 kN, el cual corresponde el límite de resistencia previo a la fisuración. En esta etapa se distinguen dos tramos: el primero, con una pendiente pronunciada, refleja una alta rigidez inicial del material; mientras que el segundo, con una pendiente más suave, evidencia una pérdida progresiva de rigidez antes de alcanzar la carga máxima. Posteriormente, en la zona post-fisura, la carga disminuye hasta el valor de 19 kN a una deformación de 25mm, lo que nos indica una reducción de la rigidez y de la capacidad estructural. Sin embargo, la pendiente suave de la curva en esta zona demuestra que las fibras están contribuyendo a la absorción de energía, retrasando la formación y propagación de grietas, además de evitar la ruptura del material. Ver **Figura 3.2**.

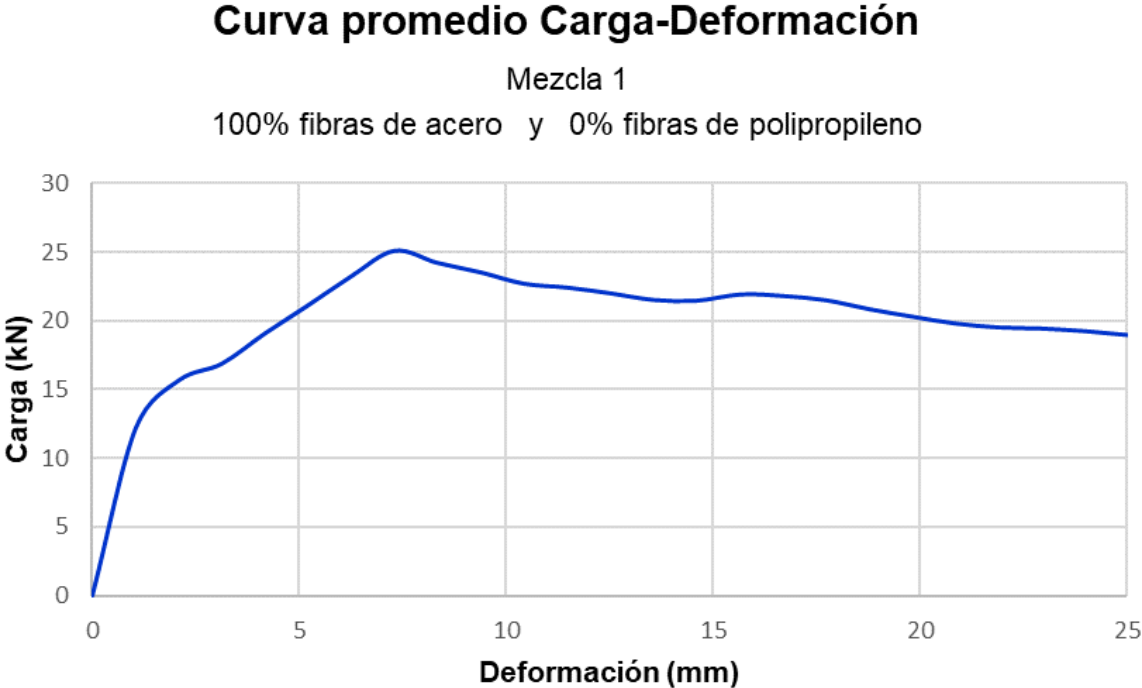


Figura 3.2 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 1
Fuente: Elaboración propia

Mezcla 2: En el intervalo de 0 a 5.21 mm de deformación, la carga aumenta de forma lineal (fase elástica) hasta alcanzar la carga máxima registrada de 20.21 kN, el cual corresponde el límite de resistencia previo a la fisuración. En esta zona se observa una pendiente suave, lo que indica que el material presenta una rigidez inicial adecuada. Posteriormente, en la zona post-fisura, la carga disminuye hasta el valor de 13.43 kN a una deformación de 25mm, lo que indica una reducción de la rigidez y de la capacidad estructural. Sin embargo, la pendiente suave de la curva en esta zona demuestra que las fibras están contribuyendo a la absorción de energía, retrasando la formación y propagación de grietas, además de evitar la ruptura del material. Ver **Figura 3.3**.

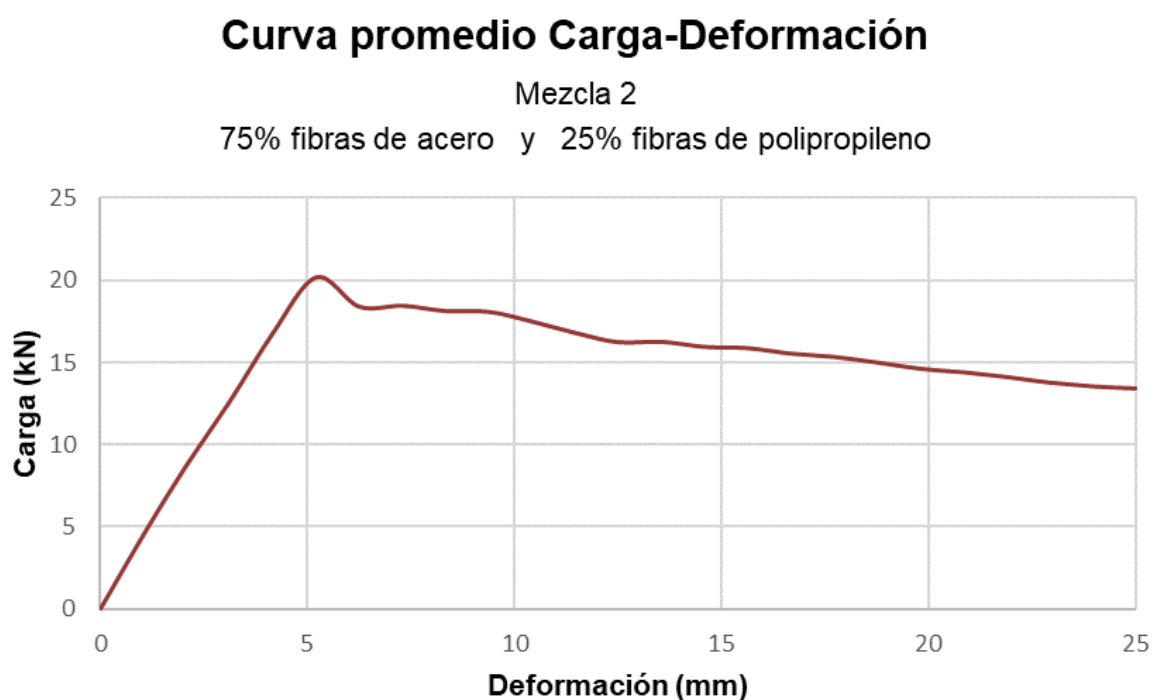


Figura 3.3 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 2

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 3: En el intervalo de 0 a 4.16 mm de deformación, la carga aumenta de forma lineal (fase elástica) hasta alcanzar la carga máxima registrada de 23.19 kN, el cual corresponde el límite de resistencia previo a la fisuración. En esta zona se observa una pendiente pronunciada, lo que indica que el material presenta una alta rigidez inicial. Posteriormente, en la zona post-fisura, la carga disminuye hasta el valor de 16.76 kN a una deformación de 25mm, lo que indica una reducción de la rigidez y de la capacidad estructural. Sin embargo, en esta zona se presenta una pendiente suave que cambia ligeramente hacia una meseta, lo cual nos indica que ambas fibras están contribuyendo a la absorción de energía y retrasando de forma significativa la formación y propagación de grietas, proporcionando al material de un comportamiento más dúctil. Ver **Figura 3.4**.

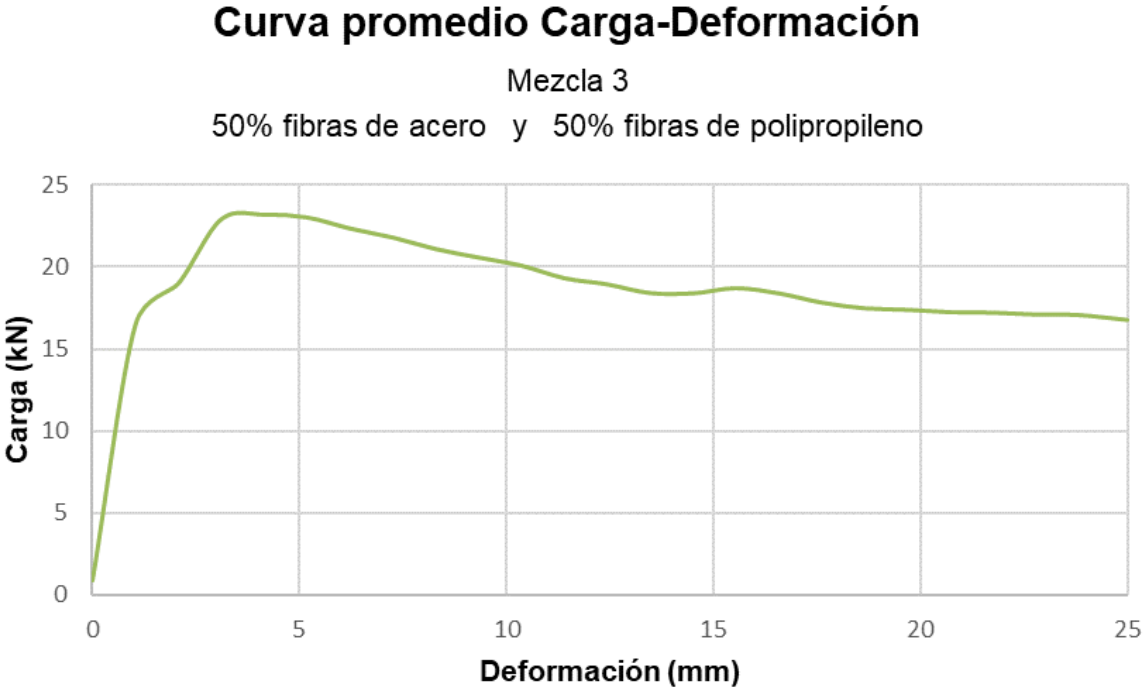


Figura 3.4 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 3
Fuente: Elaboración propia

Mezcla 4: En el intervalo de 0 a 3.13 mm de deformación, la carga aumenta de forma lineal (fase elástica) hasta alcanzar la carga máxima registrada de 25.82 kN, el cual corresponde el límite de resistencia previo a la fisuración. En esta zona se observa una pendiente pronunciada, lo que indica que el material presenta una alta rigidez inicial. Posteriormente, en la zona post-fisura, la carga disminuye hasta el valor de 15.95 kN a una deformación de 25mm, lo que indica una reducción de la rigidez y de la capacidad estructural. Inicialmente se presenta una pendiente suave que cambia ligeramente hacia una meseta, lo cual nos indica que a partir de un punto las fibras empiezan a contribuir en la absorción de energía, retrasando la propagación de grietas y evitando la ruptura del material. Ver **Figura 3.5**.

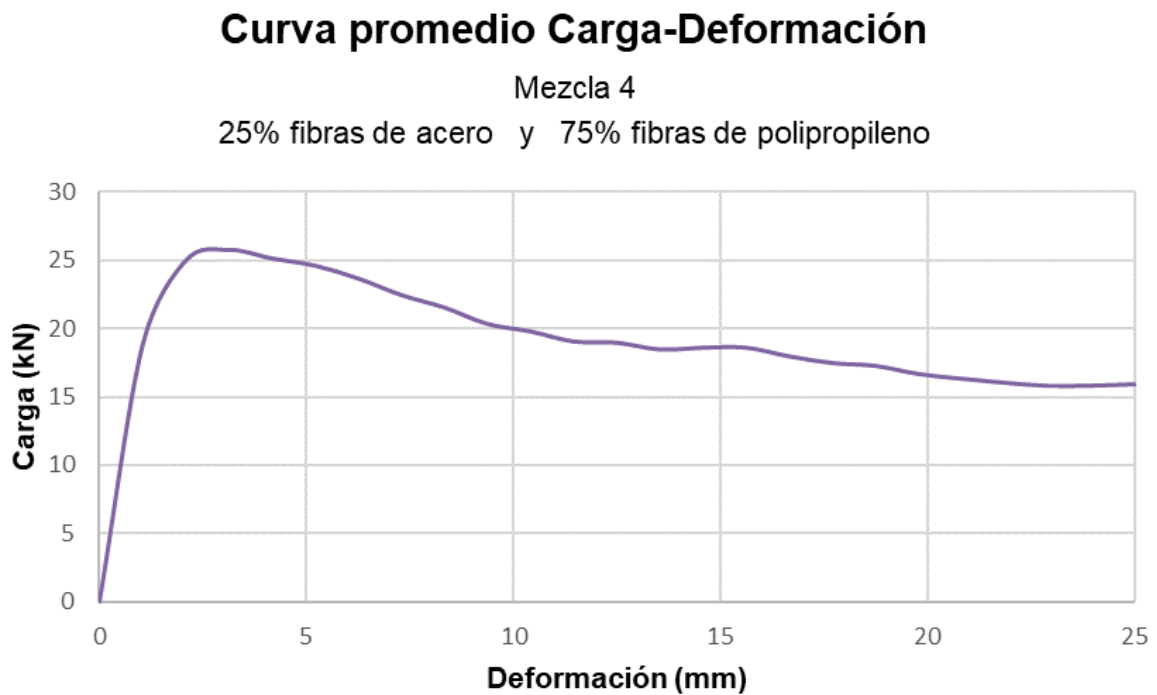


Figura 3.5 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 4

Fuente: Elaboración propia

Mezcla 5: En el intervalo de 0 a 2.12 mm de deformación, la carga aumenta de forma lineal (fase elástica) hasta alcanzar la carga máxima registrada de 18.73 kN, el cual corresponde el límite de resistencia previo a la fisuración. En esta zona se observa una pendiente pronunciada, lo que indica que el material presenta una alta rigidez inicial. Posteriormente, en la zona post-fisura, la carga disminuye rápidamente hasta el valor de 7.80 kN a una deformación de 25mm, lo que indica una reducción de la rigidez y de la capacidad estructural. Inicialmente se presenta una pendiente moderada que cambia ligeramente hacia una meseta, lo cual nos indica que a partir de un punto las fibras empiezan a contribuir en la absorción de energía, retrasando la propagación de grietas y evitando la ruptura del material. Ver **Figura 3.6**.

Curva promedio Carga-Deformación

Mezcla 5

0% fibras de acero y 100% fibras de polipropileno

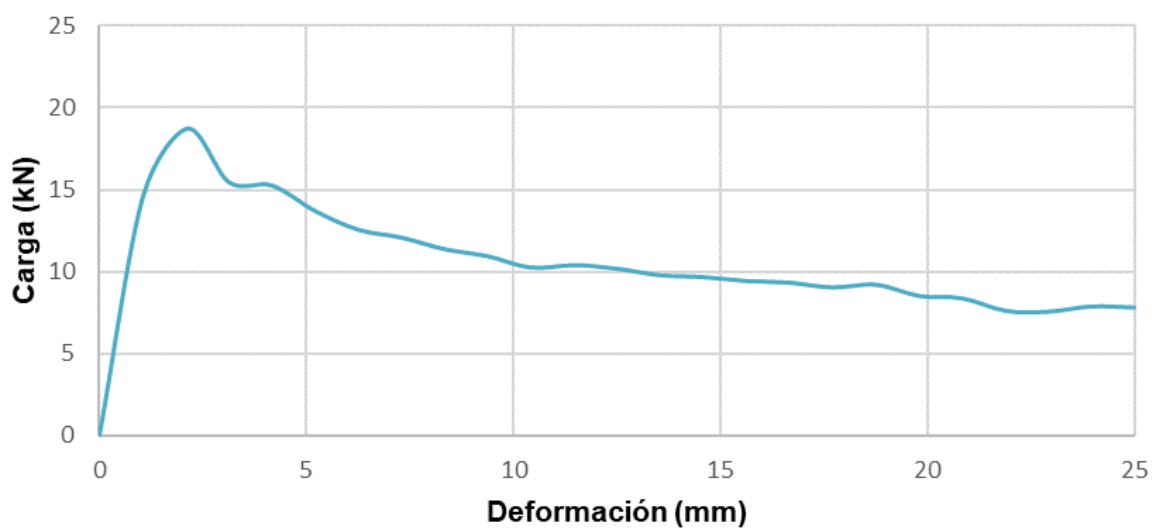


Figura 3.6 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 5

Fuente: *Elaboración propia*

Mezcla 6: En el intervalo de 0 a 3.14 mm de deformación, la carga aumenta de forma lineal (fase elástica) hasta alcanzar la carga máxima registrada de 34.19 kN, el cual corresponde el límite de resistencia previo a la fisuración. En esta zona se observa una pendiente pronunciada, lo que indica que el material presenta una alta rigidez inicial. Posteriormente, en la zona post-fisura, la carga disminuye hasta el valor de 19.36 kN a una deformación de 25mm, lo que indica una reducción de la rigidez y de la capacidad estructural. Sin embargo, la pendiente moderada de la curva en esta zona, nos indica que las fibras están contribuyendo en cierta medida a la absorción de energía, retrasando la formación y propagación de grietas, además de evitar la ruptura del material. Ver **Figura 3.7**.

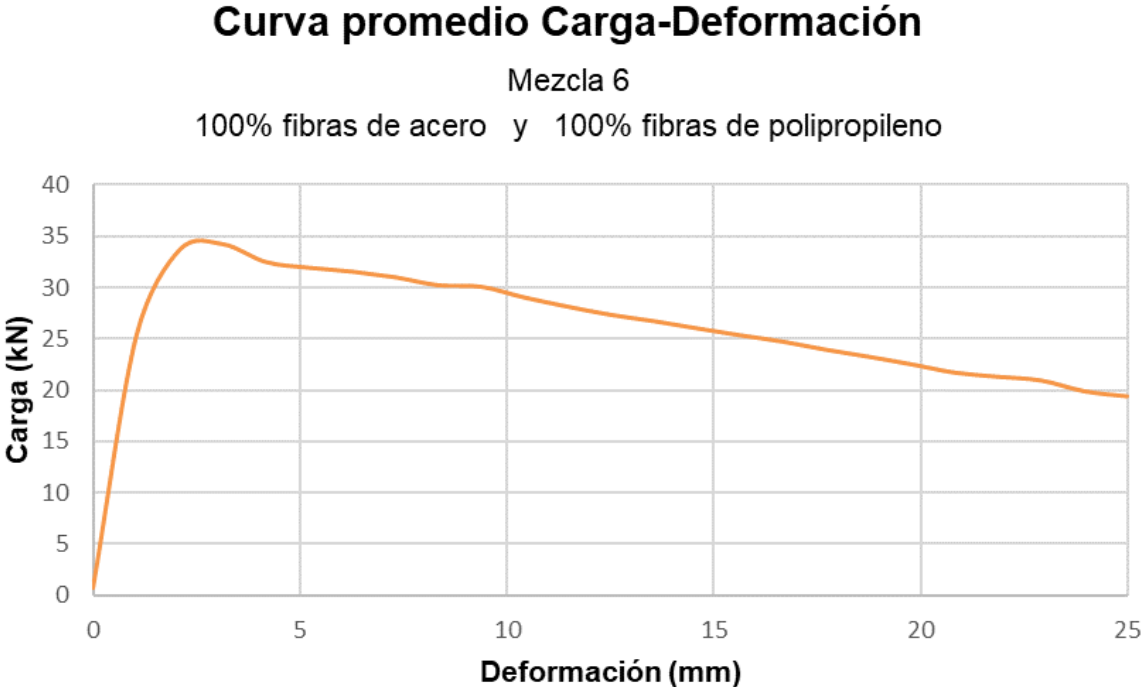


Figura 3.7 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 6

Fuente: *Elaboración propia*

Mezcla 7: En el intervalo de 0 a 5.2 mm de deformación, la carga aumenta de forma lineal (fase elástica) hasta alcanzar la carga máxima registrada de 33.89 kN, el cual corresponde al límite de resistencia previo a la fisuración. En esta etapa se distinguen dos tramos: el primero, con una pendiente pronunciada, refleja una alta rigidez inicial del material; mientras que el segundo, con una pendiente más suave, evidencia una pérdida de rigidez antes de alcanzar la carga máxima. Posteriormente, en la zona post-fisura, la carga disminuye hasta el valor de 21.70 kN a una deformación de 25mm, lo que nos indica una reducción de la rigidez y de la capacidad estructural. En esta zona se presenta una pendiente suave que cambia ligeramente hacia una meseta, lo cual nos indica que las fibras están contribuyendo a la absorción de energía y retrasando de forma significativa la formación y propagación de grietas, proporcionando al material de un comportamiento más dúctil. Ver **Figura 3.8**.

Curva promedio Carga-Deformación

Mezcla 7

75% fibras de acero y 75% fibras de polipropileno

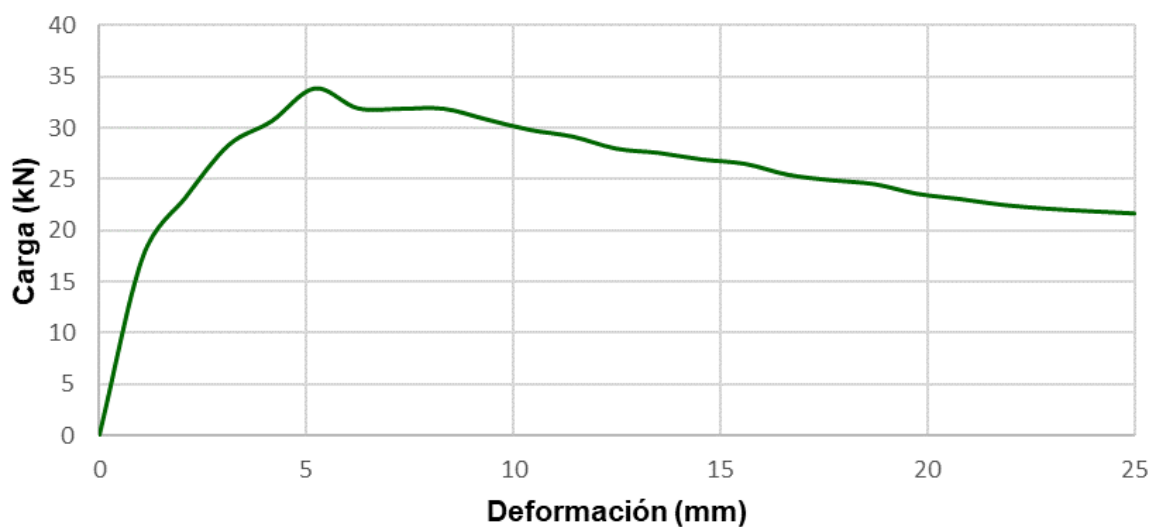


Figura 3.8 Curva promedio Carga-Deformación muestra: Mezcla 7

Fuente: Elaboración propia

La tenacidad se define como la capacidad de un material para absorber energía y deformarse plásticamente antes de alcanzar la rotura. Corresponde a una combinación entre resistencia y ductilidad; por lo tanto, un material tenaz es capaz de soportar mayores cargas y experimentar deformaciones significativas antes de romperse. Este parámetro puede determinarse a partir del cálculo del área bajo la curva carga-deformación.

- **Energía absorbida calculada como el área bajo la curva:** Se presentan las respectivas gráficas de energía absorbida promedio vs deformación para cada una de las mezclas ensayadas.

Energía absorbida promedio vs Deformación

Mezcla A - Patrón

0% fibras de acero y 0% fibras de polipropileno

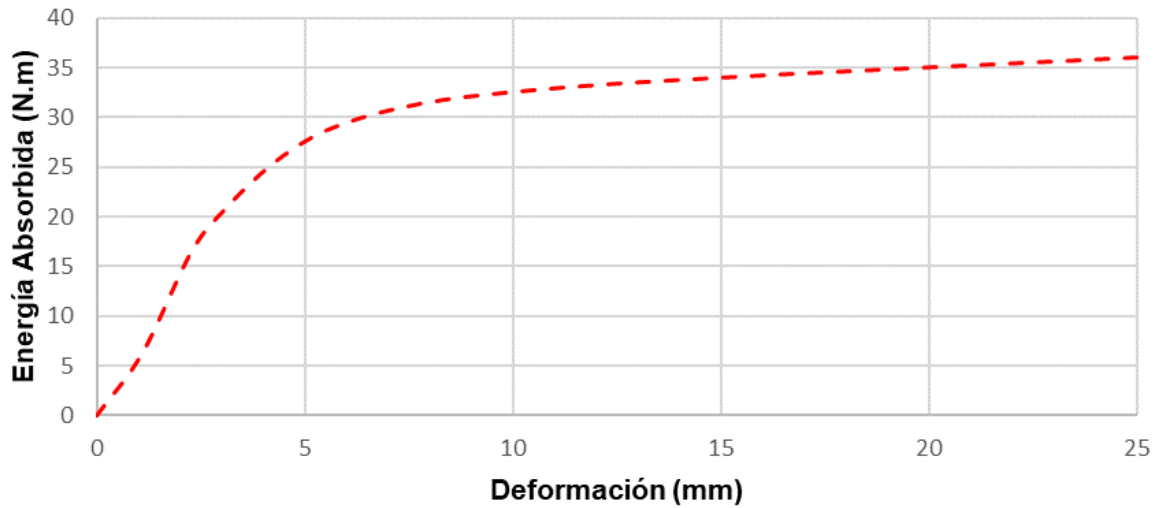


Figura 3.9 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Patrón

Fuente: Elaboración propia

Energía absorbida promedio vs Deformación

Mezcla 1

100% fibras de acero y 0% fibras de polipropileno

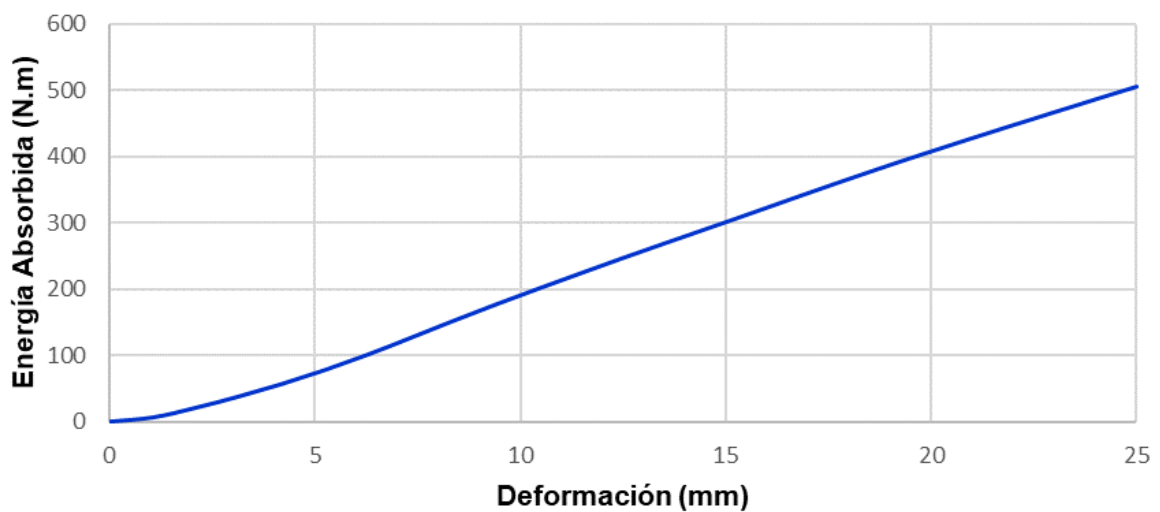


Figura 3.10 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 1

Fuente: Elaboración propia

Energía absorbida promedio vs Deformación

Mezcla 2

75% fibras de acero y 25% fibras de polipropileno

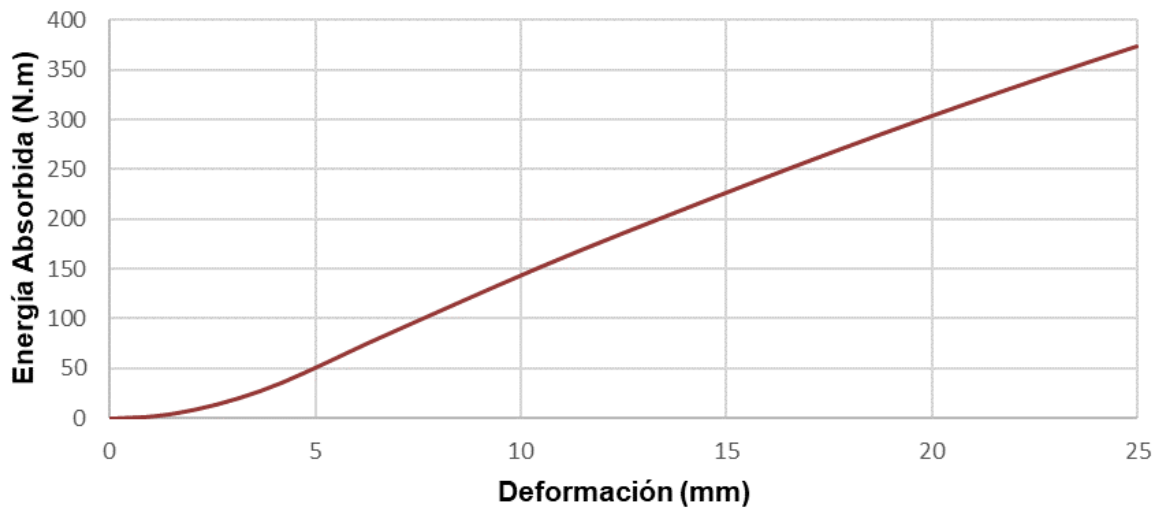


Figura 3.11 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 2

Fuente: Elaboración propia

Energía absorbida promedio vs Deformación

Mezcla 3

50% fibras de acero y 50% fibras de polipropileno

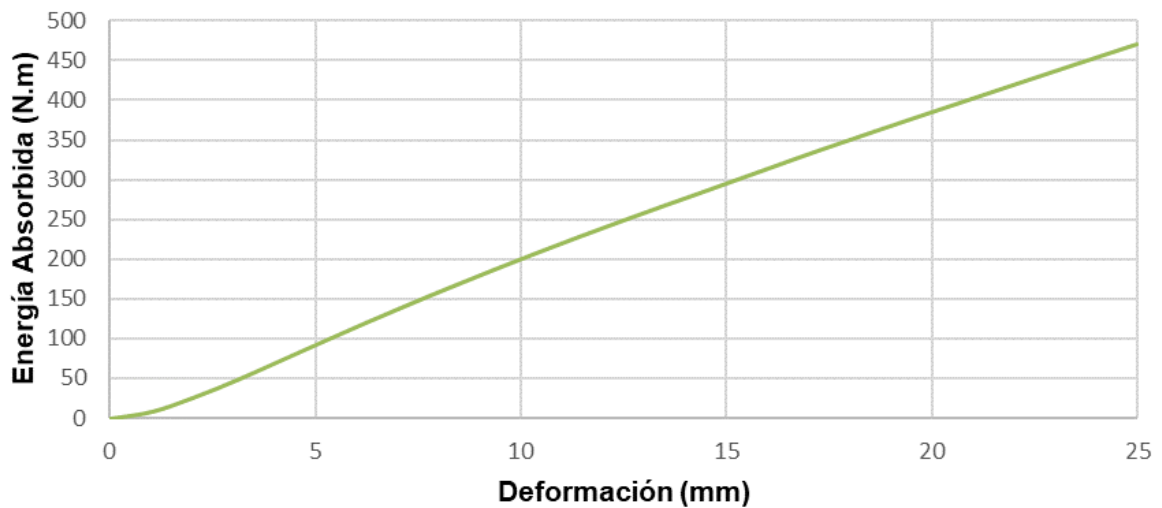


Figura 3.12 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 3

Fuente: Elaboración propia

Energía absorbida promedio vs Deformación

Mezcla 4

25% fibras de acero y 75% fibras de polipropileno

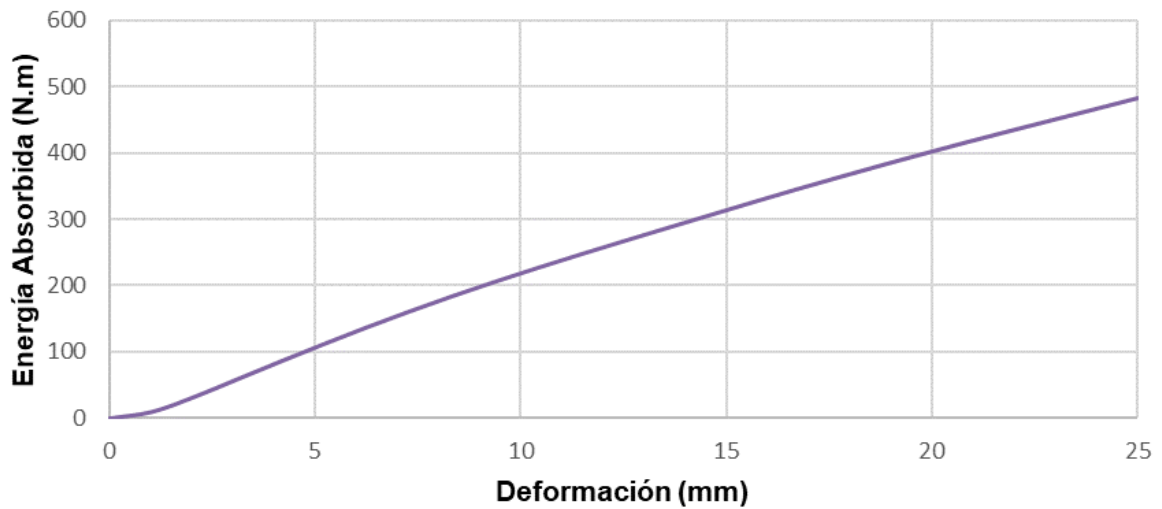


Figura 3.13 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 4

Fuente: Elaboración propia

Energía absorbida promedio vs Deformación

Mezcla 5

0% fibras de acero y 100% fibras de polipropileno

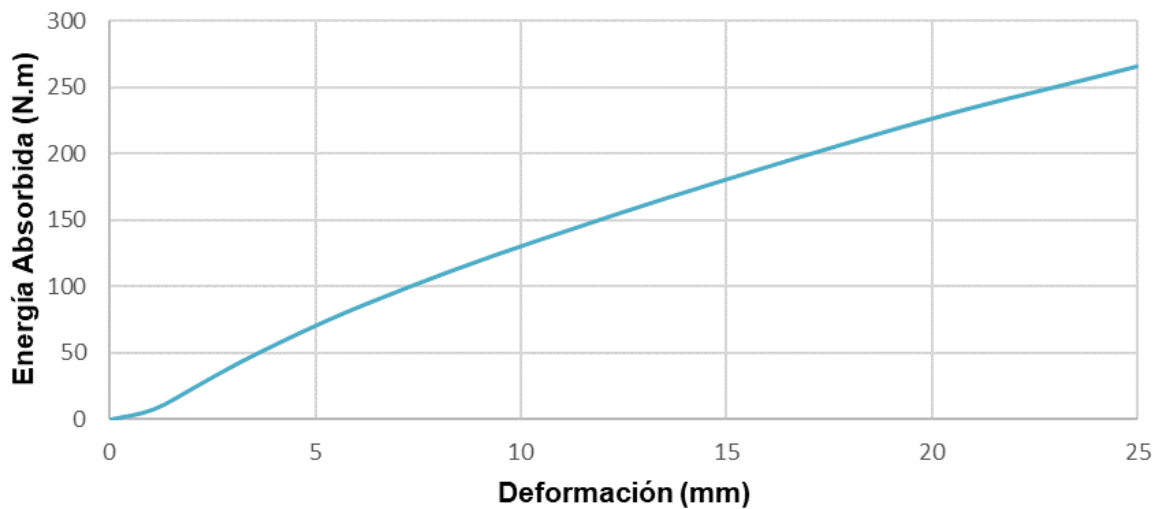


Figura 3.14 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 5

Fuente: Elaboración propia

Energía absorbida promedio vs Deformación

Mezcla 6

100% fibras de acero y 100% fibras de polipropileno

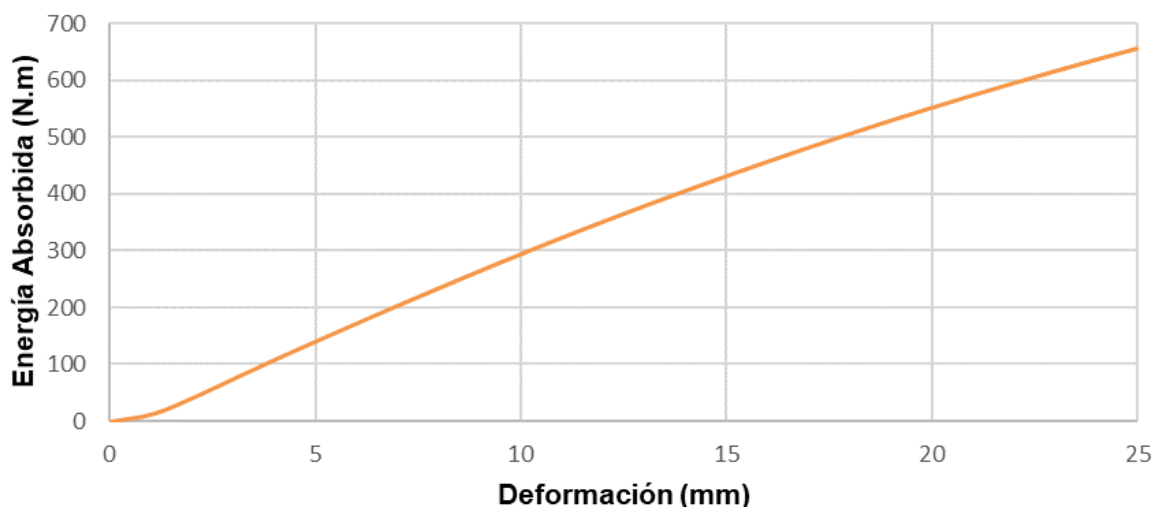


Figura 3.15 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 6

Fuente: Elaboración propia

Energía absorbida promedio vs Deformación

Mezcla 7

75% fibras de acero y 75% fibras de polipropileno

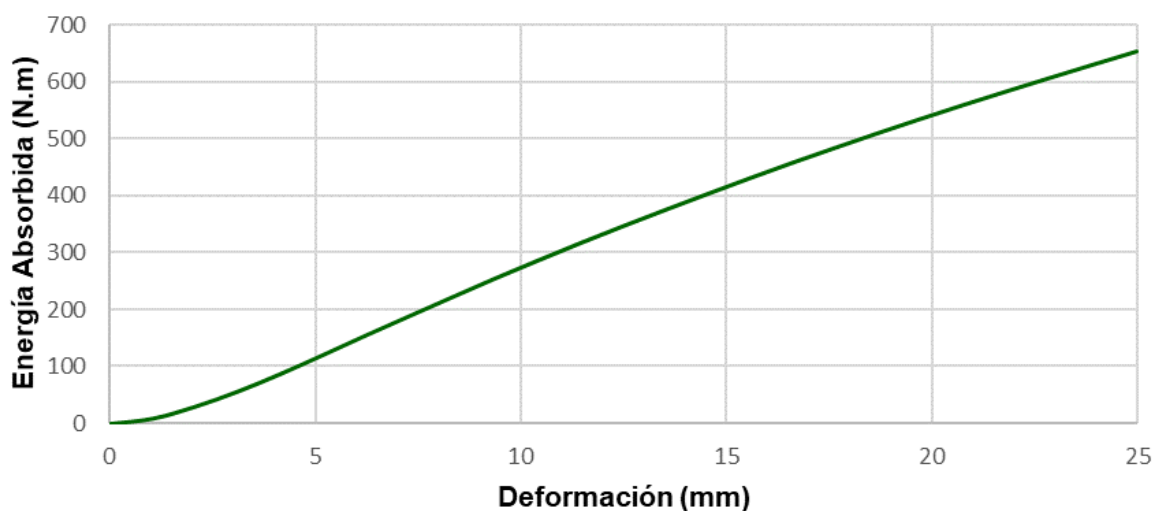


Figura 3.16 Energía absorbida acumulada promedio-Deformación muestra: Mezcla 7

Fuente: Elaboración propia

A partir de las gráficas de energía absorbida promedio vs deformación mostradas desde la Figura 3.9 a la Figura 3.16, se puede observar un crecimiento de energía en todas las curvas, con excepción de la que corresponde a la mezcla patrón, lo que evidencia el aporte sustancial de las fibras en este rango de deformación.

La aparición de la meseta en la curva de energía absorbida promedio vs deformación de la mezcla patrón, nos indica una disminución de la capacidad del material y una pérdida abrupta de resistencia.

- **Interpretación de gráficos**

Carga vs Deformación: Nos permite describir la respuesta estructural del material durante el ensayo y su capacidad residual tras el pico. Dentro de la cual podemos denotar los siguiente puntos clave (ver Figura 3.17):

1. **Rigidez inicial:** Pendiente inicial de la curva cerca del origen. Nos indica la rigidez del material (mayor pendiente = mayor rigidez).
2. **Resistencia pico y deformación al pico (kN y mm):** Carga máxima registrada en la curva y la deformación a la que ocurre la misma. Nos resume la resistencia máxima alcanzada.
3. **Rama post-pico:** Describe el ablandamiento y la capacidad de respuesta después de la fractura (fisuración). Una caída lenta de la meseta nos indica ductilidad y buen control de fisuras.
4. **Resistencias residuales (kN):** Cargas registradas en la curva cada 5, 10, 15, 20, 25 mm de deformación. Se obtienen por interpolación sobre la curva: R_5 , R_{10} , R_{15} , R_{20} , R_{25} , o lectura directa en esos valores. Nos permitirá comparar la capacidad residual entre mezclas.
5. **Capacidad residual a 25 mm (%):** Se determina mediante la relación entre la resistencia pico y la resistencia residual a 25mm.

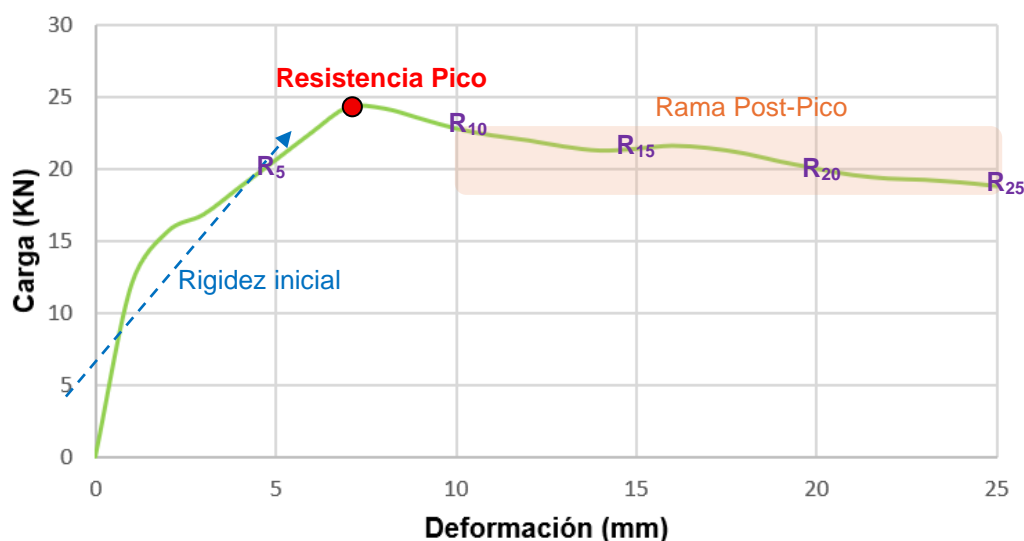


Figura 3.17 Puntos notables de la gráfica Carga vs Deformación

Fuente: Elaboración propia

Con lo que podemos decir:

- Mayor resistencia pico en menor deformación: mejor resistencia inicial.
- Rama post-pico plana y R_{25} alto: mejor comportamiento residual y ductilidad.

Cuando la pendiente inicial de la curva carga-deformación es pronunciada, significa que el material puede resistir grandes incrementos de carga con muy poca deformación, por lo tanto, este presenta una alta rigidez inicial, es decir una mejor respuesta inicial a la fractura.

Energía absorbida vs Deformación: Es la integral acumulada de la curva carga vs deformación, es decir el área bajo la curva. De la cual podemos observar lo siguiente (ver Figura 3.18):

1. **Crecimiento de Energía:** Cuando la curva presenta un crecimiento rápido, nos indica un elevado aporte de carga en ese rango de deformación. La aparición de mesetas nos indica una disminución de capacidad, es decir un bajo aporte adicional de energía.
2. **Energías de referencia:** E_5 , E_{10} , E_{15} , E_{20} , E_{25} , facilitan comparaciones consistentes entre mezclas. E_{25} es la métrica estándar utilizada para la comparación de la tenacidad, por lo que será adoptada como referencia en este proyecto.

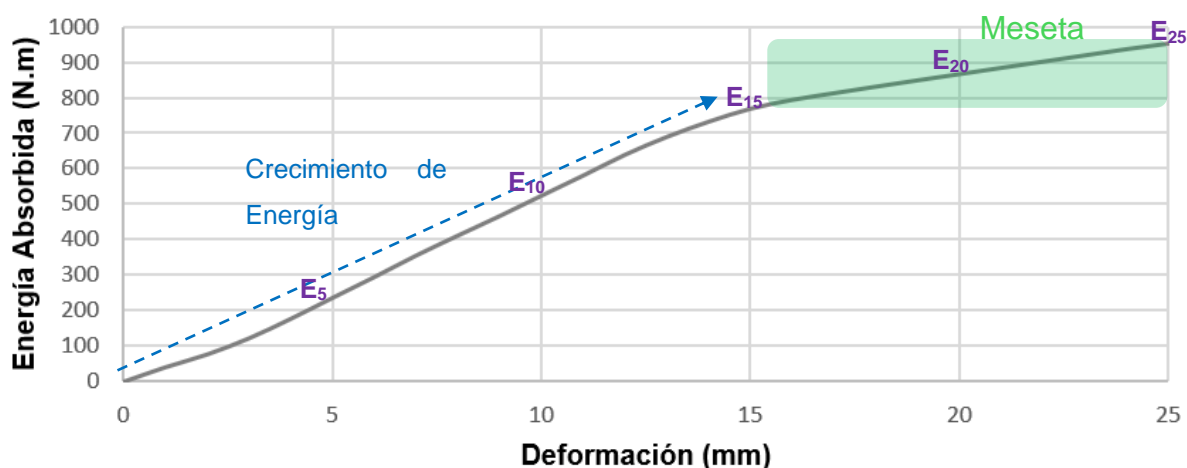


Figura 3.18 Puntos notables de la gráfica Energía absorbida vs Deformación

Fuente: Elaboración propia

Con lo que podemos decir que:

- Curvas de energía absorbida más altas es igual a una mayor tenacidad.
- Si E_{25} es alto y R_{25} también es alto, el material cuenta con un buen desempeño residual o post fractura.

- Resistencia residual a 25mm (R_{25}) de todas las mezclas (ver Figura 3.19).

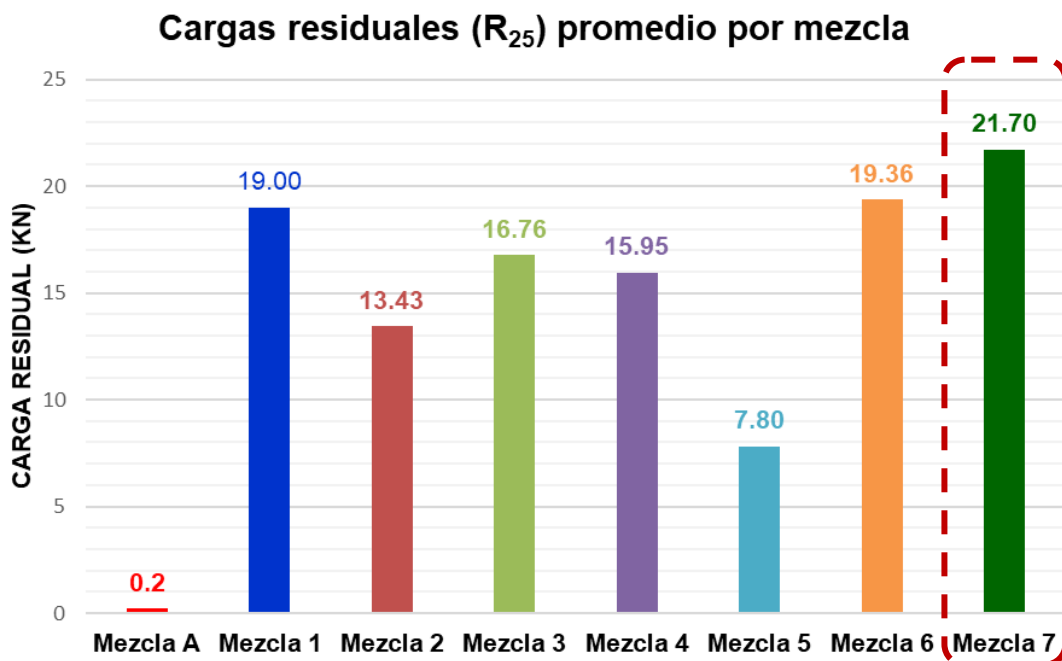


Figura 3.19 Resultados de Carga Residual promedio a 25mm (R_{25}) de las mezclas ensayadas

Fuente: Elaboración propia

- Energía total absorbida a 25mm (E_{25}) de todas las mezclas (ver Figura 3.20)

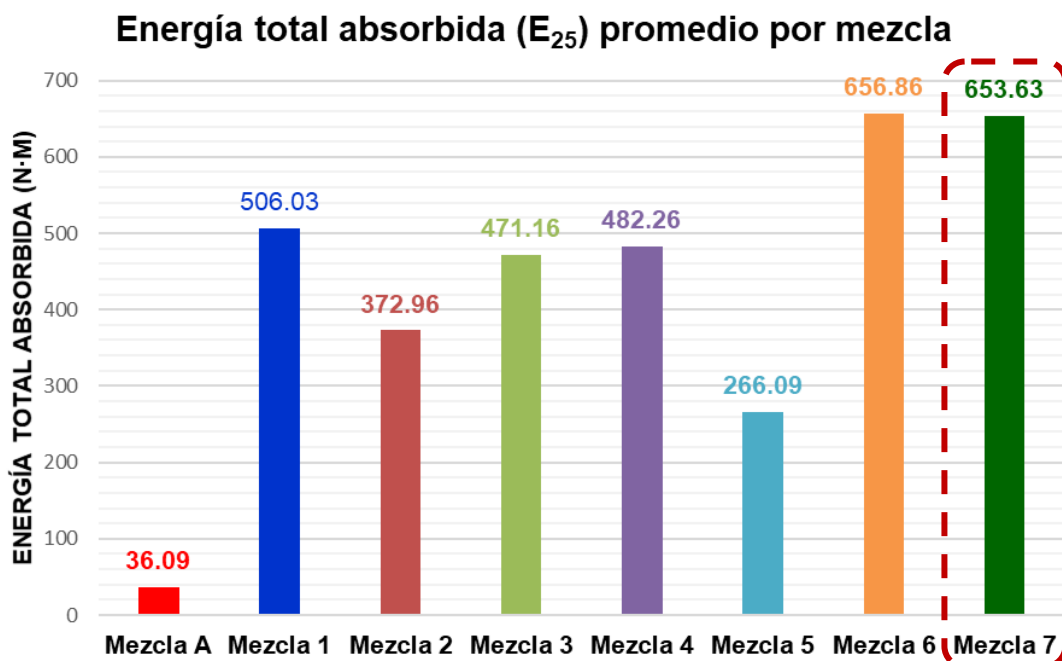


Figura 3.20 Resultados de Energía absorbida total a 25mm (E_{25}) de las mezclas ensayadas

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Ensayos complementarios:

Aquí se reportan los resultados de los ensayos adicionales:

- **Resistencia a la compresión de cilindro:** Resistencia a la compresión promedio a 28 días, alcanzada por cada mezcla (ver Figura 3.21). Cabe mencionar que para el cálculo de la resistencia promedio se excluyeron los valores en rojo de la Tabla 2.48.

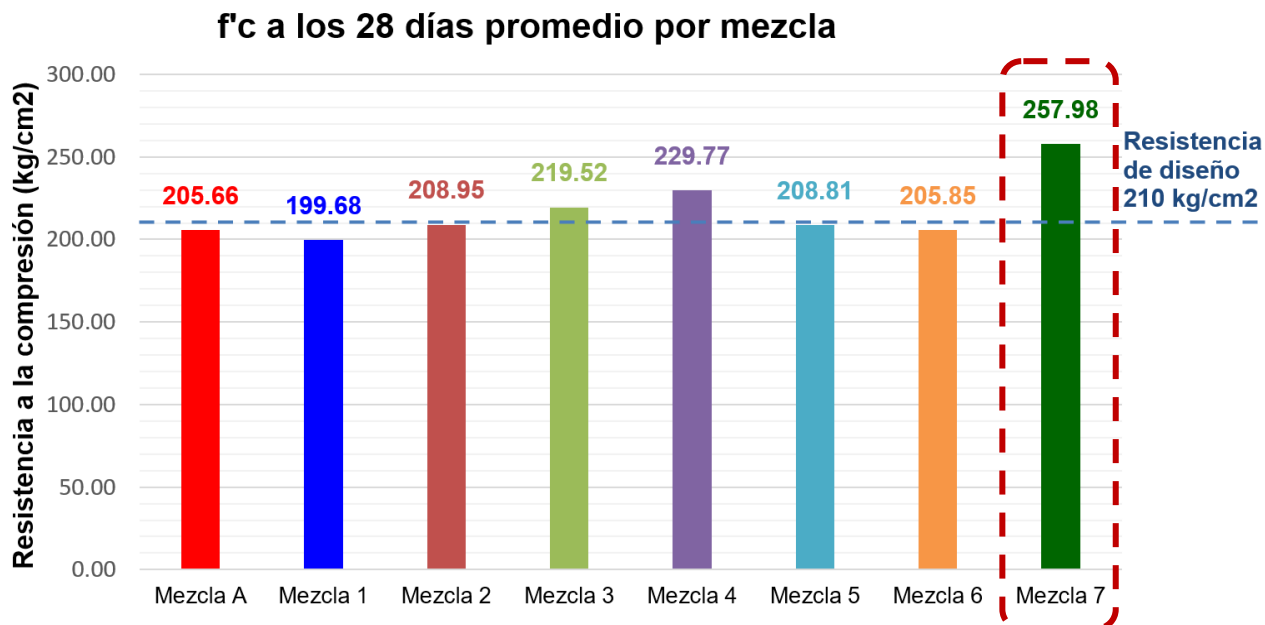


Figura 3.21 Resultados de Resistencia a la compresión promedio de las mezclas ensayadas

Fuente: Elaboración propia

- **Ensayo de trabajabilidad (slump):** Asentamiento promedio en centímetros del hormigón, para cada mezcla (ver Figura 3.22).

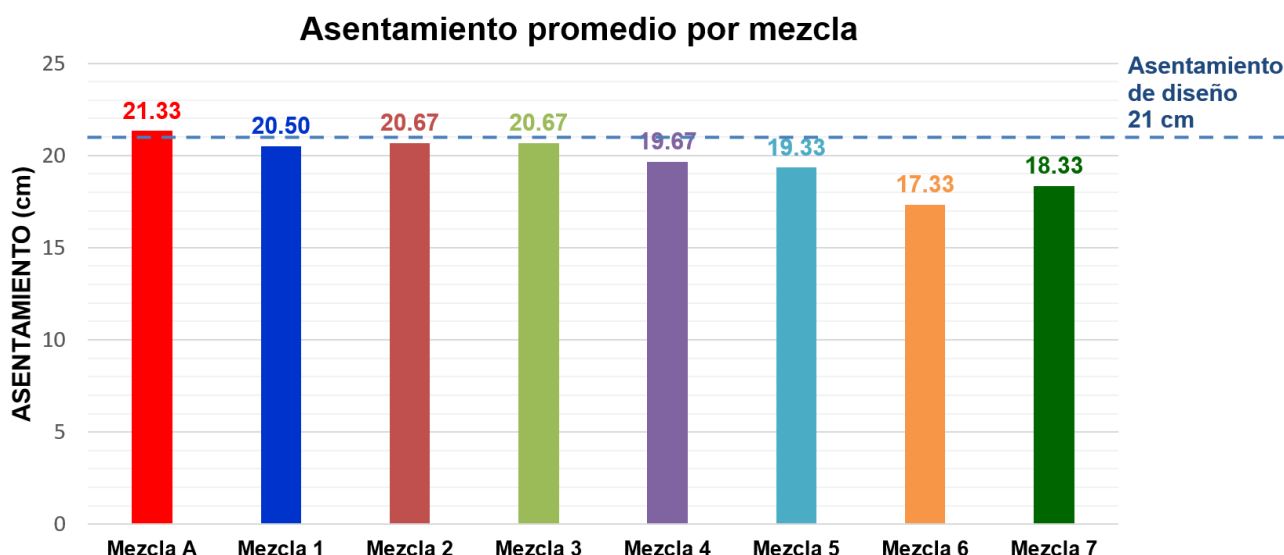


Figura 3.22 Resultados de asentamiento promedio de las mezclas ensayadas

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura, la incorporación de un porcentaje más elevado de fibras disminuye la trabajabilidad del hormigón.

3.1.3 Comparación de Mezclas:

A continuación, se muestran los siguientes gráficos utilizados para comparar de manera directa las diferentes mezclas:

- Comparación de curvas promedio carga vs deformación de todas las mezclas: Como se puede observar en la Figura 3.23, las mezclas 6 y 7 son las que alcanzan una alta resistencia, además de lograr una excelente respuesta inicial. Como es característico del hormigón convencional, para la mezcla patrón se muestra una pérdida abrupta de resistencia de este material.

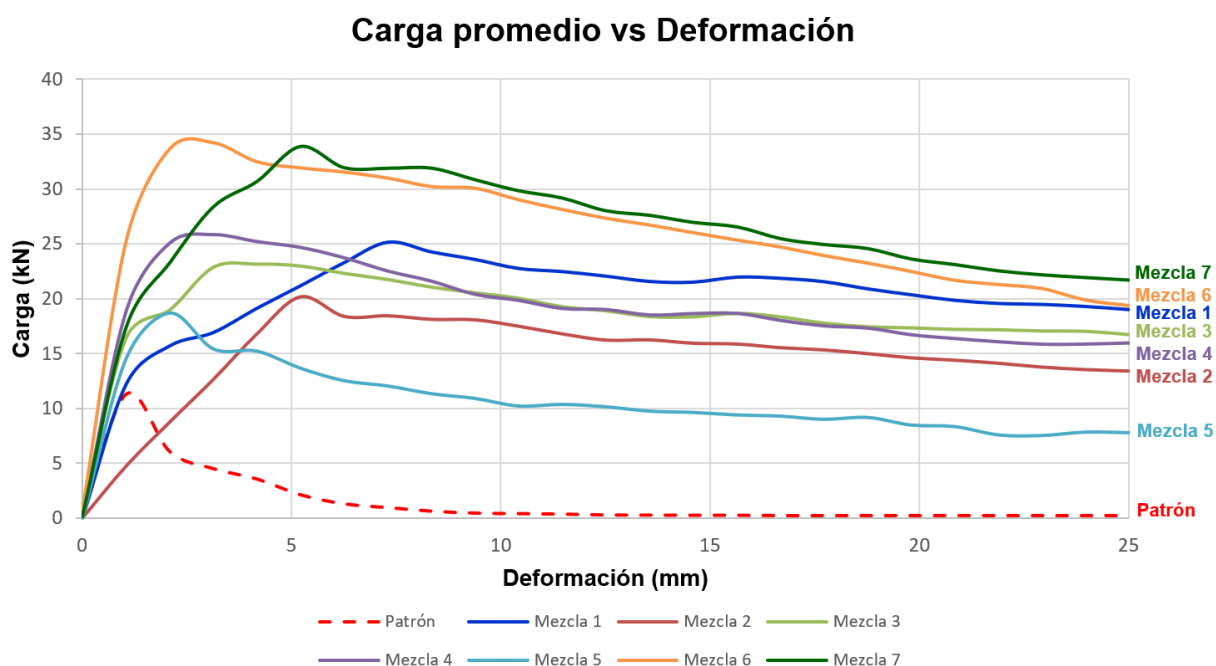


Figura 3.23 Comparación de la curva carga vs deformación promedio para todas las mezclas

Fuente: Elaboración propia

- Comparación de curvas promedio energía absorbida vs deformación de todas las mezclas: Como se puede observar en la Figura 3.24, las mezclas 6 y 7 son las que poseen una alta capacidad de absorción de energía (tenacidad a la fractura). Como es característico del hormigón convencional, la mezcla patrón presenta una capacidad muy limitada de absorción de energía, lo que conduce a un comportamiento frágil y a una falla brusca del material.

Energía absorbida promedio vs Deformación

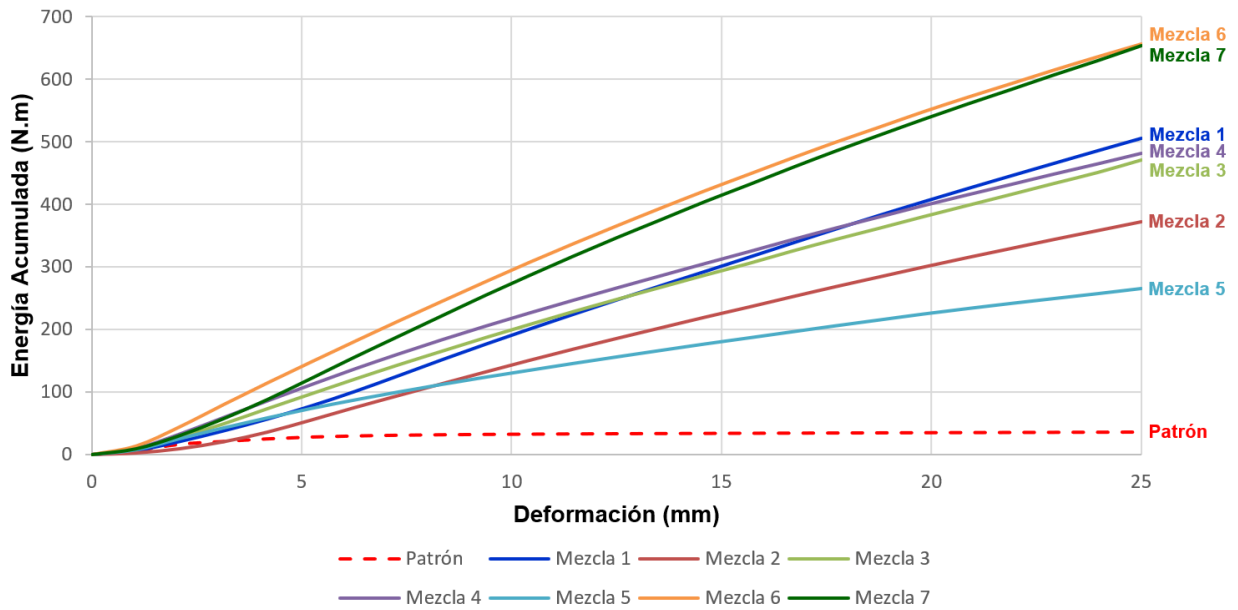


Figura 3.24 Comparación de la curva energía absorbida vs deformación promedio para todas las mezclas

Fuente: Elaboración propia

- Comparación de la resistencia a la compresión a los 28 días vs la energía absorbida a 25mm de deformación para todas las mezclas: Como se observa en la Figura 3.25, la mezcla 7 que presenta una elevada energía total absorbida a 25mm de deformación, también alcanza una resistencia a la compresión a los 28 días que supera significativamente a la resistencia de diseño.

f'c 28 días vs Energía absorbida a 25mm (promedios por mezcla)

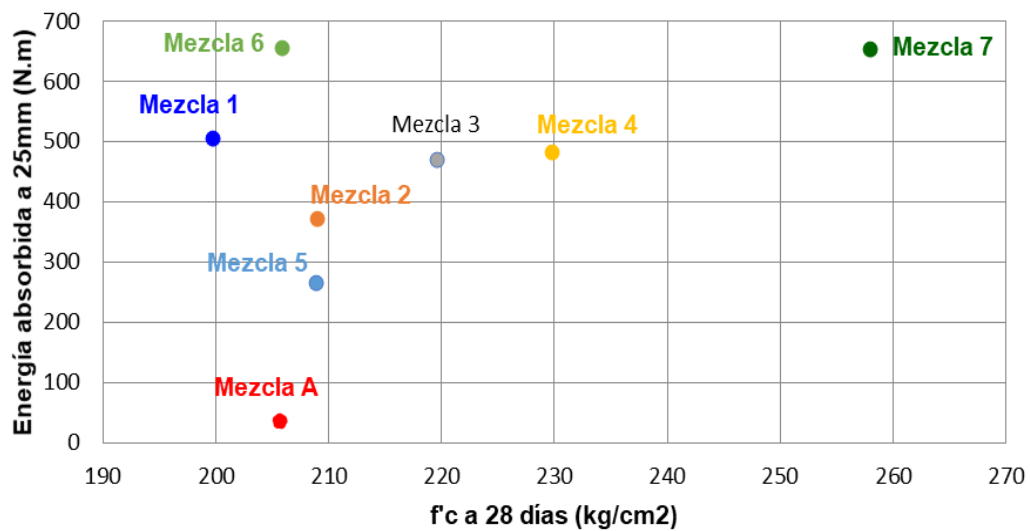


Figura 3.25 Comparación de f'c a 28 días vs E₂₅ para todas las mezclas

Fuente: Elaboración propia

- Comparación de la trabajabilidad vs la energía absorbida a 25mm de deformación para todas las mezclas: Como se observa en la Figura 3.26, para la mayoría de las mezclas se obtiene un asentamiento aceptable, a excepción de las mezclas 6 y 7 que, debido al elevado contenido de fibras de acero y polipropileno, presentan una reducción de la trabajabilidad del hormigón.

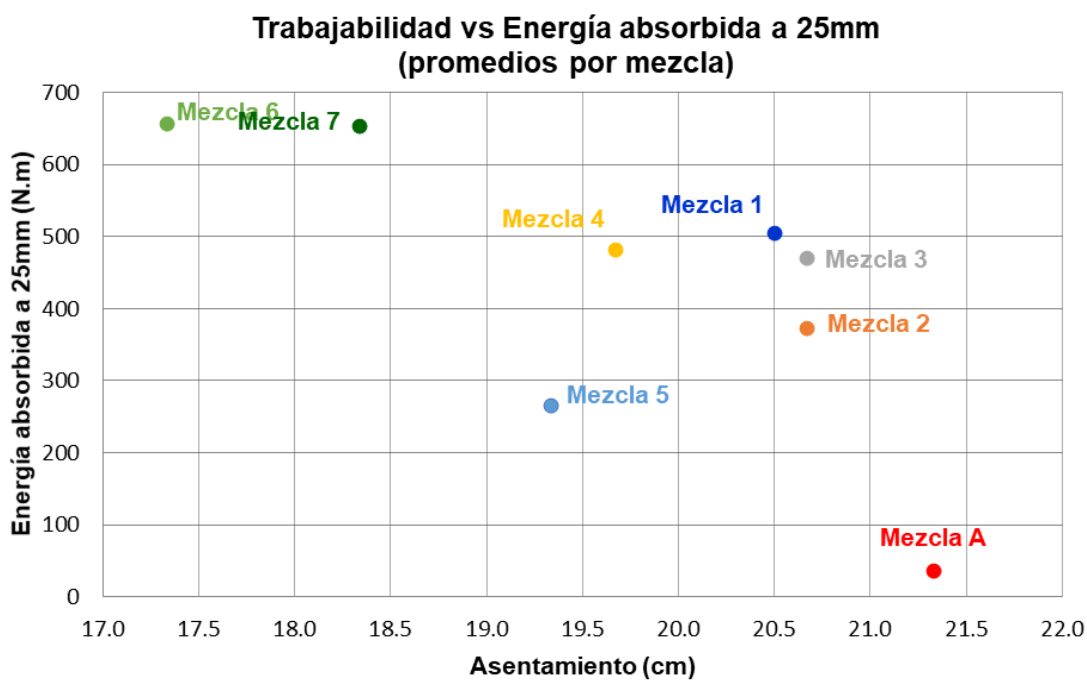


Figura 3.26 Comparación de trabajabilidad vs E_{25} para todas las mezclas

Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Determinación del costo unitario de las mezclas:

Se determinó el costo unitario de cada mezcla a partir de la dosificación que corresponde a un metro cúbico de hormigón (Ver ANEXO 6), para lo cual se utilizaron los precios actualizados de los materiales disponibles en el mercado de la construcción.

A continuación, se presentan los costos unitarios para cada mezcla. (ver Tabla 3.1).

Mezcla	Proporción		Costo (USD/m ³)
	Acero (15 kg/m ³)	Polipropileno (5 kg/m ³)	
A	0%	0%	92.46
1	100%	0%	154.74
2	75%	25%	152.51
3	50%	50%	150.29
4	25%	75%	148.06
5	0%	100%	145.83
6	100%	100%	208.11
7	75%	75%	179.20

Tabla 3.1 Costos unitarios por metro cúbico de las mezclas propuestas

Fuente: Elaboración propia

Para la evaluación económica de las mezclas se utilizaron las siguientes métricas:

1. Porcentaje de incremento del costo con respecto al patrón, el cual se determina a partir de la relación de la diferencia de costos entre la mezcla analizada y la mezcla patrón, respecto del costo de la mezcla patrón.
2. Desempeño por costo (eficiencia económico-técnica) el cual corresponde a la relación entre el costo de la mezcla en USD/m³ y la capacidad de absorción de energía (tenacidad) de la mezcla en Joule.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del cálculo de las métricas mencionadas. (ver Tabla 3.2).

Mezcla	E ₂₅ (Nxm = Joule)	Costo (USD/m ³)	% Incremento Costo vs patrón	Costo por desempeño (USD/Joule)
A	36.09	92.46		\$2.56
1	506.03	154.74	66.90%	\$0.31
2	372.96	152.51	64.50%	\$0.41
3	471.16	150.29	62.09%	\$0.32
4	482.26	148.06	59.69%	\$0.31
5	266.09	145.83	57.29%	\$0.55
6	656.86	208.11	124.50%	\$0.32
7	653.63	179.20	93.30%	\$0.27

Tabla 3.2 Evaluación económica de las mezclas propuestas

Fuente: Elaboración propia

Si bien en elementos sometidos a fatiga se priorizan las mezclas con mayor tenacidad, en proyectos con restricciones presupuestarias se recomienda considerar el desempeño de la mezcla en función de su costo unitario (USD/Joule), con el fin de adoptar decisiones técnicas y económicas más acertadas.

Cabe mencionar que la mezcla 6, al presentar una alta proporción de ambas fibras, alcanza un desempeño elevado en términos de tenacidad; sin embargo, el elevado incremento de costo con respecto al hormigón convencional puede limitar su aplicación en proyectos con presupuestos reducidos.

En cuanto a la tenacidad absoluta (E₂₅), la mezcla 7 evidencia una buena capacidad de absorción de energía y, por ende, un mejor comportamiento post-fisura. Para esta mezcla se obtiene un costo por desempeño de aproximadamente 0.27 USD/Joule, lo cual nos indica que la misma es eficiente desde un punto de vista técnico y económico,

a pesar de presentar una diferencia promedio en costos del 20% en comparación con las demás mezclas con fibras de acero y/o polipropileno.

Por lo tanto, la mezcla 7 se identifica como la más adecuada para ser aplicada en obras civiles de alta exigencia y que cuenten con un presupuesto limitado, al ofrecer una relación costo-beneficio equilibrada y un desempeño mecánico sobresaliente.

3.2 Análisis de resultados

A continuación, se realiza el análisis de los resultados presentados en el apartado 3.1, explicando las causas del comportamiento observado en cada mezcla. Para ello, se ha elaborado una tabla resumen con los resultados obtenidos. (ver Tabla 3.3).

Mezcla	Resistencia Pico (kN)	Deformación Pico (mm)	R ₂₅ (kN)	Capacidad Residual (%)	E ₂₅ (N·m)	f'c 28 días (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Costo (USD/m ³)
A	11.29	1.10	0.20	1.77%	36.09	205.66	21.33	92.46
1	25.14	7.30	19.00	75.58%	506.03	199.68	20.50	154.74
2	20.21	5.21	13.43	66.45%	372.96	208.95	20.67	152.51
3	23.19	4.16	16.76	72.27%	471.16	219.52	20.67	150.29
4	25.82	3.13	15.95	61.77%	482.26	229.77	19.67	148.06
5	18.73	2.12	7.80	41.64%	266.09	208.81	19.33	145.83
6	34.19	3.14	19.36	56.62%	656.86	214.45	17.33	208.11
7	33.89	5.20	21.70	64.03%	653.63	257.98	18.33	179.20

Tabla 3.3 Tabla resumen de los resultados obtenidos para todas las mezclas.

Fuente: Elaboración propia

- **Resistencia máxima de carga aplicada (kN):**

Mezcla 6: La dosificación nos permite obtener una matriz más rígida y fuerte a comparación de las demás mezclas, es decir se alcanza un pico máximo con una baja deformación, por lo tanto, esta mezcla muestra una respuesta inicial sobresaliente.

Mezcla 7: De igual manera se obtiene una matriz rígida y fuerte, pero en menor medida a comparación de la Mezcla 6. Se alcanza un pico máximo similar a la de la mezcla anterior, pero con una mayor deformación, sin embargo, esta mezcla presenta una buena capacidad de respuesta inicial, lo que indica que mantiene un buen nivel de rigidez durante la fase elástica del material.

Mezcla 3 / Mezcla 4: Con respecto a las mezclas restantes, se logra una respuesta inicial favorable, en que las mezclas 3 y 4 muestran un mejor desempeño, debido a que alcanzan una alta resistencia pico con una baja deformación (mayor rigidez).

Mezcla 1: Aunque no se alcanza los valores de las mezclas con combinaciones y mayor proporción de fibras de acero y polipropileno, esta mantiene un nivel aceptable de resistencia inicial.

- **Capacidad residual (%) = Resistencia residual a 25mm (R₂₅) / Resistencia máxima de carga aplicada:**

Mezcla 1: Con una proporción del 100% de fibras de acero, presenta una caída post-pico más lenta en comparación a las demás mezclas, lo que se traduce a una mayor capacidad de deformación sin pérdida repentina de resistencia (ductilidad relativa).

Mezcla 3: Esta mezcla con una proporción equitativa del 50% en las fibras de acero y polipropileno, permite un balance entre el puenteo de macro fisuras y micro fisuras, lo que nos da una alta retención y disipación de energía aportada por ambas fibras.

Mezcla 7: Para esta mezcla con una proporción equitativa del 75% en las fibras de acero y polipropileno, se logra una buena sinergia de ambas fibras, en la que cada una trabaja de manera complementaria dentro de la matriz del hormigón, lo que nos permite obtener un puenteo sostenido post-fractura.

Mezcla 2: Con esta mezcla que tiene una proporción más alta de fibra de acero (75%), que de la fibra de polipropileno (25%), se obtiene una retención aceptable.

Mezcla 6: Esta mezcla con una proporción equitativa del 100% en las fibras de acero y polipropileno, presenta una buena capacidad residual lo que permite tener una adecuada respuesta post-fisura en términos de ductilidad.

- **Tenacidad total (E₂₅ = energía absorbida a 25mm, N·m):**

Mezcla 6: Debido a que esta mezcla alcanza una alta resistencia pico con menor deformación, se obtiene una mayor área bajo la curva carga-deformación, y su buen comportamiento residual post-fractura contribuye a que el material tenga una excelente capacidad de absorción de energía (E₂₅), en comparación con las demás mezclas.

Mezcla 7: Se obtiene una energía absorbida a 25mm de deformación similar a la mezcla anterior, debido a que la misma presenta un buen comportamiento residual y alcanza una alta resistencia pico, pero con una mayor deformación.

Mezcla 1 / Mezcla 3 / Mezcla 4: Se identificaron tres mezclas con un post-pico sostenido y con una gran área acumulada, lo que permite tener un adecuado nivel de absorción de energía.

- **Resistencia a la compresión ($f'c$) a 28 días (kg/cm^2):**

Mezcla 7: Esta mezcla optimizada (granulometría + fibras) alcanza una elevada resistencia a la compresión, debido a que la misma presenta una mejor compactación y distribución de las fibras de acero y polipropileno.

Mezcla 3 / Mezcla 4 / Mezcla 6: Se identificaron tres mezclas que debido a las proporciones de ambas fibras permitieron mejorar la calidad en la matriz del hormigón. Estas mezclas alcanzaron valores de resistencia a la compresión que superan a la resistencia esperada a los 28 días ($210 kg/cm^2$).

Mezcla 1: Con esta mezcla se obtiene un nivel de resistencia a la compresión inferior a la resistencia de diseño.

- **Trabajabilidad (cm):**

Mezcla 3 / Mezcla 2: Las fracciones de fibras de acero y polipropileno para ambas mezclas, en cantidades menos significativas respecto al volumen total, nos permite obtener una mejor dispersión de las fibras, y por ende un revenimiento aceptable del hormigón.

Mezcla 1: Con esta mezcla (proporción del 100% fibras de acero) se obtiene una trabajabilidad muy cercana al patrón.

Mezcla 6 / Mezcla 7: En estas mezclas se presenta una disminución significativa de la trabajabilidad del hormigón, lo cual refleja una menor fluidez de la mezcla y una mayor exigencia en su aplicación. El aporte de proporciones más altas de fibras de acero y polipropileno produce revenimientos bajos del hormigón con respecto al esperado por el diseño.

Debido a que la Mezcla 6 presenta un costo elevado y una trabajabilidad muy deficiente, y considerando que la Mezcla 1 no satisface los objetivos planteados en la investigación, ambas mezclas quedan descartadas como opción para ser considerada como mezcla óptima o una alternativa viable dentro del proceso de selección.

3.3 Diseño de la solución

A continuación, se realiza la presentación de la propuesta final, derivada de la interpretación de los resultados obtenidos, en la que se define la mezcla óptima y su aplicación en obras de Ingeniería Civil.

3.3.1 Selección de la mezcla óptima

De lo expuesto en el análisis de resultados, hemos seleccionado las dos mejores mezclas de entre las propuestas, para posteriormente identificar la mezcla óptima (solución) y una mezcla alternativa con resultados aceptables.

Mezclas destacadas en base a su desempeño de absorción de energía

➤ **Mezcla 7 (75% acero + 75% PP) – ÓPTIMA**

Por qué destaca:

- Tenacidad a la fractura (E_{25}): Su alta resistencia inicial y su buen comportamiento residual post fractura, contribuye a que el material tenga una excelente capacidad de absorción de energía y un buen equilibrio entre resistencia y ductilidad. Esta mezcla destaca por su alta tenacidad a la fractura en comparación a las demás mezclas.
- Resistencia a la compresión (f'_c): Esta mezcla nos permite obtener una resistencia a la compresión que supera de manera significativa a la resistencia de diseño.

Posible desventaja:

- Trabajabilidad: Se presenta una disminución significativa de la trabajabilidad del hormigón, lo cual refleja una menor fluidez del material, y una mayor exigencia en su aplicación.

➤ **Mezcla 3 (50% acero + 50% PP) – ALTERNATIVA**

Por qué destaca:



- Tenacidad a la fractura (E_{25}): Presenta una buena capacidad de absorción de energía en la zona post-fisura, lo cual demuestra que la combinación de fibras permite mantener esfuerzos luego de la fisuración inicial.
- Resistencia a la compresión (f'_c): Se alcanza una resistencia similar al propuesto por el diseño.
- Trabajabilidad: Esta mezcla permite obtener una trabajabilidad muy cercana al patrón, lo cual garantiza una adecuada fluidez del material.

Mezcla #7: Una vez realizado el análisis técnico y económico, se determina como la mezcla óptima (solución), a la Mezcla 7 (Ver Tabla 3.4 y Tabla 3.5), la cual presenta un mejor desempeño global de entre todas las mezclas propuestas en esta investigación y mantiene un buen equilibrio entre su capacidad de absorción de energía y su costo de fabricación. Esta mezcla cuenta con una alta resistencia inicial, una buena capacidad residual en la zona post-fisura, y por ende de una mayor tenacidad a la fractura.

Mezcla #7 (Óptima) 75% de fibras de acero y 75% fibras de polipropileno	
Resistencia máxima	33.89 kN
Deformación Pico	5.2 mm
Capacidad residual	64.03 %
Energía absorbida a 25mm (E ₂₅)	653.63 Nxm
Resistencia a la compresión (f'c) a los 28 días	257.98 kg/cm ²
Trabajabilidad	18.33 cm
Costo por metro cúbico	\$ 179.20

Tabla 3.4 Datos de la Mezcla Óptima.

Fuente: Elaboración propia

Mezcla #7 (Óptima)		
Materiales	Dosificación (kg) Volumen = 1 m³	Ilustración
Cemento Tipo GU	370	
Agua Potable	187,75	

Mezcla #7 (Óptima)		
Materiales	Dosificación (kg) Volumen = 1 m ³	Ilustración
Arena Gruesa (Módulo de finura 1.63)	913,5	
Grava 3/4" (Piedra Gris)	831,75	
Fibra de polipropileno Sika Force-48	3,75	
Fibra de acero Dramix	11,25	


Mezcla #7 (Óptima)		
Materiales	Dosificación (kg) Volumen = 1 m ³	Ilustración
Aditivo Super plastificante	2,95	

Tabla 3.5 Materiales de la Mezcla Óptima.






Fuente: Elaboración propia

Mezcla #3: Como alternativa de solución para proyectos de ingeniería civil con presupuestos muy limitados y que no requieren de una alta exigencia mecánica de los materiales, se recomienda a la Mezcla 3 (Ver Tabla 3.6 y Tabla 3.7), la cual muestra un buen desempeño al contar con una resistencia inicial favorable y de una buena capacidad residual en la zona post-fisura.

Mezcla #3 (Alternativa)	
50% de fibras de acero y 50% fibras de polipropileno	
Resistencia máxima	23.19 kN
Deformación Pico	4.16 mm
Capacidad residual	72.27 %
Energía absorbida a 25mm (E ₂₅)	471.16 Nxm
Resistencia a la compresión (f'c) a los 28 días	219.52 kg/cm ²
Trabajabilidad	20.67 cm
Costo por metro cúbico	\$ 150.29

Tabla 3.6 Datos de la Mezcla Alternativa

Fuente: Elaboración propia

Mezcla #3 (Alternativa)		
Materiales	Dosificación (kg) Volumen = 1 m ³	Ilustración
Cemento Tipo GU	370	
Agua Potable	188	
Arena Gruesa (Módulo de finura 1.63)	918,5	
Grava 3/4" (Piedra Gris)	838,5	
Fibra de polipropileno Sika Force-48	2,5	



Mezcla #3 (Alternativa)		
Materiales	Dosificación (kg) Volumen = 1 m ³	Ilustración
Fibra de acero Dramix	7,5	
Aditivo Super plastificante	2,95	

Tabla 3.7 Materiales de la Mezcla Alternativa.

Fuente: Elaboración propia

De ambas mezclas recomendadas para su uso en proyectos de ingeniería civil, se pueden aprovechar por el aporte de las fibras de acero y polipropileno, los siguientes beneficios:

Aporte de la fibra de acero

- Punteo de macro fisuras: Ayuda a sostener cargas tras la fisuración principal dándonos una tenacidad alta.
- Post-pico más plano: Nos otorga una menor caída de carga después del pico con una retención sólida post fisura.
- Energía acumulada: Eleva el área bajo la curva a grandes deformaciones lo que contribuye a una mayor absorción de energía.

Aporte de la fibra de polipropileno (PP)

- Multiplicación de micro fisuras y control del inicio del daño: la curva carga vs deformación es más estable y con menos dispersión.

- Transición al post-pico más gradual: Ayuda a que la pérdida de capacidad no sea abrupta, favoreciendo la energía acumulada en el rango 5–15 mm.
- Beneficio constructivo: Limita la fisuración temprana; en esta mezcla se logró buen equilibrio pese a la penalización moderada en trabajabilidad. Además de ser un material apropiado en ambientes con condiciones abrasivas.

3.3.2 Recomendaciones de aplicación

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis técnico y económico, se recomienda la aplicación de este tipo de hormigones en elementos sometidos a cargas de impacto, fatiga o abrasión, donde la ductilidad y la capacidad de disipación de energía son parámetros determinantes en la resistencia y seguridad de las estructuras. Por lo tanto, el hormigón reforzado con fibras combinadas de acero y polipropileno debe ser usado en las siguientes aplicaciones:

- Pisos industriales y losas de alta sollicitación mecánica, donde la resistencia a fisuración y la capacidad del material para redistribuir esfuerzos reducen la formación y propagación de grietas.
- Losas colaborantes y elementos prefabricados, en lo que el hormigón reforzado con fibras de acero y polipropileno mejora el comportamiento post-fisura y permite optimizar el uso de armaduras convencionales.
- Pavimentos de alto tráfico o áreas de carga pesada.
- Revestimiento de hormigón proyectado en túneles.

3.3.3 Limitaciones

A pesar de que los resultados obtenidos son representativos del comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero y polipropileno, el presente estudio presenta ciertas limitaciones que deben considerarse al extrapolar los mismos a aplicaciones a gran escala:

- Variabilidad del material: Las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras de acero y polipropileno puede ser modificado por la homogeneidad de la mezcla, la dispersión de las fibras y las condiciones de curado, factores que presentan una mayor variación e influyen de manera directa durante la ejecución de la Obra.
- Alcance de los ensayos: Esta evaluación se limitó a obtener la tenacidad a la fractura a 25mm de deformación, para lo cual no se incluyeron estudios de

durabilidad, retracción, comportamiento cíclico o resistencia a la fatiga del hormigón reforzado con fibras de acero y polipropileno.

- Condiciones ambientales: No se analizó los efectos de la temperatura, humedad o de la exposición a agentes agresivos (cloruros, sulfatos, carbonatación), parámetros que pueden modificar el desempeño de las fibras, especialmente en ambientes marinos o industriales.

Para investigaciones futuras, se recomienda tener en cuenta los siguientes puntos:

- Realizar ensayos a escala real (losas o vigas de laboratorio) para validar la respuesta estructural obtenida en probetas pequeñas.
- Evaluar el comportamiento a largo plazo, considerando ciertos parámetros tales como la durabilidad, la corrosión de las fibras metálicas y el desempeño bajo cargas repetidas.

3.4 Especificaciones técnicas

1. Hormigón reforzado con fibras de acero y polipropileno, mezcla óptima N.-7 (75% fibras de acero y 75% fibras de polipropileno) para aplicaciones de obras civiles de alta exigencia.

Descripción. -

Es el hormigón reforzado con proporciones de 75% fibras de acero y 75% fibras de polipropileno, que será utilizado en varias aplicaciones como: pisos industriales, losas colaborantes, pavimentos de alto tráfico, revestimiento de hormigón proyectado en túneles. Esta especificación técnica incluye el proceso de fabricación, vertido, compactación y curado del hormigón reforzado con fibras de acero y polipropileno.

Unidad: Metro cúbico (m³).

Materiales mínimos: Cemento tipo GU, Agua potable, Arena gruesa, Ripio triturado (Grava 3/4"), Aditivo super plastificante, Fibra de acero Dramix, Macrofibra de polipropileno SikaForce-48; que deben cumplir con las especificaciones técnicas de materiales.

Equipo mínimo: Concretera de 1 Saco o Mixer con bomba nivel piso, Vibrador de concreto, elevador, herramientas menores.

Mano de obra mínima calificada: Maestro mayor en ejecución de Obras Civiles, peón, albañil, operador de vibrador.

Procedimiento. -

Se aprobará el tipo, dosificación, instrucciones y recomendaciones a considerar para los aditivos, y las fibras de acero y polipropileno.

Verificado el cumplimiento de los requerimientos previos, se empieza vertiendo los agregados debidamente pesados según la dosificación, y se procede a mezclarlos en seco por 1 minuto. Se vierte alrededor del 70% del agua según la dosificación, y se vuelve a mezclar con los agregados de 1 a 2 minutos aproximadamente. Se detiene el mezclado para verter todo el cemento y procedemos a mezclar por 30 segundos, luego mientras la mezcla sigue en marcha se introduce las fibras manteniendo el siguiente orden: primero las fibras de acero y a continuación las fibras de polipropileno. Añadimos el 30% restante de agua y el aditivo super plastificante según la dosificación de la mezcla y se continua con el mezclado por 2 minutos.

Previo al vaciado, el constructor deberá proveer de canalones, elevadores, artesas y plataformas adecuadas a fin de transportar el hormigón en forma correcta hacia los diferentes niveles de consumo. En todo caso no se permitirá que se deposite el hormigón desde una altura tal que se produzca la separación de los agregados.

Se procederá con el vaciado del hormigón elaborado en Obra o premezclado, en capas de un espesor que permita un adecuado vibrado y compactación.

La compactación del hormigón se ejecutará continuamente a medida que se vaya complementando las áreas fundidas para evitar una orientación preferencial excesiva de fibras y eliminar las burbujas de aire; y simultáneamente con la ayuda de codales metálicos o de madera se garantizará las pendientes y niveles indicados en los planos.

Para la protección del hormigón durante las primeras 24 horas, se aplicará un aditivo curador para evitar una pérdida drástica de agua y posibles fisuras por acción del calor.

Ningún elemento de hormigón reforzado con fibras debe ser desencofrado antes de que el hormigón haya adquirido la resistencia mínima de acuerdo con el tiempo mínimo de fraguado y que sea comprobado por medio de ensayos de rotura por compresión, de esta manera al quitar los elementos de encofrado, no se producirán descascaramientos, distorsiones, flechas y otros daños por efecto del retiro de moldes.

Dentro de lo posible, todas las superficies de hormigón deben mantenerse a una temperatura de más de 10 grados centígrados y en condición húmeda, mediante rociados con agua potable convenientemente espaciados, por lo menos durante los 7 primeros días después de su colocación.

El hormigón se sujetará a pruebas de laboratorio y de campo (ensayo de asentamiento de Cono de Abrams y ensayo de resistencia a la rotura por compresión), así como de las tolerancias y condiciones en las que se realiza dicha entrega.

Para la ejecución de los trabajos se debe cumplir con los requerimientos del Código Ecuatoriano de la Construcción C.E.C. vigente, en lo que se refiere a: Materiales, valores de asentamientos, hormigón premezclado, hormigón mezclado en sitio, vaciado del hormigón, curado del hormigón, pruebas de laboratorio y de campo.

Medición y Pago. -

La medición se realizará en unidad de volumen y su pago será por metro cúbico (m³), con aproximación de dos decimales. Las cantidades establecidas se pagarán al precio contractual, el cual constituye la compensación total por el empleo de equipos, herramientas, mano de obra, materiales y demás trabajos adicionales, que son necesarias para la correcta ejecución del rubro.

MEZCLA ÓPTIMA N.-7				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Cemento Tipo GU	kg	370.000	0.17	62.90
Agua	m ³	0.188	1.00	0.19
Arena gruesa*	m ³	0.697	10.50	7.32
Grava 3/4" **	m ³	0.525	12.50	6.56
Fibra de acero Dramix	kg	11.250	4.15	46.71
Fibra de polipropileno Sika Force-48	kg	3.750	10.67	40.03
Aditivo Super plastificante	kg	2.950	5.25	15.49
Costo por metro cúbico:				179.20
* La cantidad de arena se determina: $918.5 \text{ kg} / 1317 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidad)} = 0.697 \text{ m}^3$				
** La cantidad de grava 3/4" se determina: $838.5 \text{ kg} / 1596 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidad)} = 0.525 \text{ m}^3$				

Tabla 3.8 Costo unitario por metro cúbico de la mezcla óptima: Mezcla 7

Fuente: *Elaboración propia*

2. Hormigón reforzado con fibras de acero y polipropileno, mezcla alternativa N.-3 (50% fibras de acero y 50% fibras de polipropileno) para aplicaciones de obras civiles de exigencia media.

Descripción. -

Es el hormigón reforzado con proporciones de 50% fibras de acero y 50% fibras de polipropileno, que será utilizado en varias aplicaciones como: losas colaborantes, elementos prefabricados, revestimiento de hormigón proyectado en túneles. Esta especificación técnica incluye el proceso de fabricación, vertido, compactación y curado del hormigón reforzado con fibras de acero y polipropileno.

Unidad: Metro cúbico (m³).

Materiales mínimos: Cemento tipo GU, Agua potable, Arena gruesa, Ripio triturado (Grava 3/4"), Aditivo super plastificante, Fibra de acero Dramix, Macrofibra de polipropileno SikaForce-48; que cumplirán con las especificaciones técnicas de materiales.

Equipo mínimo: Concretera de 1 Saco o Mixer con bomba nivel piso, Vibrador de concreto, elevador, herramientas menores.

Mano de obra mínima calificada: Maestro mayor en ejecución de Obras Civiles, peón, albañil, operador de vibrador.

Procedimiento. -

Se aprobará el tipo, dosificación, instrucciones y recomendaciones a considerar para los aditivos, y las fibras de acero y polipropileno.

Verificado el cumplimiento de los requerimientos previos, se empieza vertiendo los agregados debidamente pesados según la dosificación, y se procede a mezclarlos en seco por 1 minuto. Se vierte alrededor del 70% del agua según la dosificación, y se vuelve a mezclar con los agregados de 1 a 2 minutos aproximadamente. Se detiene el mezclado para verter todo el cemento y procedemos a mezclar por 30 segundos, luego mientras la mezcla sigue en marcha se introduce las fibras manteniendo el siguiente orden: primero las fibras de acero y a continuación las fibras de polipropileno. Añadimos el 30% restante de agua y el aditivo super plastificante según la dosificación de la mezcla y se continua con el mezclado por 2 minutos.

Previo al vaciado, el constructor deberá proveer de canalones, elevadores, artesas y plataformas adecuadas a fin de transportar el hormigón en forma correcta hacia los

diferentes niveles de consumo. En todo caso no se permitirá que se deposite el hormigón desde una altura tal que se produzca la separación de los agregados.

Se procederá con el vaciado del hormigón elaborado en Obra o premezclado, en capas de un espesor que permita un adecuado vibrado y compactación.

La compactación del hormigón se ejecutará continuamente a medida que se vaya complementando las áreas fundidas para evitar una orientación preferencial excesiva de fibras y eliminar las burbujas de aire; y simultáneamente con la ayuda de codales metálicos o de madera se garantizará las pendientes y niveles indicados en los planos.

Para la protección del hormigón durante las primeras 24 horas, se aplicará un aditivo curador para evitar una pérdida drástica de agua y posibles fisuras por acción del calor.

Ningún elemento de hormigón reforzado con fibras debe ser desencofrado antes de que el hormigón haya adquirido la resistencia mínima de acuerdo con el tiempo mínimo de fraguado y que sea comprobado por medio de ensayos de rotura por compresión, de esta manera al quitar los elementos de encofrado, no se producirán descascamientos, distorsiones, flechas y otros daños por efecto del retiro de moldes.

Dentro de lo posible, todas las superficies de hormigón deben mantenerse a una temperatura de más de 10 grados centígrados y en condición húmeda, mediante rociados con agua potable convenientemente espaciados, por lo menos durante los 7 primeros días después de su colocación.

El hormigón se sujetará a pruebas de laboratorio y de campo (ensayo de asentamiento de Cono de Abrams y ensayo de resistencia a la rotura por compresión), así como de las tolerancias y condiciones en las que se realiza dicha entrega.

Para la ejecución de los trabajos se debe cumplir con los requerimientos del Código Ecuatoriano de la Construcción C.E.C. vigente, en lo que se refiere a: Materiales, valores de asentamientos, hormigón premezclado, hormigón mezclado en sitio, vaciado del hormigón, curado del hormigón, pruebas de laboratorio y de campo.

Medición y Pago. -

La medición se realizará en unidad de volumen y su pago será por metro cúbico (m³), con aproximación de dos decimales. Las cantidades establecidas se pagarán al precio contractual, el cual constituye la compensación total por el empleo de equipos, herramientas, mano de obra, materiales y demás trabajos adicionales, que son necesarias para la correcta ejecución del rubro.

MEZCLA ALTERNATIVA N.-3				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Cemento Tipo GU	kg	370.000	0.17	62.90
Agua	m ³	0.188	1.00	0.19
Arena gruesa*	m ³	0.697	10.50	7.32
Grava 3/4" **	m ³	0.525	12.50	6.56
Fibra de acero Dramix	kg	7.500	4.15	31.14
Fibra de polipropileno Sika Force-48	kg	2.500	10.67	26.69
Aditivo Super plastificante	kg	2.950	5.25	15.49
Costo por metro cúbico:				150.29
* La cantidad de arena se determina: $918.5 \text{ kg} / 1317 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidad)} = 0.697 \text{ m}^3$				
** La cantidad de grava 3/4" se determina: $838.5 \text{ kg} / 1596 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidad)} = 0.525 \text{ m}^3$				

Tabla 3.9 Costo unitario por metro cúbico de la mezcla alternativa: Mezcla 3

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El análisis técnico y de costos demostró que el incremento en la dosificación de fibras de acero y fibras de polipropileno genera un efecto significativo en la capacidad de absorción de energía del hormigón, validando la hipótesis general planteada. Las fibras metálicas actúan como puentes de transferencia de esfuerzos a través de las fisuras, incrementando la tenacidad y la capacidad portante del material (hormigón). Por su parte, las fibras de polipropileno aportan una notable resistencia a la abrasión y al desgaste superficial; propiedad que complementa a las fibras metálicas y que resulta especialmente útil en pisos industriales, losas colaborantes, pavimentos de alto tráfico y revestimientos con hormigón proyectado en túneles.
- La Mezcla 7 alcanzó el mejor desempeño técnico, con costo por desempeño de apenas \$0.27 / Joule (Nxm), el más eficiente de todas las combinaciones. Este balance evidencia que una proporción mayoritaria de fibras de acero, complementada con fibras de polipropileno, optimiza simultáneamente la capacidad de carga, la ductilidad y la tenacidad a la factura. Confirmando la hipótesis específica, de que las mezclas con estas fibras logran un rendimiento integral superior.
- La Mezcla 3, compuesta por una proporción intermedia de fibras (50 % fibra de acero y 50 % fibra de polipropileno), mostró buenos resultados de absorción de energía (471 Nxm = Joule) y una capacidad residual del 72.27%, destacando como una opción más económica que, aunque no supera a la mezcla 7; ofrece un desempeño notablemente superior al del hormigón convencional. Evidenciando que incluso con menor contenido de fibras de acero y de polipropileno, este refuerzo híbrido mejora la tenacidad y ductilidad, constituyendo una alternativa viable para aplicaciones con requerimientos mecánicos moderados y presupuestos limitados.
- Este proyecto de investigación comprobó que la incorporación combinada de fibras de acero y polipropileno no solo mejora el comportamiento mecánico y el desempeño del hormigón, sino que también representa una alternativa frente a

soluciones tradicionales, prolongando la vida útil de los elementos estructurales. Esto las convierte en una tecnología compatible con los principios de sostenibilidad y eficiencia en la construcción moderna, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9, 11 y 12).

Recomendaciones

- Se recomienda fomentar el empleo de hormigones reforzados con fibras combinadas (acero + polipropileno) en proyectos de infraestructura, debido a su capacidad de absorber energía, resistir la propagación de fisuras y mejorar la durabilidad de los elementos estructurales.
- Es conveniente ampliar los estudios, incorporando ensayos complementarios de durabilidad, retracción, fatiga y comportamiento frente a ciclos de carga, a fin de evaluar el desempeño a largo plazo de las mezclas con ambas fibras y establecer parámetros de diseño más precisos.
- Se recomienda realizar una investigación y análisis con fibras de acero que tenga ganchos con más número de doblez en los extremos, y usar otros tipos de áridos gruesos y finos como piedra caliza, además de otros tipos de cemento; ya que podría permitir una optimización más precisa de la relación costo–desempeño, aportando información valiosa para la normalización y aplicación práctica de estos hormigones reforzados con fibras, en el sector del diseño y la construcción nacional.
- Se recomienda fortalecer la formación técnica y académica en el uso de hormigones reforzados con estas fibras, promoviendo capacitaciones, talleres y difusión de resultados experimentales entre profesionales, estudiantes y entidades del sector de la construcción, con el fin de incentivar la aplicación práctica y la innovación tecnológica en este campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Banthia, N., & Trottier, J. F. (s.f.). *ACI Materials Journal*. *ACI*.
- BarChip. (2018). *Best Practice for Testing Fibre Reinforced Shotcrete*. Obtenido de https://barchip.com/wp-content/uploads/2019/10/BarChip_TN-Best-Practice-for-Testing-FRS_2018_sec.pdf
- Bekaert. (2020). *Technical Data Sheet: Dramix® Steel Fibers*. Bekaert.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Taylor & Francis.
- Bošnjak, J., Sharma, A., & Grauf, K. (24 de Enero de 2019). Mechanical Properties of Concrete with Steel and Polypropylene Fibres at Elevated Temperatures. *Fibers*, 7 (2)(9), 13. doi:<https://doi.org/10.3390/fib7020009>
- Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (1963). *Experimental and quasi-experimental designs for research*. Houghton Mifflin.
- Campoverde Cajamarca, D. F. (2017). *Análisis del comportamiento del hormigón reforzado con fibras metálicas para el ensayo de flexo-tracción (trabajo de titulación)*. Machala: UTMACH.
- Compraco. (2024). *Nuevos desarrollos en hormigón con fibras de acero*. Obtenido de <https://compraco.com.br/es/blogs/construcao-civil/novos-desenvolvimentos-em-concreto-com-fibra-de-aco>
- Concretonline. (2020). *Empleo y aplicaciones de hormigones reforzados con fibras sintéticas estructurales*. Obtenido de <https://www.concretonline.com>
- Constrofacilitator. (July de 2020). *Fiber-reinforced concrete - Advantages, types and applications*. Obtenido de <https://constrofacilitator.com/fiber-reinforced-concrete-advantages-types-and-applications/>
- EFNARC. (1996). *European Specification for Sprayed Concrete*. European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- Hormigon, A. A. (2021). Hormigones reforzados con fibras de acero: conceptos fundamentales y aplicaciones estructurales. *Revista Hormigon*.

- Kerlinger, F. N., & Lee, H. B. (2002). *Foundations of behavioral research (4th ed.)*. Holt, Rinehart and Winston.
- Meda, A., & Plizzari, G. (2004). *Experimental evaluation of fiber reinforced concrete slabs under punching shear*. Cement and Concrete Research.
- Medium. (2020). *Los cuatro tipos de hormigón reforzado con fibras*. Obtenido de <https://medium.com/@bhconcretos/los-cuatro-tipos-de-hormig%C3%B3n-reforzado-con-fibras-eb157562e5bf>
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete (2nd ed.)*. Prentice Hall.
- MtCopeland. (2022). *¿Qué es el hormigón reforzado con fibras?* Obtenido de <https://mtcopeland.com/es/blog/what-is-fiber-reinforced-concrete/>
- Naaman, A. E. (2007). *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*.
- Neville, A. M. (2010). *Concrete Technology*. Prentice Hall.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson Education Limited.
- Psiconcreto. (2021). *Fibras para concreto: tipos y usos*. Obtenido de <https://psiconcreto.com/fibras-para-concreto-tipos-usos/>
- Revista Hormigón. (2021). Hormigones reforzados con fibras de acero. Conceptos fundamentales y aplicaciones estructurales. *Revista Hormigón 60*, 36–44.
- Serna-Ros, P., Martí-Vargas, J. R., & Gil, L. (2009). *Durability of polypropylene fibre reinforced concrete industrial floors*. Construction and Building Materials.
- Sika. (2022). *SikaFiber® Force-48 Technical datasheet*. Sika AG.
- Tenabrix. (2023). *Qué es el hormigón reforzado con fibras y cómo fabricarlo*. Obtenido de <https://tenabrix.com/es/que-es-el-hormigon-reforzado-con-fibras-y-como-fabricarlo/>
- Texdelta. (2023). *Hormigón reforzado con fibras: definición y aplicaciones*. Obtenido de <https://texdelta.com/blog/hormigon-reforzado-con-fibras/>
- Yao, W., Li, J., & Wu, K. (2003). *Cement and Concrete Research*.

ANEXOS

ANEXO 1: FICHA TÉCNICA FIBRA DE ACERO

Dramix® MallaEnBolsa+

El futuro del reforzamiento

Dramix® MallaEnBolsa+

Beneficios en tus losas livianas

- 1 Mayor resistencia
- 2 Reemplaza la malla electrosoldada
- 3 Refuerza de forma activa cada parte de la estructura de concreto

¿Por qué escoger Bekaert?

Líder a nivel mundial

Somos líderes en fabricación de productos de alambre.

Bekaert es la empresa líder en la fabricación de productos de alambre, ofreciendo una amplia gama de productos, adaptados a una variedad de segmentos tales como agrícola, industrial, construcción entre otros.

¿Qué ofrecemos?

Dramix® MallaEnBolsa+ son fibras de acero de refuerzo de concreto que actúan en tres dimensiones reemplazando la malla electrosoldada o varillas de acero en placas de contrapiso de cargas livianas (menores a 500 kg/m²), contrapisos residenciales, camineras residenciales, aceras y láminas colaborantes.

Ideal para

> Pisos Livianos

Usar una bolsa para una losa sobre terreno con área de 20 m² y con un espesor de 10 cm, reemplazando la malla electrosoldada de diámetro de 5 mm con cuadro de 15x15 cm.

> Camineras Residenciales y Aceras

Reemplaza el refuerzo aplicar una bolsa de Dramix® MallaEnBolsa+ / m³.

> Placa Colaborante

Reemplaza únicamente la malla electrosoldada de retracción y temperatura, cualquier refuerzo adicional o conector debe mantenerse según recomendación del diseñador estructural.

Utiliza un kilo de Dramix® MallaEnBolsa+ / m².

Características

Propiedades del material

Resistencia Nominal a la tracción:	1.800 (N/mm ²)
Módulo de Young:	200.000 (N/mm ²)
Tensión en estado último:	0,8 %



Geometría

Gama de fibras



Longitud (l) 60 mm



Diameter (d) 0,75 mm



Certificados del producto*



Conformidad del producto

Dramix® MallaEnBolsa+ conforme a las especificaciones:

Fabricación:

- EN 14889-1 (Certificación CE)
- ASTM A 820

Certificación:

- CE
- ISO

Norma Local:

- NORMA NTE INEN ISO 13270
- NORMA NTE INEN 3063 y 3069



SACOS
10 kg

Certificados del sistema

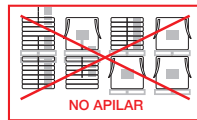


Todas las plantas industriales Dramix® cuentan con el certificado ISO 9001 e ISO 14001.

Manipulación



Mantener en un lugar seco
Una vez abierta la funda, para preservar el material, doble y selle la funda para evitar humedad.



No apilar pallets
Cada pallet contiene 100 fundas de Dramix® MallaEnBolsa+ de 10 kgs.



Para recomendaciones sobre manejo, dosificación y mezcla **escanea aquí** ▶

¿Más
información?

www.idealalambrec.beaert.com

Ecuador:
www.idealalambrec.beaert.com

1800 25 26 27
(Alambre)

Nos reservamos el derecho de realizar modificaciones.

Todos los detalles describen nuestros productos solo en forma general.

Para realizar pedidos, utilice únicamente las especificaciones oficiales y documentos correspondientes.

A menos que se indique lo contrario, todas las marcas comerciales mencionadas en este folleto son marcas comerciales registradas de Ideal Alambrec S.A, NV Bekaert SA o sus subsidiarias.
© Bekaert 2023

ANEXO 2: FICHA TÉCNICA FIBRA DE POLIPROPILENO

HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO

SikaFiber® Force-48

MACROFIBRA SINTÉTICA PARA HORMIGÓN ESTRUCTURAL Y PROYECTADO.

DESCRIPCION DEL PRODUCTO

SikaFiber® Force-48 es una macrofibra sintética de uso estructural para hormigón proyectado y hormigón convencional.

USOS

SikaFiber® Force-48 es un producto especialmente recomendado para:

Hormigón proyectado:

- Estabilización en excavaciones de túnel y minería
- Estabilización de taludes y terrenos
- Sustitución de armado de acero en aplicaciones de hormigón proyectado

Hormigón de obra y Prefabricado:

- Hormigón para losas y pavimentos industriales
- Cimentaciones con hormigón reforzado con fibra
- Elementos prefabricados de hormigón
- Aplicaciones en hormigón que requieren alta resistencia a la abrasión

CARACTERISTICAS / VENTAJAS

Con la adición de SikaFiber® Force-48, aporta las siguientes ventajas en las características del hormigón endurecido:

- Mejora resistencias del hormigón endurecido
- Alto rango de absorción de energía para hormigón proyectado
- Capacidad de puenteo de fisuras, especialmente en grandes aberturas
- Superficies sin óxido

CERTIFICADOS / NORMAS

- Marcado CE y declaración de prestaciones según EN 14889-2-Fibras para hormigón. Fibras Poliméricas.

INFORMACION DEL PRODUCTO

Base Química	Poliiolefina
Empaques	SikaFiber® Force-48 está disponible en sacos hidrosolubles de 5 kilos. Consulte la tarifa actual para conocer las variaciones de embalaje.
Apariencia / Color	Fibras blancas, rectas y con relieve.
Vida en el recipiente	5 años de vida útil a partir de la fecha de fabricación si se almacena correctamente en el empaque original, sin daños y sin abrir.
Condiciones de Almacenamiento	Almacenar a temperaturas que aseguren un rango entre 5°C y 30°C. Proteger de la luz solar directa, el agua y la contaminación en su empaque original.
Densidad	~0,901 kg/l
Declaración de Producto	EN 14889-2: Clase II: Macro fibras

Dimensiones	Diámetro equivalente	~0,84 mm
	Longitud	~48 mm

Punto de Fusión	~164 °C
-----------------	---------

INFORMACION TECNICA

Resistencia a tensión	~465 N/mm ² (MPa)	(EN 14889-2)
-----------------------	------------------------------	--------------

Módulo de Elasticidad a Tensión	~7,5 kN/mm ² (GPa)	(EN 14889-2)
---------------------------------	-------------------------------	--------------

INFORMACION DE APLICACIÓN

Dosificación Recomendada	2-10 kg/m ³
--------------------------	------------------------

Compatibilidad	Compatible con otros aditivos Sika®
----------------	-------------------------------------

NOTAS

Los usuarios deben referirse siempre a la versión local más reciente de la Hoja Técnica del Producto cuya copia será suministrada al ser solicitada.

LIMITACIONES

Para unos buenos resultados se recomienda el uso de un hormigón de calidad.

Las fibras no mejoran la calidad de un hormigón pobre. SikaFiber® Force-48 es compatible con otros aditivos de Sika. Siempre se debe consultar con un ingeniero experto en fibras para el cambio de armado metálico por fibra.

Para más información, póngase en contacto con el Departamento Técnico.

ECOLOGIA, SALUD Y SEGURIDAD

REGULACIÓN (EC) Nº 1907/2006 - REACH

No contiene ninguna sustancia destinada a ser liberada del artículo en condiciones de uso normales o razonablemente previsibles. No es necesaria una ficha de datos de seguridad según el artículo 31 de la misma normativa para la comercialización, el transporte o la utilización del producto. Para un uso seguro, siga las instrucciones de la hoja de datos del producto. Según nuestros conocimientos actuales, este producto no contiene SVHC (sustancias altamente preocupantes) como las enumeradas en el Anexo XIV del reglamento REACH o en la lista de candidatos publicada por la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos en concentraciones superiores al 0,1 % (p/p).

INSTRUCCIONES DE APLICACION

DOSIFICACIÓN

SikaFiber® Force-48 se dosifica con los áridos secos cuidando de que se distribuyan uniformemente por toda la mezcla. Las fibras se pueden añadir una vez ya añadidos todos los componentes de la mezcla, aunque puede ser necesario prolongar el tiempo de mezclado para garantizar una distribución uniforme de las fibras. Como guía, aumentar la mezcla al menos 1 min por m³.

No añadir las fibras directamente en el agua de amasado.

RESTRICCIONES LOCALES

Este producto puede variar en su funcionamiento o aplicación como resultado de regulaciones locales específicas. Por favor, consulte la hoja técnica del país para la descripción exacta de los modos de aplicación y uso.

NOTAS LEGALES

La información, y en particular las recomendaciones relacionadas con la aplicación y uso final de los productos Sika, se proporcionan de buena fe, con base en el conocimiento y la experiencia actuales de Sika sobre los productos que han sido apropiadamente almacenados, manipulados y aplicados bajo condiciones normales de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones actuales de las obras son tales, que ninguna garantía con respecto a la comercialidad o aptitud para un propósito particular, ni responsabilidad proveniente de cualquier tipo de relación legal pueden ser inferidos ya sea de esta información o de cualquier recomendación escrita o de cualquier otra asesoría ofrecida. El usuario del producto debe probar la idoneidad del mismo para la aplicación y propósitos deseados. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de los productos. Los derechos de propiedad de terceras partes deben ser respetados. Los usuarios deben referirse siempre a la versión local más reciente de la Hoja Técnica del Producto cuya copia será suministrada al ser solicitada. Para más información visite: web: <http://ecu.sika.com>.

Durán:

Km 3.5 vía Durán-Tambo
PBX 0999502574

Machachi:

Parque Industrial El Obraje, frente al
Fuerte Militar Atahualpa
Panamericana E35 Vía Machachi –
Alóag
PBX: 0999502574

Hoja Técnica de Producto

SikaFiber® Force-48
Octubre 2025, Versión 03.03
02140802100000097

ANEXO 3: FICHAS TÉCNICAS DE ADITIVOS
(SUPER PLASTIFICANTE, DESMOLDANTE Y
CURADOR)

HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO

Sika® ViscoCrete® GL 7954

Aditivo retenedor de asentamiento: súper plastificante de nueva generación/reductor de agua de alta actividad/estabilizador del contenido de aire en concreto.

DESCRIPCION DEL PRODUCTO

Sika® ViscoCrete® GL 7954, es un aditivo reductor de agua de alto rango a base de Policarboxilatos. Es muy efectivo para producir mezclas de concreto con diferentes niveles de trabajabilidad y retención de asentamiento, incluidas aplicaciones que requieren el uso de concreto autonivelante. Formulado con tecnología de última generación especializada en reducir y estabilizar el contenido de aire en mezclas de concreto. Cumple con los requisitos ASTM C494 para aditivos reductores de agua Tipo A y aditivos reductores de agua de alto rango Tipo F.

USOS

- Hormigones donde se requieran reducciones de agua del 5% al 40%.
- Hormigones donde se requieren tiempos de fraguado normales.
- Hormigones de alta fluidez y gran durabilidad.
- Hormigones donde se requieran altas resistencias mecánicas y acabados superiores.
- Hormigones donde se requiera estabilizar su contenido de aire.
- En la producción de mezclas de hormigón autonivelantes.
- En la producción de mezclas de concreto que requieran una mayor retención del asentamiento.
- Muy eficaz para mezclas de hormigón con asentamientos medios (150 a 200 mm), como el hormigón de flujo libre.

CARACTERISTICAS / VENTAJAS

- Contenido de agua reducido para un determinado nivel de trabajabilidad.
- Reducción lineal de agua en todo el rango de dosificación.
- Puede ser utilizado en mezclas de concreto que re-

quieran aditivos tipo A o F.

- Reología controlada.
- Se obtiene hormigón cohesivo sin segregación. Sika® ViscoCrete® GL 7954, ayuda en la producción de hormigón de calidad proporcionando las siguientes ventajas especiales:
 - Mejora la resistencia y durabilidad del hormigón.
 - Mejores características de acabado en pisos y en cualquier aplicación donde se utilicen encofrados deslizantes.
 - Reducida necesidad de vibración.
 - Sika® ViscoCrete® GL 7954, es eficaz como aditivo único o como parte de un sistema de aditivos Sika Ecuatorina.
 - Aumento del desarrollo de la resistencia a la compresión y flexión en todas las edades.
 - Beneficios económicos para todo el equipo de construcción, con mayor productividad y reducción de costos variables.
 - Reducción de contracciones y aumento de la vida útil de las estructuras.
 - Reduce el contenido de agua para un asentamiento determinado y reduce la segregación.
 - Reduce el contenido de aire, estabilizándolo eficazmente.
 - Excelente comportamiento en hormigón proyectado por su alto poder reductor de agua.

INFORMACION DEL PRODUCTO

Empaques	Sika® ViscoCrete® GL 7954, está disponible en IBC y a granel.
Vida en el recipiente	Un (1) año desde su fecha de fabricación. Para el transporte se deben tomar las precauciones habituales para productos químicos.
Condiciones de Almacenamiento	El producto debe almacenarse en envases sellados originales, sin abrir y sin daños.
Densidad	Aprox. a 20 °C 1,09 ± 0,01 kg/L.

INFORMACION DE APLICACIÓN

Dosificación Recomendada	<p>Dosis: La dosis recomendada del aditivo Sika® ViscoCrete® GL 7954, es de 150 a 1200 ml/100 kg de material cementoso (0,15% - 1,2% del peso del material cementoso), para la mayoría de las mezclas de hormigón. Se pueden utilizar dosis fuera del rango recomendado debido a variaciones en los materiales del concreto, condiciones de campo o aplicaciones, en estos casos se recomienda contactar a su representante local de Sika.</p> <p>Mezclado: Para un tiempo de trabajabilidad más prolongado, se recomienda agregar el aditivo Sika® ViscoCrete® GL 7954, al agua de mezclado inicial.</p> <p>Corrosividad: Sika® ViscoCrete® GL 7954, el aditivo no iniciará ni promoverá la corrosión del acero de refuerzo incrustado en concreto o concreto pretensado o postensado. Sika® ViscoCrete® GL 7954, no contiene cloruros.</p> <p>Compatibilidad: Sika® ViscoCrete® GL 7954, es compatible con la mayoría de los aditivos utilizados en la producción de concreto, incluidos los aditivos reductores de agua de rango normal, medio y alto, incluye aire, aceleradores, retardadores, aditivos de control del tiempo de fraguado, inhibidores de corrosión y reductores de contracción.</p>
---------------------------------	---

NOTAS

ECOLOGIA, SALUD Y SEGURIDAD

Para obtener información y recomendaciones sobre transporte, manipulación, almacenamiento y eliminación de productos químicos, consulte la información de seguridad más reciente que contiene datos relacionados con la seguridad física, ecológica, toxicológica y de otro tipo.

NOTAS LEGALES

La información y, en particular, las recomendaciones relativas a la aplicación y uso final de Sika productos, se proporcionan de buena fe basándose en el conocimiento y la experiencia actuales de Sika sobre los productos cuando se almacenan, manipulan y aplican

adecuadamente en condiciones normales de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las diferencias en materiales, sustratos y condiciones reales del sitio son tales que no se puede inferir ninguna garantía con respecto a la comerciabilidad o la idoneidad para un propósito particular, ni ninguna responsabilidad que surja de cualquier relación legal, ya sea de esta información, o de cualquier recomendación escrita o de cualquier otro consejo ofrecido. El usuario del producto debe probar la idoneidad del producto para la aplicación y el propósito previstos. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de sus productos. Deben respetarse los derechos de propiedad de terceros. Todos los pedidos se aceptan sujetos a nuestras condiciones de venta y entrega vigentes. Los usuarios siempre deben consultar la edición más reciente de la hoja de datos del producto local correspondiente al producto en cuestión, cuyas copias se proporcionarán previa solicitud.

Durán:

Km. 3.5 vía Durán-Tambo.
PBX (593) 4 2812700

Quito:

Av. Naciones Unidas entre Iñaquito
y Núñez de Vela.
Piso 11. Oficinas: 1111 - 1112
Tel: (593) 2 4506455

Cuenca:

Av. Ordóñez Lasso y Los Claveles.
Edificio Palermo
Tel: (593) 7 4089725

SikaViscoCreteGL7954-es-EC-(03-2025)-2-1.pdf

HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO

Sika® Separol® Ecológico

AGENTE DE DESENCOFRADO.

DESCRIPCION DEL PRODUCTO

Sika® Separol® Ecológico Agente de desencofrado de hormigones y morteros, de color blanco lechoso. Está formulado, a partir de materias primas vegetales, con lo que se consigue un mejor respeto del medio ambiente y una mayor seguridad durante la aplicación.

USOS

Sika® Separol® Ecológico Se utiliza como agente de desencofrado, tanto en obra como en plantas de prefabricados de hormigón. Los casos en los que se aplica son los siguientes:

- Hormigones colocados por métodos tradicionales (con vibración).
- Sin curado al vapor o con curado al vapor hasta 60°C.
- Sobre encofrados metálicos o de madera.

CARACTERISTICAS / VENTAJAS

- Evita la adherencia del hormigón o de la lechada superficial con las superficies tratadas.
- No deja manchas de aceite sobre el hormigón después del desencofrado o desmolde.
- No mancha los hormigones blancos o coloreados.
- Permite la aplicación posterior de revestimientos o pinturas.
- Se pueden obtener paramentos de excelencia calidad.

INFORMACION DEL PRODUCTO

Empaques	Tambor de 200 kg Plástico de 10 kg
Apariencia / Color	Líquido blanco lechoso.
Vida en el recipiente	12 meses desde su fecha de fabricación.
Condiciones de Almacenamiento	En sus envases de origen bien cerrado y no deteriorados. En lugar seco y fresco protegiéndolos de las heladas y el frío excesivo, a una temperatura entre +5°C y 30°C.
Densidad	Materias vegetales (20°C) aprox. 0,9 kg/l
Consumo	Dependiendo de la naturaleza y condiciones del soporte, aproximadamente 1 kg de producto diluido en 2 litros de agua rinde entre 30-40 m ² , de encofrado.

INSTRUCCIONES DE APLICACION

Preparación de la superficie:

Las formaletas de madera deben estar limpias, las metálicas deberán además estar secas.

Preparación del producto:

El producto viene listo para usar, solo agite **Sika® Separol® Ecológico** en su empaque original antes de su uso, para garantizar la homogeneidad de la solución. Sobre formaletas metálicas o de madera usarlo puro (no diluirlo).

APLICACIÓN

Sika® Separol® Ecológico se aplica con brocha, rodillo, estopa o pistola en una capa que cubra completamente la superficie de la formaleta. Luego de aplicado el producto, las formaletas podrán ser llenadas con concreto luego de 1 hora aproximadamente.

LIMITACIONES

En el caso que un concreto cuyo encofrado haya sido tratado con **Sika® Separol® Ecológico**, vaya a ser pintado o con aplicación de otro tipo de acabado, se debe hacer un lavado vigoroso de la superficie mediante cepillos de cerdas duras y agua, en cuanto la estructura se haya desencofrado.

Sika® Separol® Ecológico es un aceite emulsionado por consiguiente, deben protegerse las formaletas de fuertes lluvias que puedan retirar el producto de las mismas.

NOTAS

Los usuarios deben referirse siempre a la versión local más reciente de la Hoja Técnica del Producto cuya copia será suministrada al ser solicitada.

RESTRICCIONES LOCALES

Este producto puede variar en su funcionamiento o aplicación como resultado de regulaciones locales específicas. Por favor, consulte la hoja técnica del país para la descripción exacta de los modos de aplicación y uso.

ECOLOGIA, SALUD Y SEGURIDAD

Manténgase fuera del alcance de los niños. Usar guantes de caucho y gafas de protección para su manipulación. Consultar Hoja de Seguridad del producto.

NOTAS LEGALES

La información, y en particular las recomendaciones relacionadas con la aplicación y uso final de los productos Sika, se proporcionan de buena fe, con base en el conocimiento y la experiencia actuales de Sika sobre los productos que han sido apropiadamente almacenados, manipulados y aplicados bajo condiciones normales de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones actuales de las obras son tales, que ninguna garantía con respecto a la comercialidad o aptitud para un propósito particular, ni responsabilidad proveniente de cualquier tipo de relación legal pueden ser inferidos ya sea de esta información o de cualquier recomendación escrita o de cualquier otra asesoría ofrecida. El usuario del producto debe probar la idoneidad del mismo para la aplicación y propósitos deseados. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de los productos. Los derechos de propiedad de terceras partes deben ser respetados. Los usuarios deben referirse siempre a la versión local más reciente de la Hoja Técnica del Producto cuya copia será suministrada al ser solicitada. Para más información visite: web: <http://ecu.sika.com>

Durán:

Km. 3.5 vía Durán-Tambo.
PBX (593) 4 2812700

Quito:

Av. Naciones Unidas entre Iñaquito
y Núñez de Vela.
Piso 11. Oficinas: 1111 - 1112
Tel: (593) 2 4506455

Cuenca:

Av. Ordóñez Lasso y Los Claveles.
Edificio Palermo
Tel: (593) 7 4089725

Sika Ecuador S.A. - Registro SCJ
Sistema de Gestión de la Calidad y
Ambiental - CERTIFICADO POR UNICER S.A.
Norma ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015
registro número 001593

Hoja Técnica de Producto
Sika® Separol® Ecológico
Enero 2020, Versión 01.02
021405021000000156

SikaSeparolEcolgico-es-EC-(01-2020)-1-2.pdf

HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO

Sika® Antisol® Blanco INF

CURADOR PARA HORMIGÓN Y MORTERO

DESCRIPCION DEL PRODUCTO

Antisol Blanco INF es una emulsión acuosa de parafina que forma, al aplicarse sobre el hormigón o mortero fresco, una película impermeable que evita la pérdida prematura de humedad, para garantizar un completo curado del material.

USOS

Para curar el hormigón o mortero. La película que forma el Antisol Blanco INF retiene el agua de la mezcla evitando el resecamiento prematuro garantizando una completa hidratación del cemento, un normal desarrollo de resistencias y ayudando a controlar el agrietamiento del hormigón o mortero.

CARACTERISTICAS / VENTAJAS

- Antisol evita el resecamiento prematuro y por lo tanto la reducción de resistencia, las grietas por secado rápido, la mala calidad superficial del hormigón.
- Especialmente diseñado para el curado en recintos cerrados ya que no contiene solventes.
- Su color más blanco permite observar y controlar el curado durante la aplicación.

INFORMACION DEL PRODUCTO

Empaques	Tambor : 200 kg
Apariencia / Color	Líquido blanco.
Vida en el recipiente	Un año.
Condiciones de Almacenamiento	Mantener en sitio fresco y bajo techo, en envase original bien cerrado.
Densidad	1 kg/l aprox.

INSTRUCCIONES DE APLICACION

APLICACIÓN

Antisol Blanco INF debe diluirse en agua potable (no contaminada) en proporción un (1) volumen de Antisol y tres (3) volúmenes de agua. La dilución hecha así se aplica sobre la superficie del hormigón o mortero haciendo uso de una fumigadora accionada manualmente o de un aspersor neumático.

El área a curar se debe cubrir totalmente. La aplicación del producto se hace en dos pasadas sucesivas e inmediatas.

La aplicación del curador debe hacerse tan pronto desaparezca el agua de exudación del hormigón o mortero. Si las condiciones ambientales son agresivas con presencia de fuerte sol y viento, se recomienda aplicar el producto una vez que termine el acabado. La aplicación también puede efectuarse con brocha, sólo que en este caso la superficie queda rayada por las cerdas de la brocha y el consumo se incrementa.

LIMITACIONES

- Antisol Blanco INF debe agitarse antes de usarlo y periódicamente durante su aplicación.
- Proteger la película de la lluvia por lo menos dos (2) horas y del tráfico por lo menos durante 7 días.
- Antes de la aplicación de un recubrimiento o acabado deberá retirarse la película dejada por el curador.

NOTAS

Los usuarios deben referirse siempre a la versión local más reciente de la Hoja Técnica del Producto cuya copia será suministrada al ser solicitada.

RESTRICCIONES LOCALES

Este producto puede variar en su funcionamiento o aplicación como resultado de regulaciones locales específicas. Por favor, consulte la hoja técnica del país para la descripción exacta de los modos de aplicación y uso.

ECOLOGIA, SALUD Y SEGURIDAD

Usar guantes, gafas de protección para su manipulación.

Consultar Hoja de Seguridad del producto.

NOTAS LEGALES

La información, y en particular las recomendaciones

relacionadas con la aplicación y uso final de los productos Sika, se proporcionan de buena fe, con base en el conocimiento y la experiencia actuales de Sika sobre los productos que han sido apropiadamente almacenados, manipulados y aplicados bajo condiciones normales de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones actuales de las obras son tales, que ninguna garantía con respecto a la comercialidad o aptitud para un propósito particular, ni responsabilidad proveniente de cualquier tipo de relación legal pueden ser inferidos ya sea de esta información o de cualquier recomendación escrita o de cualquier otra asesoría ofrecida. El usuario del producto debe probar la idoneidad del mismo para la aplicación y propósitos deseados. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de los productos. Los derechos de propiedad de terceras partes deben ser respetados. Los usuarios deben referirse siempre a la versión local más reciente de la Hoja Técnica del Producto cuya copia será suministrada al ser solicitada. Para más información visite: web: <http://ecu.sika.com>

Durán:

Km. 3.5 vía Durán-Tambo.
PBX (593) 4 2812700

Quito:

Av. Naciones Unidas entre Iñaquito
y Núñez de Vela.
Piso 11. Oficinas: 1111 - 1112
Tel: (593) 2 4506455

Cuenca:

Av. Ordóñez Lasso y Los Claveles.
Edificio Palermo
Tel: (593) 7 4089725

Sika Ecuadoriana S.A. dispone de un
Sistema de Gestión de la Calidad y
Ambiental certificado de acuerdo a los
normas ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015
respectivamente, por SGS

Hoja Técnica de Producto
Sika® Antisol® Blanco INF
Octubre 2018, Versión 01.01
021405031000000082

SikaAntisolBlancoINF-es-EC-(10-2018)-1-1.pdf



ANEXO 4: ENSAYOS DE MASAS UNITARIAS DE
ÁRIDOS (ASTM C-29)

**DEPARTAMENTO TECNICO
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES**

Procedencia : Arena de Río km (Megametales) Proyecto: Maestria
Fecha : Martes 26 de Agosto 2025 Ensayo #: 1

**MASAS UNITARIAS DE ARIDOS FINOS
ASTM C - 29**

V = Volumen del Recipiente cm3 9935

MASA UNITARIA SUELTA

P1= 11940
P2= 11950
P3= 11940

PROM. = 11943 GR.

MASA UNITARIA COMPACTADA

P1= 13020
P2= 13140
P3= 13100

PROM. = 13087 GR.

MASA UNITARIA SUELTA

1.202 Kg/M3

MASA UNITARIA COMPACTADA

1.317 kg/M3

Observaciones :

Departamento Técnico

**DEPARTAMENTO TECNICO
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES**

Procedencia : Grava triturada 3/4" (Megametales) Proyecto: Maestria
Fecha : Martes 26 de Agosto 2025 Ensayo #: 2

**MASAS UNITARIAS DE ARIDOS GRUESOS
ASTM C - 29**

V = Volumen del Recipiente cm3 9935

MASA UNITARIA SUELTA

P1= 14100
P2= 14160
P3= 14200

PROM. = 14153 GR.

MASA UNITARIA COMPACTADA

P1= 15800
P2= 15860
P3= 15900

PROM. = 15853 GR.

MASA UNITARIA SUELTA

1.425 Kg/M3

MASA UNITARIA COMPACTADA

1.596 Kg/M3

Observaciones :

Departamento Técnico

**ANEXO 5: ENSAYOS DE ANÁLISIS
GRANULOMÉTRICO DE ÁRIDOS (ASTM C-33)**

LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES

Análisis Granulométrico

Especificación para agregado ASTM C-33
 Norma técnica Ecuatoriana INEN 696

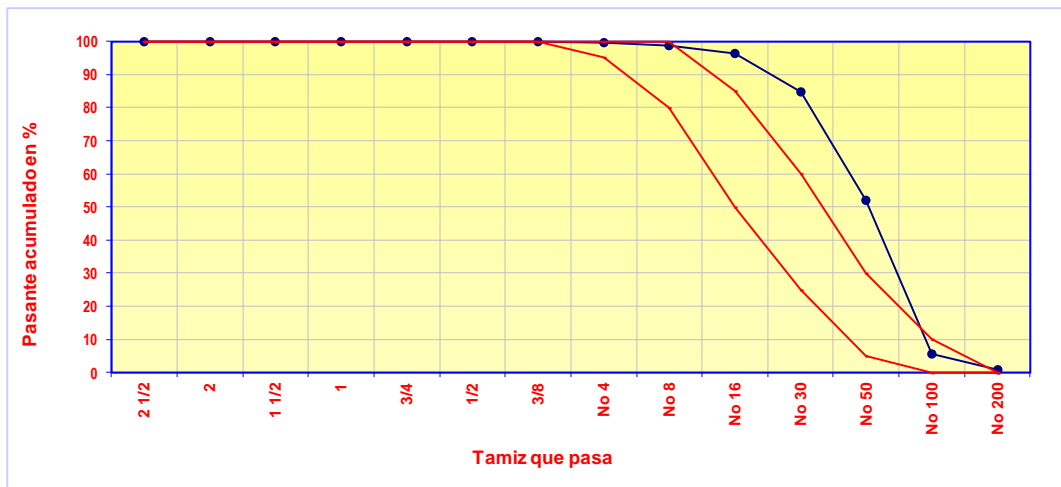
Fuente del material

Arena de Río (Megametales)

Fecha

Martes 26 de Agosto 2025

Tamiz		Peso parcial	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado	Especificación	
Pulg	mm					Limite Superior	Limite Inferior
2 1/2	63.5		0.0	0.0	100.0	100	100
2	50.0		0.0	0.0	100.0	100	100
1 1/2	38.1		0.0	0.0	100.0	100	100
1	25.0		0.0	0.0	100.0	100	100
3/4	19.0		0.0	0.0	100.0	100	100
1/2	12.5		0.0	0.0	100.0	100	100
3/8	9.5	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
No 4	4.75	4.0	0.5	0.5	99.5	100	95
No 8	2.36	8.0	0.9	1.4	98.6	100	80
No 16	1.18	20.0	2.3	3.6	96.4	85	50
No 30	0.6	104.0	11.8	15.4	84.6	60	25
No 50	0.3	288.0	32.5	47.9	52.1	30	5
No 100	0.15	412.0	46.6	94.5	5.5	10	0
No 200		41.0	4.6	99.1	0.9	0	0
Fondo		8.0	0.9	100.0	0.0		
TOTAL		885	Modulo de finura	1.63		Tamaños standard de agregados procesados	



LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES

Análisis Granulométrico

Especificación para agregado ASTM C-33

Norma técnica Ecuatoriana INEN 696

Fuente del material

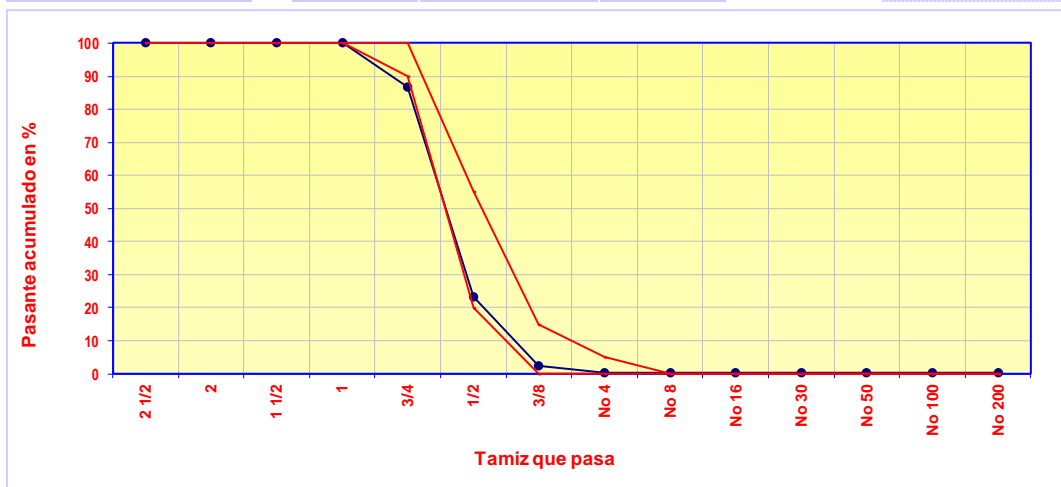
Grava triturada (Megametales)

6 (19,0 a 9,5 mm)

Fecha

Martes 26 de Agosto 2025

Tamiz		Peso parcial	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado	Especificación	
Pulg	mm					Limite Superior	Limite Inferior
2 1/2	63.5		0.0	0.0	100.0	100	100
2	50.0		0.0	0.0	100.0	100	100
1 1/2	38.1		0.0	0.0	100.0	100	100
1	25.0	0	0.0	0.0	100.0	100	100
3/4	19.0	709	13.2	13.2	86.8	100	90
1/2	12.5	3,399	63.4	76.6	23.4	55	20
3/8	9.5	1,129.0	21.1	97.7	2.3	15	0
No 4	4.75	109.0	2.0	99.7	0.3	5	0
No 8	2.36	2.0	0.0	99.7	0.3	0	0
No 16	1.18	0.0	0.0	99.7	0.3	0	0
No 30	0.6	0.0	0.0	99.7	0.3	0	0
No 50	0.3	0.0	0.0	99.7	0.3	0	0
No 100	0.15	0.0	0.0	99.7	0.3	0	0
No 200		0.0	0.0	99.7	0.3	0	0
Fondo		14.0	0.3	100.0	0.0		
TOTAL		5,362	Modulo de finura	7.09		Tamaños standard de agregados procesados	



ANEXO 6: ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE
MEZCLAS PROPUESTAS

MEZCLA A (PATRÓN)				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Cemento Tipo GU	kg	370.000	0.17	62.90
Agua	m3	0.188	1.00	0.19
Arena gruesa*	m3	0.697	10.50	7.32
Grava 3/4" **	m3	0.525	12.50	6.56
Fibra de acero Dramix	kg	0	4.15	0
Fibra de polipropileno Sika Force-48	kg	0	10.67	0
Aditivo Super plastificante	kg	2.950	5.25	15.49
Costo por metro cúbico:				92.46
* La cantidad de arena se determina: 918.5 kg / 1317 kg/m3 (densidad) = 0.697 m3				
** La cantidad de grava 3/4" se determina: 838.5 kg / 1596 kg/m3 (densidad) = 0.525 m3				

MEZCLA 1				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Cemento Tipo GU	kg	370.000	0.17	62.90
Agua	m3	0.188	1.00	0.19
Arena gruesa*	m3	0.697	10.50	7.32
Grava 3/4" **	m3	0.525	12.50	6.56
Fibra de acero Dramix	kg	15.000	4.15	62.28
Fibra de polipropileno Sika Force-48	kg	0	10.67	0
Aditivo Super plastificante	kg	2.950	5.25	15.49
Costo por metro cúbico:				154.74
* La cantidad de arena se determina: 918.5 kg / 1317 kg/m3 (densidad) = 0.697 m3				
** La cantidad de grava 3/4" se determina: 838.5 kg / 1596 kg/m3 (densidad) = 0.525 m3				

MEZCLA 2				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Cemento Tipo GU	kg	370.000	0.17	62.90
Agua	m3	0.188	1.00	0.19
Arena gruesa*	m3	0.697	10.50	7.32
Grava 3/4" **	m3	0.525	12.50	6.56
Fibra de acero Dramix	kg	11.250	4.15	46.71
Fibra de polipropileno Sika Force-48	kg	1.250	10.67	13.34
Aditivo Super plastificante	kg	2.950	5.25	15.49
Costo por metro cúbico:				152.51
* La cantidad de arena se determina: 918.5 kg / 1317 kg/m3 (densidad) = 0.697 m3				
** La cantidad de grava 3/4" se determina: 838.5 kg / 1596 kg/m3 (densidad) = 0.525 m3				

MEZCLA 3				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Cemento Tipo GU	kg	370.000	0.17	62.90
Agua	m3	0.188	1.00	0.19
Arena gruesa*	m3	0.697	10.50	7.32
Grava 3/4" **	m3	0.525	12.50	6.56
Fibra de acero Dramix	kg	7.500	4.15	31.14
Fibra de polipropileno Sika Force-48	kg	2.500	10.67	26.69
Aditivo Super plastificante	kg	2.950	5.25	15.49
Costo por metro cúbico:				150.29
* La cantidad de arena se determina: $918.5 \text{ kg} / 1317 \text{ kg/m}^3$ (densidad) = 0.697 m3				
** La cantidad de grava 3/4" se determina: $838.5 \text{ kg} / 1596 \text{ kg/m}^3$ (densidad) = 0.525 m3				

MEZCLA 4				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Cemento Tipo GU	kg	370.000	0.17	62.90
Agua	m3	0.188	1.00	0.19
Arena gruesa*	m3	0.697	10.50	7.32
Grava 3/4" **	m3	0.525	12.50	6.56
Fibra de acero Dramix	kg	3.750	4.15	15.57
Fibra de polipropileno Sika Force-48	kg	3.750	10.67	40.03
Aditivo Super plastificante	kg	2.950	5.25	15.49
Costo por metro cúbico:				148.06
* La cantidad de arena se determina: $918.5 \text{ kg} / 1317 \text{ kg/m}^3$ (densidad) = 0.697 m3				
** La cantidad de grava 3/4" se determina: $838.5 \text{ kg} / 1596 \text{ kg/m}^3$ (densidad) = 0.525 m3				

MEZCLA 5				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Cemento Tipo GU	kg	370.000	0.17	62.90
Agua	m3	0.188	1.00	0.19
Arena gruesa*	m3	0.697	10.50	7.32
Grava 3/4" **	m3	0.525	12.50	6.56
Fibra de acero Dramix	kg	0	4.15	0
Fibra de polipropileno Sika Force-48	kg	5.000	10.67	53.37
Aditivo Super plastificante	kg	2.950	5.25	15.49
Costo por metro cúbico:				145.83
* La cantidad de arena se determina: $918.5 \text{ kg} / 1317 \text{ kg/m}^3$ (densidad) = 0.697 m3				
** La cantidad de grava 3/4" se determina: $838.5 \text{ kg} / 1596 \text{ kg/m}^3$ (densidad) = 0.525 m3				

MEZCLA 6				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Cemento Tipo GU	kg	370.000	0.17	62.90
Agua	m3	0.188	1.00	0.19
Arena gruesa*	m3	0.697	10.50	7.32
Grava 3/4" **	m3	0.525	12.50	6.56
Fibra de acero Dramix	kg	15.000	4.15	62.28
Fibra de polipropileno Sika Force-48	kg	5.000	10.67	53.37
Aditivo Super plastificante	kg	2.950	5.25	15.49
Costo por metro cúbico:				208.11
* La cantidad de arena se determina: $918.5 \text{ kg} / 1317 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidad)} = 0.697 \text{ m}^3$				
** La cantidad de grava 3/4" se determina: $838.5 \text{ kg} / 1596 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidad)} = 0.525 \text{ m}^3$				

MEZCLA 7				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Cemento Tipo GU	kg	370.000	0.17	62.90
Agua	m3	0.188	1.00	0.19
Arena gruesa*	m3	0.697	10.50	7.32
Grava 3/4" **	m3	0.525	12.50	6.56
Fibra de acero Dramix	kg	11.250	4.15	46.71
Fibra de polipropileno Sika Force-48	kg	3.750	10.67	40.03
Aditivo Super plastificante	kg	2.950	5.25	15.49
Costo por metro cúbico:				179.20
* La cantidad de arena se determina: $918.5 \text{ kg} / 1317 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidad)} = 0.697 \text{ m}^3$				
** La cantidad de grava 3/4" se determina: $838.5 \text{ kg} / 1596 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidad)} = 0.525 \text{ m}^3$				