

Influencia de fibras de polipropileno en la absorción de energía y el desempeño mecánico de hormigón de 34,3 MPa

Influence of polypropylene fibers on energy absorption and mechanical performance of 34.3 MPa concrete

Xavier Emmanuel Mármol Acosta¹ (xavier.marmola@ug.edu.ec) (<https://orcid.org/0000-0001-9738-2276>)

Israel Santiago Bermeo Tigrero² (israel.bermeot@ug.edu.ec) (<https://orcid.org/0009-0006-5301-0861>)

Alfonso Vicente Ordoñez Zuñiga³ (alfonso.ordonezz@ug.edu.ec) (<https://orcid.org/0009-0000-7937-9436>)

Karina Matilde Guerrero Antepara⁴ (karina.guerreroa@ug.edu.ec) (<https://orcid.org/0009-0003-0046-4817>)

Lixson Elías Mora Fernández⁵ (lixson.moraf@ug.edu.ec) (<https://orcid.org/0009-0005-4574-9124>)

Resumen

El hormigón simple presenta una respuesta frágil después de la fisuración, lo que limita su capacidad para disipar energía. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de macrofibras de polipropileno en un hormigón con resistencia de diseño $f'_c = 34,3$ MPa. Para ello se fabricaron cuatro mezclas con 0; 1,8; 4,55 y 10 kg/m³ de fibra. Se determinaron asentamiento, densidad y contenido de aire en estado fresco; resistencia a compresión a 3, 7, 14 y 28 días ($n = 2$ por dosificación y edad); módulo de rotura a 28 días ($n = 2$); y energía absorbida hasta una deflexión de 25 mm mediante paneles UNE-EN 14488-5 ($n = 1$ por dosificación). Como principales resultados se obtuvo que el asentamiento disminuyó de 23 a 18 cm al aumentar la fibra, mientras la densidad y el aire permanecieron prácticamente constantes. La energía E_{25} pasó de 291,41 J en el control a aproximadamente 900, 1.900 y 3.600 J, equivalentes a 3,1; 6,5 y 12,4 veces el valor de referencia. A 28 días, la resistencia a compresión fue 35,62; 37,42; 37,42 y 34,35 MPa, y el módulo de rotura 4,54; 5,09; 5,35 y 6,41 MPa, respectivamente. Las fibras modificaron principalmente la respuesta posfisuración y elevaron la resistencia a

¹ Magister en Ingeniería Civil, mención Construcción y Saneamiento. Máster Universitario en Dirección y Organización de Proyectos. Ingeniero Civil. Docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.

² Magister en Geotecnia. Ingeniero Civil. Docente Ocasional en la carrera Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.

³ Docente Investigador. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.

⁴ Docente Investigador. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.

⁵ Docente Investigador. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.

flexión, pero las dosis altas redujeron la trabajabilidad y aumentaron el costo. Las dosificaciones intermedias ofrecieron el equilibrio más favorable entre desempeño mecánico, absorción de energía y viabilidad de producción.

Palabras clave: hormigón reforzado con fibras, polipropileno, absorción de energía, tenacidad, resistencia residual.

Abstract

Plain concrete exhibits a brittle post-cracking response, which limits its energy-dissipation capacity. This study assessed the effect of macro polypropylene fibers on concrete with a design compressive strength $f'_c = 34.3$ MPa. Four mixtures containing 0, 1.8, 4.55, and 10 kg/m³ of fiber were produced. Slump, density, and air content were measured in the fresh state; compressive strength was tested at 3, 7, 14, and 28 days ($n = 2$ per dosage and age); modulus of rupture was determined at 28 days ($n = 2$); and energy absorption up to 25 mm deflection was assessed using UNE-EN 14488-5 panels ($n = 1$ per dosage). Slump decreased from 23 to 18 cm as fiber content increased, whereas density and air content remained nearly constant. E_{25} energy rose from 291.41 J for the control to approximately 900, 1,900, and 3,600 J, corresponding to 3.1, 6.5, and 12.4 times the reference value. At 28 days, compressive strength was 35.62, 37.42, 37.42, and 34.35 MPa, while modulus of rupture reached 4.54, 5.09, 5.35, and 6.41 MPa, respectively. The fibers mainly altered post-cracking behavior and increased flexural strength; however, high dosages reduced workability and increased cost. Intermediate dosages provided the most favorable balance among mechanical performance, energy absorption, and production feasibility.

Key words: fiber-reinforced concrete; polypropylene; energy absorption; toughness; residual strength.

Introducción

El hormigón combina elevada resistencia a compresión con baja capacidad de deformación a tracción. Una vez que se forma una fisura dominante, la pérdida de rigidez y de capacidad portante puede ser rápida; por ello, en elementos sometidos a flexión, impacto o cargas repetidas no basta con caracterizar únicamente la resistencia máxima. La tenacidad, entendida como la energía absorbida durante la deformación, permite describir la respuesta completa hasta un desplazamiento de referencia y resulta particularmente pertinente para losas y pavimentos (Bentur & Mindess, 2007; ACI Committee 544, 2018).

Las fibras discontinuas actúan como puentes entre las caras de las fisuras. Antes del agrietamiento, su contribución a la rigidez global suele ser limitada; después de la fisuración, transfieren esfuerzos por adherencia y extracción, retrasan la apertura de grietas y sostienen una resistencia residual. Las macrofibras sintéticas de polipropileno añaden ventajas de baja densidad, resistencia a la corrosión y facilidad de

manipulación. Su eficacia, sin embargo, depende de la geometría, la adherencia, la dispersión y la dosis, además de la consistencia y composición de la matriz. La evidencia disponible muestra un efecto más consistente sobre la ductilidad y la respuesta pospico que sobre la resistencia a compresión.

Abousnina et al. (2021) observaron una reducción moderada del asentamiento y una transición hacia una falla progresiva en hormigones con macrofibras; Wei et al. (2022) señalaron que el aumento de fibra puede mejorar la resistencia y la tenacidad, aunque la trabajabilidad y la respuesta resistente no evolucionan de forma estrictamente monótona. En hormigones de mayor resistencia, Hosseinzadeh et al. (2023) también registraron disminución de la trabajabilidad y mejoras más claras en flexión que en compresión. Los ensayos posfisuración confirman que la capacidad residual depende de la cantidad de fibra y de su índice de refuerzo (Del Savio et al., 2023), mientras que el contenido óptimo debe definirse según la propiedad prioritaria y no por una regla universal (Smarzewski & Jancy, 2025).

En el contexto ecuatoriano existe interés en emplear macrofibras como refuerzo distribuido en pisos y pavimentos; no obstante, se requieren datos que relacionen una dosificación comercial amplia con trabajabilidad, energía absorbida y resistencias convencionales. En particular, una dosis que maximiza la energía posfisuración puede ser desfavorable en términos de mezclado, compactación y costo. La comparación simultánea de estos indicadores permite distinguir entre el máximo desempeño aislado y una solución técnicamente equilibrada.

El objetivo fue determinar la influencia de cuatro contenidos de fibra de polipropileno — 0; 1,8; 4,55 y 10 kg/m³— sobre la absorción de energía, el comportamiento en estado fresco y las resistencias a compresión y flexión de un hormigón de 34,3 MPa. Se planteó que el aumento de la dosis incrementaría la energía absorbida y la capacidad posfisuración, con un efecto menos pronunciado sobre la resistencia a compresión y una penalización progresiva en la trabajabilidad.

Materiales y métodos

Diseño experimental y dosificaciones

Se realizó una investigación cuantitativa, experimental y longitudinal en el Laboratorio CIH San Eduardo, Guayaquil. La variable independiente fue la dosificación de macrofibra de polipropileno Tuf-Strand, expresada en kg/m³. Las designaciones empleadas en el trabajo de titulación —18 %, 45,5 % y 100 %— representan proporciones respecto de una dosis máxima de referencia de 10 kg/m³; no corresponden a fracciones volumétricas. Para evitar ambigüedad, en este artículo se usan las dosis absolutas.

La mezcla de control se diseñó para $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$ (34,3 MPa). Las formulaciones con 1,8 y 4,55 kg/m³ conservaron las cantidades de los demás componentes. La mezcla

inicial de 10 kg/m³ presentó segregación y no permitió moldear los especímenes; por ello se ajustaron las proporciones de arena, agregado grueso y agua. En consecuencia, los resultados de esa serie representan el comportamiento conjunto de la alta dosis de fibra y del rediseño de la matriz, aspecto considerado en la interpretación.

Tabla 1.

Dosificación de los materiales por metro cúbico de hormigón

Mezcla	Fibra	Cemento HE	Arena	Agregado 19 mm	Agua	Plastificante	Retardante
Control	0	350	1.004	920	170	1,75	2,80
F1,8	1,8	350	1.004	920	170	1,75	2,80
F4,55	4,55	350	1.004	920	170	1,75	2,80
F10*	10	350	1.050	870	175	1,75	2,80

Nota. Todas las cantidades están en kg/m³. *Mezcla rediseñada después de observar segregación con la formulación inicial de 10 kg/m³.

Materiales, mezclado y curado

Se utilizó cemento hidráulico de alta resistencia inicial, arena de río y agregado grueso de tamaño nominal 19 mm. La arena presentó módulo de finura 2,77, absorción de 2,54 % y densidad seca de 2.608 kg/m³; el agregado grueso tuvo módulo de finura 6,72, absorción de 1,50 % y densidad seca de 2.907 kg/m³. Se incorporaron un aditivo plastificante y un aditivo retardante en dosis constantes, salvo el ajuste de agua indicado para F10.

Los agregados se mezclaron durante 3 min; luego se añadió el cemento y se continuó el mezclado por otros 3 min. El agua y los aditivos se incorporaron progresivamente durante aproximadamente 5 min. Las fibras se agregaron de forma gradual para reducir la formación de aglomeraciones y favorecer su distribución. Después del moldeo y la compactación, los especímenes se desmoldaron y curaron hasta las edades de ensayo establecidas.

Ensayos en estado fresco y endurecido

El asentamiento, la densidad y el contenido de aire se determinaron en cada mezcla con procedimientos basados en ASTM C143/C143M, ASTM C138/C138M y ASTM C231/C231M, respectivamente. En estado endurecido se evaluaron la resistencia a

compresión de cilindros, el módulo de rotura de vigas mediante carga en los tercios y la energía absorbida por paneles. El plan experimental se resume en la Tabla 2.

Tabla 2.

Plan de ensayos y unidades experimentales.

Propiedad	Método	Edad	Réplicas mezcla por	Total
Asentamiento	ASTM C143/C143M	Fresco	1 determinación	4
Densidad	ASTM C138/C138M	Fresco	1 determinación	4
Contenido de aire	ASTM C231/C231M	Fresco	1 determinación	4
Compresión	ASTM C39/C39M	3, 7, 14 y 28 días	2 por edad	32 cilindros
Flexión	ASTM C78/C78M	28 días	2	8 vigas
Energía E ₂₅	UNE-EN 14488-5	28 días	1	4 paneles

Nota. El tamaño muestral disponible sustenta comparaciones descriptivas; no se aplicaron pruebas inferenciales.

La resistencia a compresión se obtuvo a 3, 7, 14 y 28 días conforme a ASTM C39/C39M. Para cada combinación de dosis y edad se ensayaron dos cilindros y se reportó la media. La resistencia a flexión se determinó a 28 días en dos vigas prismáticas por dosificación según ASTM C78/C78M, expresada como módulo de rotura.

La absorción de energía se evaluó con paneles de 600 × 600 × 100 mm, apoyados en sus cuatro lados con una luz libre de 500 mm, y una carga central aplicada mediante una placa de 100 × 100 mm. El desplazamiento central se controló a 1,5 mm/min hasta al menos 25 mm. La energía E₂₅ corresponde al área bajo la curva carga–deflexión: $E_{25} = \int_0^{25} P(\delta) d\delta$, donde P es la carga en kN y δ la deflexión en mm; la equivalencia kN·mm = J permite expresar el resultado en joules (European Committee for Standardization, 2006).

Tratamiento de los datos

Para compresión y flexión se calcularon medias aritméticas. Los cambios relativos se obtuvieron respecto de la mezcla de control mediante $\Delta = (x_i/x_0 - 1) \times 100$. En el ensayo de panel se dispuso de una unidad por dosificación; además, las series numéricas completas de carga-deflexión no estuvieron disponibles en el registro consolidado. Por esta razón, los valores de E_{25} de las mezclas con fibra se presentan como aproximaciones leídas de las curvas y de los resúmenes del estudio original. No se estimaron desviaciones, intervalos de confianza ni significancia estadística para E_{25} .

Resultados

Propiedades del hormigón fresco

Tabla 3.

Propiedades de las mezclas en estado fresco.

Fibra (kg/m ³)	Asentamiento (cm)	Variación asentamiento del	Densidad (kg/m ³)	Aire (%)
0	23	Referencia	2.409	1,77
1,8	22	-4,35 %	2.414	1,79
4,55	20	-13,04 %	2.404	1,78
10	18	-21,74 %	2.401	1,74

Fuente: Elaboración por los autores a partir de la investigación.

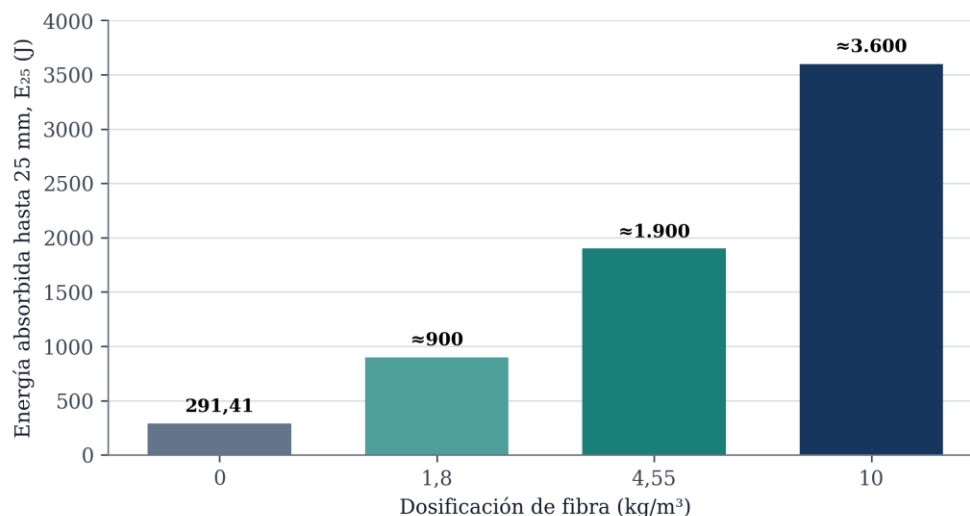
El asentamiento disminuyó de manera progresiva conforme aumentó la dosis de fibra. La pérdida máxima fue de 5 cm, equivalente a 21,74 % respecto del control. Este patrón es consistente con el incremento del área superficial y el entrelazamiento de las fibras, que restringen la movilidad relativa de los agregados. En cambio, la densidad se mantuvo entre 2.401 y 2.414 kg/m³ y el contenido de aire entre 1,74 % y 1,79 %, sin una tendencia sistemática. La principal modificación observable en estado fresco fue, por tanto, la menor fluidez.

Absorción de energía y respuesta posfisuración

El panel sin fibra alcanzó su carga máxima al inicio de la deformación y presentó una pérdida abrupta de capacidad después de la fisuración, con $E_{25} = 291,41$ J. En las mezclas reforzadas, la carga residual se mantuvo durante un intervalo de desplazamiento mucho mayor. La energía aumentó a aproximadamente 900 J con 1,8 kg/m³, 1.900 J con 4,55 kg/m³ y 3.600 J con 10 kg/m³ (Figura 1). Estos valores corresponden a 3,1; 6,5 y 12,4 veces la energía del control, respectivamente.

Figura 1.

Energía absorbida hasta 25 mm de deflexión en función de la dosificación de fibra.



Nota. Valores aproximados para las mezclas con fibra; $n = 1$ panel por dosificación. La comparación es descriptiva. Fuente: Elaboración por los autores a partir de la investigación.

El incremento sostenido de E_{25} evidencia que la contribución principal de la macrofibra ocurre después de la aparición de la grieta. Las fibras atravesaron el plano de fisuración y permitieron transferir carga mientras se extraían o deformaban, en contraste con la separación del panel de control. La dosis de 10 kg/m³ produjo la mayor capacidad registrada, aunque su comparación está condicionada por el rediseño de la mezcla.

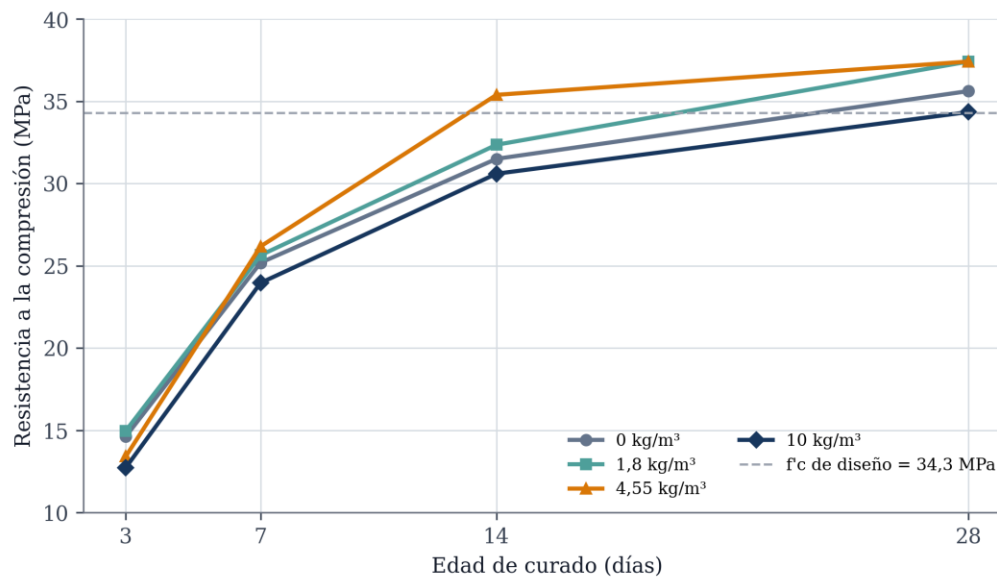
Resistencia a compresión

Todas las mezclas desarrollaron resistencia con la edad (Figura 2). A 28 días, el control alcanzó 35,62 MPa y las mezclas F1,8 y F4,55 alcanzaron 37,42 MPa, un incremento de 5,04 %. F10 registró 34,35 MPa, 3,58 % por debajo del control, pero prácticamente igual a la resistencia de diseño de 34,3 MPa. La evolución no fue

monotónica con la dosis: F4,55 mostró el mayor valor a 14 días, mientras F10 presentó los menores resultados en la mayoría de las edades.

Figura 2.

Evolución de la resistencia a compresión según la dosificación de fibra.



Nota. Cada punto representa la media de dos cilindros. La línea discontinua indica $f'c = 34,3$ MPa. Fuente: Elaboración por los autores a partir de la investigación.

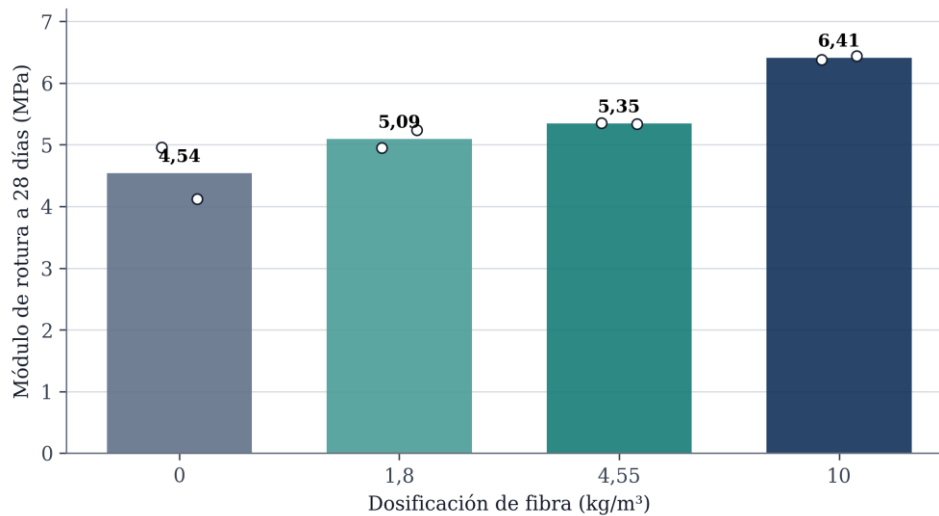
Los resultados muestran que la fibra no produjo una mejora proporcional de la resistencia a compresión. Las dosis intermedias conservaron o aumentaron modestamente el valor a 28 días, mientras la formulación F10 combinó menor trabajabilidad con una matriz modificada. En consecuencia, el aumento de E_{25} no puede inferirse a partir de la resistencia a compresión: ambas propiedades describen mecanismos distintos.

Resistencia a flexión

El módulo de rotura aumentó con cada incremento de fibra (Figura 3). Las medias fueron 4,54 MPa para el control; 5,09 MPa para F1,8; 5,35 MPa para F4,55; y 6,41 MPa para F10. Los cambios relativos fueron 12,18 %, 17,79 % y 41,19 %, respectivamente. A diferencia de las vigas sin fibra, que se separaron tras la falla, las vigas reforzadas conservaron mayor cohesión por el puenteo de las grietas.

Figura 3.

Módulo de rotura a 28 días; barras de media y resultados individuales.



Nota. Los puntos representan las dos vigas ensayadas por dosificación; las barras muestran la media. Fuente: Elaboración por los autores a partir de la investigación.

Síntesis técnico-económica

Tabla 4.

Indicadores principales a 28 días y costo estimado por metro cúbico.

Fibra (kg/m³)	E ₂₅ (J)	E ₂₅ /control	Compresión (MPa)	Flexión (MPa)	Costo (USD/m³)
0	291,41	1,00	35,62	4,54	110,53
1,8	≈900	3,09	37,42	5,09	129,81
4,55	≈1.900	6,52	37,42	5,35	158,73
10	≈3.600	12,35	34,35	6,41	217,67

Nota. Costos del estudio original y del contexto local de producción; no incluyen una verificación estructural de sustitución de refuerzo convencional. Fuente: Elaboración por los autores a partir de la investigación.

El costo directo estimado aumentó 17,44 % con 1,8 kg/m³, 43,61 % con 4,55 kg/m³ y 96,94 % con 10 kg/m³. El crecimiento de la energía absorbida fue más rápido que el del costo, pero el indicador económico no puede interpretarse de forma aislada: el nivel F10 requirió rediseño y mostró la mayor pérdida de asentamiento. Para aplicaciones en las que se necesita un incremento relevante de capacidad posfisuración sin duplicar el costo del material, F1,8 y F4,55 constituyen rangos de interés para validación adicional.

Discusión

La tendencia más robusta del experimento fue el aumento de la energía absorbida con la dosificación de fibra. El control falló de forma frágil, mientras los paneles reforzados conservaron una carga residual a grandes desplazamientos. Este comportamiento concuerda con el mecanismo de puenteo: tras la fisuración de la matriz, la carga se transfiere a las fibras y se disipa energía mediante adherencia, deformación y extracción. Resultados semejantes han sido documentados para macrofibras de polipropileno en hormigón convencional y de alto desempeño (Shi et al., 2020; Abousnina et al., 2021), así como en ensayos alternativos de caracterización posfisuración (Del Savio et al., 2023).

La magnitud de los incrementos de E_{25} debe interpretarse con prudencia. El ensayo UNE-EN 14488-5 mide el área bajo una curva de panel y es sensible a la distribución de fibras, la orientación, la localización de la grieta y la variabilidad del hormigón. Con una sola placa por dosificación no es posible estimar la dispersión. En estudios con mayor número de especímenes, la variabilidad de las propiedades posfisuración de concretos con fibras sintéticas puede ser apreciable (Del Savio et al., 2023). Por ello, los factores de 3,1 a 12,4 veces describen las unidades ensayadas y no deben tratarse como parámetros de diseño sin repetición y control de calidad.

La reducción del asentamiento confirmó la contrapartida reológica del refuerzo. Las fibras aumentan el área que debe recubrir la pasta y generan interacciones con los agregados; cuando la dosis es alta, la mezcla puede perder movilidad y compactarse de forma menos uniforme. Wei et al. (2022) y Hosseinzadeh et al. (2023) reportaron tendencias análogas. En el presente estudio, la estabilidad de densidad y contenido de aire sugiere que hasta F4,55 la modificación dominante fue la fluidez. La segregación observada en la formulación inicial F10, sin embargo, evidencia un umbral práctico que obligó a modificar la matriz.

La resistencia a compresión varió en un intervalo estrecho respecto del control y no siguió una relación dosis–respuesta. Este resultado coincide con la literatura, donde la compresión puede aumentar, permanecer estable o disminuir ligeramente según la dispersión y compactación de la fibra.

En cambio, el incremento gradual del módulo de rotura y la conservación de la integridad de las vigas fueron consistentes con la mejora del desempeño en flexión observada por Abousnina et al. (2021), Wei et al. (2022) y Najaf y Abbasi (2023). La combinación de una mejora modesta en la carga máxima con una diferencia marcada en E_{25} reafirma que la contribución esencial de la fibra es posfisuración.

Desde el punto de vista de selección, la dosis óptima depende del requisito funcional. F10 maximizó E_{25} y flexión, pero casi duplicó el costo unitario, redujo 21,74 % el asentamiento y no puede compararse con las demás series como una mezcla idéntica. F1,8 elevó E_{25} aproximadamente 209 % con un incremento de costo de 17,44 % y conservó la resistencia a compresión; F4,55 amplió la reserva posfisuración a aproximadamente 1.900 J, con mayor costo, pero sin penalización de la resistencia a 28 días. Estos niveles intermedios representan alternativas técnicamente plausibles, siempre que el diseño estructural se base en parámetros residuales verificados y no en una sustitución automática de malla o acero convencional.

Los hallazgos son coherentes con la recomendación de diseñar el hormigón reforzado con fibras a partir de requisitos de desempeño y métodos de ensayo normalizados (ACI Committee 544, 2018). Para pisos industriales, pavimentos o elementos expuestos a impacto, la energía y la resistencia residual pueden ser más informativas que la compresión por sí sola. No obstante, la transferencia a escala de obra requiere controlar el método de incorporación, la homogeneidad, el asentamiento y la dosificación efectiva, además de validar espesores y refuerzo mediante cálculo estructural.

Limitaciones del estudio

La principal limitación fue el tamaño muestral: se dispuso de un panel por dosificación para energía y de dos especímenes por condición para compresión y flexión. Este diseño permite identificar tendencias, pero no estimar con precisión la variabilidad ni realizar inferencias estadísticas. Los valores de energía de las mezclas con fibra son aproximados porque el registro consolidado conservó las curvas y los valores resumen, no las series digitales completas de carga-deflexión.

La formulación F10 se rediseñó después de la segregación de la mezcla inicial; por tanto, su respuesta combina el efecto de la fibra con cambios en agua y agregados. Además, no se evaluaron durabilidad, fatiga, impacto cíclico, contracción ni comportamiento a escala estructural. El análisis económico utilizó precios del contexto de la investigación y no demuestra equivalencia estructural con otros sistemas de refuerzo. Se recomienda repetir el ensayo de panel con al menos tres unidades por condición, conservar las series primarias y comparar dosis bajo una matriz constante o mediante un diseño factorial que separe ambos efectos.

Conclusiones

La incorporación de macrofibras de polipropileno modificó de forma marcada la respuesta posfisuración. Frente a 291,41 J del control, las dosis de 1,8; 4,55 y 10 kg/m³ alcanzaron aproximadamente 900, 1.900 y 3.600 J, equivalentes a 3,1; 6,5 y 12,4 veces la energía de referencia.

El asentamiento disminuyó progresivamente hasta 21,74 % con 10 kg/m³, mientras la densidad y el contenido de aire se mantuvieron estables. La trabajabilidad fue el indicador fresco más sensible a la dosificación.

A 28 días, las mezclas con 1,8 y 4,55 kg/m³ aumentaron la resistencia a compresión 5,04 % respecto del control. La mezcla de 10 kg/m³ alcanzó 34,35 MPa, valor cercano al diseño, aunque su interpretación está condicionada por el rediseño de la matriz.

El módulo de rotura aumentó 12,18 %, 17,79 % y 41,19 % para 1,8; 4,55 y 10 kg/m³, respectivamente. Las vigas con fibra conservaron mayor cohesión después de la fisuración, coherente con el mecanismo de puenteo.

Las dosis intermedias ofrecieron el mejor compromiso observado entre energía, resistencia, trabajabilidad y costo. La dosis de 10 kg/m³ es pertinente cuando se prioriza la máxima capacidad posfisuración, pero exige optimización de mezcla y validación experimental adicional antes de su uso en diseño.

Declaración de origen

Este artículo se elaboró a partir del trabajo de titulación “Análisis de la capacidad de absorción de energía en hormigón $f'_c = 350$ kg/cm² reforzado con fibra de polipropileno”, desarrollado en la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Guayaquil.

Referencias bibliográficas

- Abousnina, R., Premasiri, S., Anise, V., Lokuge, W., Vimonsatit, V., Ferdous, W. & AlAjarmeh, O. (2021). Mechanical properties of macro polypropylene fibre-reinforced concrete. *Polymers*, 13(23), 4112. <https://doi.org/10.3390/polym13234112>
- ACI Committee 544. (2018). *ACI 544.4R-18: Guide to design with fiber-reinforced concrete*. American Concrete Institute.
- ASTM International (2017). *ASTM C138/C138M-17a: Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete*. https://doi.org/10.1520/C0138_C0138M-17A
- ASTM International (2020). *ASTM C143/C143M-20: Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete*. https://doi.org/10.1520/C0143_C0143M-20

- ASTM International (2022). *ASTM C78/C78M-22: Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)*. https://doi.org/10.1520/C0078_C0078M-22
- ASTM International (2024a). *ASTM C39/C39M-24: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-24
- Bentur, A. & Mindess, S. (2007). *Fibre reinforced cementitious composites* (2nd ed.). CRC Press.
- Del Savio, A. A., La Torre Esquivel, D. & García Landeo, J. M. (2023). Post-cracking properties of concrete reinforced with polypropylene fibers through the Barcelona test. *Polymers*, 15(18), 3718. <https://doi.org/10.3390/polym15183718>
- European Committee for Standardization (2006). *EN 14488-5: Testing sprayed concrete—Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens*.
- Hosseinzadeh, H., Salehi, A. M., Mehraein, M. & Asadollahfardi, G. (2023). The effects of steel, polypropylene, and high-performance macro polypropylene fibers on mechanical properties and durability of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 386, 131589. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131589>
- Najaf, E. & Abbasi, H. (2023). Impact resistance and mechanical properties of fiber-reinforced concrete using string and fibrillated polypropylene fibers in a hybrid form. *Structural Concrete*, 24(1), 1282–1295. <https://doi.org/10.1002/suco.202200019>
- Shi, F., Pham, T. M., Hao, H., & Hao, Y. (2020). Post-cracking behaviour of basalt and macro polypropylene hybrid fibre reinforced concrete with different compressive strengths. *Construction and Building Materials*, 262, 120108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120108>
- Smarzewski, P. & Jancy, A. (2025). Comparative study on mechanical performance and toughness of high-performance self-compacting concrete with polypropylene and basalt fibres. *Materials*, 18(16), 3833. <https://doi.org/10.3390/ma18163833>
- Wei, Y., Qin, Y., Chai, J., Xu, C., Zhang, Y. & Zhang, X. (2022). Experimental study on compressive and flexural performances of polypropylene fiber-reinforced concrete. *Geofluids*, 4168918. <https://doi.org/10.1155/2022/4168918>

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses en relación con el artículo.

Contribución de los autores: Los autores realizaron, de conjunto, el análisis de la información para el artículo, así como su diseño y redacción.

Universidad de Las Tunas en <https://ror.org/05fj29j73>