



Evaluación de la resistencia a la flexión y compresión del concreto modificado mediante la incorporación de vasos desechables triturados

Autor:

CARLOS ADRIÁN LÓPEZ CALLE

Tutor:

Diana Patricia Urrea Ramírez.

Opción de grado:

Investigación

Corporación Universitaria Remington

Facultad de ingenierías.

Ingeniería civil.

2025

Dedicatoria

A mi madre,
por brindarme su apoyo en todo este camino.

Agradecimientos

A la profesora Diana Patricia Urrea,
por permitirme ser parte de su semillero de investigación

Contenido

RESUMEN.....	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Ductilidad mejorada	8
2.2. Reducción del agrietamiento	11
2.3. Influencia del material plástico triturado en la resistencia a la compresión	13
2.4. Variación de la resistencia a la flexión por incorporación de vasos desechables	16
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
4. OBJETIVOS.....	21
4.1. General	21
4.2. Específicos	21
5. METODOLOGÍA.....	22
5.1. Tipo de investigación	22
5.2. Nivel de investigación.....	22
5.3. Diseño de investigación	22
5.4. Fase experimental.....	23
5.5. Población y muestra	23
5.6. Técnica de recolección de datos.....	24
5.7. Normativa aplicable	24
5.8. Aspectos éticos.....	24
6. RESULTADOS	25
6.1. Resultados experimentales	30
7. DISCUSIÓN	34
8. CONCLUSIONES	38
9. REFERENCIAS.....	40

Lista de figuras

Figura 1. La estrategia de ductilidad mediante mecanismos	11
Figura 2. Estrategias influyentes en la resistencia a compresión del concreto.	16
Figura 3. Grafica esfuerzo vs tiempo compresión	25
Figura 4. Grafica esfuerzo vs tiempo flexión	27
Figura 5. Distribución granulométrica del material arenoso.	28
Figura 6. Curvas límite y trayectoria granulométrica del material lana (arena).	29
Figura 7. Curvas límite y trayectoria granulométrica del material tipo grava.	30
Figura 8. Proceso de lavado de los desechables reciclados	31
Figura 9. Proceso de triturado de vasos desechables	31
Figura 10. Fibras de vasos desechables triturados	32
Figura 11. Ensayo de granulometría INV 2012	32
Figura 12. Ensayo índices de forma INV-2012.....	33
Figura 13. Ensayo de asentamiento	33
Figura 14. Ensayo micro deval INV 2012	33

RESUMEN

El uso de plásticos de un solo uso como vasos desechables, pitillos y otros se ha convertido en un problema ambiental debido a su facilidad para llegar a ecosistemas marinos y su difícil degradación tanto en ambientes terrestres como acuáticos. Este trabajo de investigación evaluó el comportamiento de la matriz cementante del concreto con la adición de fibras de vasos desechables triturados en porcentajes del 0,3, 0,6% y 0,12% respecto al peso del cemento y su comportamiento mecánico a flexión y compresión. Se realizaron mezclas de control y modificadas para ensayos con cilindros y vigas.

Los resultados muestran una mejoría a flexión en comparación a la mezcla patrón, también se observó una disminución en la capacidad de soportar esfuerzos de compresión respecto a la mezcla de control. La trabajabilidad no se vio afectada en ningún caso, esto debido a la impermeabilidad misma del polipropileno compuesto principal de los vasos desechables. Los resultados muestran que con más investigación y llegando a dosificaciones adecuadas el material puede llegar a utilizarse en estructuras que estén sometidas a esfuerzos de flexión.

Palabras clave: polipropileno, matriz cementante, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, mezcla patrón.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento continuo en la generación de residuos plásticos provenientes de elementos de un solo uso ha impulsado diversas investigaciones orientadas a su aprovechamiento dentro de materiales cementicios. En particular, los vasos desechables elaborados en polipropileno representan una fracción considerable de estos residuos; por esta razón, convertirlos en insumos para mezclas de concreto constituye una alternativa que permite integrarlos nuevamente en procesos constructivos. De este modo, el análisis de su comportamiento dentro de la matriz cementante adquiere especial relevancia, ya que la presencia del polímero modifica la forma en que se distribuyen los esfuerzos internos y la trayectoria del agrietamiento.

El concreto, por su parte, mantiene una elevada capacidad para resistir compresión, aunque presenta limitaciones ante tracción y flexión debido a la formación temprana de micro-fisuras. En consecuencia, la incorporación de partículas poliméricas trituradas altera la respuesta mecánica del material al generar discontinuidades internas que influyen en la rigidez inicial, la deformación admisible y la transferencia de tensiones residuales. Asimismo, la naturaleza hidrofóbica del polipropileno, junto con su baja densidad y su comportamiento deformable, condiciona variables como la trabajabilidad, la formación de vacíos y la interacción con la pasta de cemento.

A su vez, la transformación de vasos desechables en partículas aptas para mezclas cementicias exige examinar características como tamaño, geometría, adherencia mecánica y efectos generados en la zona de transición interfacial. Cada uno de estos elementos influye directamente en la desviación de micro-fisuras, en la disipación de energía y en la modificación del modo de falla bajo cargas crecientes. Debido a ello, la presencia del polímero puede generar respuestas diferenciadas entre la resistencia a la compresión y el comportamiento flexional, lo que obliga a establecer proporciones precisas y procedimientos de mezcla uniformes.

Finalmente, el estudio experimental de concretos que integran distintos porcentajes de polímero triturado permite relacionar el contenido del material con las variaciones observadas en las propiedades mecánicas. A través de esta comparación, es posible identificar condiciones en las que la incorporación del residuo favorece la deformación sin una disminución marcada en la capacidad portante. Así, la evaluación del desempeño estructural asociado a estos compuestos contribuye a la exploración de alternativas que integran materiales reciclados y que, al mismo tiempo, mantienen niveles adecuados de estabilidad bajo cargas de compresión y flexión.

2. MARCO TEÓRICO

El concreto es un material de construcción conocido por su alta resistencia a esfuerzos mecánicos de compresión y su durabilidad. Sin embargo, su desempeño a flexión y tracción es menor. Según Toirac-Corral (2004). Las grietas y fisuras en obras de concreto nos mencionan que el proceso de contracción hidráulica se puede generar al no soportar la fuerza de tracción en el momento inicial de la instalación, las fisuras y grietas así lo demuestran.

El polipropileno por otro lado es un termoplástico que se utiliza en el embazado de bebidas, alimentos y sus fibras se podrían utilizar para la industria de la construcción ya que puede resistir la alcalinidad de la matriz cementante del concreto. Al ser impermeables no absorben el agua de la mezcla lo que evita modificar la relación A/C del concreto y soporta esfuerzos de tracción hasta de 27 MPa.

2.1. Ductilidad mejorada

La incorporación de vasos desechables triturados en matrices cementicias transforma el comportamiento mecánico del material al introducir partículas poliméricas capaces de deformarse antes de fracturarse. Según expone Abousnina *et al.* (2021), los polímeros sintéticos generan cambios en la manera en que se distribuyen las tensiones internas, ya que su rigidez es menor que la del hormigón tradicional. De esta forma, cuando se originan micro-fisuras, los fragmentos plásticos absorben parte de la energía liberada y reducen la velocidad de propagación de los daños. Asimismo, este contraste de módulos crea zonas con capacidad de distorsión adicional que permiten que el compuesto soporte deformaciones más amplias sin perder estabilidad estructural inmediata, configurando un comportamiento menos frágil frente a cargas crecientes.

Según Linares-Durand (2021)“las fibras de polipropileno pueden mejorar la ductilidad del concreto, lo que significa que el concreto puede deformarse más antes de romperse”. Lo que es fundamental para mejorar un diseño estructural, ya que se busca que los elementos presenten fallas dúctiles, que al contrario de las fallas frágiles pueden permitir la evacuación de estructuras antes de que estas fallen por completo.

Además, la presencia de estas partículas modifica los mecanismos de puenteo entre caras de grietas emergentes. Dado que los elementos plásticos presentan una mayor capacidad de elongación, contribuyen a retardar la apertura de discontinuidades internas. En esta línea, Małek

et al. (2020) señalan que las fibras y partículas de polipropileno recuperado influyen en la resistencia a la tracción indirecta y estabilizan la fisuración cuando aparecen tensiones localizadas. En consecuencia, la matriz no desarrolla una trayectoria dominante sino un sistema de microgrietas distribuidas, lo que incrementa la energía requerida para la propagación y extiende el rango de trabajo útil previo al colapso estructural. Esta redistribución de esfuerzos favorece una respuesta más estable durante etapas de flexión o compresión avanzada.

Por otra parte, las geometrías irregulares resultantes del triturado proporcionan superficies capaces de generar resistencia al deslizamiento dentro de la mezcla. Estas irregularidades permiten que los fragmentos queden integrados mediante adherencia mecánica y fricción interna, dificultando su extracción bajo carga. En concordancia con este planteamiento, Rohden *et al.* (2020) describen cómo los residuos plásticos introducen interfaces que provocan desvíos en las trayectorias de daño y elevan el trabajo necesario para fracturar la matriz. En consecuencia, el avance de las fisuras requiere superar mecanismos adicionales de resistencia interna, lo cual se traduce en una manifestación más gradual del deterioro estructural.

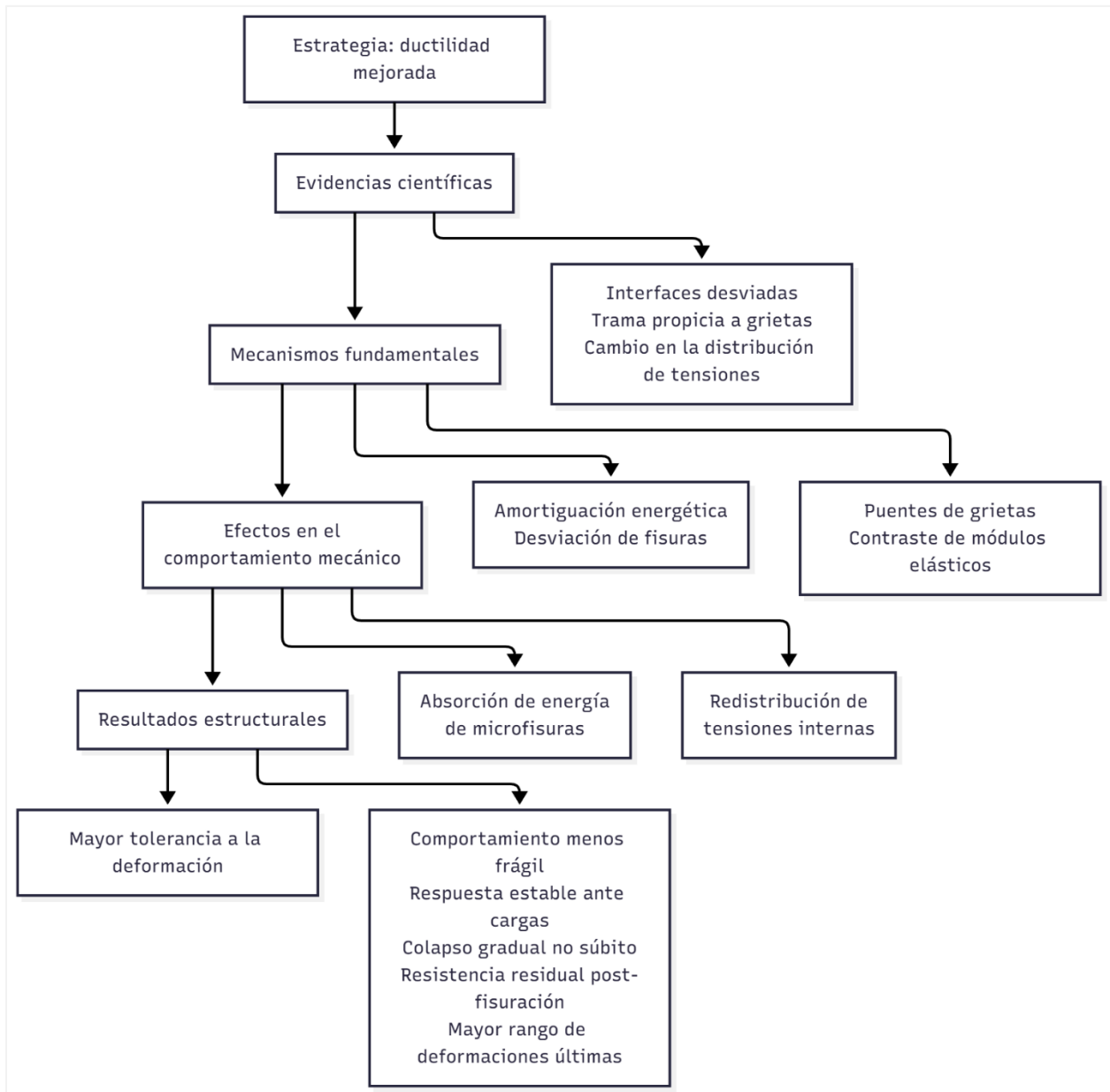
Asimismo, las partículas de plástico desechado actúan como elementos amortiguadores que almacenan energía mediante deformación progresiva. Debido a su capacidad para soportar distorsiones elevadas sin quebrarse, contribuyen a suavizar la transición entre la fase elástica y la fase en la que la fisuración se vuelve dominante. Abousnina *et al.* (2021) registran que los compuestos con polímeros presentan un tramo post-pico más amplio en sus curvas carga-deformación, asociado con la capacidad del material para mantener resistencia residual después de la primera fisura. Esta característica es indicativa de ductilidad, ya que el material conserva integridad estructural aun cuando han iniciado procesos de daño interno.

A su vez, la interacción entre la matriz cementicia y los fragmentos provenientes de vasos triturados genera un sistema heterogéneo donde las diferencias de rigidez obligan al agrietamiento a desviarse constantemente. Tal desviación impide que la grieta concentre energía en una sola dirección y, por ende, incrementa la disipación energética durante el proceso de fractura; argumentan que los polímeros reciclados inducen comportamientos de fisuración ramificada, lo cual conduce a incrementos apreciables en la capacidad de deformación previo a la pérdida total de soporte. En este sentido, el material adquiere una respuesta más estable ante cargas repetitivas o gradualmente crecientes.

Por lo tanto, el efecto combinado de deformabilidad polimérica, anclaje geométrico, desviación de fisuras y absorción progresiva de energía produce una mezcla con mayor tolerancia a la deformación y menor susceptibilidad al colapso súbito. Tal como exponen Rohden *et al.* (2020), la presencia de residuos plásticos altera la secuencia de daños, interfiere en el avance de grietas dominantes y mejora la capacidad de redistribución tensional dentro de la matriz. De este modo, la adición de vasos desechables triturados genera un comportamiento caracterizado por una disminución del carácter frágil habitual en el concreto convencional y por una ampliación del rango de deformaciones posibles antes de la pérdida de funcionalidad estructural.

Figura 1.

La estrategia de ductilidad mediante mecanismos



Nota. La figura sintetiza las relaciones entre evidencias científicas, mecanismos fundamentales, efectos en el comportamiento mecánico y resultados estructurales asociados a estrategias de ductilidad.

2.2. Reducción del agrietamiento

Debido a la pérdida de agua durante del fraguado del concreto, este tiende a fisurarse, lo que puede comprometer su calidad y disminuir la resistencia a esfuerzos mecánicos, en su investigación, Mendoza, (2011). “La presencia de las fibras en el concreto fresco puede disminuir el agrietamiento, lo que podría tener un impacto positivo en la resistencia a la flexión y compresión

del concreto”.

El uso de fibras de polipropileno en el concreto es una práctica consolidada que busca mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad del material. La aplicación de las fibras de polipropileno es amplia en la industria de la construcción, abarcando desde pavimentos, morteros y concretos estructurales. Es indispensable una correcta dosificación que garantice un correcto desempeño tanto en la trabajabilidad como en la resistencia final de la mezcla. Para esto hay normativas como la ACI y el INVIAS, que proporcionan lineamientos para el diseño de este tipo de concreto modificado.

La incorporación de vasos desechables triturados en mezclas cementicias modifica la trayectoria y el desarrollo de las microgrietas desde las primeras fases de carga, dado que los fragmentos poliméricos generan discontinuidades internas que desvían el avance del daño. Según Suksiripattanapong *et al.* (2022), la presencia de polímeros dentro de la matriz reduce la concentración de esfuerzos y favorece una respuesta mecánica más estable, lo cual se relaciona con la alteración de la zona de transición interfacial y con la necesidad de mayor energía para que una fisura progrese de manera continua. De esta forma, el polímero triturado actúa como un mecanismo disperso que perturba la continuidad del agrietamiento.

Asimismo, la ductilidad propia del material plástico introduce un comportamiento diferenciado frente a la apertura de grietas, ya que los fragmentos se deforman sin romperse y ejercen una resistencia residual entre los labios de la fisura. En coherencia con lo expuesto por Zhao *et al.* (2021), la interacción entre la matriz y los elementos poliméricos genera un efecto de puenteo que retrasa la pérdida de capacidad resistente, dado que los materiales de menor rigidez absorben deformaciones adicionales antes de la fractura. Este puenteo prolonga la vida útil de la fisura incipiente y modifica la cinemática del daño en la zona traccionada.

De igual manera, la diferencia entre los módulos elásticos del cemento hidratado y del polímero triturado crea un estado tensional heterogéneo que atenúa la coalescencia de microgrietas. Nourou *et al.* (2021) sostienen que los refuerzos poliméricos interrumpen la fragilidad del conglomerado al permitir mecanismos de deslizamiento interno que reducen la severidad del proceso de separación del material, lo cual contribuye a una redistribución más uniforme de los esfuerzos antes del colapso. Esta discrepancia en propiedades mecánicas actúa como un factor que incrementa la resistencia pos-fisuración sin alterar de manera significativa la

densidad global del compuesto.

Además, la superficie lisa y la naturaleza hidrofóbica del polímero originan una interfaz con menor adhesión química que facilita deslizamientos controlados cuando la fisura comienza a abrirse. Tal como señalan Suksiripattanapong *et al.* (2022), estos desplazamientos consumen parte de la energía disponible para la propagación de grietas y disminuyen la velocidad con la que el daño se extiende a través de la matriz cementicia. Debido a ello, el proceso de fractura adquiere una evolución más gradual y menos abrupta, especialmente durante cargas repetitivas o flexionales.

Por otra parte, en condiciones de flexión, la presencia de polímeros triturados incrementa la deformación admisible antes de la pérdida notable de capacidad estructural. Zhao *et al.* (2021) describen que el comportamiento post-pico en materiales reforzados con fibras se caracteriza por curvas carga-deflexión con descensos más suaves, lo que evidencia una mayor absorción de energía asociada a la acción conjunta de los fragmentos que sostienen parte del esfuerzo residual. Esta respuesta evita un colapso súbito y otorga una mayor capacidad para disipar tensiones localizadas en la zona traccionada del elemento.

Por lo tanto, la baja densidad y la capacidad elástica del polímero procedente de vasos desechables reducen los efectos de restricción interna que suelen originar fisuración temprana. Según Suksiripattanapong *et al.* (2022), la inclusión de residuos plásticos triturados disminuye la severidad del agrietamiento debido a la capacidad del material para deformarse sin fracturarse, lo que atenúa tensiones derivadas de variaciones térmicas y del proceso de hidratación. En conjunto, estas características confieren a la mezcla un comportamiento más dúctil y una progresión del daño menos acelerada durante la aplicación de cargas crecientes.

2.3. Influencia del material plástico triturado en la resistencia a la compresión

La incorporación de vasos desechables triturados en mezclas cementicias genera variaciones significativas en la respuesta mecánica bajo compresión; además, esta modificación puede describirse a partir de la interacción entre partículas poliméricas y matriz hidráulica. Dawood y Sabar (2025) señalan que el reemplazo parcial de la arena por polímeros provenientes de residuos PET induce una disminución del módulo de elasticidad y una redistribución de tensiones internas, lo que favorece una deformación más amplia antes del colapso. Debido a que

el poliestireno y el polipropileno presentan rigidez reducida frente a los agregados minerales, la mezcla resultante exhibe un comportamiento compuesto en el que zonas deformables coexisten con dominios rígidos, generando curvas tensión–deformación con pendientes iniciales menores y capacidad de deformación incrementada.

Asimismo, al analizar la forma y textura de los fragmentos introducidos, puede apreciarse que su geometría laminar o alargada interviene en el desarrollo de micro–fisuras y en la redistribución de esfuerzos en la zona de transición interfacial. Bhat y Vikram (2023) describen que las fibras de polipropileno y PVC utilizadas en concretos experimentales actúan como elementos capaces de interceptar fisuras incipientes y sostener tensiones residuales, lo que resulta en un descenso gradual de la carga posterior al pico resistente. Aunque los vasos triturados no constituyen fibras en sentido estricto, su composición polimérica y sus bordes irregulares permiten generar un efecto de puenteo que contribuye a elevar la deformación última bajo compresión, mitigando el desarrollo de fallas frágiles.

Por otra parte, al considerar la composición volumétrica del concreto, el contenido de plástico triturado influye directamente en la densidad, en la compactación y en la estabilidad de la microestructura endurecida; de este modo, reemplazos parciales de agregado fino alteran la proporción de vacíos e incrementan la heterogeneidad interna. Dawood y Sabar (2025) reportan que mezclas con sustituciones elevadas de PET muestran reducciones sustanciales del módulo dinámico, mientras que mantienen resistencias próximas a valores estructurales convencionales en edades estándar de curado. Esta combinación produce curvas de carga con mayor amplitud en el tramo post-pico y zonas amplias de deformación plástica asociadas a la presencia de polímeros deformables.

Del mismo modo, la interacción entre partículas de plástico triturado y pasta de cemento influye en la configuración de la zona interfacial, donde contrastes de rigidez generan campos de tensión diferenciados. Bhat y Vikram (2023) argumentan que los polímeros flexibles inducen la aparición de microdaños distribuidos en vez de fisuras dominantes, situación que repercute en una disipación más gradual de la energía aplicada. La presencia de fragmentos con superficies rugosas, capaces de anclarse parcialmente en la matriz, deriva en un retraso de la propagación de grietas críticas, aumentando la deformación transversal antes de la pérdida de capacidad resistente.

Además, investigaciones centradas en refuerzos híbridos han mostrado que la combinación

de materiales poliméricos y componentes metálicos altera de manera significativa el comportamiento post-fisura. Mohammed (2023) evidencian que el uso de fibras híbridas en elementos autocompactantes incrementa la tenacidad y la capacidad de redistribución de esfuerzos residuales, prolongando la fase descendente de la curva carga-deformación. En concreto modificado con vasos triturados, las partículas poliméricas pueden asumir una función equivalente a la de fibras sintéticas de baja rigidez, ayudando a conservar la integridad estructural en etapas posteriores al inicio del daño interno.

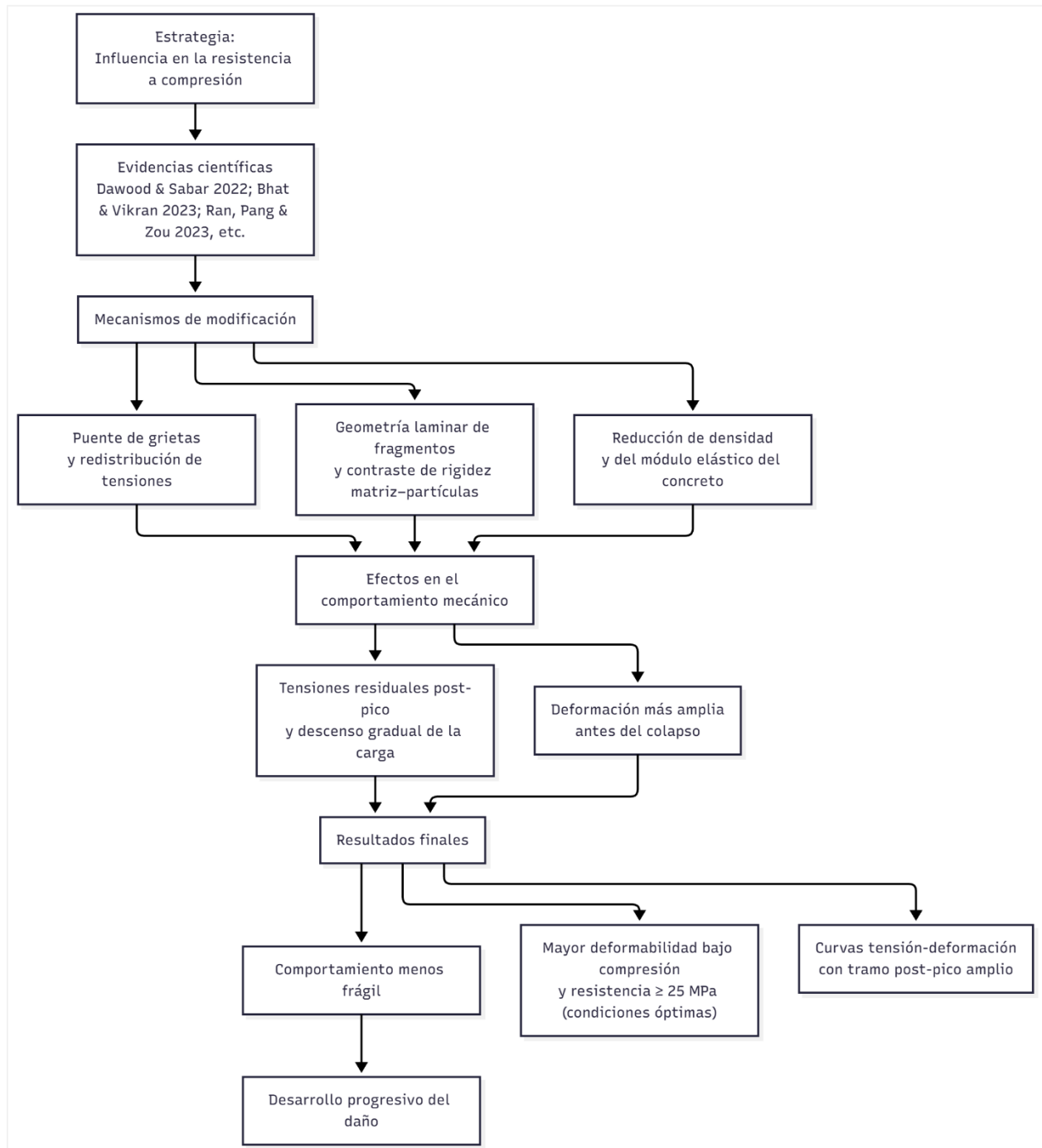
Igualmente, en estudios sobre reutilización de polímeros provenientes de residuos médicos, se ha documentado la capacidad de los materiales flexibles para modificar la forma de falla en compresión. Muestran que trajes protectores triturados introducidos como refuerzo ligero generan incrementos en la deformación a la carga máxima y un modo de fisuramiento más gradual debido a la naturaleza extensible del polímero. Por analogía, los vasos desechables triturados inducen efectos similares al permitir la redistribución de esfuerzos locales y al retardar la coalescencia de fisuras mayores, lo que contribuye a un comportamiento menos frágil.

También debe considerarse que la reducción de densidad asociada al uso de materiales poliméricos puede influir en la rigidez inicial pero no necesariamente implica pérdidas significativas en la resistencia última, siempre que la dosificación mantenga una relación adecuada entre agua, cemento y plástico. Dawood y Sabar (2025) identifican que concretos ligeros con PET pueden alcanzar resistencias superiores a 25 MPa, lo que refleja que la presencia de partículas deformables no elimina la capacidad portante del sistema, sino que modifica su régimen de deformación. En estas condiciones, la mezcla presenta una redistribución progresiva de esfuerzos internos favorecida por la ductilidad del material incorporado.

Por lo tanto, la observación conjunta de los estudios citados permite establecer que la presencia de polímeros triturados genera un efecto de modificación mecánica que se manifiesta tanto en la rigidez como en la trayectoria de daño; destacan que los polímeros tienden a retrasar la fractura principal y a sostener tensiones residuales después de la aparición de micro-fisuras. En mezclas elaboradas con vasos desechables triturados, esta condición se traduce en mayor deformabilidad, en disminución de la fragilidad y en un desarrollo progresivo del daño bajo carga de compresión, aspectos coherentes con la naturaleza flexible y extensible de los materiales plásticos reciclados.

Figura 2.

Estrategias influyentes en la resistencia a compresión del concreto.



Nota. Esquema conceptual que integra las evidencias, los mecanismos de modificación del concreto y sus efectos sobre el comportamiento mecánico, hasta los resultados finales en resistencia a compresión. Elaboración propia.

2.4. Variación de la resistencia a la flexión por incorporación de vasos desechables

En primer lugar, la adición de partículas procedentes de vasos desechables triturados

modifica el comportamiento flexional del concreto mediante la creación de interfaces poliméricas que alteran la trayectoria natural del agrietamiento. De acuerdo con Ahmed et al. (2025), la incorporación de fibras sintéticas provenientes de residuos plásticos introduce zonas internas capaces de desviar el avance de las microfisuras, lo que exige un mayor consumo energético para su propagación. En este sentido, los fragmentos plásticos actúan como barreras discontinuas que evitan la liberación inmediata de tensiones en la fibra traccionada, generando un proceso de daño más progresivo y una reducción del carácter frágil característico del concreto convencional.

Asimismo, la inclusión del polímero triturado influye en la transferencia inicial de esfuerzos en la zona sometida a tracción; los materiales cementicios reforzados con elementos plásticos presentan una capacidad aumentada para resistir la iniciación de fisuras debido a la presencia de superficies de baja rigidez que redistribuyen las tensiones. Por consiguiente, el sistema compuesto retrasa la formación de la primera grieta al requerir una mayor deformación para superar la resistencia interna impuesta por los fragmentos insertados, lo que incrementa la estabilidad mecánica durante las fases iniciales de flexión.

Además, durante el desarrollo del agrietamiento, los fragmentos provenientes de vasos desechables actúan como puentes internos que mantienen la continuidad relativa entre planos traccionados. Ahmed et al. (2025) señalan que este tipo de refuerzo residual permite conservar la transmisión de cargas más allá del punto de fisuración, lo cual se manifiesta en incrementos notables de la deflexión última. En consecuencia, el compuesto adquiere una mayor capacidad para sostener deformaciones sin pérdida abrupta de capacidad portante, característica asociada a un comportamiento más dúctil.

Asimismo, la interacción entre la matriz cementante y el polímero triturado introduce mecanismos de fricción y anclaje que contribuyen significativamente al aumento de la resistencia residual; indican que las superficies rugosas o irregulares del polímero reciclado favorecen la adherencia mecánica, obligando a que el frente de fisura modifique su dirección y genere discontinuidades adicionales. De esta manera, la energía requerida para la extensión de cada microgrieta se incrementa, lo que tiene como efecto un retardo en la formación de fisuras críticas y una prolongación del comportamiento estable durante el ensayo de flexión.

Por otra parte, la capacidad deformacional del material se ve influida por la respuesta dúctil inherente del polímero incorporado. Rajeev et al. (2023) sostienen que los componentes plásticos

recuperados pueden experimentar deformaciones significativas antes de la rotura, permitiendo que continúen transfiriendo esfuerzos incluso después del inicio del daño en la matriz. Debido a ello, el concreto modificado presenta una curva carga–deflexión con un tramo posfisura más extendido, lo que se traduce en mejoras en la absorción de energía y en la deformación asociada al estado último.

Por lo tanto, la suma de los mecanismos mencionados genera una variación apreciable en la resistencia a la flexión y en la ductilidad global del compuesto. Ahmed et al. (2025) documentan que la inclusión de fibras y partículas plásticas distribuidas aleatoriamente incrementa la capacidad de disipar energía y modifica el modo de falla hacia un comportamiento menos frágil. En virtud de ello, los vasos desechables triturados introducidos como refuerzo no convencional permiten alterar la cinemática interna del agrietamiento, redistribuir tensiones y retardar la aparición de grietas críticas, lo que se refleja en una respuesta flexional con mayores niveles de deformación y estabilidad mecánica.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En primer lugar, el concreto convencional presenta procesos de retracción durante el fraguado que generan microfisuras capaces de modificar la capacidad resistente del material. La incorporación de partículas de polipropileno procedentes de vasos desechables triturados introduce superficies de interacción adicionales dentro de la matriz cementante, donde la fricción y las propiedades hidrofóbicas del polímero pueden interferir en la aparición y desarrollo de dichas discontinuidades, especialmente en elementos sometidos a ambientes con presencia constante de humedad. Sin embargo, no se dispone de información suficiente que describa con precisión cómo varía la respuesta mecánica de este material compuesto cuando se recurre a este tipo de adición.

Asimismo, el incremento sostenido en el consumo de plásticos de un solo uso ha generado volúmenes significativos de residuos que permanecen activos durante largos periodos en los ecosistemas. Frente a este escenario, la trituración de vasos desechables y su incorporación en mezclas cementicias se perfila como una alternativa de reutilización que podría integrar residuos poliméricos a procesos constructivos. No obstante, la ausencia de caracterizaciones detalladas sobre el comportamiento de estos compuestos en términos de resistencia, deformación y fisuración impide establecer si la transformación del residuo en insumo para la industria de la construcción resulta compatible con las exigencias mecánicas habituales.

Por otra parte, desde la ingeniería civil, la evaluación de la resistencia a compresión y la resistencia a flexión constituye un requisito para estimar la capacidad portante de elementos fabricados con materiales cementicios. Estos parámetros definen la forma en que la mezcla responde ante sollicitaciones directas y ante esfuerzos que inducen tracción en la zona inferior de vigas u otros componentes estructurales. La introducción de fragmentos de polipropileno reciclado dentro de la matriz hidráulica podría alterar la rigidez inicial, la distribución de tensiones y el patrón de agrietamiento, por lo que se requiere un análisis comparativo frente a una mezcla patrón elaborada con agregados convencionales.

De igual manera, la presencia de partículas plásticas dentro de la pasta cementante modifica la heterogeneidad interna del material, así como la zona de transición interfacial entre pasta y agregados. Esta condición puede traducirse en cambios en la trayectoria de las fisuras, en la forma de falla y en la capacidad del compuesto para mantener esfuerzos residuales después del primer agrietamiento. Sin embargo, no se dispone de resultados que permitan determinar si las

dosificaciones propuestas para las fibras procedentes de vasos triturados generan reducciones significativas en la resistencia a compresión, incrementos medibles en la resistencia a flexión o variaciones simultáneas en ambas propiedades que limiten su utilización en elementos estructurales.

En consecuencia, emerge la necesidad de responder a la pregunta: ¿Cómo influye la adición de vasos desechables triturados en la resistencia a la flexión y la compresión del concreto? La formulación de esta interrogante orienta el diseño de un programa experimental en el que se comparen mezclas con distintos porcentajes de incorporación polimérica frente a un material de referencia, con el propósito de identificar tendencias en la capacidad portante y en el comportamiento frente a la fisuración bajo cargas normalizadas.

Por lo tanto, el empleo de polímeros reciclados dentro de mezclas cementicias se relaciona con estrategias de reducción, reciclaje y reutilización de residuos, por lo que la cuantificación de su efecto mecánico permite vincular parámetros estructurales con criterios de sostenibilidad. La ausencia de datos específicos sobre la interacción entre polipropileno triturado de vasos desechables y la matriz cementante plantea la necesidad de generar información experimental que describa la respuesta de estos compuestos, de modo que se puedan delimitar rangos de dosificación, posibles aplicaciones y eventuales restricciones para su uso en sistemas constructivos donde se requiera garantizar un desempeño mecánico verificable.

4. OBJETIVOS

4.1. General

Evaluar la resistencia a la flexión y compresión del concreto tradicional y modificado con adición de vasos desechables triturados, para determinar las proporciones adecuadas de sus componentes y corroborar su posible utilidad como material durable, económico y amigable con el medio ambiente.

4.2. Específicos

- Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de los vasos desechables triturados, incluyendo tamaño de la fibra y forma.
- Preparar muestras de concreto modificadas con adiciones de fibras de vasos desechables triturados al 0.3%, 0.6% y 0.12% en peso del cemento.
- Realizar pruebas de resistencia a la flexión en vigas de concreto y las fisuras que se formen durante la flexión pueden revelar información sobre la adherencia y la capacidad de las fibras para resistir la propagación de fisuras.
- Realizar pruebas de resistencia a la compresión en cilindros de concreto con y sin fibras de vasos desechables triturados, comparando los valores de resistencia.
- Analizar y comparar los resultados de las pruebas experimentales para determinar el impacto de las fibras en la resistencia a la flexión y compresión del concreto.

5. METODOLOGÍA

5.1. Tipo de investigación

La investigación se desarrolla a partir de una revisión técnica orientada a identificar antecedentes, parámetros de diseño, propiedades mecánicas y criterios de desempeño asociados al uso de polímeros reciclados en mezclas cementicias. Esta etapa inicial permite establecer rangos de dosificación, características físicas del material plástico triturado y efectos reportados en el comportamiento mecánico del concreto. Posteriormente, se ejecuta una fase experimental que incorpora procedimientos de laboratorio organizados de manera secuencial, desde la recolección y acondicionamiento del material polimérico hasta la fabricación de especímenes y ejecución de ensayos normalizados. Esta combinación de revisión documental y experimentación permite describir el efecto del polímero incorporado en condiciones controladas y compararlo con un concreto patrón.

5.2. Nivel de investigación

El estudio corresponde al nivel experimental porque involucra la elaboración de materiales con composición modificada y su sometimiento a pruebas normalizadas para caracterizar su respuesta mecánica. La investigación aplicada se evidencia en la adaptación de procedimientos propios de la ingeniería civil para examinar un material que integra componentes reciclados, buscando determinar su comportamiento en condiciones que simulan esfuerzos reales. La ejecución en laboratorio permite controlar variables tales como la temperatura, el tiempo de curado, el grado de compactación y la homogeneidad de los especímenes, lo que garantiza la generación de datos comparables entre las distintas mezclas preparadas.

5.3. Diseño de investigación

El diseño se organiza mediante una secuencia que integra análisis documental, caracterización del material polimérico, preparación de especímenes y evaluación mecánica. La fase documental comprende la identificación de parámetros técnicos utilizados en investigaciones previas, así como la revisión de normas aplicables al ensayo de concretos modificados. La caracterización del polímero triturado incluye la determinación de tamaño, geometría, densidad aparente y comportamiento hidrofóbico, debido a que estas variables influyen en la distribución

del aditivo dentro de la matriz cementante. La fase constructiva de vigas y cilindros reproduce las condiciones establecidas por normas ASTM, garantizando que las proporciones, el procedimiento de mezclado, la compactación y el curado sean uniformes para todas las combinaciones. Posteriormente, los datos generados por los ensayos se organizan en matrices que permiten comparar tendencias y variaciones diferenciales entre concretos modificados y la mezcla patrón.

5.4. Fase experimental

La fase experimental inicia con la preparación del material polimérico, el cual se obtiene a partir de vasos desechables recolectados, limpiados y triturados hasta generar partículas con tamaño sobrepasante para mezclas cementicias. Estas partículas se tamizan para obtener una distribución adecuada y se almacenan en condiciones secas para evitar variaciones en la humedad de la mezcla. En la etapa de dosificación se definen tres porcentajes de incorporación del polímero triturado (0.3 %, 0.6 % y 0.12 % respecto al peso del cemento), manteniendo constante la relación agua/cemento y el volumen de agregados. El mezclado se realiza siguiendo un orden secuencial que garantiza la dispersión del aditivo dentro de la pasta, reduciendo la formación de aglomerados y permitiendo una integración adecuada con los agregados.

La fabricación de especímenes comprende la elaboración de vigas y cilindros siguiendo dimensiones y procedimientos estipulados por ASTM C31, ASTM C39 y ASTM C78. Cada mezcla se vierte en moldes metálicos lubricados y se compacta mediante vibración mecánica para reducir vacíos internos. Con posterioridad, los especímenes se desmoldan y se trasladan a un ambiente húmedo con temperatura controlada para asegurar un proceso de hidratación uniforme hasta alcanzar las edades de ensayo. Durante los ensayos a compresión y flexión se registran cargas aplicadas, modos de fisuración, deformaciones y características visibles del agrietamiento, lo que permite relacionar el efecto del polímero con la resistencia obtenida y con el comportamiento durante el incremento progresivo de carga.

5.5. Población y muestra

Dado que la población asociada a los especímenes no puede definirse dentro de un marco estadístico convencional, se adopta lo establecido en normas ASTM en cuanto al número mínimo de unidades requeridas para garantizar la validez de los resultados. Cada combinación de mezcla requiere al menos tres especímenes por edad de prueba, lo que permite obtener valores promedio

y analizar la dispersión de los datos obtenidos. Este criterio asegura que las variaciones en los resultados no se atribuyan únicamente a diferencias en la fabricación o compactación, sino que reflejen el comportamiento característico del material evaluado.

5.6. Técnica de recolección de datos

Los datos se obtienen mediante la combinación de registros documentales y mediciones experimentales. La consulta de literatura especializada proporciona información sobre tendencias de comportamiento, parámetros de diseño y propiedades mecánicas típicas para materiales cementicios con adiciones poliméricas. Paralelamente, los ensayos realizados en laboratorio generan mediciones precisas de carga máxima, deformación, curvas tensión–tiempo y características de fisuración. Cada registro se almacena en formatos estandarizados que aseguran la trazabilidad de la información, permitiendo correlacionar variables tales como porcentaje de adición, edad de ensayo y resistencia obtenida.

5.7. Normativa aplicable

El conjunto de procedimientos desarrollados se ajusta a los lineamientos definidos por INVIAS, complementados por normas ASTM y ASHTO que regulan tanto la elaboración de especímenes como la ejecución de ensayos mecánicos. En particular, se emplean las normas ASTM C39 para la determinación de resistencia a compresión, ASTM C78 para la resistencia a flexión y ASTM C31 para el muestreo, moldeado y curado de probetas. Estas normas permiten unificar los criterios de preparación, compactación, curado y evaluación del concreto, asegurando que los resultados sean comparables con investigaciones previas y con parámetros de la industria.

5.8. Aspectos éticos

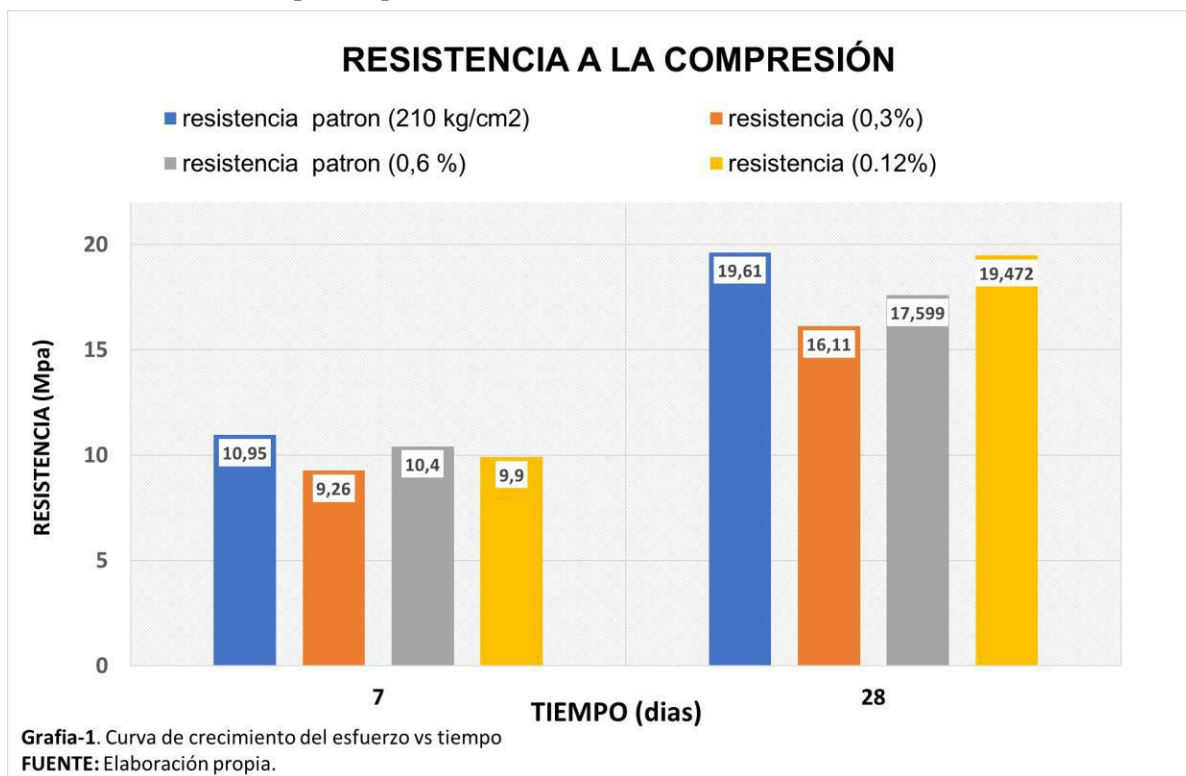
La gestión de la información técnica proveniente de entidades ambientales se realiza con estricta reserva, garantizando que cualquier material proporcionado por terceros sea empleado exclusivamente con fines académicos. Las fuentes documentales se citan conforme a estándares establecidos y se delimita el carácter estudiantil de la investigación para evitar interpretaciones que sugieran aplicaciones fuera del ámbito académico. La manipulación de residuos plásticos se lleva a cabo considerando protocolos de seguridad y manejo adecuado de materiales, preservando condiciones de higiene y minimizando cualquier impacto ambiental asociado.

6. RESULTADOS

La representación de la **Figura 3** permitió identificar variaciones cuantitativas en la resistencia mecánica del material en función del tiempo de curado y del porcentaje de incorporación de partículas procedentes de vasos desechables. En primer lugar, a los 7 días se observó que las mezclas modificadas presentaron valores inferiores respecto al patrón; de este modo, quedó evidenciada una respuesta inicial con menor capacidad portante en todas las dosificaciones analizadas. Asimismo, las tres adiciones mostraron diferencias entre sí, lo que permitió distinguir el efecto gradual del incremento de fibra sobre el comportamiento temprano del concreto.

Figura 3.

Grafica esfuerzo vs tiempo compresión



Nota. La gráfica muestra la variación de la resistencia a la compresión del concreto a 7 y 28 días para diferentes porcentajes de incorporación de partículas procedentes de vasos desechables triturados. Los valores evidencian una disminución general de la resistencia conforme aumenta el contenido de fibra, excepto en la dosificación del 0.12%, que presenta un comportamiento cercano al patrón. Elaboración propia.

Posteriormente, a los 28 días, la mezcla patrón conservó el mayor nivel de resistencia, mientras que la dosificación correspondiente al 0,12% registró un valor muy próximo. En

consecuencia, esta proporción exhibió un desarrollo resistente comparable al de la mezcla sin adiciones, sin evidenciar una disminución marcada frente a los demás porcentajes. Por el contrario, las mezclas con 0,3% y 0,6% mantuvieron valores inferiores, reflejando un comportamiento menos favorable durante el proceso de maduración.

Al relacionar los resultados obtenidos en ambos periodos, se advirtió una reducción progresiva asociada al aumento del contenido de fibra proveniente de los vasos triturados. De manera general, esta disminución se presentó en casi todas las proporciones evaluadas, aunque la mezcla con 0,12% evidenció un comportamiento particular, ya que el avance del curado permitió alcanzar niveles cercanos al patrón sin una brecha significativa en la etapa final del ensayo.

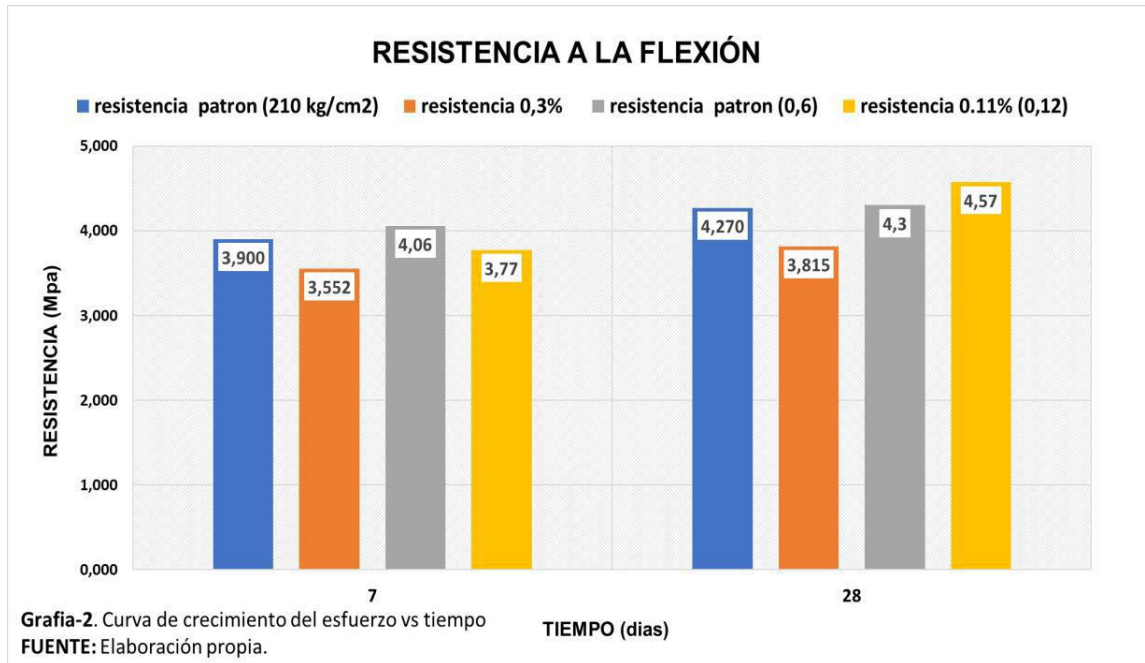
Asimismo, la lectura comparativa de los valores reportados permite observar variaciones asociadas tanto al tiempo de curado como al porcentaje de fibra incorporado. En primer lugar, a los siete días, la dosificación equivalente al 0.6 % registra una resistencia a la flexión superior a la obtenida por la mezcla patrón y por las adiciones del 0.3 % y 0.12 %. De esta manera, se evidencia que, durante las primeras etapas de hidratación, una mayor cantidad de refuerzo se refleja en un incremento del esfuerzo que el material puede soportar antes de la rotura.

Posteriormente, a los veintiocho días, la distribución de resultados muestra un comportamiento distinto. En este caso, la mezcla con el 0.12 % alcanza el mayor valor de resistencia, seguida por el 0.6 %. En consecuencia, se observa que, en edades avanzadas, una dosificación menor puede generar una transferencia de esfuerzos más eficiente, lo cual se manifiesta en el incremento del valor medido respecto a los demás porcentajes evaluados.

Por último, al comparar ambas etapas de curado, se identifica que cada dosificación desarrolla un ritmo particular de crecimiento mecánico. Así, el aumento registrado entre el séptimo y el vigésimo octavo día en las mezclas con 0.12 % y 0.6 % indica que la interacción fibra-matriz modifica la trayectoria de ganancia en resistencia a la flexión, permitiendo que determinadas proporciones superen a la mezcla patrón conforme avanza la hidratación.

Figura 4.

Grafica esfuerzo vs tiempo flexión



Nota. La gráfica presenta la variación de la resistencia a la flexión (MPa) en función del tiempo de curado para cuatro dosificaciones: mezcla patrón (210 kg/cm²), adición del 0.3 %, adición del 0.6 % y adición del 0.12 %. Los valores reportados corresponden a mediciones realizadas a los 7 y 28 días. *Fuente:* *Elaboración propia.*

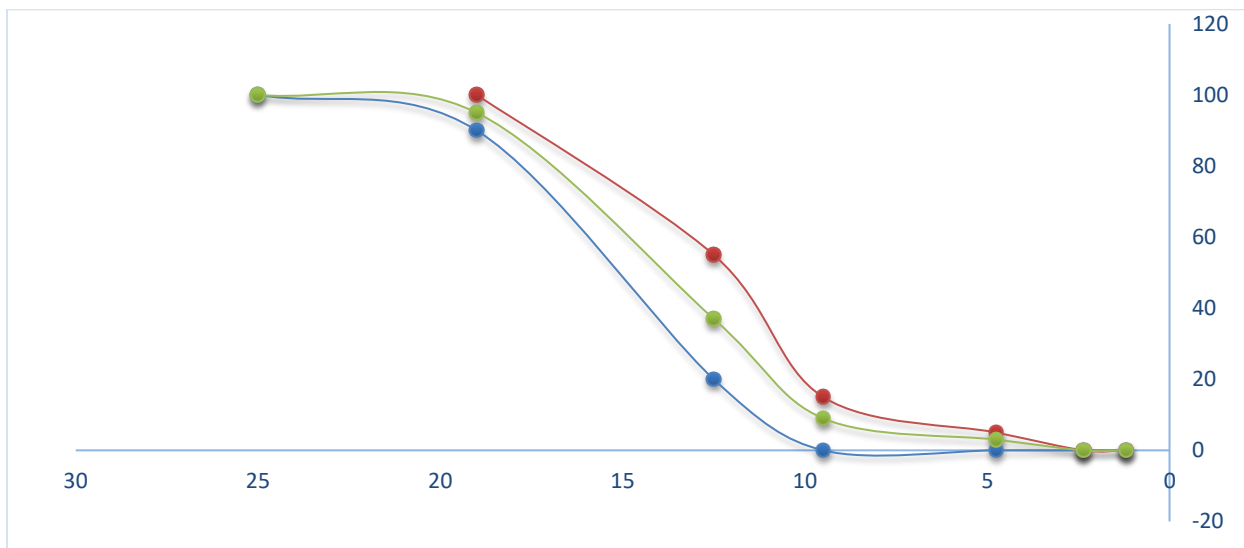
La información correspondiente a un análisis granulométrico mediante una estructura que permite interpretar de manera ordenada la relación entre los tamaños de tamiz y la proporción de material que podría asociarse a cada fracción. Para ello, presenta tres columnas paralelas límite superior, distribución central y límite inferior que funcionan como referentes conceptuales dentro del proceso de evaluación granulométrica. En la primera columna se disponen los valores asociados al límite superior, los cuales representan la trayectoria máxima que suele emplearse como referencia en ejercicios de clasificación. Esta sección se presenta siguiendo la secuencia descendente de tamices, de manera que la lectura conserva la progresión típica del proceso de tamizado y facilita la construcción de un esquema comparativo. Posteriormente, la columna central reúne una distribución intermedia que sirve como punto de contraste entre los límites establecidos. Esta disposición permite visualizar cómo se ordenan las fracciones a lo largo de la serie de tamices y cómo se articula la continuidad entre tamaños mayores y menores. La estructura facilita imaginar el trazo de una curva que, en un gráfico, adoptaría una forma descendente conforme disminuye la abertura.

La tercera columna contiene el límite inferior, el cual define la trayectoria mínima del

intervalo de referencia. Su alineación con las otras dos columnas posibilita una lectura simultánea de las tres trayectorias, lo que hace posible comprender cómo se configura un corredor de gradación. Dicho corredor es el que posteriormente se representa en la **Figura 5** con una curva superior y otra inferior que delimitan el espacio donde se ubica la trayectoria intermedia. Además, la correspondencia exacta entre tamaños de tamiz en los tres bloques permite transferir fácilmente la información a una representación gráfica; por ello, las tres columnas pueden proyectarse como líneas paralelas que descienden de manera progresiva conforme disminuye la granulometría.

Figura 5.

Distribución granulométrica del material arenoso.



Nota. La figura representa la relación entre el tamaño de tamiz y la proporción acumulada de material que atraviesa cada abertura. Las tres curvas corresponden al límite superior, la distribución intermedia y el límite inferior establecidos para la caracterización granulométrica de arenas conforme a los criterios técnicos aplicados.

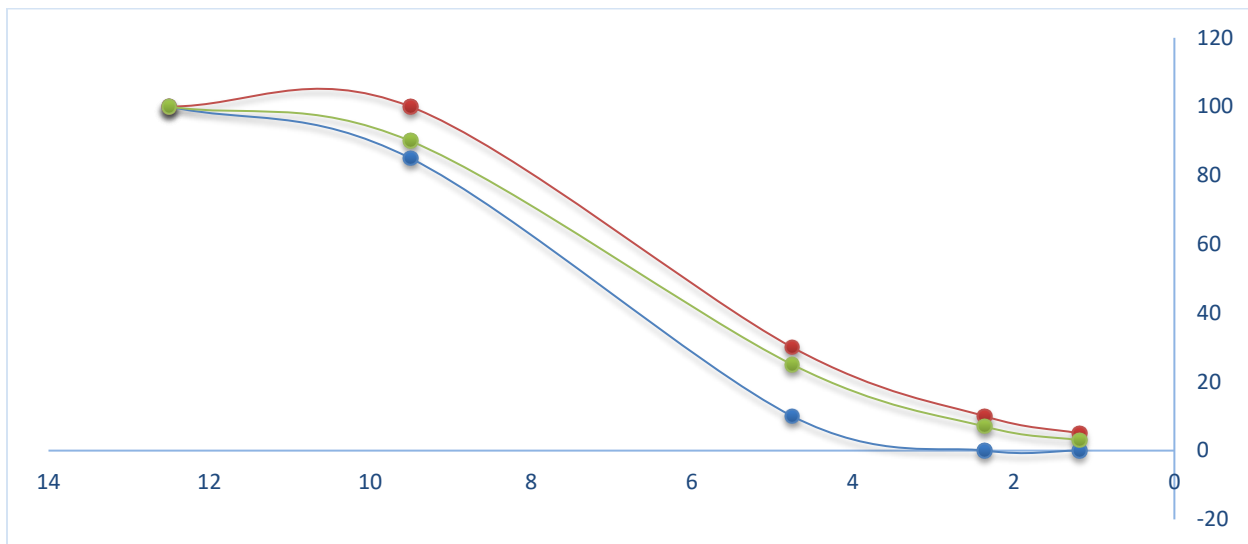
Los bloques de límite superior, distribución del ensayo y límite inferior definen un corredor de gradación para un agregado de naturaleza arenosa. La línea asociada al límite superior se construye a partir de esa primera columna y funciona como borde del intervalo permisible; la línea de la muestra se origina en la columna central y traduce la secuencia de porcentajes acumulados de paso para cada tamiz. Gracias a esta correspondencia, cada punto de la gráfica puede vincularse con una abertura específica y con la proporción relativa de partículas que logra atravesarla, lo que permite distinguir el comportamiento de las fracciones gruesas, medias y finas sin requerir valores numéricos explícitos.

En la **Figura 6** se aprecia que, en el tramo correspondiente a los tamices de mayor abertura, ambas líneas se mantienen próximas, lo que indica una similitud en la distribución de las partículas

de mayor tamaño. Sin embargo, a medida que el análisis progresa hacia tamices de menor abertura, la línea de la muestra adquiere una pendiente más pronunciada que la trayectoria límite, lo que evidencia una reducción más rápida de la fracción que pasa y, por tanto, una presencia relativamente menor de material fino. En los últimos tamices la curva tiende a estabilizarse cerca del eje horizontal, con valores muy bajos de paso, de modo que la porción más fina queda concentrada en una franja limitada del espectro granulométrico. Esta combinación de tramos con pendientes diferenciadas permite caracterizar la arena lana como un material cuya gradación se concentra en tamaños intermedios, con aportes reducidos de fracciones muy finas.

Figura 6.

Curvas límite y trayectoria granulométrica del material lana (arena).



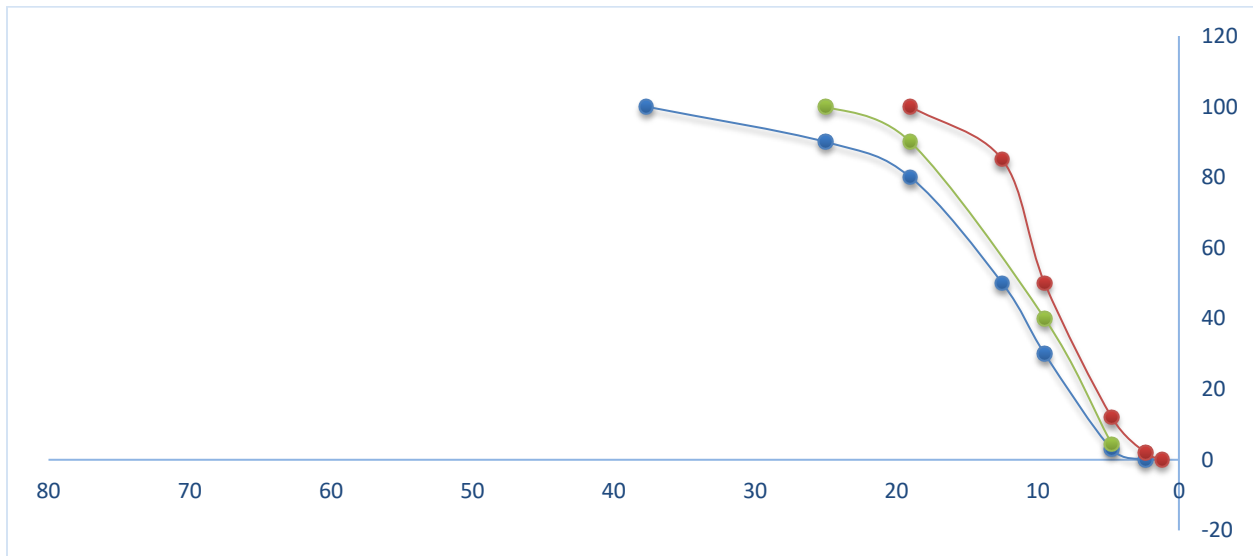
Nota. La figura muestra la relación entre el tamaño de tamiz y la proporción acumulada que define el comportamiento granulométrico del material en comparación con sus límites de referencia.

En vasos(grava) se organiza la información correspondiente a la distribución granulométrica del material mediante un conjunto de columnas que relaciona cada tamaño de tamiz con la proporción de partículas que logran atravesarlo. En primer lugar, el límite superior establece la trayectoria máxima esperada para un agregado grueso y, por ello, mantiene valores elevados en las aberturas de mayor tamaño. A medida que se avanza hacia tamices más pequeños, esta línea desciende de forma continua, lo que permite delinear la envolvente superior del intervalo dentro del cual se interpreta el comportamiento general del material. La secuencia ordenada de estos valores facilita reconstruir el perfil que suele utilizarse como referencia para materiales con predominio de fracciones gruesas.

A continuación, la columna central muestra la progresión correspondiente a la muestra analizada. Esta trayectoria sigue un descenso gradual desde las fracciones iniciales de mayor diámetro hacia los tamaños intermedios y, posteriormente, hacia las fracciones finas. De esta forma, se observa cómo el material se concentra principalmente en los tamaños grandes y cómo disminuye su presencia a medida que la abertura se reduce. Paralelamente, el límite inferior reúne los valores mínimos admitidos para la misma serie de tamices y define la envolvente más baja del corredor granulométrico. La presencia simultánea de estas tres columnas permite comparar la distribución observada con los márgenes establecidos y, además, facilita interpretar en la gráfica la transición progresiva del material desde partículas gruesas hasta tamaños reducidos.

Figura 7.

Curvas límite y trayectoria granulométrica del material tipo grava.



Nota. La figura representa la relación entre el tamaño de tamiz y la proporción acumulada que describe el comportamiento granulométrico de la grava en comparación con los límites de referencia establecidos.

6.1. Resultados experimentales

En primer lugar, el procedimiento registrado en la **Figura 8** permitió observar que el lavado de los vasos desechables eliminó residuos adheridos y sustancias superficiales que podrían alterar la relación agua–cemento. Como consecuencia de esta limpieza, las superficies poliméricas conservaron su integridad física sin cambios visibles en textura o coloración, lo cual facilitó su posterior manipulación en estado seco.

A continuación, el proceso de trituración ilustrado en la **Figura 9** generó partículas con geometrías irregulares y variabilidad dimensional. Debido a esta morfología, los fragmentos

exhibieron una capacidad elevada para interactuar mecánicamente con la matriz cementante una vez incorporados. Además, la heterogeneidad de bordes observada favoreció la fricción interna y la dispersión aleatoria durante el mezclado, sin evidenciar concentraciones localizadas.

Figura 8.
Proceso de lavado de los desechables reciclados



Figura 9.
Proceso de triturado de vasos desechables



Luego, la **Figura 10** presentó el material obtenido tras el triturado. En esta etapa fue posible distinguir una reducción consistente en el espesor de los fragmentos, junto con un comportamiento físico caracterizado por baja densidad aparente. De este modo, el material mostró una tendencia natural a distribuirse de forma uniforme cuando se manipula manualmente, condición relevante para los ensayos posteriores.

Posteriormente, el análisis granulométrico mostrado en la **Figura 11**, aplicado conforme a los lineamientos del INV 2012, permitió determinar la distribución de tamaños predominantes en el polímero triturado. A partir del tamizado, se identificó una gradación abierta con predominio de tamaños medios y finos. Así, la mezcla final pudo elaborarse sin necesidad de ajustes adicionales, dado que los fragmentos no generaron obstrucciones ni acumulaciones dentro del sistema de tamices.

Figura 10.
Fibras de vasos desechables triturados



Figura 11.
Ensayo de granulometría INV 2012



De manera complementaria, el ensayo de índices de forma reflejado en la **Figura 12** evidenció que los fragmentos presentaron proporciones alargadas y planas. Por tal razón, este comportamiento geométrico sugirió que las partículas podrían contribuir al puenteo de microfisuras durante la aplicación de cargas, ya que su configuración facilita mecanismos de interferencia interna en la matriz.

Asimismo, la **Figura 13** mostró el comportamiento de asentamiento bajo condiciones de mezcla con incorporación de polímero. Durante la ejecución del ensayo no se observó alteración en la fluidez, debido a que las partículas mantuvieron su condición hidrofóbica y no absorbieron agua. En consecuencia, la trabajabilidad permaneció dentro del rango esperado para un concreto fabricado con la misma relación agua-cemento.

Finalmente, el ensayo micro-Deval presentado en la **Figura 14** permitió analizar la resistencia al desgaste del material triturado. Tras la aplicación del giro del tambor, los fragmentos conservaron su tamaño y su integridad superficial, lo que indicó que el polímero no experimentó desintegración notable. Por consiguiente, el material mantuvo sus dimensiones iniciales antes de incorporarse a las mezclas destinadas a los ensayos mecánicos.

Figura 12.
Ensayo índices de forma INV-2012



Figura 13.
Ensayo de asentamiento



Figura 14.
Ensayo micro deval INV 2012



7. DISCUSIÓN

En primer lugar, los resultados obtenidos permiten identificar un comportamiento mecánico claramente diferenciado entre los ensayos de compresión y los de flexión, lo cual se relaciona con las propiedades intrínsecas del polipropileno descritas por Lugo Mejía & Torres Pérez (2019). Según estos autores, el polímero posee un módulo elástico considerablemente menor que el de la matriz cementante, de modo que su incorporación reduce la rigidez axial del concreto, pero incrementa su deformabilidad cuando se aplican cargas traccionadas. En el caso analizado, esta condición explica que las mezclas presentaran disminuciones en la resistencia a la compresión y, simultáneamente, aumentos en la capacidad de soportar deflexiones más amplias, especialmente en las dosificaciones con contenidos intermedios de partículas procedentes de vasos desechables triturados. El comportamiento dual observado demuestra que la presencia del polímero altera el equilibrio entre rigidez y ductilidad propio del concreto tradicional, generando un material más flexible en zonas traccionadas, pero menos eficiente ante cargas verticales.

Asimismo, la disminución registrada en la resistencia a la compresión muestra coherencia con lo expuesto por Mendoza (2011), quienes indican que la adición de polímeros genera discontinuidades internas que afectan la transmisión uniforme de esfuerzos dentro de la matriz. Estas discontinuidades se manifiestan como micro-zonas de vacíos o deformación temprana alrededor de los fragmentos plásticos, lo que provoca una pérdida de compacidad y origina un inicio más rápido del proceso de micro-fisuración bajo carga axial. En los ensayos realizados, esta tendencia se evidenció en las dosificaciones del 0.3 % y 0.6 %, que presentaron reducciones apreciables respecto al concreto patrón. La naturaleza hidrofóbica del polipropileno contribuye a establecer tales discontinuidades, ya que sus partículas no absorben agua y pueden propiciar la retención de aire, lo cual incrementa la porosidad local y afecta la resistencia mecánica final.

Además, el comportamiento particular observado en la dosificación del 0.12 % permite analizar una condición señalada por Małek et al (2020) quienes destacan que cantidades reducidas de material polimérico pueden incorporarse sin afectar de manera significativa la estructura interna del concreto. En esta proporción específica, la cantidad de polímero parece ser suficiente para generar mecanismos de puenteo en flexión sin comprometer la compacidad del material, lo que explica que la resistencia a la compresión registrada a los 28 días se mantuviera cercana a la mezcla patrón. Este comportamiento sugiere que existe un umbral a partir del cual la presencia de

polímeros comienza a reducir la capacidad portante axial, lo que debe considerarse en posibles aplicaciones estructurales destinadas a soportar cargas elevadas.

De igual manera, los incrementos registrados en la resistencia a la flexión se relacionan directamente con lo planteado por Abousnina et al. (2021), quienes explican que los polímeros deformables prolongan la transferencia de esfuerzos incluso después del inicio de la fisuración. Debido a su capacidad para elongarse sin fracturarse de inmediato, el polipropileno actúa como un elemento puente que enlaza temporalmente las superficies agrietadas y proporciona resistencia residual. En los resultados experimentales, esta acción se evidenció en mayor deflexión y en un comportamiento posfisura extendido, lo cual indica que la mezcla modificada disipa energía de manera más gradual que el concreto convencional. Esta característica resulta particularmente relevante para elementos sometidos a esfuerzos de flexión repetitivos o crecientes, pues permite retardar la transición hacia el colapso.

Asimismo, la forma irregular de los fragmentos plásticos obtenidos durante el triturado influyó significativamente en la desviación de trayectorias de agrietamiento, tal como lo señalan Rohden et al. (2020). Estos autores sostienen que las partículas no uniformes generan interrupciones en la continuidad del daño, lo que obliga a las micro-fisuras a modificar su dirección y aumenta la energía requerida para su progresión. En la presente investigación, esta condición se reflejó en un patrón de fisuración menos lineal y en valores superiores de deformación última, especialmente en las mezclas con mayor dispersión de geometrías. La presencia de bordes irregulares también favoreció la fricción interna, lo que reforzó parcialmente el efecto de puenteo durante los ensayos de flexión.

Por otra parte, la impermeabilidad característica del polipropileno, descrita por Toirac (2004), explica la estabilidad observada en la trabajabilidad de todas las mezclas. No obstante, esta misma propiedad contribuye a que se retenga aire alrededor de los fragmentos, lo que puede disminuir la densidad efectiva del concreto endurecido. En los resultados, este fenómeno se manifestó como una reducción progresiva en la resistencia a la compresión conforme aumentaba el contenido de polímero. Esta situación concuerda con investigaciones previas en las que se reconoce que la incorporación de materiales hidrofóbicos tiende a aumentar la porosidad interna cuando se superan ciertos umbrales volumétricos.

Adicionalmente, la interacción entre la matriz cementante y los fragmentos plásticos

generó contrastes de rigidez que influyeron en el patrón del daño, condición descrita por Malek *et al.* (2020). Estos autores indican que tales contrastes dan lugar a micro-fisuras distribuidas en lugar de grietas dominantes, lo que produce un comportamiento más progresivo durante la aplicación de cargas crecientes. Esta afirmación se relaciona con los resultados de la presente investigación, en los cuales las mezclas reforzadas mostraron un desempeño más estable en la fase post-fisura y una mayor capacidad para sostener esfuerzos residuales bajo flexión.

También es necesario considerar la sensibilidad térmica del polipropileno, señalada por Zhao *et al.* (2021), quienes explican que este material modifica sus propiedades mecánicas cuando se expone a temperaturas elevadas. Debido a esta característica, los elementos fabricados con mezclas modificadas podrían presentar variaciones no previstas en ambientes donde predominan ciclos térmicos severos o fuentes externas de calor. Esta condición delimita las aplicaciones potenciales del material y plantea la importancia de complementar los ensayos mecánicos con evaluaciones térmicas y de durabilidad.

De manera semejante, los descensos observados en la resistencia a la compresión concuerdan con los hallazgos de Dawood y Sabar (2025), quienes reportan que los polímeros reciclados incorporados como sustitutos parciales del agregado fino reducen la capacidad portante axial debido a su menor rigidez. En las dosificaciones analizadas, especialmente aquellas con 0,3 % y 0,6 % de incorporación, se evidenció este comportamiento, que responde a la presencia de zonas deformables que interrumpen la transmisión continua de tensiones en la matriz cementante.

Asimismo, los incrementos obtenidos en la resistencia a la flexión pueden relacionarse con lo expuesto por Ahmed *et al.* (2025), quienes documentan que los polímeros reciclados incrementan la longitud del tramo posfisura debido a la transferencia de esfuerzos residuales. En las mezclas evaluadas, esta característica se manifestó mediante incrementos en la deflexión última y en la resistencia registrada a los 28 días, demostrando que el polipropileno contribuye a modificar el modo de falla del concreto hacia un comportamiento menos frágil.

Además, la progresión gradual del daño registrada durante los ensayos se relaciona con lo planteado por Suksiripattanapong *et al.* (2022), quienes explican que los polímeros alteran la zona de transición interfacial y disminuyen la concentración localizada de tensiones. En esta investigación, dicha alteración permitió que el agrietamiento se distribuyera de manera más uniforme, lo que favoreció una disipación energética más estable durante la aplicación de cargas

flexionales.

Por lo tanto, el comportamiento general observado en los especímenes modificados concuerda con lo expuesto por Rohden *et al.* (2020), quienes sostienen que la incorporación de polímeros flexibles disminuye la fragilidad del compuesto y aumenta su capacidad para redistribuir tensiones residuales. Esta tendencia se refleja en la transición más lenta hacia el fallo y en la mayor tolerancia a la deformación registrada en las mezclas reforzadas, lo que señala la viabilidad de considerar este tipo de adiciones en elementos sometidos a flexión, siempre que se mantengan dosificaciones que no comprometan de manera significativa la resistencia a la compresión.

8. CONCLUSIONES

La evaluación mecánica permitió identificar que la incorporación de partículas procedentes de vasos desechables triturados generó una modificación diferenciada en la respuesta resistente del material, puesto que la mezcla incrementó su capacidad para soportar esfuerzos de flexión mientras que, de manera simultánea, experimentó una reducción en la resistencia a la compresión. Asimismo, la interacción entre el polímero y la matriz cementante derivó en un comportamiento heterogéneo en el que la deformabilidad del polipropileno influyó directamente en la trayectoria del daño bajo cargas traccionadas y en la disminución de la rigidez axial.

Por otra parte, la observación del concreto fresco evidenció que la trabajabilidad permaneció estable en todas las dosificaciones analizadas, debido a que el carácter hidrofóbico del polipropileno evitó la absorción de agua y mantuvo constante la proporción entre los componentes de la mezcla. De igual manera, la fluidez registrada durante los ensayos de asentamiento mostró que la presencia del material triturado no alteró la maniobrabilidad ni la cohesión de la pasta, lo que permitió conservar condiciones homogéneas durante los procesos de mezclado, vaciado y compactación.

Además, el comportamiento detectado en los ensayos de flexión indicó que las mezclas modificadas prolongaron su capacidad para sostener esfuerzos una vez iniciada la fisuración, ya que los fragmentos del polímero actuaron como elementos capaces de transferir tensiones residuales y de retardar la separación entre las superficies sometidas a tracción. En consecuencia, se registraron deflexiones más amplias y una disipación gradual de la energía aplicada, lo cual reflejó la influencia de la ductilidad del polipropileno en la cinemática interna de agrietamiento.

Asimismo, el análisis comparativo entre concretos con diferentes porcentajes de adición mostró que los valores resistentes variaron en función de la cantidad de polímero incorporada, puesto que la mezcla con el menor contenido evaluado presentó un comportamiento compresivo cercano al patrón, mientras que las dosificaciones superiores exhibieron reducciones más notorias. Esto sugiere que la presencia del polímero produce efectos distintos según su proporción, debido a que introduce zonas con menor rigidez que alteran la continuidad del campo tensional y modifican la trayectoria del daño bajo carga axial.

De igual forma, la revisión de los resultados indicó la conveniencia de ampliar la

caracterización experimental mediante la aplicación de ensayos en otras edades de curado, tales como 7, 14 y 28 días, con el propósito de definir con mayor precisión el crecimiento resistente de la mezcla modificada a lo largo del tiempo. Esta recomendación se fundamenta en las variaciones observadas entre periodos de maduración, que mostraron ritmos diferenciales de ganancia mecánica en cada dosificación evaluada.

En adición a lo anterior, se estableció que el polipropileno utilizado como aditivo no presentó indicios de oxidación al entrar en contacto con compuestos presentes en suelos o cuerpos de agua, específicamente sulfatos y cloruros, lo que evidencia una estabilidad química relevante para contextos donde predominan agentes agresivos. Esta característica se relaciona con la naturaleza del polímero, cuyas propiedades no se ven alteradas por dichas sustancias, manteniendo su estructura sin cambios perceptibles durante la interacción con ambientes húmedos.

Igualmente, la incorporación de este material reciclado mostró potencial para ser empleada como recurso alternativo dentro de la producción de concreto, puesto que su baja densidad, su disponibilidad y su origen reutilizable permiten integrarlo como componente adicional sin generar alteraciones significativas en la preparación de mezclas convencionales. Además, la reutilización de vasos desechables triturados ofrece una vía para transformar residuos en un insumo que puede participar en procesos constructivos, siempre que se consideren cuidadosamente los efectos mecánicos asociados a cada proporción de incorporación.

Por lo tanto, el conjunto de observaciones derivado de la experimentación señala que el polipropileno reciclado constituye una fuente posible de material que, debido a su estabilidad física y su resistencia frente a sustancias agresivas, puede integrarse en estudios dirigidos al desarrollo de mezclas cementicias con propiedades específicas. Por tanto, resulta pertinente continuar la exploración de dosificaciones adicionales y edades de medición que permitan delimitar con mayor exactitud la magnitud de los cambios inducidos por el polímero en el comportamiento mecánico del concreto modificado.

9. REFERENCIAS

- Abad Chero, Y. (2023). Adición de fibra de polipropileno y nylon para mejorar las propiedades físicas – mecánicas del concreto. *Universidad Señor de Sipán*.
- Abousnina, R., Premasiri, S., Anise, V., & Lokuge, W. (2021). Mechanical properties of macro polypropylene fibre-reinforced concrete. *Polymers*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/polym13234112>
- Ahmed, S., Hilal, N., Aadi, A., & Nawar, M. (2025). The influence of waste polypropylene fibers on the behavior of sustainable reinforced concrete beams. *Structural Concrete*, 26(5), 5965–5977. <https://doi.org/10.1002/suco.202400954>
- Bhat, A., & Vikram, A. (2023). Performance of concrete with polypropylene fibre and polyvinyl chloride fibre. *Materials Today: Proceedings. Advance online publication*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.104>
- Dawood, A., & Sabar, Z. (2025). Production of eco-friendly lightweight fibrous concrete by replacing half of the sand with PET waste. *Advances in Civil and Architectural Engineering*, 16(30), 165–181. <https://doi.org/10.13167/2025.30.10>
- Linares-Durand, J., Linares-Fonseca, D., & Melgarejo-Madueño, L. (2021). Influencia de Adición de Fibras de Polipropileno al Concreto.
- Lugo Mejía, J., & Torres Pérez, Y. (2019). Caracterización del comportamiento mecánico del concreto simple con adición de fibras poliméricas recicladas PET. . *Universidad Católica de Colombia*.
- Małek, M., Jackowski, M., Łasica, W., & Kadela, M. (2020). Characteristics of recycled polypropylene fibers as an addition to concrete fabrication based on Portland cement. *Materials*, 13(7).
- Mendoza, C., Aire, C., & Dávila, P. (2011). Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido. *Concreto y cemento*.
- Mohamed, A. (2023). Effect of macro polypropylene fibers on strength properties of reactive powder concrete. *Banat Journal of Biotechnology*, 14(28), 9-18.
- Nourou Mahaman, L., Thuo, J., & Kabubo, C. (2021). Performance of Polypropylene Fibre Reinforced Laterite Masonry Bricks. *Civil Engineering and Architecture*, 9(7), 2178-2186. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090707>
- Phetprapai, T., Singsang, W., Phetprapai, T., & Singsang, W. (2022). Plastic Waste in Fiber Reinforced Concrete for Eco-Friendly Footpath and Pavement Applications. *Sustainability*, 14. <https://doi.org/10.3390/su14116839>

- Rajeev, P., Ramesh, A., Navaratnam, S., & Sanjayan, J. (2023). Using fibre recovered from face mask waste to improve printability in 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105047>
- Rohden, A., Camilo, J., Amaral, R., & Garcez, E. (2020). Effects of plastic waste on the heat-induced spalling performance and mechanical properties of high-strength concrete. *Materials*, 13(15).
- Suksiripattanapong, C., Phetprapai, T., Singsang, W., Phetchuay, C., Thumrongvut, J., & Tabyang, W. (2022). Utilization of Recycled Plastic Waste in Fiber Reinforced Concrete for Eco-Friendly Footpath and Pavement Applications. *Sustainability*, 14. <https://doi.org/10.3390/su14116839>
- Toirac Corral, J. (2004). Patología de la construcción: grietas y fisuras en obras de hormigón; origen y prevención.
- Zhao, J., Meng, X., Chen, L., Liu, G., & Zhang, Z. (2021). Correlation between the mechanical properties and the fiber breaking morphology of fiber reinforced shotcrete (FRS). *Composite Structures*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114641>