

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENEIRIA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Estudio experimental y numérico del comportamiento
mecánico del Engineered Cementitious Composites (ECC)
elaborado con materiales locales de la región de Puno, Perú**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Abel Fernando Malaga Curo

Asesor:

Mg. Herson Duberly Pari Cusi

Juliaca, mayo del 2026

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mg. Herson Duberly Pari Cusi, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“Estudio experimental y numérico del comportamiento mecánico del Engineered Cementitious Composites (ECC) elaborado con materiales locales de la región de Puno, Perú”** del autor **Abel Fernando Malaga Curo** tiene un índice de similitud de 7% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 12 días del mes de junio del año 2026



Mg. Herson Duberly Pari Cusi

Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 27 día(s) del mes de mayo del año 2016, a las 9:20 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección de:

(de la) presidente(a):

Mtro Leonel Chahuares Paucar, el (la) secretario(a): Dr. Edwin Parillo
Escarsena y los demás miembros: Mg. Arnaldo Cahui Galarga
 y el (la) asesor(a) Mg. Herson Duberly Pari Cusi

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

Estudio experimental y numérico del comportamiento mecánico del Engineered Cementitious Composites (ECC) elaborado con materiales locales de la región de Puno, Perú del(los) bachiller/es: a) Abel Fernando Malaga Curo

b) _____

c) _____

conducente a la obtención del título profesional de: _____

Ingeniero Civil

(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Abel Fernando Malaga Curo

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (b): _____

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

Bachiller (c): _____

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
Presidente/a
[Firma]
Asesor/a
[Firma]
Bachiller(a)

[Firma]
Miembro
[Firma]
Bachiller (b)

[Firma]
Secretario/a
[Firma]
Miembro
[Firma]
Bachiller (c)

DEDICATORIA

A Dios, por el privilegio de la vida, por guiarme y fortalecerme en cada momento.

A mis padres, Melania Curo y Luis Málaga, por su amor y apoyo incondicional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN	6
2. MODELOS NUMÉRICOS	7
3. EXPERIMENTOS	9
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
5. CONCLUSIONES	20
6. REFERENCIAS	21
7. ANEXOS	23

Malaga Curo, Abel Fernando*; Pari Cusi, Herson Duberly

Estudio experimental y numérico del comportamiento mecánico del Engineered Cementitious Composites (ECC) elaborado con materiales locales de la región de Puno, Perú

Resumen: Los materiales cementicios convencionales presentan un comportamiento frágil ante esfuerzos de tracción y flexión, lo que limita su capacidad de disipar energía y restringe su aplicación en elementos que requieren una respuesta más controlada. En este contexto, se plantea el uso de materiales cementicios tipo ECC elaborados con arena de río y fibras de polipropileno como alternativa de menor costo. El objetivo del presente estudio es evaluar un ECC sin ceniza volante utilizando arena del río Coata (Puno, Perú) como sustituto progresivo de la arena de sílice y fibras de polipropileno como refuerzo. Se desarrolló un programa experimental con ensayos de compresión, tracción indirecta, flexión y fractura, complementado con un modelamiento numérico en DIANA FEA basado en las leyes de Thorenfeldt y CMOD. Los resultados mostraron resistencias superiores a 27 MPa y curvas carga-deflexión con doble pico asociadas al aporte de fibras. El análisis ANOVA indicó que el reemplazo de arena no genera diferencias significativas ($p > 0.05$), y todas las mezclas presentaron un comportamiento dúctil con capacidad residual y descenso post-pico estable. Asimismo, la simulación numérica reprodujo adecuadamente la carga máxima y la respuesta post-fisura. Estos hallazgos muestran la viabilidad técnica del uso de arena local y fibras de polipropileno, logrando una reducción de costos superior al 70 % sin afectar el desempeño mecánico del material.

Palabras clave: ECC; arena de río; fibras de polipropileno; ensayo de compresión; tracción indirecta; flexión; fractura; CMOD; energía de fractura; DIANA FEA; modelado numérico.

* **Autor de Correspondencia:** Abel Malaga, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Peruana Unión, Puno, Perú, e-mail: abel.malaga@upeu.edu.pe

Herson Pari: Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Peruana Unión, Puno, Perú

1 Introducción

El mortero o concreto de alta ductilidad también denominado (Engineered Cementitious Composite (ECC)), es un material cementicio reforzado con fibras, diseñado micromecánicamente para superar la fragilidad del concreto convencional. En su concepción clásica, el ECC exhibe un comportamiento no lineal de endurecimiento prolongado y alta deformabilidad (3–5 %), con fisuras de ancho reducido ($<100 \mu\text{m}$), lo que le confiere ventajas notables en durabilidad y desempeño estructural [1,2].

Sin embargo, la formulación tradicional de ECC requiere insumos de alto costo y disponibilidad limitada, como la arena de sílice ultrafina y fibras de alcohol polivinílico (PVA) [1]. Esta dependencia restringe su aplicación a gran escala, particularmente en países en desarrollo. Ante esta situación, múltiples investigaciones han explorado alternativas con agregados y fibras locales, buscando reducir costos sin sacrificar propiedades mecánicas esenciales.

Respecto a los agregados, Guan et al. [2] demuestran que un ECC con arena de río de granulometría gruesa (máx. 4.75 mm) alcanzó deformaciones superiores al 9 % y reducciones de costo mayores al 10 %. Li et al. [3] investigan los mecanismos de propagación de grietas en ECC con arena de río (RS-ECC). Encontraron que en mezclas de resistencia normal la grieta tiende a desviarse en la interfase arena-matriz, generando trayectorias más tortuosas que incrementan la tenacidad a fractura de la matriz, pero reducen la capacidad de múltiples fisuras y la deformación unitaria. En cambio, en mezclas de alta resistencia la grieta penetra a través de las partículas de arena, dando lugar a fenómenos de ramificación que favorecen la saturación de múltiples fisuras y mejoran la ductilidad del material. Otros autores han evaluado arenas no convencionales: Lin et al. [4] desarrollan un ECC con arena marina y agua de mar, estableciendo modelos constitutivos uniaxiales; Niu et al. [5]

emplean arena de desierto, observando mejoras en la adherencia fibra-matriz; y Raza et al. [6] reportan buen desempeño de ECC con arena del río Amarillo bajo condiciones de congelamiento-deshielo. Estos estudios confirman que la utilización de agregados locales constituye una estrategia eficaz para lograr materiales cementicios de menor costo.

En cuanto a las fibras, si bien las de PVA continúan siendo la referencia en ECC, su elevado precio y limitada accesibilidad han motivado el empleo de fibras de polipropileno (PP) como alternativa. Zhu et al. [1] proponen un ECC con arena superfina y fibras PP, alcanzando buena ductilidad y control de fisuras, aunque con desempeño inferior al ECC tradicional. Investigaciones recientes han mostrado que, con un ajuste adecuado de las proporciones de mezcla, el PP puede ofrecer un comportamiento aceptable en términos de tenacidad y resistencia [4,5].

El análisis numérico ha acompañado estos avances experimentales. Kang y Bolander [7] aplican un modelo reticular (lattice model) para comprender la fisuración, mientras que Zhang et al. [8] desarrollan un modelo acoplado discreto-continuo, válido para estudiar fractura, aunque computacionalmente exigente. A nivel de elementos finitos, se han empleado programas como DIANA FEA para simular flexión y fractura en vigas reforzadas con ECC, mostrando correlaciones satisfactorias con resultados experimentales [9,10]. De igual forma, modelos meso-escalares han permitido describir la evolución de múltiples grietas en materiales cementicios reforzados [11].

A pesar de estos avances, existe un vacío relevante: la literatura internacional se centra en ECC con ceniza volante, y son escasos los estudios que evalúan un ECC sin ceniza volante basado en arena de río y fibras PP. En el contexto peruano, particularmente en la región andina, no se reportan investigaciones que utilicen arena local del río Coata ni análisis experimentales combinados con modelamiento numérico.

La importancia de este estudio radica en demostrar que materiales económicos y disponibles localmente pueden emplearse para desarrollar un ECC de desempeño adecuado, contribuyendo a alternativas viables para infraestructura en zonas andinas. En este marco, la presente investigación tiene como propósito evaluar un ECC sin ceniza volante utilizando arena del río Coata como sustituto progresivo de la arena de sílice y fibras de polipropileno como refuerzo, abarcando ensayos mecánicos en compresión, tracción indirecta, flexión y fractura, además de un modelamiento numérico mediante DIANA FEA que permite contrastar y comprender la respuesta estructural observada.

En esta investigación se emplearon microfibras de polipropileno (PP) debido a que forman parte de los materiales disponibles localmente en Perú, lo cual es

coherente con el objetivo general del estudio: analizar y desarrollar un ECC económico y accesible utilizando insumos regionales. Las fibras de alcohol polivinílico (PVA), que constituyen el refuerzo tradicional de los ECC de alto desempeño, no se comercializan en el mercado peruano, ya que su producción se concentra principalmente en países como Japón y China donde fabricantes como Kuraray y proveedores asiáticos lideran la oferta internacional [12]. En el contexto peruano, su adquisición solo es posible mediante importación directa o a través de distribuidores y marketplaces internacionales, lo que incrementa de manera considerable el costo del material y compromete la viabilidad técnico-económica que este estudio busca demostrar.

Aunque las fibras PVA permiten obtener niveles superiores de micromecanismos como microfisuración múltiple y control de apertura de fisuras menores a 100 μm , diversos estudios realizados con fibras PP han reportado que este refuerzo puede proporcionar un desempeño post-fisuración estable y ductilidad adecuada cuando se optimizan las proporciones de mezcla y el tamaño del agregado fino. En este sentido, la presente investigación no pretende replicar un ECC convencional basado en PVA, sino adaptar el concepto de un material de alta ductilidad hacia una versión más accesible y viable con recursos locales, manteniendo un comportamiento no lineal, doble pico de resistencia y aporte residual de fibras.

El presente estudio no busca replicar todas las condiciones micromecánicas del ECC clásico desarrollado por Li & Lepech [13,14] (teoría del “composite tailoring”), el cual exige cumplir simultáneamente con: (i) formación de múltiples fisuras, (ii) comportamiento de strain-hardening, y (iii) control de fisuras finas menores a 100 μm . Debido a que se emplean fibras de PP y arena de río —materiales no optimizados micromecánicamente— el objetivo se orienta a evaluar el comportamiento mecánico a una escala de laboratorio, es decir alcanzar el grado de ductilidad sin entrar en el detalle micromecánico y la viabilidad técnica-económica del material. No obstante, los resultados obtenidos (doble pico, aumento de tenacidad y aporte residual de fibras) muestran que el material presenta un comportamiento significativamente más dúctil que un material cementicio convencional, lo cual constituye un primer paso hacia desarrollos posteriores donde sí podrá incorporarse una optimización micromecánica completa.

2 Modelos numéricos

El modelado numérico de la viga del material cementicio reforzado con fibras se realizó utilizando el software comercial DIANA Finite Element Analysis (FEA), desarrollado para análisis avanzados de elementos finitos en problemas estructurales, geotécnicos y de ingeniería civil. En esta sección se presenta la metodología empleada para la simulación de la viga con muesca sometida a flexión a tres

puntos, reproduciendo las condiciones experimentales de geometría, carga, apoyos y modelos constitutivos.

2.1 Modelos constitutivos

Se empleó el modelo de deformación total de fractura (Total Strain Crack Model) en la formulación de grietas distribuidas (smeared crack), con las siguientes leyes constitutivas:

El comportamiento a compresión se representó con la ley de Thorenfeldt–Tomaszewicz–Jensen (1987) [15], ampliamente usado en materiales cuasi-frágiles. La expresión matemática es:

$$f = -f_p \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \left(\frac{n}{n - \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}\right)} \right)^{nk} \quad (1)$$

Donde los parámetros se definen como:

$$n = 0.80 + \frac{f_{cc}}{17}, \quad k = \begin{cases} 1, & \text{si } \varepsilon_p < \varepsilon < 0 \\ 0.67 + \frac{f_{cc}}{62}, & \text{si } \varepsilon \leq \varepsilon_p \end{cases} \quad (2)$$

En el modelo de Thorenfeldt, las variables y parámetros adoptan el siguiente significado: f corresponde al esfuerzo de compresión (negativo por convención), mientras que f_p representa el esfuerzo pico en compresión, es decir, la resistencia máxima alcanzada por el material. La variable α es la deformación normalizada y ε_p la deformación normalizada al pico. Por su parte, n define la curvatura de la rama ascendente de la curva esfuerzo–deformación, y k regula el ablandamiento característico de la rama descendente. Finalmente, f_{cc} se refiere a la resistencia a compresión del ensayo de cubos, a partir de la cual se ajustan los parámetros de la ley constitutiva.

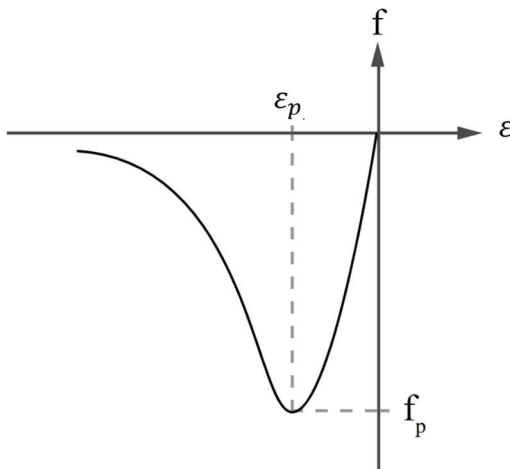


Figura 1. Curva de compresión de Thorenfeldt [16].

Este modelo reproduce la rama ascendente hasta el esfuerzo máximo y el descenso post-pico controlado, capturando de manera realista el ablandamiento en compresión observado en los ensayos experimentales.

Para el comportamiento en tracción se empleó un modelo de ablandamiento en función de la apertura de fisura (CMOD), adecuado para morteros y concretos reforzados con fibras. La curva se define con un tramo inicial elástico hasta la resistencia a tracción f_t , seguido de un ablandamiento no lineal que representa el efecto de puenteo, fricción y extracción de fibras.

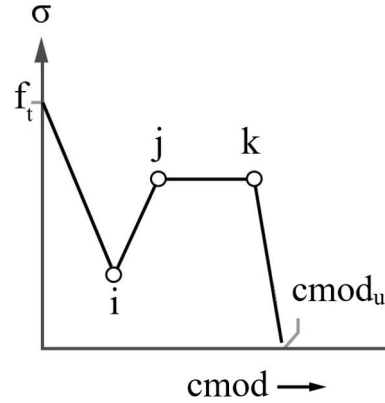


Figura 2. Modelo de fibra basado en la apertura de grietas [16].

Los desplazamientos verticales obtenidos en el ensayo de flexión a tres puntos se transformaron a CMOD aplicando la relación indicada en la UNE-EN 14651:2007+A1 [17]:

$$\delta = 0.85 CMOD + 0.04 \quad (3)$$

donde δ es el desplazamiento vertical (mm) y CMOD la apertura de fisura (mm).

A partir de las curvas carga–CMOD se calcularon las resistencias residuales según la norma citada [17]:

$$f_{R,i} = \frac{3 F_i l}{2 b h_{sp}^2} \quad (4)$$

donde F_i es la carga en el punto $CMOD_i$, l es la luz de la viga, b el ancho y h_{sp} la altura útil encima de la entalla hasta la parte superior de la viga.

Este enfoque se encuentra en concordancia con lo establecido en el FIB Model Code 2010, que identifica la relación fuerza–apertura de fisura (F–CMOD) como la propiedad más representativa del concreto reforzado con fibras y utiliza las resistencias residuales post-fisuración (f_{R1} , f_{R3}) como parámetros clave para modelar la contribución de las fibras en el puenteo de grietas [18]. Estos valores permiten definir los puntos característicos de la curva post-

fisura (i-j-k), que reproducen el comportamiento de ablandamiento del material reforzado con fibras y la disipación de energía posterior a la fisuración.

2.2 Elementos finitos empleados

La viga entallada se modeló computacionalmente mediante un esquema de elementos finitos en estado de tensión plana, bajo condiciones de ensayo de flexión a tres puntos, tal como se muestra en la Figura 3. El modelo incluyó un total de 873 elementos cuadriláteros isoparamétricos, reproduciendo las dimensiones geométricas de la muestra experimental.

Para la discretización se empleó una malla gruesa de 15 mm en la mayor parte del dominio y una malla refinada de 4 mm en la zona próxima a la entalla, con el fin de capturar con mayor precisión la iniciación y propagación de fisuras. La viga se apoyó en dos elementos de acero y recibió carga en su parte superior central.

Tanto el material cementicio como las placas de carga y los apoyos de acero se representaron con elementos cuadriláteros isoparamétricos de 8 nodos (Q8MEM), los cuales poseen 18 grados de libertad. Adicionalmente, se incorporaron elementos de interfaz L8IF en las zonas de contacto material cementicio-acero (apoyos y aplicación de carga), a los que se asignaron una rigidez normal de 10 000 N/mm³ y una rigidez tangencial de 30 N/mm³, en concordancia con lo reportado por Shams et al. [19].

El análisis no lineal (NLFEA) se realizó aplicando la carga en forma de desplazamiento incremental con variaciones de 1 mm. La resolución del sistema de ecuaciones se efectuó mediante el método iterativo de Newton-Raphson, estableciendo una tolerancia de convergencia de 0.001.

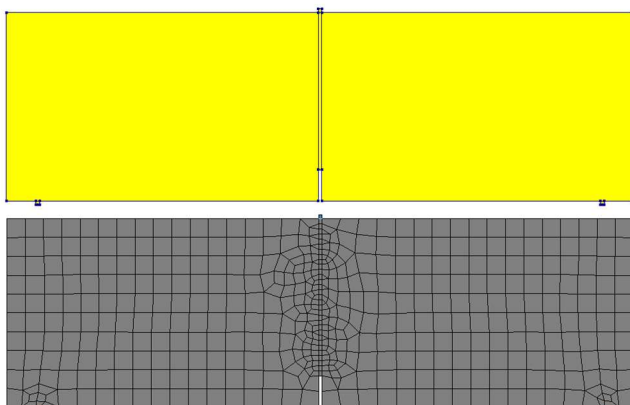


Figura 3. Geometría del modelo FEM y malla con refinamiento en la zona de la muesca.

3 Experimentos

3.1 Materiales y equipos utilizados

- **Cemento.** El Cemento Portland Tipo IP utilizado se obtuvo de la empresa Rumi. Las composiciones químicas y propiedades físicas del Cemento Portland Tipo IP se dan en la Tabla 1.
- **Arena de río.** La arena se extrajo del río Coata, ubicado en la región de Puno, Perú, y se utilizó como agregado fino. La distribución del tamaño de partículas se observa en la Figura 4. De acuerdo con el análisis por fluorescencia de rayos X (Tabla 3), presenta un contenido moderado de dióxido de silicio ($\text{SiO}_2 = 49.3\%$) y una mayor proporción de óxidos de calcio ($\text{CaO} = 3.16\%$), magnesio ($\text{MgO} = 11.39\%$) y hierro ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 8.31\%$) respecto a la arena de sílice. Estos valores reflejan su origen natural con impurezas minerales típicas de arenas fluviales.
- **Arena de sílice.** Adquirida de la empresa Yakua, presentando una granulometría con diámetro máximo de 0.5 mm. La distribución del tamaño de partículas se observa en la Figura 4. En cuanto a su composición química (Tabla 3), su composición química está dominada por un alto contenido de SiO_2 (80.46 %), acompañado de una menor proporción de Na_2O (14.74 %) y trazas de óxidos menores como Fe_2O_3 (0.58 %) y CaO (0.42 %). Esta alta pureza silícea la caracteriza como un agregado químicamente estable y poco reactivo.
- **Superplastificante.** Se usó el aditivo plastificante y reductor de agua para morteros y concretos SikaCem® plastificante, es un líquido marrón oscuro, su base química es una mezcla de lignosulfonatos y polímeros orgánicos.
- **Fibra.** Se usó la microfibra de polipropileno de Z Aditivos. Las propiedades físicas y mecánicas de la fibra se presentan en la tabla 4.
- **Máquina de ensayo de materiales.** Se usó la máquina de ensayo de materiales internacional Forney, con una capacidad de hasta 1100 kN. Los resultados pueden variar en $\pm 0,1$ kN debido al error de la máquina.
- **Trompo mezclador.** Se usó el trompo mezclador Bauker de 120 litros, diseñado especialmente para la fabricación de morteros y concreto, con mezcla de áridos y cemento.
- **Programa DIANA FEA.** Software de análisis de elementos finitos utilizado para modelar y simular el comportamiento a fractura de las vigas. En este estudio se empleó una versión no comercial del programa para la ejecución del modelamiento numérico.
- **Ventosa vibradora.** Es una herramienta inalámbrica que ofrece una sujeción firme y una vibración controlada. Funciona con una batería de litio-ion de 2.0 Ah y 20 V.
- **Dial comparador.** El indicador digital con base magnética cuenta con un recorrido de 25.4 mm y una precisión de 0.01 mm.

Tabla 1: Propiedades físicas y químicas del cemento Rumi IP.

Propiedades	Unidad	Valores
Óxido de magnesio (MgO)	%	Máximo 6.0
Trióxido de azufre (SO ₃)	%	Máximo 4.0
Pérdida de ignición	%	Máximo 5.0
Peso específico	g/cm ³	2.75 a 2.85
Contracción / Expansión en Autoclave	%	-0.20 a 0.80
Tiempo de fraguado inicial Vicat	minutos	45 a 420
Contenido de aire	%	Máximo 12
Resistencia a la compresión		
3 días	Kgf/cm ²	Mínimo 133
7 días	Kgf/cm ²	Mínimo 204
28 días	Kgf/cm ²	Mínimo 255
Resistencia a los sulfatos		
Expansión a 6 meses para alta resistencia a sulfatos	%	Máximo 0.05
Expansión a 12 meses para alta resistencia a sulfatos	%	Máximo 0.10

Datos obtenidos de [20].

Tabla 2: Propiedades de la arena del río Coata y de sílice.

Tamaño del tamiz	Arena de río % Que pasa	Arena de sílice % Que pasa
3/8"	100	100
N° 4	100	100
N° 8	100	100
N° 16	100	99.90
N° 30	99.40	15.10
N° 50	20.74	0.20
N° 100	2.00	0.00
N° 200	0.40	0.00
Módulo de finura	1.78	2.85

Tabla 3: Composición química (% en masa, expresada como óxidos)

Composición (% en masa)	Arena de sílice	Arena de río
SiO ₂	80.460	49.319
Na ₂ O	14.742	7.521
MgO	3.197	11.392
Fe ₂ O ₃	0.584	8.309
SO ₃	0.449	0.267
CaO	0.425	3.157
K ₂ O	0.124	5.689
Al ₂ O ₃	-	7.443
P ₂ O ₅	-	4.998
TiO ₂	-	1.326

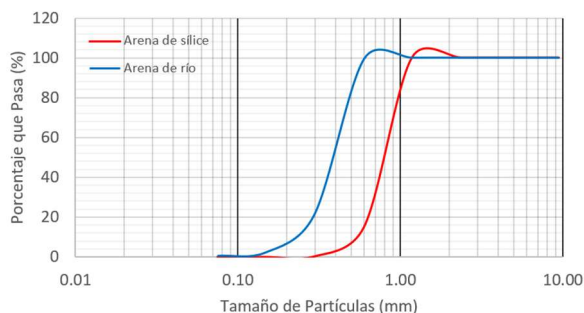


Figura 4. Distribución de tamaño de partículas de arena del río y de sílice.

Tabla 4: Propiedades de la fibra de polipropileno ZPP.

Propiedad	Valor
Material	100% Polipropileno
Diámetro	25 ± 5 µm (diámetro promedio según fabricante)
Resistencia a la tensión	≥ 460 MPa
Elongación	≥ 15% (con respecto a la longitud original)
Humedad	≤ 5% (en estado de suministro)
Densidad	0.91 – 0.93 g/cm ³
Longitud	12 mm
Módulo de elasticidad	≥ 4600 MPa
Resistencia a álcalis	≥ 98% de retención de resistencia
Punto de fusión	160 – 170 °C

Datos obtenidos de [21].

3.2 Mezcla y preparación de la muestra

El acondicionamiento granulométrico se realizó para la arena de río, cuya distribución era variable; se tamizó y ajustó a 0.5 mm, (para equipararla a la arena de sílice de diámetro 0.5 mm). Las mezclas se prepararon en un trompo BAUKER de 120 L. Primero se introdujeron los agregados y el cemento y se efectuó un mezclado en seco durante 2 min. Luego se añadió el agua y se mezcló 2 min adicionales; a continuación, se incorporó el plastificante y se mezcló 1 min. Las fibras de polipropileno se agregaron lentamente, manteniendo la agitación por 3–4 min hasta obtener una mezcla homogénea.

El colado de las probetas se llevó a cabo en dos capas, tanto en vigas prismáticas como en cubos de 50 mm y para los cilindros se llevó a cabo en 3 capas. Para asegurar una adecuada consolidación del material y evitar la formación de vacíos, se utilizó una ventosa vibradora aplicada en las caras de los moldes. Todas las probetas permanecieron en el molde durante 24 horas, para luego ser desmoldadas y sumergidas en una poza de agua a temperatura ambiente. El curado se mantuvo de manera continua hasta la edad de ensayo correspondiente. En el caso de los ensayos de compresión, las probetas fueron evaluadas a las edades de 1, 3, 7, 14, 28 y 90 días, mientras que, para los ensayos de flexión, tracción indirecta y fractura se consideró únicamente la edad de 28 días. Las geometrías utilizadas correspondieron a cubos de 50×50×50 mm para los ensayos de compresión, vigas prismáticas de 150×150×500 mm para los ensayos de flexión, cilindros de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura para tracción indirecta y vigas de 150×150×550 mm con una muesca central de 3 mm de espesor y 25 mm de altura para los ensayos de fractura, todas ellas dimensionadas de acuerdo con las normas técnicas correspondientes.

Para cada diseño de mezcla se elaboraron cinco muestras. Las variaciones de mezcla incluyeron reemplazos progresivos de arena de sílice por arena del río Coata en proporciones de 0, 33, 66 y 100 %. La proporción de mezcla real se muestra en la Tabla 5, donde, por ejemplo, ECC-R33 significa que la arena del río Coata reemplaza la arena de cuarzo a una tasa del 33%. En la Figura 5 se resume el proceso experimental.

Tabla 5: Peso de materiales de mezcla ECC para incorporar arena del río Coata en kg para 1 m³.

Grupo	Arena de cuarzo	Cemento	Arena de río	Plastificante	Fibra de PP	Agua
ECC-R0	700	1170	0	5.3	19	410
ECC-R33	469	1170	231	5.3	19	410
ECC-R66	231	1170	469	5.3	19	410
ECC-R100	0	1170	700	5.3	19	410

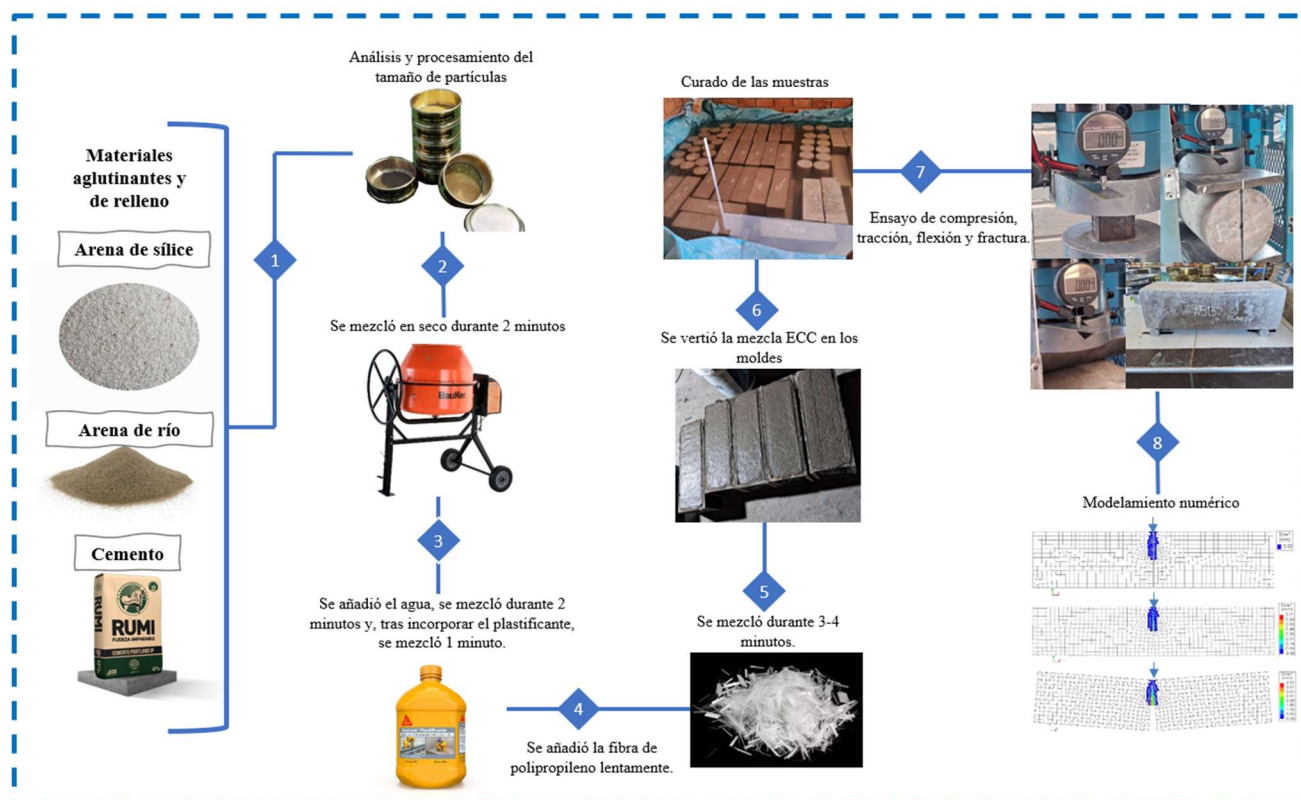


Figura 5. Proceso experimental.

3.3 Prueba de compresión

El ensayo de compresión se realizó conforme a la NTP 334.051 [22] en cubos de 50×50×50 mm. La carga se aplicó de forma continua a 70 kgf/s, con adecuada alineación en prensa. El acortamiento axial se midió con un dial comparador de precisión 0.01 mm, la punta de contacto se apoyó sobre una regla metálica rígida colocada en la cara superior de la prensa para garantizar una superficie plana de medición (Figura 6).

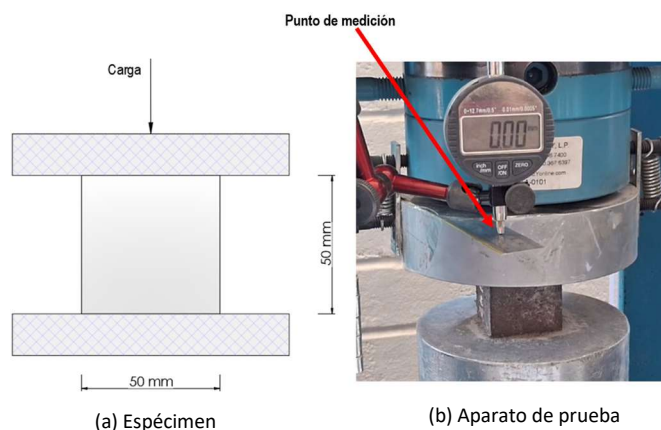


Figura 6. Aparato de ensayo a compresión.

3.4 Prueba de tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta se realizó conforme a la NTP 339.084 [22] en cilindros de 150×300 mm. La carga se aplicó de forma continua a 90 kgf/s hasta la rotura. El desplazamiento se midió con un dial comparador de precisión 0.01 mm, la punta de contacto se apoyó sobre una regla metálica rígida colocada en la cara superior de la prensa para garantizar una superficie plana de medición (Figura 7).

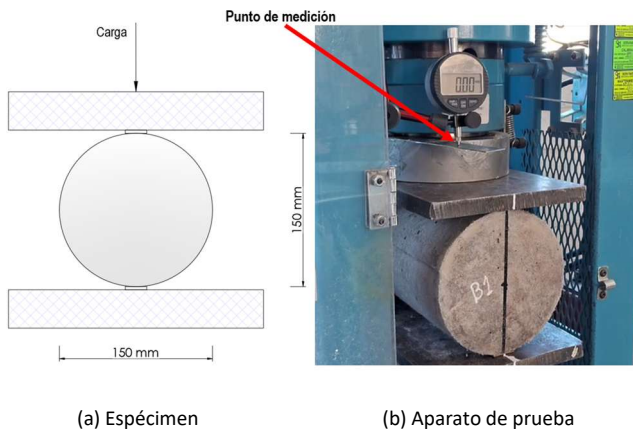
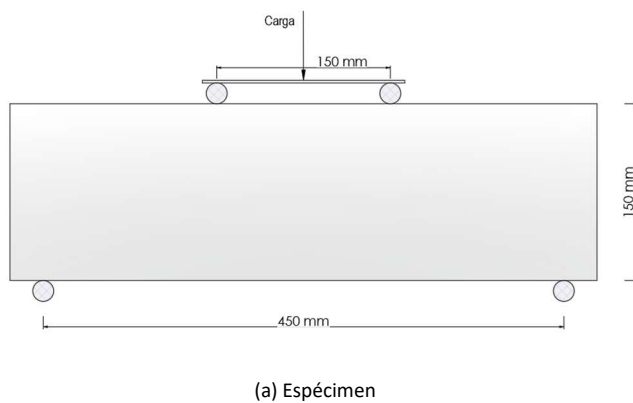


Figura 7. Aparato de ensayo de tracción indirecta.

3.5 Prueba de flexión

El ensayo de flexión se realizó conforme a la NTP 339.078 [22], en prismas de 150×150×500 mm. La carga se aplicó en flexión a cuatro puntos (dos puntos de carga y dos apoyos) a 30 kgf/s hasta la rotura. La deflexión se midió con un dial comparador de 0.01 mm ubicado en la parte superior del centro de la luz, como se muestra en Figura 8.



(a) Espécimen

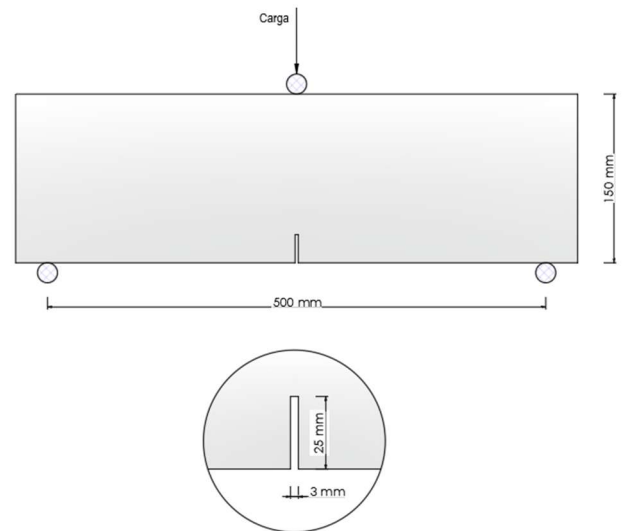


(b) Aparato de prueba

Figura 8. Aparato de ensayo a flexión.

3.6 Prueba de fractura a 3 puntos con muesca central

El ensayo de fractura se realizó conforme a la RILEM TC-162 [23], en prismas de 150×150×550 mm con muesca central de 3 mm de espesor y 25 mm de altura. La prueba fue de flexión a tres puntos (un punto de carga y dos apoyos), aplicando la carga a 30 kgf/s hasta la rotura. La deflexión se midió con un dial comparador de 0.01 mm, la punta de contacto se apoyó sobre una regla metálica rígida colocada en la cara superior de la prensa para garantizar una superficie plana de medición (Figura 9).



(a) Espécimen



(b) Aparato de prueba

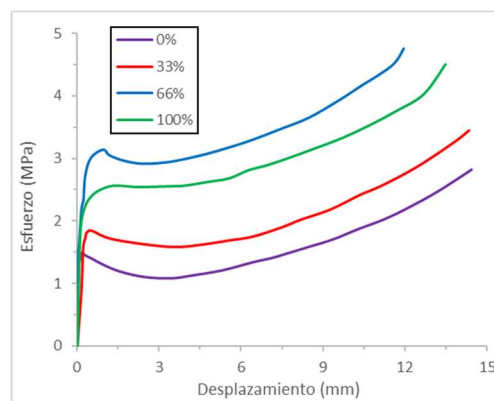
Figura 9. Aparato de ensayo a fractura.

4 Resultados y discusión

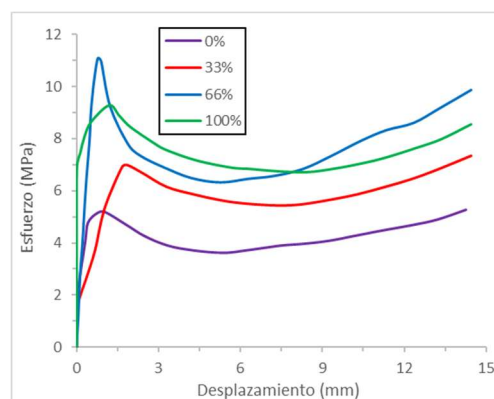
4.1 Curvas esfuerzo-desplazamiento en compresión

Las curvas esfuerzo–desplazamiento de los cubos (50×50×50 mm) evidencian un incremento progresivo de la resistencia en compresión con la edad, pasando del intervalo de 1.5–3.1 MPa en 1 día a 29.6–37.2 MPa en 90 días, según el porcentaje de sustitución de arena (Tabla 6). La mezcla con 66 % de arena de río registra los mayores valores de resistencia a compresión en la mayoría de edades con 30.37 MPa a 28 días y 37.21 MPa a 90 días, seguida por el 100 % de arena de río con 27.35 y 35.79 MPa a los 28 y 90 días respectivamente y con la sustitución del 33 % de arena de río con resistencias de 27.22 y 33.60 MPa respectivamente, mientras que la más baja corresponde a 0 % de arena de río con 25.90 y 29.61 MPa respectivamente.

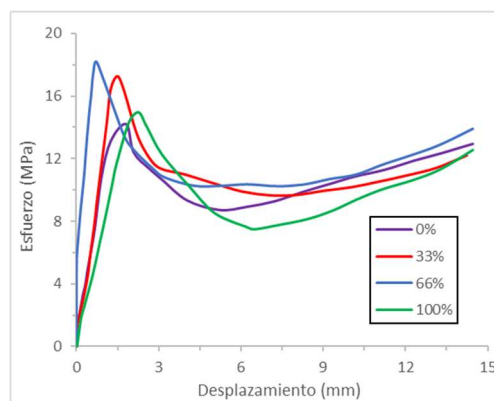
En general, el material presenta un comportamiento no lineal característico: un tramo ascendente progresivo y un post-pico estable que confirma que no se trata de un material frágil. Este desempeño está asociado a la acción de las microfibras de PP, que contribuyen al puenteo y control del daño.



(a) Ensayo al 1er día



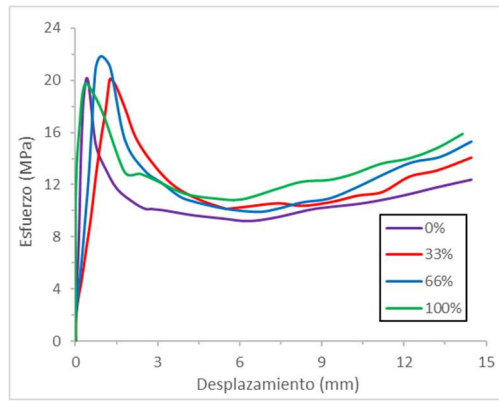
(b) Ensayo al 3er día



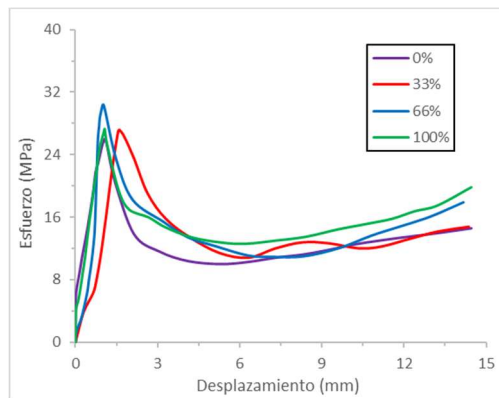
(c) Ensayo al 7mo día

Tabla 6: Valores representativos de las curvas esfuerzo-desplazamiento del ensayo a compresión.

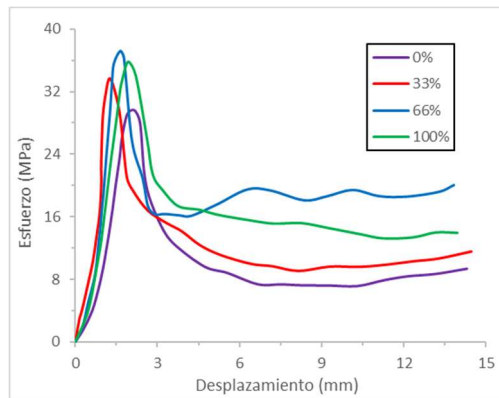
Día de ensayo	0% de sustitución de arena		33% de sustitución de arena		66% de sustitución de arena		100% de sustitución de arena	
	Desplazamiento en el esfuerzo máximo (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Desplazamiento en el esfuerzo máximo (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Desplazamiento en el esfuerzo máximo (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Desplazamiento en el esfuerzo máximo (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)
1	0.17	1.47	0.47	1.84	0.94	3.14	1.30	2.56
3	1.04	5.19	1.85	6.98	0.78	11.08	1.19	9.29
7	1.80	14.22	1.50	17.24	0.71	18.21	2.26	14.98
14	0.45	20.01	1.26	20.10	0.97	21.83	0.35	19.78
28	1.09	25.90	1.60	27.22	1.03	30.37	1.06	27.35
90	2.15	29.61	1.27	33.60	1.64	37.21	1.92	35.79



(d) Ensayo al 14vo día



(e) Ensayo al 28vo día



(f) Ensayo al 90vo día

Figura 10. Curvas esfuerzo–desplazamiento en compresión de cubos ECC con distintos porcentajes de arena de río a diferentes edades.

El análisis de los datos muestra que el reemplazo progresivo de arena de sílice por arena tamizada del río Coata no compromete la resistencia a compresión, manteniendo valores superiores a 27 MPa a 28 días en todas las mezclas. Además, la presencia de microfibras de PP favorece una disipación de energía superior y un comportamiento más estable post-pico, especialmente en las mezclas con mayor contenido de arena local.

Estos resultados son coherentes con lo reportado por Nataraja et al. [24], quienes observaron que la incorporación de fibras de acero incrementa significativamente la desplazamiento pico y la tenacidad, suavizando el tramo descendente de la curva y promoviendo una respuesta más dúctil y controlada en compresión.

4.2 Curvas esfuerzo-desplazamiento en tracción indirecta

Las curvas esfuerzo–desplazamiento del ensayo de tracción indirecta muestran un comportamiento no lineal con dos picos principales de resistencia (Figura 11). El primer pico refleja la capacidad resistente del material en conjunto (matriz cementicia y fibras antes de la formación de fisuras dominantes), mientras que el segundo pico está asociado a la capacidad residual proporcionada por las fibras, que actúan como puentes de transferencia de carga después del agrietamiento.

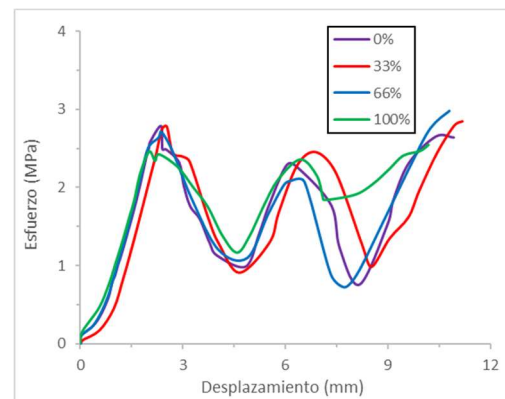


Figura 11. Curvas esfuerzo–desplazamiento en tracción indirecta de cilindros ECC con distintos porcentajes de arena de río.

Según la Tabla 7, el primer pico de resistencia varía entre 2.42 y 2.79 MPa. Con 0 % de arena de río alcanza el valor más alto de 2.79 MPa y 100 % de arena de río el valor más bajo a 2.31 MPa. El segundo pico presenta valores entre 2.08 y 2.46 MPa, siendo la mezcla con 33 % de arena de río la que presenta mayor resistencia. Los desplazamientos máximos asociados muestran una diferencia clara entre ambos picos: aproximadamente entre 2.31 a 2.53 mm en el primer pico y entre 6.04 a 6.89 mm en el segundo.

Tabla 7. Valores clave de las curvas esfuerzo-desplazamiento de ensayo a tracción indirecta a 28 días.

% de sustitución de arena	Desplazamiento en el primer pico (mm)	Resistencia máxima del material (MPa)	Desplazamiento en el segundo pico (mm)	Resistencia máxima asociada a las fibras (MPa)
0%	2.35	2.79	6.04	2.29
33%	2.53	2.78	6.89	2.46
66%	2.37	2.71	6.13	2.08
100%	2.31	2.42	6.44	2.36

El patrón de doble pico observado confirma que el material no se comporta de manera frágil; tras el primer pico, asociado a la resistencia global de la matriz y las fibras antes de la fisuración principal, las fibras continúan absorbiendo carga mediante puenteo, fricción y extracción progresiva, estabilizando la apertura de fisuras y generando un descenso post-pico más controlado. Los resultados obtenidos indican que el segundo pico de resistencia está directamente relacionado con el aporte residual de las fibras, lo que permite mantener la integridad de la sección y alcanzar una mayor disipación de energía y tenacidad del material. Este comportamiento concuerda con investigaciones previas sobre el ensayo brasileño en concreto reforzado con fibras, en las que se describen fases similares de respuesta no lineal y estabilización de la carga tras la fisuración de la matriz (Carmona et al. [25]; Masih et al. [26]).

En conjunto, la sustitución progresiva de arena de sílice por arena del río Coata no compromete el desempeño a tracción indirecta; por el contrario, los resultados sugieren que mezclas con 33–66 % logran un buen equilibrio entre resistencia inicial y aporte de fibras tras el agrietamiento, aportando mayor seguridad estructural y capacidad de disipación de energía.

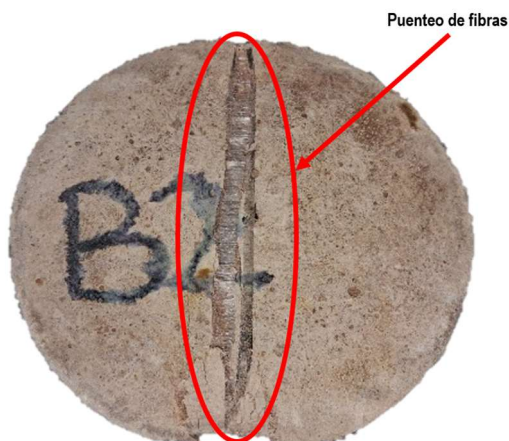


Figura 12. Puenteo de fibras tras la fisuración en ensayo de tracción indirecta.

4.3 Curvas fuerza-deflexión del ensayo de 4 puntos

Las curvas fuerza–deflexión en el punto superior central de la viga del ensayo a flexión a 4 puntos muestran un comportamiento no lineal con dos picos principales (Figura 13). El primer pico refleja la capacidad de la matriz antes de la fisuración dominante, mientras que el segundo pico se asocia principalmente al aporte de las fibras, que continúan transfiriendo carga tras la formación de fisuras.

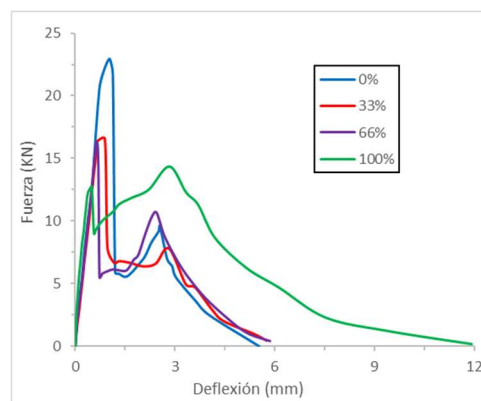


Figura 13. Curvas esfuerzo–deflexión en el ensayo de 4 puntos de vigas ECC con distintos porcentajes de arena de río a 28 días.

Según la Tabla 8, la fuerza máxima inicial oscila de manera global entre 12.77 y 22.99 kN. Con la mezcla de 0 % de arena de río alcanza el valor más alto de 22.99 kN y con mezclas del 33 al 66 % de arena de río muestra valores en torno a 16 kN. La mezcla con 100 % de arena de río presenta una fuerza inicial intermedia de 12.77 kN, mientras que la capacidad en el segundo pico atribuida a las fibras es mayor en la mezcla con 100 % de arena de río con 14.38 kN y con 66 % de arena de río alcanza 10.68 kN, evidenciando que una mayor proporción de arena local no reduce el desempeño de las fibras, sino que favorece una respuesta más dúctil.

Tabla 8. Valores representativos de las curvas esfuerzo–desplazamiento de ensayo a flexión a 28 días.

% de sustitución de arena	Desplazamiento en el primer pico (mm)	Fuerza máxima del material I (kN)	Desplazamiento en el segundo pico (mm)	Fuerza máxima asociada a las fibras (kN)
0%	1.03	22.99	2.55	9.61
33%	0.89	16.57	2.82	7.83
66%	0.67	16.11	2.45	10.68
100%	0.50	12.77	2.83	14.38

Los desplazamientos en el primer pico se mantienen entre 0.50 y 1.03 mm, mientras que en el segundo pico oscilan entre 2.45 y 2.83 mm, lo que confirma que el mecanismo de puenteo y extracción de fibras prolonga la resistencia del material más allá de la capacidad de la matriz. Este comportamiento de doble pico coincide con lo reportado por Lusis et al. [27], quienes observaron en vigas fibroreforzadas de acero y polipropileno que, tras la resistencia inicial de la matriz, las fibras aportan un segundo tramo de carga residual que estabiliza la curva post-pico y mejora significativamente la tenacidad.

En conjunto, los resultados demuestran que todas las mezclas presentan un descenso post-pico estable y un incremento notable de la tenacidad, destacando la eficacia de las fibras de polipropileno para controlar la propagación de fisuras y disipar energía, incluso con altos porcentajes de arena de río.



Figura 14. Puenteo de fibras tras la fisuración en ensayo de flexión.

4.4 Curvas fuerza-desplazamiento en el ensayo de 3 puntos con muesca central

Las curvas fuerza–desplazamiento obtenidas en el ensayo de fractura a tres puntos (Figura 15) muestran un comportamiento no lineal caracterizado por dos picos principales. El primer pico corresponde a la capacidad resistente del material en conjunto (matriz y fibras antes de la formación de fisuras dominantes), mientras que el segundo pico refleja la contribución residual de las fibras, que actúan como puentes tras la fisuración de la matriz.

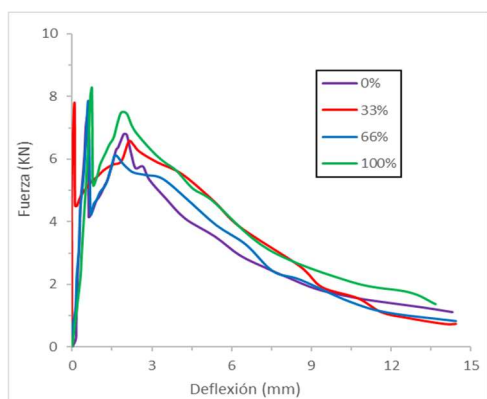


Figura 15. Curvas esfuerzo–desplazamiento en el ensayo de 3 puntos con muesca de vigas ECC con distintos porcentajes de arena de río a 28 días.

De acuerdo con la Tabla 9, la fuerza máxima inicial se encuentra en un rango de 7.44 a 8.26 kN, siendo la mezcla con 100 % de arena de río la que alcanza el mayor valor (8.26 kN). Por su parte, las mezclas con 0–66 % presentan valores similares (7.44–7.81 kN), lo que evidencia que el reemplazo progresivo de arena de sílice por arena local no reduce la capacidad resistente del material. En cuanto al segundo pico, se observa una resistencia asociada a las fibras de entre 6.13

y 7.48 kN, destacando nuevamente la mezcla con 100 % de arena de río como la de mejor desempeño residual.

Tabla 9. Valores representativos de las curvas esfuerzo–desplazamiento de ensayo a fractura a 28 días.

% de sustitución de arena	Desplazamiento en el primer pico (mm)	Fuerza máxima del material (kN)	Desplazamiento en el segundo pico (mm)	Fuerza máxima asociada a las fibras (kN)
0%	0.60	7.44	1.94	6.80
33%	0.10	7.81	2.14	6.57
66%	0.62	7.80	1.63	6.13
100%	0.74	8.26	1.84	7.48

Nota: El desplazamiento corresponde a la deflexión en el punto medio (mid-span), medida mediante un dial comparador ubicado en la parte superior central de la viga durante el ensayo.

Los desplazamientos registrados confirman: el primer pico se presenta en el rango de 0.60–0.74 mm, mientras que el segundo ocurre entre 1.63 y 2.14 mm, mostrando que la acción de las fibras prolonga la capacidad portante y proporciona un descenso post-pico más estable y controlado. Este comportamiento confirma la eficacia de las fibras de polipropileno en el puenteo de fisuras y la disipación de energía, aportando ductilidad y mayor tenacidad incluso en mezclas con alto contenido de arena del río Coata.

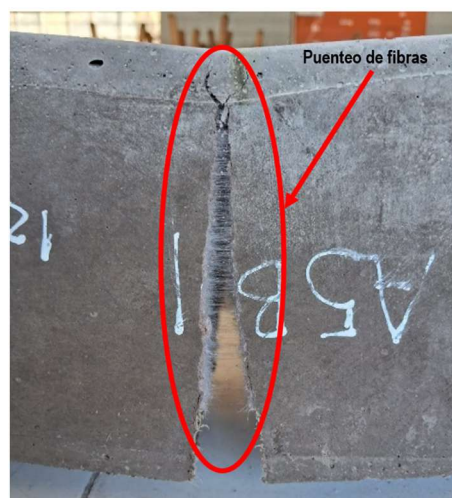


Figura 16. Puenteo de fibras tras la fisuración en ensayo de fractura.

4.5 Análisis estadístico

Para determinar si las variaciones observadas entre los diferentes porcentajes de reemplazo de arena de sílice por arena de río generan diferencias estadísticamente significativas en el comportamiento mecánico del ECC, se realizó un análisis estadístico basado en ANOVA de un factor para los valores máximos de compresión, tracción indirecta, flexión y fractura. Previamente al ANOVA, se verificaron los supuestos básicos del modelo: normalidad de los datos y homogeneidad de varianzas (Tabla 10).

Tabla 10. Supuestos estadísticos

	Grupo	Normalidad	Homogeneidad
Compresión	ECC-R0	0.959	0.763
	ECC-R33	0.876	
	ECC-R66	0.865	
	ECC-R100	0.969	
Tracción	ECC-R0	0.634	0.965
	ECC-R33	0.291	
	ECC-R66	0.125	
	ECC-R100	0.626	
Flexión	ECC-R0	0.186	0.529
	ECC-R33	0.124	
	ECC-R66	0.137	
	ECC-R100	0.095	
Fractura	ECC-R0	0.454	0.626
	ECC-R33	0.160	
	ECC-R66	0.150	
	ECC-R100	0.929	

En primer lugar, la normalidad de los valores individuales de cada ensayo fue evaluada mediante la prueba de Shapiro–Wilk, la cual no mostró evidencias suficientes para rechazar la hipótesis nula de normalidad en ninguno de los cuatro conjuntos de datos ($p > 0.05$). De igual modo, la homogeneidad de varianzas entre los grupos de reemplazo (0 %, 33 %, 66 % y 100 %) fue comprobada mediante la prueba de Levene, obteniéndose valores p superiores a 0.05; esto indica que las varianzas entre grupos pueden considerarse equivalentes, validando el uso del ANOVA.

Cumplidos los supuestos estadísticos, se aplicó el ANOVA de un factor, cuyos resultados se presentan en las Tablas 11 y 12. Los resultados indican que las diferencias entre grupos no son estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95 % ($p > 0.05$) para los cuatro tipos de ensayos.

Tabla 11. Estadísticos descriptivos del ECC con reemplazo de arena

		N	Min	Max	Media	D.E.
Compresión	ECC-R0	5	20.006	27.743	23.967	2.980
	ECC-R33	5	21.800	30.244	26.615	3.256
	ECC-R66	5	24.340	31.568	28.202	2.857
	ECC-R100	5	24.379	28.959	26.482	1.772
Tracción	ECC-R0	5	2.331	2.791	2.543	0.196
	ECC-R33	5	2.491	3.062	2.864	0.235
	ECC-R66	5	2.682	3.203	2.930	0.255
	ECC-R100	5	2.459	3.194	2.873	0.266
Flexión	ECC-R0	5	13.765	25.662	21.299	4.476
	ECC-R33	5	15.239	17.340	16.634	0.819
	ECC-R66	5	15.203	29.033	19.649	5.546
	ECC-R100	5	12.765	22.922	19.652	4.011
Fractura	ECC-R0	5	2.385	7.440	4.624	1.812
	ECC-R33	5	3.221	7.807	6.073	1.703
	ECC-R66	5	3.200	8.821	6.435	2.605
	ECC-R100	5	6.221	9.495	8.018	1.224

Tabla 12. Análisis de varianza (ANOVA) de un factor

		Sum_sq	df	F	PR(>)
Compresión	Entre grupos	45.948	3.0	1.990	0.156
	Dentro de grupos	123.141	16.0		
	Total	169.089	19		
Tracción	Entre grupos	0.463	3.0	2.684	0.082
	Dentro de grupos	0.919	16.0		
	Total	1.382	19		
Flexión	Entre grupos	56.751	3.0	1.120	0.370
	Dentro de grupos	270.211	16.0		
	Total	326.962	19		
Fractura	Entre grupos	29.142	3.0	2.685	0.082
	Dentro de grupos	57.882	16.0		
	Total	87.024	19		

Los valores de sum_sq (suma de cuadrados) expresan la magnitud de la variabilidad total, descomponiéndose en la variación explicada por el factor y la no explicada (error experimental). Los grados de libertad (df) indican el número de datos independientes utilizados en el cálculo de cada componente. El estadístico F compara la variación entre grupos con respecto a la variación dentro de los grupos, permitiendo evaluar si existen diferencias significativas entre las medias. Finalmente, el valor de PR(>F) o *p-value* cuantifica la probabilidad de que dichas diferencias ocurran por azar; cuando este valor es mayor a 0.05, como en este caso (0.37), se interpreta que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos analizados.

Finalmente, dado que el ANOVA no encontró diferencias globales, se aplicó una prueba post-hoc de Tukey HSD (Tabla 13) para explorar comparaciones pareadas entre los niveles de reemplazo. La prueba confirmó que ninguno de los pares de comparación (0–33 %, 0–66 %, 0–100 %, etc.) presenta diferencias estadísticamente significativas, validando el resultado global del ANOVA. Esto sugiere que, pese a la dispersión natural de los datos —propia de materiales reforzados con fibras y consistente con la literatura técnica— la sustitución de arena de sílice por arena de río no modifica significativamente la respuesta mecánica del ECC.

Estos resultados sugieren que, aunque se observan variaciones en los valores medios de resistencia, no existe evidencia estadística suficiente para afirmar que el reemplazo de arena de sílice por arena de río genera diferencias significativas en la respuesta mecánica del ECC.

Tabla 13. Prueba de Tukey

	Grupo 1	Grupo 2	Diferencia de medias	p-adj	Decisión
Compresión	ECC-R0	ECC-R100	2.5144	0.4981	Semejantes
	ECC-R0	ECC-R33	2.6478	0.4552	Semejantes
	ECC-R0	ECC-R66	4.2345	0.1145	Semejantes
	ECC-R100	ECC-R33	0.1334	0.9998	Semejantes
	ECC-R100	ECC-R66	1.7201	0.7624	Semejantes
	ECC-R33	ECC-R66	1.5867	0.8028	Semejantes
Tracción	ECC-R0	ECC-R100	0.3302	0.1716	Semejantes
	ECC-R0	ECC-R33	0.3210	0.1895	Semejantes
	ECC-R0	ECC-R66	0.3876	0.0885	Semejantes
	ECC-R100	ECC-R33	-0.0092	0.9999	Semejantes
	ECC-R100	ECC-R66	0.0574	0.9809	Semejantes
	ECC-R33	ECC-R66	0.0665	0.9708	Semejantes
Flexión	ECC-R0	ECC-R100	-1.6477	0.9195	Semejantes
	ECC-R0	ECC-R33	-4.6654	0.3114	Semejantes
	ECC-R0	ECC-R66	-1.6507	0.9191	Semejantes
	ECC-R100	ECC-R33	-3.0177	0.6587	Semejantes
	ECC-R100	ECC-R66	-0.0029	1.0000	Semejantes
	ECC-R33	ECC-R66	3.0148	0.6594	Semejantes
Fractura	ECC-R0	ECC-R100	3.3937	0.0540	Semejantes
	ECC-R0	ECC-R33	1.4490	0.6329	Semejantes
	ECC-R0	ECC-R66	1.8107	0.4574	Semejantes
	ECC-R100	ECC-R33	-1.9447	0.3976	Semejantes
	ECC-R100	ECC-R66	-1.5830	0.5665	Semejantes
	ECC-R33	ECC-R66	0.3617	0.9902	Semejantes

4.6 Análisis comparativo de costos

Con el objetivo de evaluar la viabilidad económica del uso de materiales locales, se realizó un análisis comparativo de los costos de las tres mezclas principales de ECC: una mezcla de referencia con fibras de PVA y arena de sílice (ECC-PVA), una mezcla modificada con fibras de polipropileno y arena de sílice (ECC-R0) y una mezcla elaborada completamente con arena de río local (ECC-R100).

La Tabla 14 presenta la proporción en peso de los componentes y el costo estimado por metro cúbico para cada mezcla. Se observa que la mezcla ECC-PVA tiene el costo más elevado, alcanzando aproximadamente 5945.57 PEN/m³, debido principalmente al alto precio de las fibras de PVA y la arena de sílice importada. En contraste, la mezcla ECC-R0, en la que se sustituyeron las fibras de PVA por fibras de polipropileno, reduce el costo a 4416.02 PEN/m³, representando un ahorro cercano al 25 % respecto a la mezcla base.

La mezcla ECC-R100, elaborada íntegramente con arena de río como reemplazo total de la arena de sílice, presenta el costo más bajo con 1583.14 PEN/m³, lo que equivale a una reducción superior al 70 % respecto a la mezcla original. Esta disminución significativa se atribuye al uso de materiales locales de bajo costo especialmente la arena de río y las fibras de polipropileno, sin requerir adiciones minerales como la ceniza volante.

En comparación, un concreto convencional estructural con resistencia promedio de 21–28 MPa tiene un costo estimado de entre 330 y 480 PEN/m³, dependiendo del tipo de cemento y aditivos empleados. Si bien el ECC-R100 sigue siendo más costoso que un concreto tradicional, ofrece ventajas mecánicas notables, como mayor ductilidad, control de fisuras y capacidad de disipación de energía, que justifican su aplicación en elementos de alta durabilidad o zonas sísmicas.

Tabla 14. Composición y análisis de costos estimados por metro cúbico de las mezclas ECC

Componentes	ECC-PVA		ECC-R0		ECC-R100	
	Proporción en peso (kg/m ³)	Costo (PEN/m ³)	Proporción en peso (kg/m ³)	Costo (PEN/m ³)	Proporción en peso (kg/m ³)	Costo (PEN/m ³)
Cemento	585	390	1170	780	1170	780
Arena de sílice	700	2870	700	2870	-	-
Arena de río	-	-	-	-	700	37.12
Ceniza volante	585	1170	-	-	-	-
Agua	410	1.64	410	1.64	410	1.64
Plastificante	5.3	63.6	5.3	63.6	5.3	63.6
fibra de pva	19	1450.33	-	-	-	-
fibra de pp	-	-	19	700.78	19	700.78
Costo total		5945.57		4416.02		1583.14

4.7 Simulación numérica

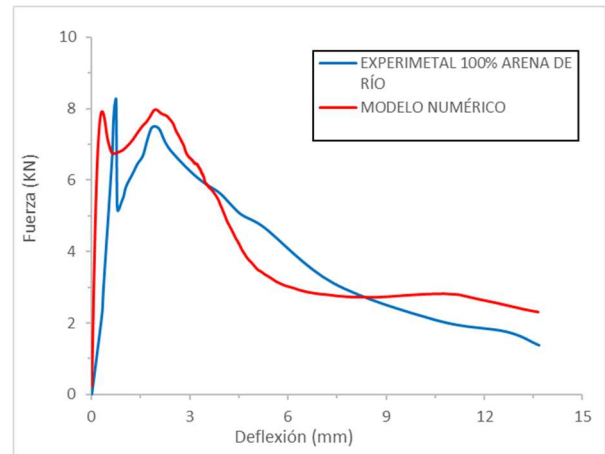
La simulación numérica se realizó al ensayo experimental de 3 puntos con muesca central, con 100 % de reemplazo de arena de río, tomando como base los parámetros experimentales obtenidos en los ensayos previos de tracción indirecta y compresión. Del ensayo brasileño se obtuvo una resistencia media de 2.42 MPa, valor que se ajustó a 2.7 MPa para el inicio de fisuración en el modelo numérico. Por otro lado, de los ensayos a compresión se consideró la resistencia a los 28 días de 27.35 MPa, adoptada directamente como resistencia máxima en el modelo de Thorenfeldt. A partir de este valor se calcularon los parámetros de forma n y k , que controlan la curvatura de la rama ascendente y el ablandamiento post-pico, respectivamente como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Parámetros del modelo a tracción y compresión

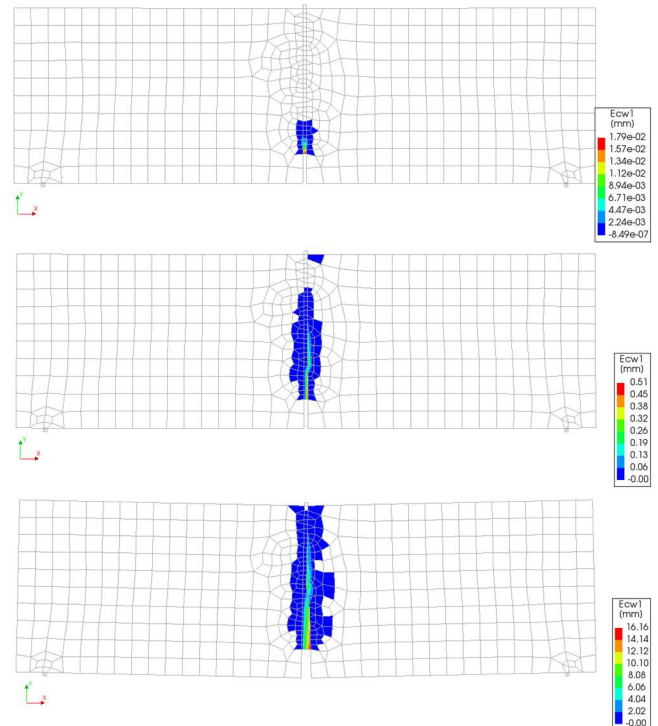
Modelo	Propiedad	Valor
Reforzado con fibra, a base de apertura de grieta	Fuerza al inicio de la grieta FL	2.7 N/mm ²
	Fuerza FRi y apertura de grieta a FRi	1.6 N/mm ² ; 0.55 mm
	Fuerza FRj y apertura de grieta a FRj	2.2 N/mm ² ; 3.5 mm
	Fuerza FRk y apertura de grieta a FRk	0.176 N/mm ² ; 5.5 mm
	Apertura de grieta definitiva	14 mm
	Especificación del ancho de banda de grieta	Govindjee
	Factor de esfuerzo del modelo FRC	0.54
Thorenfeld	Resistencia a la compresión	27.35 N/mm ²
	Parámetro n	2.41
	Parámetro k	1
	Parámetro de escala de longitud	15 mm
	Resistencia a la compresión residual	0 N/mm ²

En el caso del modelo de tracción por fibras, los datos experimentales de fuerza–deflexión obtenidos en el ensayo de flexión a tres puntos fueron procesados siguiendo la norma UNE-EN 14651:2007+A1 [17], que permite transformarlos en curvas fuerza–CMOD. A partir de estas curvas se determinaron las resistencias residuales en puntos clave (0.55 mm – 1.63 MPa, 3.5 mm – 2.00 MPa, 5.5 mm – 1.59 MPa), que sirvieron como referencia inicial para el modelo. Sin embargo, en la simulación fue necesario realizar ajustes para lograr una mejor representación de la respuesta global. En particular, el punto FRj se aproximó a 2.2 MPa con apertura de 3.5 mm, y el punto FRk se redujo a 0.176 MPa a 5.5 mm, lo que permitió suavizar la cola de la curva y reflejar de manera más realista la disipación de energía. La Tabla 12 resume los parámetros definitivos empleados para los modelos de tracción y compresión.

La Figura 17 compara las curvas numéricas y experimentales de carga–deflexión. Se observa que el modelo reproduce con buena aproximación la resistencia máxima (≈ 8 kN) y el inicio de la fisuración, aunque presenta una pendiente inicial ligeramente mayor que la experimental. En el post-pico, la curva numérica muestra una cola más sostenida, producto del ajuste en el punto FRk, mientras que la curva experimental exhibe un descenso más pronunciado. Esta diferencia se atribuye a la sensibilidad del modelo frente a la definición de los parámetros de ablandamiento en tracción, pero al mismo tiempo refleja la capacidad de las fibras de mantener cargas residuales aún después de grandes deformaciones.

**Figura 17.** Curva fuerza-deflexión del ensayo experimental y numérico.

El patrón de agrietamiento observado durante el ensayo de fractura a 3 puntos se presenta a través del campo de apertura de grietas en los elementos que se muestran en la Figura 18. Los resultados, que muestran la propagación de la grieta en la muesca, concuerdan con el comportamiento observado en ensayos experimentales.

**Figura 18.** Distribución de la abertura de grietas en la viga cerca de la muesca según el análisis FEM.

En conjunto, la comparación evidencia que el modelo numérico es capaz de capturar las principales características de la respuesta experimental: el nivel de carga máxima, el inicio de la fisuración y la resistencia residual aportada por las fibras. Si bien persisten discrepancias en la rama

descendente, el ajuste de los parámetros CMOD permitió aproximar adecuadamente el comportamiento global del material bajo flexión a tres puntos.

4.7.1 Energía de fractura

Para el cálculo de la energía de fractura (G_f) se empleó la formulación propuesta por Elfgren y Shah (1986) [28], expresada en la ecuación (5):

$$G_f = \frac{(W_0 + mg\delta_0)}{(d - a)b} \quad (5)$$

donde W_0 es el trabajo total realizado para fracturar el material (área bajo la curva carga–desplazamiento), m es la masa de la viga, g la aceleración de la gravedad, δ_0 el desplazamiento vertical en el punto de aplicación de la carga, d el peralte de la viga, a la altura de la muesca y b el ancho de la sección.

Los resultados obtenidos muestran que el área bajo la curva experimental fue de 51 905.01 N·mm, mientras que el área bajo la curva numérica alcanzó 55 669.04 N·mm. Estos valores se traducen en una energía de fractura (G_f) de 2.92 N/mm para el caso experimental y de 3.12 N/mm para el modelo numérico.

En términos comparativos, la diferencia relativa entre ambas estimaciones es cercana al 7 %, lo que indica una buena correspondencia entre la simulación numérica y los resultados de laboratorio, validando la capacidad del modelo adoptado para reproducir el comportamiento de fractura del material cementicio reforzado con fibras en el ensayo a flexión a tres puntos con muesca.

4.8 Limitaciones del estudio

Si bien los resultados obtenidos muestran una buena respuesta mecánica, el estudio presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados. En primer lugar, no se realizaron ensayos microscópicos (SEM, EDS o micro-CT) que permitan analizar con mayor profundidad la interfase fibra–matriz y los mecanismos de puenteo que gobiernan la transferencia de esfuerzos en materiales cementicios reforzados con fibras. Asimismo, la evaluación experimental se restringió a la edad de 28 días, sin considerar el efecto del envejecimiento ni el desempeño del material bajo condiciones ambientales extremas características de zonas altoandinas, como ciclos de congelamiento–deshielo, radiación UV o variaciones térmicas pronunciadas.

Por otro lado, aunque el material mostró un comportamiento más dúctil que un material cementicio convencional dentro de los rangos de un ECC convencional, el estudio se limita a

abordar el problema en la escala de laboratorio, es decir fisuras del orden milímetro –centímetro. Este aspecto limita la comparación directa con un ECC optimizado micromecánicamente.

Asimismo, el análisis numérico se efectuó con una versión no comercializada del software DIANA FEA, aspecto que debe considerarse dentro del alcance del análisis computacional.

Estas limitaciones delimitan el alcance del estudio y abren oportunidades claras para futuras investigaciones orientadas a la optimización micromecánica, la caracterización multiescala y la evaluación del desempeño en condiciones ambientales reales.

5 Conclusiones

El análisis del ECC elaborado con diferentes proporciones de arena del río Coata demuestra que es posible desarrollar un material cementicio de alta ductilidad utilizando materiales locales y de bajo costo. Todas las mezclas presentan resistencias a compresión superiores a 27 MPa, doble pico en flexión y una respuesta post-fisura estable debido al puenteo de las fibras de polipropileno. Los resultados confirman que este ECC mantiene un comportamiento dúctil incluso sin emplear arena de sílice ni ceniza volante, evidenciando su potencial para aplicaciones estructurales y de rehabilitación en zonas andinas.

El análisis ANOVA mostró valores de $p > 0.05$ en compresión, tracción indirecta, flexión y fractura, indicando que las variaciones en el porcentaje de reemplazo de arena del río Coata no generan diferencias significativas en el desempeño mecánico del ECC. Las curvas carga–deflexión mantienen una tendencia similar y presentan el mismo mecanismo de doble pico en todas las mezclas. Por ello, no se identifica una proporción “óptima” desde el punto de vista mecánico; sin embargo, las proporciones mayores de arena local resultan más económicas sin afectar la resistencia ni la ductilidad del material.

Los ensayos experimentales registraron resistencias a compresión entre 27–33 MPa, esfuerzos de tracción indirecta entre 2.3–2.8 MPa y cargas últimas de flexión superiores a 20 MPa en diversas muestras. Las curvas de fractura evidenciaron una energía de fractura creciente y un descenso post-pico progresivo, confirmando la contribución del puenteo de fibras PP. El doble pico recurrente y la recuperación parcial de carga en el rango post-fisura verifican que el ECC con arena del río Coata presenta una respuesta significativamente más dúctil que un material cementicio convencional.

El modelamiento realizado en DIANA FEA, utilizando la ley constitutiva de Thorenfeldt para compresión y el modelo CMOD para fractura, reproduce adecuadamente la tendencia experimental. Las curvas numéricas coinciden con las experimentales en carga máxima, inicio de fisuración y pendiente post-pico. Además, el modelo captura la pérdida progresiva de rigidez y el comportamiento pseudo-dúctil observado en laboratorio. Esto valida el uso del análisis numérico como herramienta adecuada para representar la respuesta del ECC con arena del río Coata.

El reemplazo de arena de sílice por arena del río Coata reduce el costo del material en más del 70 %, manteniendo un desempeño mecánico equivalente entre las distintas proporciones evaluadas. Esta relación costo-beneficio demuestra que el uso de arena local constituye una alternativa económicamente competitiva frente a los ECC tradicionales y frente a materiales cementicios convencionales. La combinación de bajo costo, adecuada resistencia y comportamiento dúctil confirma la viabilidad del ECC con arena del río Coata para aplicaciones en infraestructura de zonas altoandinas.

El estudio presenta limitaciones importantes en cuanto a la escala de análisis, ya que no se realizó una evaluación micromecánica del comportamiento a fractura, lo que abre un campo de investigación para futuros trabajos orientados a estudiar la fisuración en escalas inferiores. Asimismo, sería relevante considerar el efecto del envejecimiento del material y el daño por variaciones térmicas propias de zonas altoandinas. Adicionalmente, el modelamiento numérico se desarrolló empleando una versión no comercial del software DIANA FEA, lo cual constituye otra consideración metodológica respecto al alcance del análisis computacional realizado.

6 Referencias

1. Zhu Z, Tan G, Zhang W, Wu C. Preliminary Analysis of the Ductility and Crack-Control Ability of Engineered Cementitious Composite with Superfine Sand and Polypropylene Fiber (SSPP-ECC). *Materials*. 8 de junio de 2020;13(11):2609.
2. Guan X, Li Y, Liu T, Zhang C, Li H, Ou J. An economical ultra-high ductile engineered cementitious composite with large amount of coarse river sand. *Constr Build Mater*. marzo de 2019;201:461-72.
3. Li Y, Li J, Yang EH, Guan X. Mechanism study of crack propagation in river sand Engineered Cementitious Composites (ECC). *Cem Concr Compos*. 1 de abril de 2022;128:104434.
4. Lin C, Huang D, Liu Z, Lu Y. Mechanical properties, micro-mechanisms, and constitutive models of seawater sea-sand engineered cementitious composites. *J Build Eng*. octubre de 2024;94:109987.
5. Niu Y, Han F, Liu Q, Yang X. Effect of Desert Sand on the Section Bonding Properties of Polyethylene Fiber-Engineered Cementitious Composites. *Appl Sci*. 15 de mayo de 2023;13(10):6078.
6. Raza A, Junjie Z, Shiwen X, Umar M, Chengfang Y. Experimental analysis of frost resistance and failure models in engineered cementitious composites with the integration of Yellow River sand. *Sci Eng Compos Mater*. 18 de junio de 2024;31(1):20240017.
7. Kang J, Bolander JE. Multiscale modeling of strain-hardening cementitious composites. *Mech Res Commun*. diciembre de 2016;78:47-54.
8. Zhang H, Huang YJ, Yang ZJ, Xu SL, Chen XW. A discrete-continuum coupled finite element modelling approach for fibre reinforced concrete. *Cem Concr Res*. abril de 2018;106:130-43.
9. Özcan DM, Bayraktar A, Şahin A, Haktanir T, Türker T. Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior. *Constr Build Mater*. febrero de 2009;23(2):1064-77.
10. Wu Q, You J, Wang H, Wan D, Hou Z, Li Y, et al. Flexural behavior of over-reinforced beam with ECC layer: Experimental and numerical simulation study. *Heliyon*. octubre de 2024;10(19):e38271.
11. Zhu M, Zhang J, Chen B, Wu M, Han J. Numerical simulation of cost-effective green high-ductility engineered cementitious composites based on meso-scale particle flow model. *Constr Build Mater*. noviembre de 2022;356:128973.
12. Kuraray. PVA fiber. Disponible en: <https://www.kuraray.com/global-en/products/pva-fiber/>
13. Li VC. Tailoring ECC for Special Attributes: A Review. *Int J Concr Struct Mater*. 1 de septiembre de 2012;6(3):135-44.
14. Michael Lepech, Li V. Large-Scale Processing of Engineered Cementitious Composites. *ACI Mater J* [Internet]. 2008;105(4). Disponible en: <http://www.concrete.org/Publications/ACIMaterialsJournal/ACIJJournalSearch.aspx?m=details&ID=19897>
15. Thorenfeldt E. Mechanical properties of high-strength concrete and applications in design. En 1987.

- Disponible en:
https://www.semanticscholar.org/paper/Mechanical-properties-of-high-strength-concrete-and-Thorenfeldt/bb9eb71c6faf74580980be3c299cf5b20edd_a693
16. Modelos de grietas por deformación total. Disponible en: https://manuals.dianafea.com/d1010/en/1353862-1354227-total-strain-crack-models.html#UUID-07ba2a8e-d5b4-1f1a-3cfe-735d87b57352_x1-122300048_5_12
 17. UNE-EN 14651:2007+A1:2008 Método de ensayo para hormigón con f.... Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0041225>
 18. di Prisco M, Colombo M, Dozio D. Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: principles, models and test validation. *Struct Concr.* 2013;14(4):342-61.
 19. Shams MA, Bheel N, Ali M, Ahmad M, Najeh T, Gamil Y, et al. Fracture analysis of steel fibre-reinforced concrete using Finite element method modeling. *Front Mater.* 14 de febrero de 2024;11:1355351.
 20. Constructivo R. YURA S.A. - Cemento Puzolánico RUMI IP. Disponible en: <https://constructivo.com/novedad/yura-sa-cemento-puzolanico-rumi-ip-1660310492>
 21. Z Aditivos. FIBRA ZPP. Disponible en: <https://www.zaditivos.com.pe/aditivos-para-concreto/fibra-zpp>
 22. System aurix P. INACAL. Normas Técnicas Peruanas - INACAL. Disponible en: <http://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
 23. TC 162-TDF R. RILEM TC 162-TDF : ‘ Test and design methods for steel fibre reinforced concrete ’- design method Final. En 2003. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/RILEM-TC-162-TDF-%3A-%E2%80%98Test-and-design-methods-for-162-TDF/373f27b1c51aaa2f9cb4b6e0aecb7ca448522ae3>
 24. Nataraja MC, Dhang N, Gupta AP. Stress–strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cem Concr Compos.* diciembre de 1999;21(5-6):383-90.
 25. Carmona S. STUDY OF THE POST-PEAK BEHAVIOR OF CONCRETE IN THE SPLITTING-TENSION TEST.
 26. Masih VW, Ruiz G, Yu RC. IMPROVEMENTS IN THE BRAZILIAN TEST: A NOVEL APPROACH AND COMPREHENSIVE ANALYSIS WITH DIC AND STRAIN GAUGES.
 27. Lusis V, Annamaneni KK, Kononova O, Korjamins A, Lasenko I, Karunamoorthy RK, et al. Experimental Study and Modelling on the Structural Response of Fiber Reinforced Concrete Beams. *Appl Sci.* enero de 2022;12(19):9492.
 28. Elfgren L. Análisis de estructuras de hormigón mediante la mecánica de fractura: Actas de un taller de RILEM dedicado al profesor Arne Hillerborg, Abisko, Suecia, 1989.

ANEXOS

abel.malaga

De: em.secm.0.98ddee.4663816b@editorialmanager.com en nombre de Science and Engineering of Composite Materials <em@editorialmanager.com>
Enviado el: domingo, 18 de enero de 2026 12:57
Para: abel.malaga
Asunto: Submission Confirmation for Experimental and numerical study on the mechanical behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC) produced with local materials from the Puno region in Peru

Dear Mr. Malaga Curo,

Your submission entitled "Experimental and numerical study on the mechanical behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC) produced with local materials from the Puno region in Peru" has been received by journal Science and Engineering of Composite Materials

You will be able to check on the progress of your paper by logging on to Editorial Manager as an author. The URL is <https://www.editorialmanager.com/secm/>.

Your manuscript will be given a reference number once an Editor has been assigned.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Science and Engineering of Composite Materials

In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time.

[\(Remove my information/details\)](#). Please contact the publication office if you have any questions.



“AÑO DE LA RECUPERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA ECONOMÍA PERUANA”

RESOLUCIÓN N° 0049-2025/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Ñaña 18 de febrero de 2025

VISTO:

El expediente de **Abel Fernando Malaga Curo**, identificado(a) con Código Universitario N° 201920045, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Abel Fernando Malaga Curo**, ha solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Evaluación experimental y numérica del comportamiento mecánico del mortero flexible elaborado con materiales de la región de Puno sometidos a compresión, tracción, flexión y fractura" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 18 de febrero de 2025, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "**Evaluación experimental y numérica del comportamiento mecánico del mortero flexible elaborado con materiales de la región de Puno sometidos a compresión, tracción, flexión y fractura**" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar como asesor el **Mg. Herson Duberly Pari Cusi** para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por el: **Mg. Edwin Parillo Escarsena** y el **Mg. Arnaldo Cahui Galarza** otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Ph.D. Silvia Pilco Quesada
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:
-Interesado
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo