

Caracterización de un concreto geopolimérico fibrorreforzado para su aplicación en elementos constructivos

Characterization of a fiber-reinforced geopolymeric concrete for its application in construction elements

Armando Vargas-López^{1a}, Walter Vásquez-Delgado^{1b}, William Valencia-Saavedra^{2a},
Ruby Mejía de Gutiérrez^{2b}

¹ Grupo de Materiales Compuestos (GMC - CENM), Universidad del Valle, Colombia. Correos electrónicos: vargas.armando@correounivalle.edu.co^a, walter.vasquez@correounivalle.edu.co^b.

¹ Grupo de Materiales Compuestos (GMC - CENM), Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Colombia. Correos electrónicos: william.gustavo.valencia@correounivalle.edu.co^a, ruby.mejia@correounivalle.edu.co^b. Orcid: 0000-0002-8918-2132^a, 0000-0002-5404-2738^b.

Recibido: 2 junio, 2022. Aceptado: 27 agosto, 2022. Versión final: 17 octubre, 2022.

Resumen

Este artículo presenta un análisis de la caracterización físico-mecánica de un concreto geopolimérico fibrorreforzado, cuya matriz HCV está conformada por 90 % ceniza volante (CV) y 10 % cemento portland ordinario (OPC); se utiliza como activador alcalino una solución compuesta por silicato e hidróxido de sodio (NaOH, Na₂SiO₃) y agua. El refuerzo utilizado fueron fibras de acero SikaFiber Xorex incorporadas a la matriz en proporciones de 50 y 75 kg/m³. La mezcla HCV-50 reportó una resistencia a la compresión de 26,77 MPa a los 28 días de curado, por lo que se clasifica como concreto estructural según la NSR-10; a la misma edad de curado se obtuvo resistencia a la tracción indirecta de 3,49 MPa, módulo de elasticidad de 29,32 GPa, resistencia a la flexión de 5,15 MPa y tenacidad hasta la deflexión de agrietamiento (δ_f) de 1.971,9 N.mm. Esta mezcla, considerada la óptima, fue empleada en la fabricación de losas de concreto, las cuales presentaron una deflexión de ruptura δ_f de 4,45 mm, deflexión última de 16,15 mm, carga máxima soportada 15,6 kN, tenacidad de 49.464,8 N.mm hasta δ_f y 14.5847,3 N.mm hasta 3 veces δ_f . El material geopolimérico fibrorreforzado se propone además para ser utilizado en la producción de concreto proyectado (*shotcrete*) y en la construcción de losetas aligeradas.

Palabras clave: concreto geopolimerico; ceniza volante; fibrorreforzado; fibra de acero.

Abstract

This article presents an analysis of the physical-mechanical characterization of a fiber-reinforced geopolymeric concrete, whose HCV matrix is made up of 90% fly ash (CV) and 10% ordinary portland cement (OPC), using as an alkaline activator a solution composed of silicate and sodium hydroxide (NaOH, Na₂SiO₃) and water. The reinforcement used was SikaFiber Xorex steel fibers incorporated into the matrix in proportions of 50 and 75 kg/m³. The HCV-50 mix reported a compressive strength of 26.77 MPa at 28 days of curing, classifying it as structural concrete according to NSR-10. At the same curing age, indirect tensile strength of 3.49 MPa, modulus of elasticity of 29.32 GPa, flexural strength of 5.15 MPa and toughness up to cracking deflection (δ_f) of 1971,9 N.mm were obtained. ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 – 8456.

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia **CC BY-ND 4.0**



Como citar: A. Vargas-López, W. Vásquez-Delgado, W. Valencia-Saavedra, R. Mejía de Gutiérrez, “Caracterización de un concreto geopolimérico fibrorreforzado para su aplicación en elementos constructivos,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 21, no. 4, pp. 39-52, 2022, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n4-2022004>.

This mixture, considered optimal, was used in the manufacture of concrete slabs, which presented a rupture deflection δ_f of 4.45 mm, ultimate deflection of 16.15 mm, maximum load supported 15.6 kN, tenacity of 49464, 8 N.mm up to δ_f and 145847.3 N.mm up to 3 times δ_f . The fiber-reinforced geopolymeric material is also proposed to be used in the production of shotcrete (Shotcrete), and in the construction of lightweight tiles.

Keywords: geopolymeric concrete; fly ash; fiber-reinforced concrete; steel fiber.

1. Introducción

El concreto base OPC es uno de los materiales más utilizados en el mundo dadas sus propiedades mecánicas y elevada durabilidad. Posee un comportamiento mecánico sobresaliente al soportar compresión, sin embargo su resistencia a la tracción es deficiente, por lo que se emplea acero estructural para reforzar los elementos en las zonas que experimentan este tipo de esfuerzos y para proveer la suficiente ductilidad evite fallas frágiles ante sollicitaciones significativas. Cabe anotar que, la aparición de grietas o fisuras facilita el ingreso de agentes agresivos a los elementos y compromete la calidad de los materiales a lo largo del tiempo. Las deformaciones por retracción térmica, ciclos de humedecimiento y secado son algunas de las causas no estructurales de fisuración en elementos de concreto. El uso de fibrorefuerzo ha demostrado ser efectivo para el control de estos efectos [1]. Es importante aclarar que las fibras no impiden la aparición de fisuras, pero ayudan a reducir su propagación, además reducen el área total agrietada. Otro beneficio considerable de la utilización de fibrorefuerzo es que incrementa la capacidad de los elementos para absorber energía antes de fallar; cuando el concreto se fisura deja de trabajar a tensión y dicho esfuerzo es soportado por las fibras, en cuyo caso, el elemento seguirá absorbiendo energía [1]. Así, el comportamiento mecánico de un elemento fibrorreforzado está condicionado por la interacción entre el concreto y las fibras.

Por otra parte, el impacto ambiental que produce la industria cementera a través de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se ha convertido en un tema de suma importancia en la actualidad. Esta industria emite aproximadamente entre 0,82 y 1 tonelada de CO₂ a la atmósfera para producir una tonelada de cemento, lo que representa entre el 10 y 15% de las emisiones de dióxido de carbono globales, según el Centro de Estudios Británico Chatham House [2]. Además, el proceso de fabricación del OPC consume aproximadamente del 12 al 15% del uso total de energía industrial, y produce cada año millones de toneladas de residuos como el polvo de horno de cemento, lo que contribuye a los riesgos para la salud respiratoria y la contaminación [3].

El desarrollo de materiales de construcción sostenibles y con bajas emisiones de CO₂ en su proceso de fabricación es esencial para que la industria de la construcción global reduzca la huella ambiental de sus actividades. Un tipo de cemento alternativo que está atrayendo especial atención son los denominados geopolímeros, los cuales se basan en la química de materiales aluminosilicatos alcalinos. Estos materiales ofrecen propiedades técnicas comparables a las del OPC, pero con una huella de carbono mucho menor y con potenciales ventajas de rendimiento sobre los cementos tradicionales [4]. En estos materiales alternativos se utilizan subproductos y residuos industriales que mezclados con un activador alcalino dan lugar a un material cementante que se puede utilizar en la fabricación de diferentes elementos de concreto, reduciendo la explotación de materias primas y requerimiento de energía en el proceso, debido a que se producen a temperatura ambiente.

A principios del 2020 fue publicado el trabajo de Ranjbar N. y Zhang M. [5] en el que discuten acerca del auge de estos materiales, los autores muestran un desarrollo acelerado de investigaciones centradas en compuestos geopoliméricos. Esta revisión bibliográfica presenta los avances en el desarrollo de concretos geopoliméricos fibrorreforzados, entre estos señalan como rango óptimo de adición de fibras el 0.2 - 2% en volumen, valores que afirman mejoran las propiedades mecánicas y la durabilidad de las mezclas híbridas sin afectar su trabajabilidad; además resaltan el buen comportamiento de los concretos geopoliméricos ante la exposición a agentes químicos y elevadas temperaturas.

Liu F., Ding W. y Qiao Y. [6], estudiaron el comportamiento a tensión de concretos híbridos reforzados con fibras de acero corrugadas y fibras de alcohol polivinílico (PVA); la matriz cementante estaba compuesta por OPC, ceniza volante y polvo de escoria. Los autores hacen énfasis en la importancia de reconocer las razones de la formación de las grietas en las muestras durante los ensayos de tracción para entender el proceso de falla estas; con este objetivo, aplican correlación digital de imágenes (DIC), una técnica que permite la medición de deformaciones en los materiales sin que exista un contacto entre las muestras y el equipo. Los autores concluyen que la resistencia a la tracción y la tenacidad de los concretos se incrementa con la inclusión

de cualquiera de los dos tipos de fibras estudiadas. Resaltan que la resistencia a la tracción presenta un incremento mayor cuando se aumenta el porcentaje de adición de fibras de acero, mientras que, para un determinado nivel de adición de fibras de acero, el incremento en el contenido de fibras de PVA mejora la tenacidad de los elementos. También señalan que la incorporación de materiales como cenizas volantes y polvo de escorias no afecta el comportamiento de las mezclas ni la interacción de las fibras, por lo que esta práctica es viable desde el punto de vista técnico y ayuda a disminuir el impacto ambiental en la producción de los concretos. Por último, concluyen que la incorporación de estas fibras (macro fibras) no tiene un aporte significativo en cuanto al control de microgrietas, pero tienen un papel clave para disminuir la propagación de macrogrietas, y especialmente las fibras de acero mejoran de forma notable el comportamiento de los elementos durante el agrietamiento principal [6].

En general, el desarrollo de nuevos métodos constructivos está relacionado con los avances en los materiales que se utilizan y es importante determinar posibles aplicaciones para estos, teniendo en cuenta sus ventajas y limitaciones desde un punto de vista técnico. En consecuencia, esta investigación se centró en el estudio del comportamiento físico y mecánico de un concreto híbrido activado alcalinamente con adición de fibras de acero, cuya matriz corresponde a la mezcla de 90% cenizas volantes clase F de procedencia colombiana (CV) y 10% OPC, para validar su uso potencial en el sector de la construcción.

2. Materiales y metodología

El cementante utilizado en la producción del concreto activado alcalinamente fue una mezcla de ceniza volante colombiana (CV) y cemento portland UG (OPC), en proporción 90% y 10% respectivamente. La composición química evaluada por fluorescencia de rayos-X (FRX) se aprecia en la tabla 1 [7]; es de destacar el alto contenido de óxidos de sílice, aluminio y hierro (89%) y el bajo contenido de inquemados (6,35%), lo que la clasifica como tipo F con base en la norma ASTM C618. La figura 1 ilustra el patrón de rayos-X de CV, donde se identifican las fases cristalinas de cuarzo (óxido de sílice), mullita (sílico-aluminato), y hematita (óxido de hierro). La densidad de CV fue 2.396 kg/m³. El tamaño medio de partícula obtenido por la técnica de granulometría láser en un equipo Mastersizer 2000 para CV y OPC fue 24,89 μm y 21,56 μm, respectivamente [7].

Como activador alcalino se usó una solución de hidróxido de sodio (NaOH) (98%) y silicato sódico (waterglass) comercial cuya composición es: SiO₂=32,1%, Na₂O=11,9%, H₂O=55,9.

Tabla 1. Composición química de CV y OPC

Componente	CV	OPC
SiO ₂	59,03	17,99
Al ₂ O ₃	23,97	3,88
Fe ₂ O ₃	5,98	4,76
K ₂ O	1,21	0,32
CaO	0,74	62,28
SO ₃	0,55	4,03
MgO	0,31	1,71
Na ₂ O	0,19	0,23
Otros	1,66	0,66
LOI	6,35	4,14
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (Molar)	4,19	

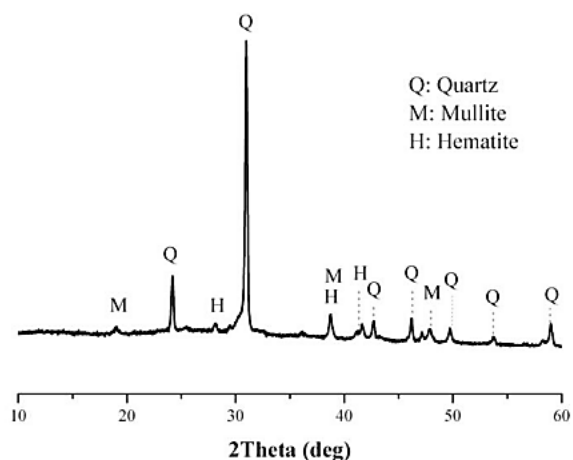


Figura 1. Difractograma CV (XRD).

En la tabla 2 se presentan las características físicas de los agregados. Las proporción utilizadas de los agregados fue 50:50, para obtener una curva acorde a Fuller-Thompson (figura 2).

Para la preparación de las mezclas de concreto, se utilizó el diseño de mezcla híbrida empleado por Rojas-Duque y Espinosa [7], que considera una resistencia mínima de 21 MPa y un asentamiento de 75 – 100 mm para garantizar la trabajabilidad y facilitar el encofrado de la mezcla. Con el objetivo de evaluar el efecto de las fibras de acero en las propiedades de los concretos activados alcalinamente (HCV-F), se diseñaron mezclas de concreto con diferentes proporciones de fibrorrefuerzo (0, 50 y 75 kg/m³). Como material de referencia se prepararon concretos base OPC (OPC-F) con las mismas

proporciones de fibras (tabla 4). Todas las mezclas se produjeron en una mezcladora horizontal CreateAngle.

Tabla 2. Propiedades físicas de los agregados

Propiedades físicas	Agregado fino	Agregado grueso
Masa unitaria suelta [Kg/m ³]	1.578,6	1.443,8
Masa unitaria compacta [Kg/m ³]	1.643,78	1.574,49
Densidad aparente [g/cm ³]	2,48	2,67
Absorción [%]	3,77	3,25
Módulo de finura	2,63	-
Tamaño máximo (pulg)	-	¾
Materia orgánica	Placa n° 2- 3	

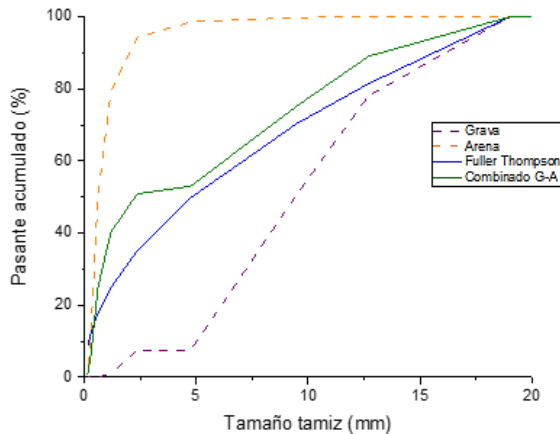


Figura 2. Ajuste granulométrico Fuller-Thompson

En los concretos fibrorreforzados se emplearon fibras de acero corrugadas (SikaFiber Xorex), cuyas propiedades, extraídas de la ficha técnica, se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Características de las fibras SikaFiber Xorex

Propiedad	Medida
Longitud	38 mm
Diámetro	1 mm
Relación longitud / diámetro	38
Resistencia a tracción	1200 MPa mín
Módulo de elasticidad	200 GPa
Elongación de ruptura	4 % máx

Para la preparación de las mezclas de concreto se utilizó el diseño de mezcla híbrida empleado por Rojas-Duque y Espinosa [7], que considera una resistencia mínima de 21 MPa y un asentamiento de 75 – 100 mm para garantizar la trabajabilidad y facilitar el encofrado de la mezcla. Con el objetivo de evaluar el efecto de las fibras

de acero en las propiedades de los concretos activados alcalinamente (HCV-F) se diseñaron mezclas de concreto con diferentes proporciones de fibrorrefuerzo (0, 50 y 75 kg/m³). Como material de referencia se prepararon concretos base OPC (OPC-F) con las mismas proporciones de fibras (tabla 4). Todas las mezclas se produjeron en una mezcladora horizontal CreateAngle.

Los concretos se evaluaron en estado fresco y estado endurecido. En estado fresco se estudió el efecto del contenido de fibra en el asentamiento del concreto, mientras que en estado endurecido se realizaron los siguientes ensayos:

- Ensayos físicos: densidad, absorción y porosidad (ASTM C642) a 28 días de curado en cubos de 7.5 cm de lado, que se extrajeron de los extremos de las vigas usadas en los ensayos de flexión.

- Ensayos mecánicos: resistencia a la compresión (ASTM C39) y resistencia a la flexión (ASTM C293) a edades de curado de 7, 28 y 90 días, resistencia a la tracción indirecta (ASTM C496) y tenacidad (ASTM C1018). Para los ensayos de compresión y tracción indirecta se utilizaron especímenes cilíndricos de 7.5 cm x 15 cm (diámetro x altura) y se ensayaron en una prensa hidráulica ELE International (capacidad de 1000 kN); para los ensayos de flexión y tenacidad se utilizaron vigas de 7.5 x 7.5 cm² x 31 cm (sección x largo) haciendo uso de una máquina universal Tinius Olsen H50KS (capacidad de 50kN).

- Observación de zonas de fractura por microscopía electrónica (MEB).

Con la mezcla de HCV-F que alcanzó los mejores resultados se diseñaron losas de concreto (L=30 cm, A= 30 cm y Espesor= 5 cm) y se evaluó la resistencia a flexión y la tenacidad (NTC 5721) en una máquina universal WPM ZD-40 (capacidad de 400 kN), cuyos resultados fueron comparados con la mezcla de referencia basada en OPC.

3. Resultados y discusión

3.1. Propiedades en estado fresco de los concretos

Con el propósito de evaluar la capacidad de los concretos para deformarse en estado fresco por acción de su propio peso, se determinó el flujo de asentamiento con el cono de Abrams bajo la norma NTC 396. Tanto las mezclas OPC como las HCV presentaron asentamientos entre 17,5 cm y 23,0 cm, los cuales estuvieron acompañados de una adecuada cohesión entre los componentes de la mezcla y la ausencia de fenómenos de segregación y sangrado.

Tabla 4. Dosificación de las mezclas de referencia basadas en OPC-F y las mezclas HCV-F (1 m³)

Mezcla	Código	OPC [kg]	CV [kg]	Solución activante (Na ₂ SiO ₃ + NaOH+ H ₂ O) [l]	Agua [l]	Fibra (F) [kg]	Grava [kg]	Arena [kg]
OPC-F	OPC 0	396,7	-	-	205	0	860	860
	OPC 50					50		
	OPC 75					75		
HCV-F	HCV 0	40	360	288,8	-	0	860	860
	HCV 50					50		
	HCV 75					75		

La viabilidad del bombeo de las mezclas depende simultáneamente de las pruebas de asentamiento (mínimo 50 mm) y sangrado por presión, que miden la cohesión entre los componentes del compuesto [8]. Esta última no se llevó a cabo, pero con base en los asentamientos exhibidos se concluye que las mezclas son potencialmente bombeables. Esto es coherente con la guía de Toxement [9], en la que se indica que los asentamientos óptimos para bombeo de concreto están entre 5 y 15 cm.

3.2. Propiedades en estado endurecido

3.2.1. Densidad, absorción y porosidad

La densidad, el porcentaje de absorción y el volumen de poros permeables (ASTM C642) de los concretos en estudio se presenta en la tabla 5. En general, los valores de densidad aparente obtenidos para estos materiales son cercanos a aquellos reportados en la literatura para concretos convencionales basados en OPC (con agregados de tipo silíceo), los cuales varían entre 2.400 y 2.800 kg/m³. Adicionalmente se observa la tendencia a incrementar la densidad con el contenido de fibra, lo que coincide con los reportado por Koenig et al [10].

3.2.2. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión fue determinada de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM C39, los resultados obtenidos se incluyen en la figura 3. En general, para todas las mezclas se observa un incremento en la resistencia a la compresión conforme avanza el proceso de curado; los concretos OPC-F presentan mayor resistencia a edades tempranas, sin embargo, conforme avanza el proceso de curado los concretos HCV-F logran superar a sus equivalentes. Así, la mezcla HCV-75 a edad de 28 y 90 días reporta una resistencia a compresión 6,62% y 18,50%,

respectivamente, superior a la reportada por la mezcla de referencia OPC-75. Cabe resaltar que, a 28 días de curado, todas las muestras cumplen con la resistencia mínima para concretos estructurales indicada en la NSR 10 (17 MPa).

Tabla 5. Resultados propiedades físicas

Mezcla	% de Absorción	Densidad aparente (kg/m ³)	Volumen de espacios vacíos (%)
HCV 0	8,54	2730	20,79
HCV 50	8,24	2750	19,56
HCV 75	8,18	2770	19,43
OPC 0	8,35	2680	18,55
OPC 50	8,38	2.740	18,97
OPC 75	8,25	2.760	18,81

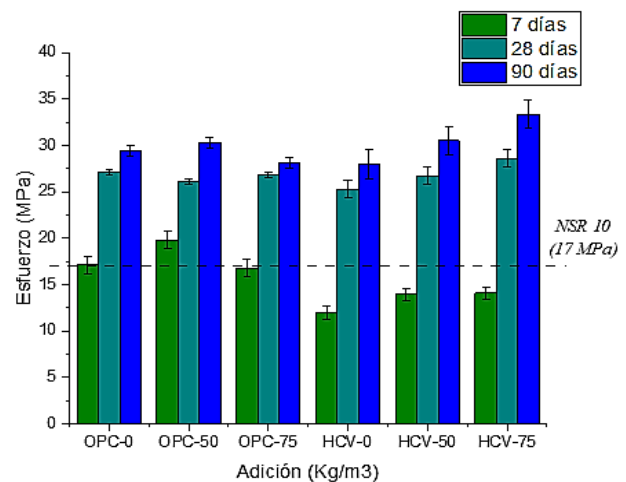


Figura 3. Resistencia a la compresión

En todos los casos la adición de fibras generó un incremento en la resistencia a compresión de la mezcla. Este comportamiento se atribuye a la reducción de los espacios vacíos dentro de los compuestos, lo que promueve el confinamiento de la matriz cementante mejorando la interacción entre ambos materiales y en consecuencia, incrementa la resistencia a los concretos [11]. El mejor comportamiento de los HCV con adición de los diferentes porcentajes de fibra, podría estar relacionado con la mejor interacción de la fibra - matriz y a su adecuada dispersión [12], [13], [14].

3.2.3. Módulo de elasticidad

Los resultados del módulo de elasticidad de las mezclas, determinado según la norma ASTM C579, se presentan en la tabla 6. Estos valores se calcularon con una relación de Poisson de 0.2, recomendada por la NSR 10 C.8.5.1 para concretos de peso normal. Esto se adecúa a lo reportado por Nguyen, Ahn, Le y Lee [15], quienes trabajaron con concretos de activación alcalina basados en ceniza volante con resistencias a la compresión en el rango de 45–58 MPa y obtuvieron relaciones de Poisson entre 0.16 y 0.21, similares a las reportadas para concretos convencionales. Aunque en los resultados obtenidos no se observa una tendencia clara para los concretos OPC, en el caso de HCV se puede apreciar un incremento con la adición de las fibras de acero; sin embargo, los módulos fluctúan entre un 66,48% y 83,10% de los reportados por OPC-F.

Tabla 6. Módulo de elasticidad (E)

Módulo de elasticidad	E prom. [GPa]
Muestra	
OPC 0	40,34
OPC 50	41,34
OPC 75	39,74
HCV 0	26,82
HCV 50	29,32
HCV 75	33,02

Estos resultados concuerdan con los reportados por Nath y Sarker [16], quienes compararon el módulo de elasticidad de concretos geopoliméricos basados en CV con mezclas base OPC, y reportaron valores similares a HCV 0, y en general valores de E_c para los concretos de activación alcalina un 25 – 30% menores que los de los concretos OPC evaluados a 28 días de curado, para mezclas con resistencias a compresión similares. Cárdenas [17] asocia este comportamiento a que el módulo elástico de los geles de aluminosilicato alcalino hidratado (N-A-S-H) en los geopolímeros es mucho menor que el módulo elástico de los geles de

silicoaluminato cálcico hidratado (C-S-H) presentes en sistemas de cemento, especialmente en el caso de las mezclas base CV (clase F); también menciona que las diferencias en la densidad del concreto y en el grado de cristalinidad de su microestructura pueden explicar este comportamiento.

3.2.4. Resistencia a la tracción indirecta

La figura 4 presenta los resultados de la resistencia a tracción indirecta obtenidos en las mezclas HCV-F y OPC-F a los 28 días de curado. Se identifica un incremento en la resistencia de las muestras a los esfuerzos de tensión conforme se incrementa el contenido de fibra. En ausencia de fibra, la resistencia de OPC fue superior a la de HCV; sin embargo, cuando se incrementa la adición de fibras de acero, la resistencia de los concretos HCV destaca ligeramente sobre la de sus equivalentes base OPC, lo que coincide con lo reportado en otras investigaciones [18], [19]. Este comportamiento sugiere una mayor adherencia de las fibras a las matrices de CV, lo que resulta en una mejor interacción al momento de resistir esfuerzos de tensión.

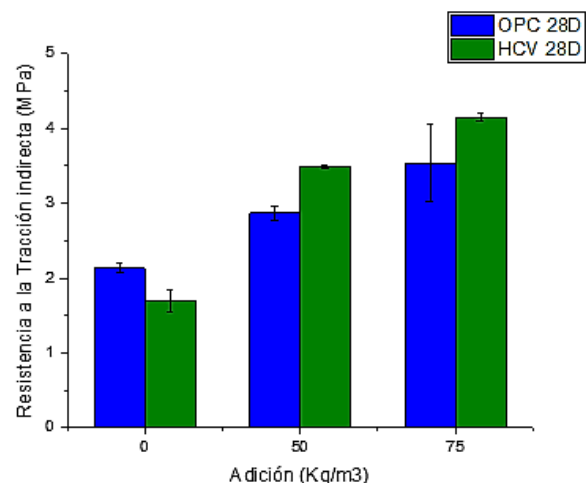


Figura 4. Resistencia a tracción indirecta 28 días de curado.

3.2.5. Resistencia a la tracción indirecta

Los ensayos a flexión se realizaron siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C293, y se estudiaron dos parámetros fundamentales: la carga y/o esfuerzo de agrietamiento y la capacidad de absorción de energía (tenacidad). Las figuras 5 y 6 permiten apreciar el efecto de las fibras en los compuestos, se evidencia un comportamiento más dúctil después de alcanzar el esfuerzo máximo de agrietamiento en los concretos con fibrorrefuerzo. La adherencia de las fibras a la matriz y su propia resistencia a la tracción permiten que el

conjunto pueda soportar y redistribuir estos esfuerzos sin fallar de forma frágil, después de que se fractura el elemento.

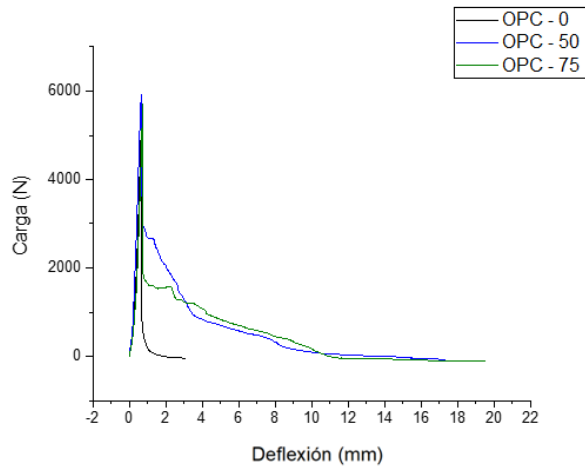


Figura 5. Gráfico carga-deflexión mezclas OPC (28d)

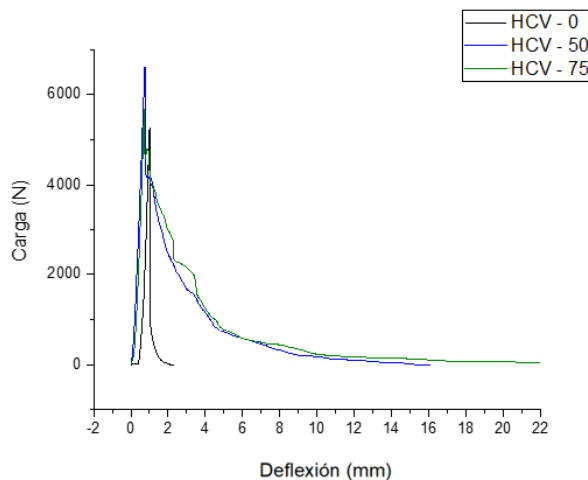


Figura 6. Gráfico carga-deflexión mezclas HCV (28d)

En la [tabla 7](#) se presentan los resultados de los ensayos a flexión, además de algunos parámetros importantes para caracterizar el comportamiento de los elementos. Se identifica que, al igual que en el ensayo de resistencia a compresión, a edades tempranas de curado (7 días) las mezclas base OPC presentan una resistencia mayor a la de los concretos HCV; sin embargo, conforme avanza dicho proceso las mezclas híbridas logran alcanzar y superar a sus equivalentes. Valencia-Saavedra, Robayo-Salazar, y Mejía de Gutiérrez [20] estudiaron el efecto de la inclusión de diferentes fuentes de calcio en el comportamiento mecánico de concretos de activación alcalina base CV, y concluyeron que los resultados descritos se pueden asociar con la lenta reactividad que presenta la CV, lo cual ocasiona que los mayores

aumentos de resistencia se obtengan a edades prolongadas de curado. En general, la adición de fibra a los HCV genera un incremento en la resistencia a la flexión, lo cual ha sido reportado por otros investigadores en sistemas de activación alcalina [19], [21].

La tenacidad se calculó utilizando el área bajo la curva de los gráficos esfuerzo vs deflexión obtenidos en los ensayos a flexión ([figura 7](#)). Las tenacidades registradas en las muestras a diferentes niveles de deflexión y edades de curado (ver [tabla 7](#)) presentan incertidumbres considerables, lo que se asocia con la distribución aleatoria de las fibras en los elementos de concreto; la ubicación de las fibras puede mitigar o promover la aparición de un plano de falla [11]. Pese a esto, se evidencia que la energía absorbida hasta este punto no tiene variaciones significativas entre mezclas simples y fibrorreforzadas, puesto que las fibras empiezan a actuar tras superar la deflexión δ_f . Sin embargo, se destaca el comportamiento de la mezcla HCV con 50 kg/m^3 de adición a 28 días de curado.

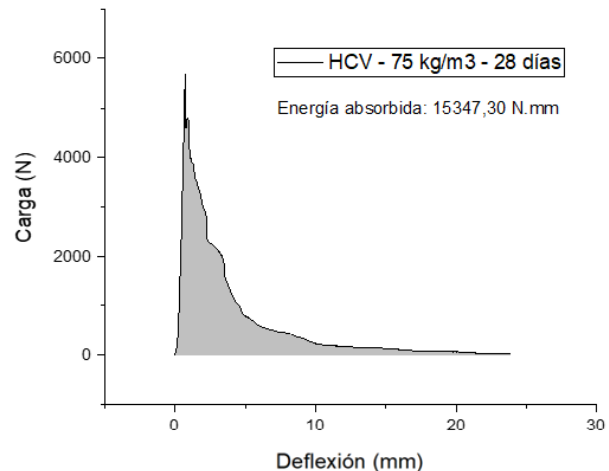


Figura 7. Cálculo tenacidad (software Origin)

Para cuantificar la energía absorbida por las muestras luego del agrietamiento se utilizan los índices de tenacidad I_3 e $I_{5.5}$. De acuerdo con la antigua norma ASTM C1018, el I_3 resulta de dividir la tenacidad lograda por las muestras hasta alcanzar $3\delta_f$ entre la tenacidad lograda hasta δ_f , mientras que el $I_{5.5}$ se calcula lograda hasta δ_f , mientras que el $I_{5.5}$ calcula como el cociente entre las tenacidades a $5.5\delta_f$ y δ_f (ver [tabla 7](#)).

Tabla 7. Resultados resistencia a la flexión

Mezcla	EDAD [días]	Pf [N]	Fcr [MPa]	Tenacidad [N.mm]			Índice de tenacidad	
				Df	3df	5.5df	I3	I5.5
OPC 0	7	4516,1	3,62	875,7	-	-	-	-
	28	5518,0	4,57	1329,7	-	-	-	-
	90	4694,2	3,76	1428,9	-	-	-	-
OPC 50	7	4787,7	3,84	1035,7	4435,6	6799,7	4,28	6,57
	28	5283,3	4,23	1292,1	4105,2	6352,0	3,18	4,92
	90	6492,8	5,06	1236,0	4519,0	6855,1	3,66	5,55
OPC 75	7	4443,4	3,56	1222,6	6782,2	10436,5	5,55	8,54
	28	5211,5	4,17	1138,4	2857,0	4440,2	2,51	3,90
	90	6060,8	4,85	1034,0	4026,6	6271,1	3,89	6,06
HCV 0	7	3711,6	2,97	1366,0	-	-	-	-
	28	5932,7	4,75	1495,6	-	-	-	-
	90	7236,6	5,79	1929,6	-	-	-	-
HCV 50	7	4022,7	3,22	1516,8	7918,8	10633,8	5,22	7,01
	28	6432,2	5,15	1971,9	6514,2	8872,8	3,30	4,50
	90	6841,6	6,10	1366,4	4569,5	7143,6	3,34	5,23
HCV 75	7	3843,6	3,08	739,4	3414,9	5068,3	4,62	6,85
	28	5160,9	4,13	1198,3	4914,2	7485,5	4,10	6,25
	90	7613,8	5,48	1706,3	7338,0	11207,6	4,30	6,57

En todas las muestras se evidencia una reducción en los índices de tenacidad cuando avanza el proceso de curado. Es importante tener en cuenta que la incidencia del fibrorrefuerzo hasta el agrietamiento es casi nula, pues es a partir de este punto que las fibras comienzan a asumir los esfuerzos de tracción. Así, se espera que la capacidad de los concretos para absorber energía hasta el agrietamiento sea más sensible al proceso de curado que la tenacidad lograda hasta deflexiones posteriores a δ_f y se asocia con menores índices de tenacidad a edades avanzadas.

3.2.6. Relación entre el comportamiento a flexión y compresión

La relación entre el esfuerzo de agrietamiento en flexión (f'_{cr}) y la resistencia a la compresión (f'_{c}) de las distintas mezclas oscila entre el 12,76% y el 24,83% (ver [tabla 8](#)).

Este comportamiento es coherente con lo presentado por Rojas y Espinosa [7] en su investigación, donde reportaron una relación MR/R_c , del 23% para su concreto HCV óptimo. Los resultados indican que la edad de curado tiene mayor incidencia en el comportamiento a compresión que en la resistencia a la tracción de los concretos, por lo que la relación f_{cr}/f'_{c} se reduce a edades avanzadas.

Tabla 8. Esfuerzos flexión vs compresión

Mezcla	Edad		
	7	28	90
OPC 0	21,10%	16,80%	12,76%
OPC 50	19,38%	16,13%	16,70%
OPC 75	21,19%	15,55%	17,21%
HCV 0	24,83%	18,74%	20,66%
HCV 50	23,10%	19,22%	19,97%
HCV 75	21,83%	14,44%	16,40%

3.3. Aplicación constructiva: producción de una losa

3.3.1. Selección de la mezcla óptima

Con base en los resultados anteriores se determinó la mezcla óptima para la elaboración de las losas de concreto, siguiendo una metodología de selección que prioriza las propiedades mecánicas más relevantes para soportar esfuerzos de flexión, las cuales fueron:

- Resistencia a la compresión (f'_{c} [MPa]): propiedad poco sensible al fibrorrefuerzo, por lo que se le asigna un 10% de influencia en la selección de la mezcla óptima (ver [figura 5](#) y [tabla 8](#)).
- Esfuerzo de agrietamiento en flexión (f_{cr} [MPa]): el comportamiento bajo condiciones de servicio es

prioritario para elegir el compuesto óptimo. Se asigna un 20% de incidencia.

- I_5 a 7 días de curado (I5 7D): la tenacidad de los elementos a edades tempranas también toma importancia si se tiene en cuenta las condiciones de obra a las que se pueden someter los concretos. Así, se asigna un 25% de influencia.
- Tenacidad hasta el agrietamiento a 28 días de curado ($T - \delta_f$ 28D [N.mm]): se da especial importancia a la energía que pueden absorber los concretos sin agrietarse a los 28 días de curado, edad a la que deben haber alcanzado su resistencia de diseño. Se asigna un 25% de influencia.
- Esfuerzo de agrietamiento en tracción indirecta (f_{cr} [MPa]): similar a la carga de agrietamiento en flexión, se toma en consideración la incidencia de las fibras en el agrietamiento de los elementos y se le asigna un 20% de influencia.

Se asume la asignación de un punto por propiedad mecánica a la mezcla que tenga el mejor resultado en dicha característica, para luego ponderarlos de acuerdo con su porcentaje de influencia. En la tabla 9 se presenta la asignación de puntos para la selección de la mezcla óptima.

Con base en estos indicadores y su correspondiente calificación, se obtiene que la mezcla óptima para la aplicación constructiva es la HCV 50 kg/m³, debido a que esta da lugar a la mayor ponderación.

3.3.2. Microestructura

Mediante la microscopía electrónica de barrido (MEB) se analizó la microestructura de la mezcla óptima HCV y su equivalente base OPC. Para ambas mezclas se puede observar (figura 8a y 8c) una matriz densa y una buena adherencia entre los agregados y la pasta en la zona de transición interfacial. Sin embargo, en la figura 8d se observa que el concreto OPC 50 presenta microfisuras en la interfaz fibra-matriz, lo que indica que la adherencia entre estas dos fases del compuesto no es óptima; además, en la parte superior de la misma figura se observa que la matriz no tiene una buena densificación, lo que influye en la pérdida de adherencia con la fibra.

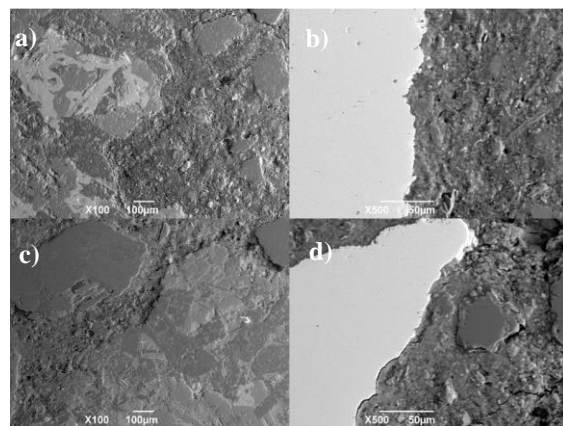


Figura 8. Microestructura de los concretos. (a y b) HCV, (c y d) OPC.

Tabla 9. Elección de la mezcla óptima

Mezcla	Propiedad		Puntos	Ponderado	
HCV 0	f'_c	25,32	0	0	0
	f_{cr}	4,75	0	0	
	I5 7D	1	0	0	
	$T - \delta_f$ 28D	1495,6	0	0	
	f_{cr} (TI)	1,70	0	0	
HCV 50	f'_c	26,77	0	0	0,7
	f_{cr}	5,15	1	0,2	
	I5 7D	7,01	1	0,25	
	$T - \delta_f$ 28D	1971,9	1	0,25	
	f_{cr} (TI)	3,49	0	0	
HCV 75	f'_c	28,60	1	0,1	0,3
	f_{cr}	4,13	0	0	
	I5 7D	6,85	0	0	
	$T - \delta_f$ 28D	1198,3	0	0	
	f_{cr} (TI)	4,15	1	0,2	

Caso contrario con el concreto HCV 50, en el que la matriz presenta una densificación adecuada (véase figura 8b) y no se perciben indicios de problemas de adherencia con las fibras, además no se presenta microfisuras, lo que resultan en un mejor anclaje de las fibras de acero a la matriz híbrida.

3.3.3. Producción de la losa

Con la mezcla híbrida óptima se produjeron losas de 30 cm x 30 cm x 5 cm, las cuales fueron comparadas con losas de su equivalente fibrorreforzado base portland. Estos elementos fueron sometidos a ensayos de flexión adaptando la metodología indicada en la NTC 5721 con base en las dimensiones de los elementos, las cuales corresponden a la mitad de sus equivalentes recomendados en la norma (60 cm x 60 cm x 10 cm).



Para el montaje del ensayo, de acuerdo con la escala de los especímenes antes mencionada, se utilizó un marco metálico cuadrado de 30 cm de lado, 2.5 cm de espesor y 3 cm de altura sobre el que se apoyaron las muestras y una platina metálica cuadrada de 5 cm de lado y 1 cm de espesor mediante la que se distribuyó la carga aplicada en el centro de las losas. Esta última se aplicó a velocidad de 1.5 – 2.0 mm/min, midiendo la deflexión de los elementos a través de un deformímetro de carátula. Adicionalmente, se tuvo que elevar todo el montaje sobre un par de perfiles W de acero para ubicar el deformímetro en la posición deseada. El montaje antes descrito se presenta en la figura 9. En la tabla 10 se observan los mecanismos de falla de los especímenes y la deflexión máxima alcanzada durante los ensayos. Las curvas carga-deflexión de las mezclas en estudio se presentan en la figura 10.



Figura 9. Montaje ensayo NTC 5721

Se observa que las muestras de HCV – 50 kg/m³ presentaron mayores niveles de deflexión que las de OPC – 50 kg/m³. Los especímenes HCV 50 alcanzaron su máxima resistencia tras alcanzar niveles de deflexión superiores a los OPC 50. Los elementos fibrorreforzados fallaron por flexión de forma dúctil, presentando múltiples grietas en toda su superficie. En cuanto a la carga máxima soportada, las losas fibrorreforzadas HCV registraron 15,60 kN frente a los 12,75 kN resistidos por sus equivalentes base OPC. Adicionalmente, se estudió la capacidad de las muestras para absorber energía siguiendo la misma metodología con la que se caracterizó el comportamiento de las vigas (ASTM C1018), identificando la tenacidad de estas a diferentes niveles de deflexión (δ_f y $3\delta_f$, puesto que ningún espécimen alcanzó niveles de deflexión superiores a $5.5\delta_f$) y calculando los índices I_3 e $I_{5.5}$ (tabla 11). Se observa que las losas fabricadas con la mezcla HVC-50 OPC-50 lograron absorber más energía que sus equivalentes base portland en todos los niveles de deformación.

Tabla 10. Mecanismo de falla y deflexión máxima alcanzada en las diferentes mezclas

Mezcla	HCV – 50 kg/m ³	OPC – 50 kg/m ³
Falla		
Def. máx [mm]	16,15	13,03
Def. en P máx[mm]	4,45	3,73

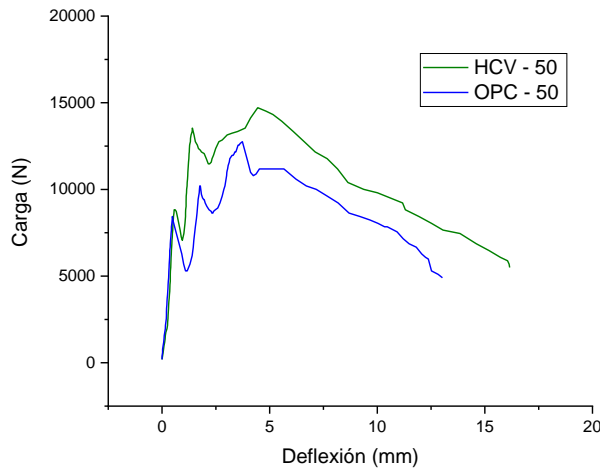


Figura 10. Curvas esfuerzo- deflexión de las diferentes mezclas

La mezcla óptima HCV 50 tiene además un alto potencial de aplicación como concreto lanzado (Shotcrete), con fibras de 38 mm de longitud, 1 mm de espesor y resistencia a la tracción de 1.200 MPa, características físicas y mecánicas similares a las recomendadas (30 mm de largo, 0.6 mm de espesor y resistencia a la tracción mínima de 1000 MPa), una adición de 50 kg/m³ que se encuentra entre los límites recomendados (20 - 60 kg/m³), con medidas de asentamiento en estado fresco de 22 cm, superiores al mínimo recomendado de 5 cm para concretos bombeables [22] y tiempos de fraguado inicial de 93.5 minutos, presentando un equilibrio entre la trabajabilidad y resistencia mecánica. Teniendo en cuenta lo anterior, el uso de las fibras como refuerzo en lugar de mallas también es recomendable desde el punto de vista económico, puesto que permite un ahorro importante en la cantidad de concreto lanzado y en el tiempo necesario para fundir los elementos [1].

Tabla 11. Tenacidad e índice de tenacidad en el ensayo de flexión de las losas

Mezcla	Tenacidad [N.mm]		Índice de tenacidad
	δ_f	$3\delta_f$	I3
HCV 50	49.464,8	145.847,3	2,95
OPC 50	31.126,7	103.182,6	3,31

En el diseño de losas aligeradas se pueden diferenciar dos elementos: viguetas y losetas; en el caso de las segundas, se diseñan bajo el supuesto de que la sección tiene un espesor tal que el concreto pueda soportar la cortante sin necesidad de estribos y el elemento se refuerce para prevenir los efectos de la retracción térmica. Así, el

fibrorrefuerzo en proporción de 50 kg/m³ se adecúa como método de refuerzo para prevenir dichos efectos en losetas de concreto, y es suficiente para proveer más masa de refuerzo que la solicitada por NSR 10 con una cuantía de refuerzo de 0.0018. Además, el hecho de que los esfuerzos por retracción térmica no se genera de manera concentrada sugiere que la distribución aleatoria y más homogénea del refuerzo que proveen las fibras puede resultar conveniente para resistir este tipo de sollicitudes.

4. Conclusiones

En el presente estudio se caracterizó el efecto de la adición de fibras de acero en las propiedades físicas y mecánicas de concretos de activación alcalina basados en CV, los resultados permiten considerar el uso potencial de estas mezclas en la fabricación de elementos constructivos.

A partir de los resultados se puede concluir que:

- A cortas edades, los concretos CV activados alcalinamente presentan resistencias a la compresión entre un 16,04 – 30,18% inferiores a las de sus equivalentes base OPC. Tras 28 días de curado, logran alcanzar resistencias de más del doble de lo obtenido a 7 días de curado, superando ampliamente el mínimo establecido por la NSR 10 para concretos estructurales (17 MPa). La adición de fibrorrefuerzo promueve el desarrollo de resistencias en las mezclas híbridas hasta de 25,32 MPa, 26,77 MPa y 28,60 MPa para las mezclas HCV 0, HCV 50 y HCV 75 respectivamente. También es de resaltar el mayor desarrollo resistente a largo plazo de los concretos geopoliméricos, los cuales superan la resistencia presentada por sus equivalentes de OPC a los 90 días de curado.
- Los concretos HCV sin fibrorrefuerzo tienen una resistencia a la tracción indirecta un 20% menor a la de sus equivalentes base OPC. Sin embargo, cuando se adiciona el fibrorrefuerzo las mezclas híbridas superan en un 21,6% y 17,4% a las de OPC con resistencias de 3,49 MPa y 4,15 MPa para los concretos HCV 50 y HCV 75, respectivamente, a los 28 días de curado. Esto indica una mejor adherencia de las fibras a las matrices de CV y una mejor interacción al momento de resistir esfuerzos de tensión, por lo cual es coherente con los resultados de la MEB donde no se identifican microfisuras, lo que lleva a un mejor anclaje de las fibras de acero.

- Los compuestos de activación alcalina base CV presentan módulos elásticos menores a los de las mezclas base OPC. Los concretos HCV 0, HCV 50 y HCV 75 exhibieron valores de E_c de 26,82 GPa, 29,32 GPa y 33,02 GPa respectivamente, con diferencias desde el 33,52% entre los concretos sin refuerzo hasta un 16,9% en las mezclas con adición de 75 kg/m³. El fibrorrefuerzo ocasiona un incremento del módulo elástico mayor en los concretos geopoliméricos que en los de OPC.
- El fibrorrefuerzo no tiene una incidencia significativa en la energía absorbida por los concretos hasta el agrietamiento, puesto que las fibras empiezan a actuar a partir de este punto. Esto se ve reflejado en una disminución de los índices de tenacidad I_3 e $I_{5,5}$ conforme avanza el proceso de curado. No obstante, la adición de fibras de acero permite a los elementos alcanzar tenacidades hasta seis veces mayores a las registradas tras alcanzar la deflexión asociada con el agrietamiento (δ_f). Se identificó un mejor comportamiento en las losas de concreto HCV 50 que en sus equivalentes de OPC, con una deflexión δ_f en el agrietamiento de 4,45 mm, deflexión última de 16,15 mm, carga máxima soportada 15,6 kN, tenacidad de 49.464,8 N.mm hasta δ_f y 14.5847,3 N.mm hasta 3 veces δ_f , lo cual equivale respectivamente a un 19,3%, 23,94%, 22,31%, 58,91% y 41,35% superiores a los resultados exhibidos por las losas de OPC.
- Tomando en cuenta los resultados obtenidos, se propone además que el material es apto para ser utilizado en la producción de concreto proyectado (shotcrete), y en la construcción de losetas en losas aligeradas.

Referencias

- [1] V. Afroughsabet, L. Biolzi, T. Ozbakkaloglu, “High-performance fiber-reinforced concrete: a review”, *J. Mater. Sci.*, vol. 51, n.º 14, pp. 6517-6551, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9917-4>
- [2] L. Rogers, “La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías”, *BBC News*, vol. 17, p. 12, 2018.
- [3] D. N. Huntzinger, T. D. Eatmon, “A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies”, *J. Clean. Prod.*, vol. 17, n.º 7, pp. 668-675, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>
- [4] J. L. Provis, S. A. Bernal, “Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials”, *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 44, n.º 1, pp. 299-327, 2014, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>
- [5] N. Ranjbar y M. Zhang, “Fiber-reinforced geopolymer composites: A review”, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 107, p. 103498, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103498>
- [6] F. Liu, W. Ding, Y. Qiao, “Experimental investigation on the tensile behavior of hybrid steel-PVA fiber reinforced concrete containing fly ash and slag powder”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 241, p. 118000, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118000>
- [7] O. Rojas-Duque, L. M. Espinosa, R. A. Robayo-Salazar, R. Mejía de Gutiérrez, “Alkali-Activated Hybrid Concrete Based on Fly Ash and Its Application in the Production of High-Class Structural Blocks”, *Crystals*, vol. 10, n.º 10, Art. n.º 10, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/cryst10100946>
- [8] Y. T. H. Cu, M. V. Tran, C. H. Ho, P. H. Nguyen, “Relationship between workability and rheological parameters of self-compacting concrete used for vertical pump up to supertall buildings”, *J. Build. Eng.*, vol. 32, p. 101786, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101786>
- [9] Toxement, “Guía básica para el concreto bombeado - PDF Descargar libre”. [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/203946647-Guia-basica-para-el-concreto-bombeado.html>
- [10] A. Koenig *et al.*, “Flexural behaviour of steel and macro-PP fibre reinforced concretes based on alkali-activated binders”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 211, pp. 583-593, jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.227>

- [11] M. M. Al-mashhadani, O. Canpolat, Y. Aygörmez, M. Uysal, S. Erdem, "Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites", *Constr. Build. Mater.*, vol. 167, pp. 505-513, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.061>
- [12] M. Alshaaer *et al.*, "Fabrication, microstructural and mechanical characterization of Luffa Cylindrical Fibre - Reinforced geopolymer composite", *Appl. Clay Sci.*, vol. 143, pp. 125-133, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.03.030>
- [13] M. Amran *et al.*, "Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review", *J. Build. Eng.*, vol. 45, p. 103638, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103638>
- [14] N. Ranjbar, M. Mehrali, M. Mehrali, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat, "Graphene nanoplatelet-fly ash based geopolymer composites", *Cem. Concr. Res.*, vol. 76, pp. 222-231, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.06.003>
- [15] K. T. Nguyen, N. Ahn, T. A. Le, K. Lee, "Theoretical and experimental study on mechanical properties and flexural strength of fly ash-geopolymer concrete", *Constr. Build. Mater.*, vol. 106, pp. 65-77, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.033>
- [16] P. Nath, P. K. Sarker, "Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete", *Constr. Build. Mater.*, vol. 130, pp. 22-31, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.034>
- [17] J. W. Cárdenas Pulido, "Desempeño en cortante por tensión diagonal sobre muretes reforzados basados en geopolímeros", 2017.
- [18] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, S. K. Bhattacharyya, "Geopolymer concrete: A review of some recent developments", *Constr. Build. Mater.*, vol. 85, pp. 78-90, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- [19] S. Haruna, B. S. Mohammed, M. M. A. Wahab, M. U. Kankia, M. Amran, A. M. Gora, "Long-Term Strength Development of Fly Ash-Based One-Part Alkali-Activated Binders", *Materials*, vol. 14, n.º 15, Art. n.º 15, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14154160>
- [20] W. G. Valencia-Saavedra, R. A. Robayo-Salaza, R. M. de Gutiérrez, "Propiedades de ingeniería de concretos híbridos activados alcalinamente basados en altos contenidos de ceniza volante: un análisis a largas edades", *Rev. UIS Ing.*, vol. 20, n.º 3, 2021, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021001>
- [21] A. Bhutta, P. H. R. Borges, C. Zanotti, M. Farooq, y N. Bantia, "Flexural behavior of geopolymer composites reinforced with steel and polypropylene macro fibers", *Cem. Concr. Compos.*, vol. 80, pp. 31-40, jul. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.11.014>
- [22] "Manual de diseño y construcción de túneles de carretera, capítulo 8: Sistemas de sostenimiento", Secretaría de comunicaciones y transportes de los Estados Unidos Mexicanos, 2016.