

Evaluation of physical and mechanical properties of concrete using sugarcane bagasse ash and fiberglass

Jonmy Altamirano Martinez¹ ; Rodrigo Zegarra Córdova² ; Efrain E. Limaylla Santiago³ 

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil, Lima – Perú
U21219689@utp.edu.pe, U21220839@utp.edu.pe, C24946@utp.edu.pe

Abstract— *The construction sector is one of the world's largest emitters of CO₂, primarily due to the environmental impact associated with Portland cement manufacturing. Simultaneously, the sugarcane agro-industrial chain generates large quantities of bagasse, the combustion of which produces sugarcane bagasse ash (SCBA). This byproduct is often underutilized and causes environmental problems such as air quality degradation, soil disturbance, and water pollution. This study evaluates the sustainability potential and mechanical performance of concrete mixtures in which cement was partially replaced by SCBA at proportions of 7%, 12%, and 17%, combined with glass fibers (GF) at contents of 0.5% and 1.5%. Ten mix designs were prepared, with fifty cylindrical specimens using a multifactorial design. The results showed that all mixtures maintained appropriate temperatures and plastic consistency, with slumps between 76 and 102 mm. The best performance was obtained with 7% SCBA and 0.5% glass fibers, achieving a compressive strength of 23.6 MPa and an indirect tensile strength of 1.89 MPa, representing increases of 10.8% and 8.8%, respectively, compared to the control concrete. The environmental benefits are evident in the reduction of clinker consumption and in the use of agro-industrial waste.*

Keywords— *sugarcane bagasse ash, sustainable concrete, glass fiber, compressive strength, tensile strength.*

Evaluación de propiedades físicas y mecánicas del concreto utilizando ceniza de bagazo de caña de azúcar y fibra de vidrio

Jonmy Altamirano¹ ; Rodrigo Zegarra Córdova² ; Efrain E. Limaylla Santiago³ 

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil, Lima - Perú
U21219689@utp.edu.pe, U21220839@utp.edu.pe, C24946@utp.edu.pe

Resumen— El sector de la construcción es uno de los mayores emisores de CO₂ a nivel mundial, principalmente por el impacto ambiental asociado a la fabricación del cemento Portland. Paralelamente, la cadena agroindustrial de la caña de azúcar genera grandes cantidades de bagazo, cuya combustión produce ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA). Este subproducto suele estar subutilizado y genera problemas ambientales como la degradación de la calidad del aire, la alteración del suelo y la contaminación del agua. Este estudio evalúa el potencial de sostenibilidad y el desempeño mecánico de mezclas de concreto en las que el cemento fue parcialmente sustituido por CBCA en proporciones de 7%, 12% y 17%, combinado con fibras de vidrio FV en contenidos de 0.5% y 1.5%. Se elaboraron 10 diseños de mezcla, con cincuenta especímenes cilíndricos mediante un diseño multifactorial. Los resultados mostraron que todas las mezclas mantuvieron temperaturas apropiadas y consistencia plástica, con revenimientos entre 76 y 102 mm. El mejor desempeño se obtuvo con 7% de CBCA y 0.5% de fibras de vidrio, alcanzando una resistencia a compresión de 23.6 MPa y una resistencia a tracción indirecta de 1.89 MPa, con incrementos de 10.8% y 8.8% respecto al concreto de control. Los beneficios ambientales se evidencian en la reducción del consumo de clínker y en el aprovechamiento de residuos agroindustriales.

Palabras clave— ceniza de bagazo de caña de azúcar, concreto sostenible, fibra de vidrio, resistencia a compresión, resistencia a tracción

I. INTRODUCCIÓN

La construcción es un sector clave para el desarrollo económico y social. Sin embargo, genera impactos ambientales significativos, principalmente debido al uso intensivo de cemento Portland. Su producción implica un alto consumo energético y emisiones de CO₂ asociadas al clínker. [1]–[3]. Se estima que la industria cementera contribuye entre el 7 % y 8 % de las emisiones antropogénicas globales [4], [5], lo que ha impulsado la búsqueda de materiales alternativos que reduzcan su huella ambiental [6], [7].

En este contexto, la gestión de residuos agroindustriales representa una oportunidad para el desarrollo de materiales sostenibles [8]. El procesamiento de la caña de azúcar genera bagazo que, al ser utilizado como combustible, produce ceniza

de bagazo de caña de azúcar (CBCA) [9], [10]. Este residuo, si no es tratado adecuadamente, puede generar impactos ambientales; no obstante, al ser calcinado y finamente molido, presenta alto contenido de sílice amorfa y propiedades puzolánicas, lo que permite su uso como material cementante suplementario [11]–[14].

Diversos estudios han evaluado la CBCA como sustituto parcial del cemento en proporciones de 5 % a 25 %, evidenciando que bajos reemplazos (5–10 %) pueden mejorar la resistencia a compresión y la microestructura del concreto debido a la formación adicional de geles C–S–H [15]–[18]. Asimismo, su reactividad depende de factores como la temperatura de calcinación (600–700 °C) y la finura de molienda (<75 µm), condiciones que favorecen una matriz más densa y durable [19]–[22]. Sustituciones intermedias (10–15 %) logran un balance entre sostenibilidad y desempeño mecánico, mientras que contenidos mayores pueden reducir la resistencia inicial, aunque esta tiende a recuperarse a edades posteriores [23]–[26]. Estos resultados han sido corroborados en estudios internacionales, donde se reportan mejoras en resistencia, durabilidad y densificación de la matriz [27]–[30].

Por otro lado, la incorporación de fibra de vidrio en matrices cementicias ha demostrado mejorar la resistencia a tracción, la ductilidad y el control de fisuración, debido a su capacidad de actuar como puente entre microfisuras [31]–[33]. Dosificaciones entre 0.5 % y 1 % han mostrado incrementos en la resistencia y en la capacidad de absorción de energía, siendo influenciadas por la longitud y distribución de las fibras [34]–[36]. Investigaciones internacionales también reportan mejoras en resistencia post-fisuración, durabilidad y reducción de permeabilidad [37]–[39].

A pesar de los beneficios individuales de la CBCA y la fibra de vidrio, su comportamiento combinado ha sido poco estudiado [40]. En este sentido, su uso conjunto podría generar efectos sinérgicos, donde la CBCA optimiza la microestructura y la fibra controla la fisuración, mejorando simultáneamente la resistencia y la durabilidad del concreto [41], [42].

El presente estudio evalúa el comportamiento mecánico de un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con reemplazos de cemento por CBCA (7 %, 12 % y 17 %) y la incorporación de fibra de vidrio (0.5 % y 1.5 %). Se analizan la resistencia a compresión y tracción indirecta, con el objetivo de determinar el potencial de estas mezclas híbridas como alternativa sostenible para el desarrollo de concretos en el contexto peruano.

Con base en la revisión de la literatura, se plantean las siguientes hipótesis de investigación:

H1: La sustitución parcial del cemento Portland por ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) mejora la resistencia a compresión del concreto hasta un determinado umbral óptimo.

H2: La incorporación de fibra de vidrio incrementa la resistencia a tracción y la capacidad de control de fisuración del concreto.

H3: La combinación de CBCA y fibra de vidrio genera un efecto sinérgico que mejora simultáneamente las propiedades mecánicas en comparación con su uso individual.

El presente estudio aporta al estado del conocimiento al evaluar el efecto combinado de la CBCA y la fibra de vidrio mediante un diseño multifactorial, enfoque que ha sido escasamente abordado en investigaciones previas. Los resultados obtenidos permiten evidenciar una interacción sinérgica entre ambos materiales, proponiendo una alternativa sostenible y mecánicamente eficiente para la producción de concreto en el contexto peruano.

II. METODOLOGIA

La presente investigación es de tipo experimental, con enfoque cuantitativo, y evalúa las propiedades físicas y mecánicas del concreto con CBCA y fibra de vidrio. Se adoptó un diseño multifactorial con el objetivo de analizar los efectos individuales y combinados de las variables estudiadas.

A. Materiales

1) *Cemento*: Se empleó cemento Portland Tipo I (Cemento Sol), común en la construcción peruana por su desempeño estable, disponibilidad local y aptitud para concretos de resistencia media. Este ligante hidráulico de uso general refleja condiciones prácticas de diseño y producción, y su composición química promedio se muestra en la Tabla I.

TABLA I
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL CEMENTO

Composición química	Contenido (% en masa)
SiO ₂	20.8
Al ₂ O ₃	5.3
Fe ₂ O ₃	2.7
CaO	63.5
MgO	2.5
SO ₃	2.8
K ₂ O	0.9
Na ₂ O	0.3
Pérdida por ignición (LOI)	1.2

2) *Agregado fino*: El agregado fino de la Fig. 1, correspondió a arena natural del río Chillón, procedente de la cantera Trapiche en Comas (Lima, Perú). Antes de su uso, el material fue lavado y secado para eliminar impurezas y asegurar una adecuada adherencia con la pasta cementicia. De acuerdo con los ensayos granulométricos realizados conforme a la NTP 400.037 y ASTM C33, la arena empleada presentó una granulometría correspondiente a una textura media, condición reflejada en un módulo de fineza de 2.88. Las pruebas complementarias permitieron obtener un peso específico de 2.57 g/cm^3 , junto con una absorción del 2.23 % y una humedad natural del 2.27 %, parámetros que contribuyen positivamente a la trabajabilidad de la mezcla. Asimismo, los valores del peso unitario, tanto en estado suelto (1771.34 kg/m^3) como compactado (1949.35 kg/m^3), se mantuvieron dentro de los rangos establecidos por la ASTM C128. La Tabla II resume de manera integral los resultados correspondientes a la caracterización física del agregado fino.

TABLA II
PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO FINO

Peso unitario suelto seco:	1771.34	Kg/m ³
Peso unitario compactado seco:	1949.35	Kg/m ³
Peso específico del agregado:	2.570	gr/cm ³
Porcentaje de absorción:	2.234	%
Contenido de humedad:	2.265	%
Módulo de fineza:	2.880	



Fig. 1. Agregado fino.

3) *Agregado grueso*: El agregado grueso de la Fig. 2, fue grava triturada de la cantera Trapiche, en Comas, cuenca del río Chillón (Lima, Perú), lo que aseguró homogeneidad mineralógica con el agregado fino. Presentó un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ", con partículas angulares y superficie rugosa, favoreciendo el engranamiento mecánico con la pasta cementante y mejorando la adherencia en la zona de transición [NTP 400.037]. Los ensayos mostraron un peso específico de 2.709 g/cm^3 , absorción de agua de 0.774 % y humedad natural de 0.328 %, valores dentro de los límites de la NTP 400.037 y

ASTM C127, confirmando su idoneidad para concretos de resistencia media. Los resultados completos se detallan en la Tabla III.

TABLA III
PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO GRUESO

Agregado grueso		
Peso unitario suelto seco:	1479.53	Kg/m ³
Peso unitario compactado seco:	1636.90	Kg/m ³
Peso específico del agregado:	2.709	gr/cm ³
Porcentaje de absorción:	0.774	%
Contenido de humedad (W):	0.328	%
Tamaño máximo nominal (TMN):	3/4"	



Fig. 2. Agregado grueso.

4) *Agua*: El agua empleada para la preparación de las mezclas procedió del suministro público y cumplió las especificaciones de la NTP 339.127. Se corroboró que no contuviera impurezas ni agentes contaminantes, dado que la calidad del agua influye directamente en las reacciones de hidratación del cemento y en la durabilidad del concreto [21], [22]. La relación agua/cemento (a/c) fue 0.56, constante en todas las dosificaciones.

5) *Ceniza de bagazo de caña de azúcar*: La CBCA utilizada se muestra en la Fig. 3, obtenida a partir de residuos agrícolas de caña de azúcar, tratados mediante combustión controlada y molienda fina hasta pasar un tamiz No. 200 ($\leq 75 \mu\text{m}$), lo que asegura partículas finas y altamente reactivas. Este material presenta un alto contenido de sílice amorfa, responsable de su actividad puzolánica. Al reaccionar con la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberada durante la hidratación del cemento, la CBCA produce geles C-S-H adicionales, lo que densifica la matriz del concreto y disminuye su porosidad.

Diversos estudios han demostrado que sustituciones parciales del cemento con CBCA, en proporciones moderadas, mejoran las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto. Martínez et al. [1] y Flores et al. [4] reportaron incrementos significativos en la resistencia a compresión para reemplazos cercanos al 10 %, mientras que Castro [6] y Cordeiro et al. [24], [26] confirmaron resultados similares en

mezclas de alta reactividad. No obstante, cuando la sustitución supera el 20 %, puede producirse una reducción en la resistencia inicial, como lo señalan Torres et al. [3] y Hernández y Ruiz [5].

La reactividad puzolánica de la CBCA depende en gran medida del control de las condiciones de calcinación y molienda. Investigaciones de Cordeiro et al. [24] y Ganesan et al. [27] indican que temperaturas entre 600 y 800 °C, combinadas con una superficie específica elevada, favorecen la formación de sílice amorfa y maximizan la actividad puzolánica.

Según la Tabla IV, se consideran los resultados de Cordeiro et al. [24], Bahurudeen y Santhanam [25], y Silva [9], las composiciones químicas típicas de la CBCA incluyen entre 55–70 % de SiO_2 , 10–20 % de Al_2O_3 , y 5–10 % de Fe_2O_3 , evidenciando su potencial como adición mineral activa en concretos sostenibles.

TABLA IV
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CBCA.

Componente (%)	Cordeiro et al. [24]	Bahurudeen & Santhanam [25]	Silva [9]	Rango típico
SiO_2	68.4	63.2	59.8	55–70
Al_2O_3	14.5	16.1	11.3	10–20
Fe_2O_3	6.8	5.9	4.7	4–10
CaO	3.2	4.5	6.8	3–7
MgO	2.5	2.8	3.1	2–4
K_2O	2.1	3.4	4	2–5
Na_2O	0.7	0.9	0.6	<1
Pérdida de ignición	1.8	2.5	3.4	1–4



Fig. 3. Ceniza de bagazo de caña de azúcar.

6) *Fibra de vidrio*: Las fibras de tipo E y AR (resistentes a medios alcalinos) presentan una composición rica en SiO_2 , CaO , Al_2O_3 y B_2O_3 [10], [14], [15]. Para la investigación, se emplearon fibras de la Fig. 4, con longitudes de 12–20 mm, adecuadas para una dispersión uniforme en la matriz del concreto. Estudios experimentales de Ali et al. [13] y Ortega et al. [14] reportaron incrementos en la resistencia mecánica y una reducción significativa en la propagación de fisuras al

incorporar entre 0.5 % y 1.5 % en volumen de fibra de vidrio. De manera similar, Chen et al. [11] observaron mejoras de hasta 25 % en la resistencia a tracción indirecta.

Estas fibras actúan como puentes entre microgrietas, redistribuyendo los esfuerzos y retardando la propagación de fisuras. Su módulo elástico, comprendido entre 70 y 75 GPa, y su resistencia a tracción cercana a 3 500 MPa, las hacen adecuadas como refuerzo pasivo [10], [13]. En combinación con materiales puzolánicos como la CBCA, diversos estudios (por ejemplo, Zhang et al. [16] y Lee [17]) demuestran efectos sinérgicos en el desempeño mecánico, así como en la durabilidad y la resistencia superficial del concreto, ver Tabla V.

TABLA V
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA FV.

Componente (%)	Ali et al. [13]	Ortega et al. [14]	Zhang et al. [16]	Rango típico
SiO ₂	55	60.2	58.7	55–65
CaO	18	16.5	17.2	15–20
Al ₂ O ₃	12.5	10.8	11	10–13
B ₂ O ₃	7.5	6.3	6	5–8
MgO	3.2	2.9	3	2–4
Na ₂ O + K ₂ O	1.8	2.1	1.5	1–3
Fe ₂ O ₃	0.5	0.6	0.7	<1



Fig. 4. Fibra de vidrio.

B. Diseño

El diseño de mezclas se realizó conforme al método ACI 211.1 [43], el cual establece criterios de dosificación en función de la resistencia, trabajabilidad y características de los agregados, garantizando uniformidad y reproducibilidad experimental.

Se empleó un diseño multifactorial completo para evaluar el efecto individual y combinado de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como reemplazo parcial del cemento y de la fibra de vidrio (FV) como refuerzo. La CBCA se incorporó en tres niveles (7 %, 12 % y 17 %) y la FV en dos (0.5 % y 1.5 %), además de una mezcla patrón sin adiciones. En total, se definieron diez dosificaciones experimentales.

Para cada mezcla se elaboraron cinco probetas cilíndricas de 4×8 pulgadas: tres destinadas al ensayo de compresión (ASTM C39/C39M-24 [39]) y dos al ensayo de tracción indirecta (ASTM C496/C496M-17 [40]). Las muestras fueron curadas durante 28 días bajo condiciones controladas. Las proporciones de los materiales se presentan en la Tabla VI.

TABLA VI
RESUMEN DE LOS NIVELES DE CBCA Y FV

Numero de muestra	Cemento (kg)	Agua (Lt)	AF (kg)	AG (kg)	(CBCA) (kg)	(FV) (kg)
M1	374	209	756	1005	-	-
M2	348	209	756	1005	26	-
M3	329	209	756	1005	45	-
M4	311	209	756	1005	63	-
M5	346	209	756	1005	26	2
M6	342	209	756	1005	26	6
M7	328	209	756	1005	44	2
M8	324	209	756	1005	44	6
M9	309	209	756	1005	63	2
M10	305	209	756	1005	63	6

C. Ensayos en estado fresco

1) *Temperatura*: La temperatura del concreto fresco se midió conforme a la ASTM C1064 y NTP 339.185 [39], utilizando un termómetro digital de inmersión inmediatamente después del mezclado. Este control permitió verificar que la mezcla se mantuviera entre 25 °C y 27 °C, evitando riesgos de fisuración térmica o aceleración del fraguado.

2) *Revenimiento o slump*: La consistencia del concreto fresco se determinó mediante el cono de Abrams, conforme a la ASTM C143 / NTP 339.035 [40]. El ensayo se realizó inmediatamente después del mezclado, llenando el molde en tres capas compactadas con 25 golpes por capa. El asentamiento (slump) permitió evaluar la trabajabilidad y cohesión de la mezcla, considerando el efecto de la CBCA y la fibra de vidrio en la fluidez del concreto. El procedimiento se muestra en la Fig. 5.



Fig. 5. Muestra de medición del Slump del concreto.

3) **Peso unitario:** El peso unitario del concreto fresco se determinó conforme a la ASTM C138 / NTP 339.049 [41], utilizando un recipiente metálico calibrado. La muestra fue colocada en tres capas, compactadas mediante varillado y golpes externos con mazo de goma. Posteriormente, se calculó la densidad del concreto fresco, parámetro empleado para estimar el rendimiento volumétrico de la mezcla.

D. Ensayos en estado endurecido

1). **Resistencia a la compresión:** La resistencia a la compresión se determinó conforme a la ASTM C39 / NTP 339.034 [43], utilizando probetas cilíndricas de 4×8 pulgadas, moldeadas y curadas bajo condiciones controladas. Se elaboraron 50 especímenes correspondientes a 10 diseños de mezcla con diferentes proporciones de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) y fibra de vidrio; para cada diseño se fabricaron 5 probetas, de las cuales 3 fueron ensayadas a los 28 días.

Las pruebas se realizaron en una máquina hidráulica de 100 toneladas, aplicando carga axial continua hasta la falla. El análisis consideró de forma independiente el efecto de la CBCA y de la fibra de vidrio en la resistencia del concreto. El procedimiento se muestra en la Fig. 6(a).

2) **Ensayo a la tracción por compresión diametral:** El ensayo de tracción indirecta se realizó conforme a la ASTM C496 / NTP 339.084 [44], utilizando probetas cilíndricas de 4×8 pulgadas correspondientes a los 10 diseños de mezcla. Para cada diseño se ensayaron 2 probetas a los 28 días de curado. Las muestras se colocaron horizontalmente entre las placas de carga, aplicando compresión diametral continua hasta la falla, lo que permitió determinar la resistencia a tracción indirecta (fct). El análisis evaluó la influencia conjunta de la CBCA y la fibra de vidrio en la ductilidad y el comportamiento post-fisuración del concreto. El procedimiento se muestra en la Fig. 6(b).

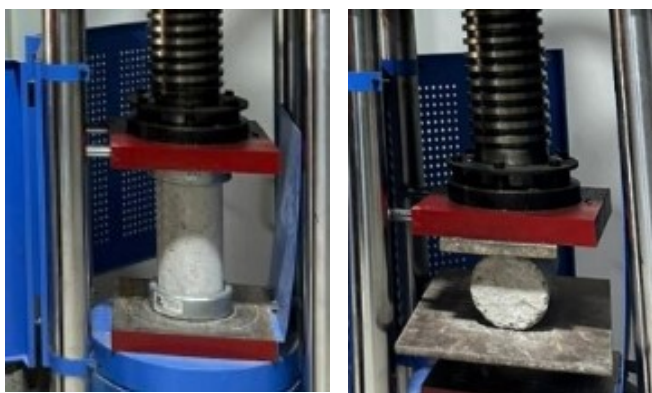


Fig. 6 (a) Ensayo de compresión y (b) Ensayo de Tracción.

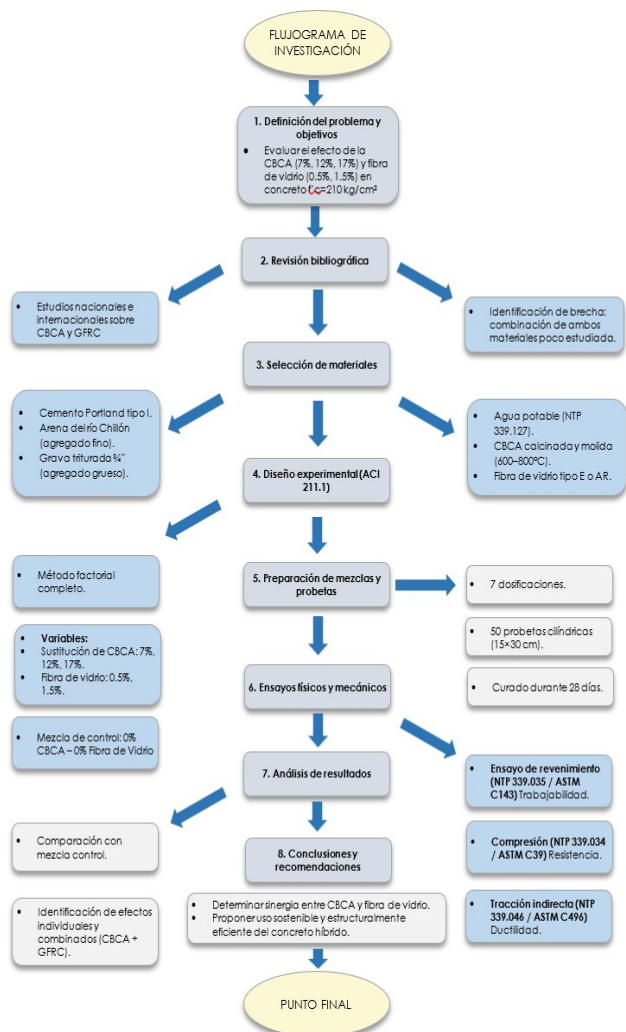


Fig. 7. Diagrama de flujo de la metodología de investigación.

III. RESULTADOS

A. Resultados de los ensayos en estado fresco

1) **Temperatura:** Según los criterios establecidos por ASTM C94 y NTP 339.184, la temperatura del concreto en estado fresco debe mantenerse por debajo de 32 °C, con el fin de prevenir pérdidas en el asentamiento y evitar la incorporación no deseada de aire. Los valores registrados para este parámetro en las diez mezclas experimentales se ilustran en la Fig. 8, con temperaturas entre 23.5 °C y 25.2 °C, las cuales se mantienen dentro del rango permitido. Se observa que el incremento del contenido de CBCA genera un ligero aumento de temperatura, debido al mayor calor de hidratación liberado por el cemento en presencia de material fino reactivo.

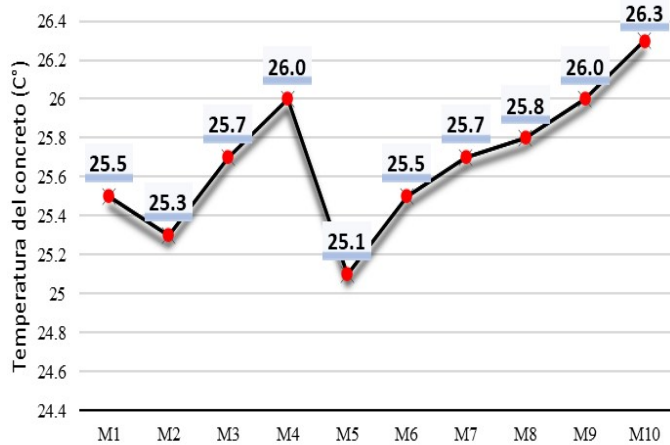


Fig. 8. Incremento del Porcentaje de temperatura.

2) Revenimiento o slump: La Fig. 9 recopila los resultados obtenidos en el ensayo de slump, donde se observa que los valores permanecieron dentro del intervalo de 3 a 4 (76–102 mm), rango que corresponde a una consistencia plástica, aceptable para la colocación y compactación de concreto estructural. Las mezclas con mayor contenido de CBCA y fibra de vidrio presentaron una ligera disminución del asentamiento respecto al patrón, atribuida al mayor grado de absorción y finura de la CBCA y al efecto físico de las fibras sobre la movilidad de la pasta.

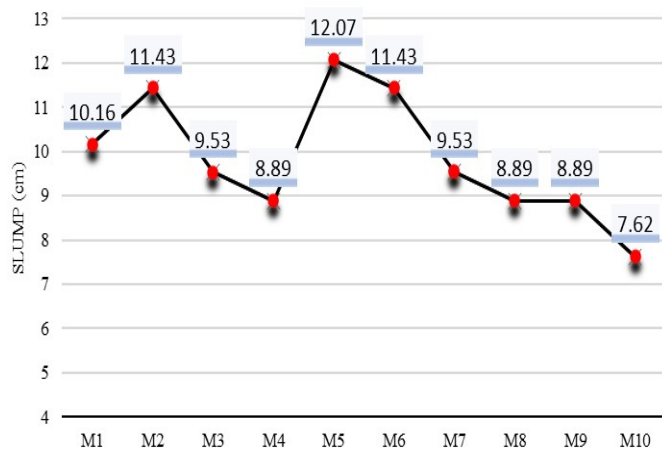


Fig. 9. Revenimiento o Slump.

B. Resultados de los ensayos en estado endurecido

1) Resistencia a la compresión: En la Fig. 10 se presentan los resultados de resistencia a compresión obtenidos a 28 días. La mezcla patrón (0 % CBCA – 0 % FV) alcanzó una resistencia promedio de 21.5 MPa, sirviendo como referencia. La mayor resistencia se registró en la mezcla con 7 % CBCA y 0.5 % FV, con una resistencia de 23.6 MPa, valor que implica un incremento del 10.8 % en comparación con la mezcla patrón. Dicho incremento se asocia tanto a la generación adicional de gel C–S–H derivado de la reacción

puzolánica como al mecanismo de puenteo proporcionado por las fibras, el cual restringe el avance de las microfisuras.

En contraste, la mezcla con 17 % CBCA presentó la menor resistencia, con 18.4 MPa, equivalente a una reducción del 14.5 % frente al patrón. Esto se debe a que una sustitución excesiva de cemento reduce el contenido de clinker disponible para la hidratación inicial, produciendo una matriz menos cohesionada.

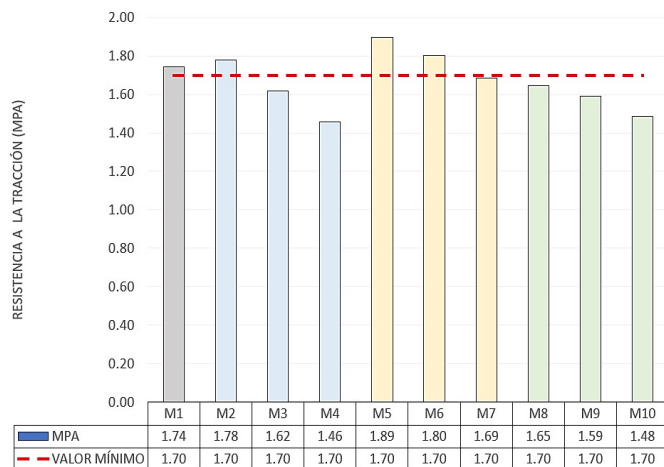


Fig. 10. Resistencia a la Compresión.

Asimismo, según la Tabla VII, el análisis estadístico de la desviación estándar (σ) presentó valores comprendidos entre 0.13 y 0.51 MPa, por lo tanto, se valida la consistencia de los resultados entre las distintas probetas evaluadas.

TABLA VII
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A 28 DÍAS DE LOS DISEÑOS DE MEZCLA DE CONCRETO

	Dosificaciones									
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
P1	21.52	22.15	20.37	18.33	23.55	22.66	21.26	20.75	19.74	18.97
P2	22.03	22.28	20.12	18.08	23.81	22.41	20.88	20.37	19.99	18.84
P3	21.01	21.9	19.99	18.72	23.43	22.79	20.63	20.63	19.48	18.72
$\bar{X}$	21.52	22.11	20.16	18.38	23.60	22.62	20.92	20.58	19.74	18.84
σ	0.51	0.19	0.19	0.32	0.19	0.19	0.32	0.19	0.26	0.13

2) Resistencia a tracción diametral: En la Fig. 11, dentro del conjunto de mezclas evaluadas, la dosificación M5 que incorporó 7 % de CBCA acompañada por una dosificación de 0.5 % de fibra de vidrio (FV), logró posicionarse como la variante con el mayor desempeño en tracción diametral, obteniendo un valor medio de 1.89 MPa, lo que supone un aumento del 8.8 % respecto a la mezcla de referencia. El desempeño observado evidencia la interacción complementaria entre la reactividad puzolánica de la CBCA y la función de refuerzo proporcionada por la fibra de vidrio, interacción que favorece una redistribución más uniforme de las tensiones internas y limita el desarrollo de microfisuras en

la matriz cementicia. Como consecuencia, el material presenta una mayor capacidad para soportar esfuerzos de tracción indirecta.

Asimismo, la mezcla que incorpora 7 % de CBCA y 1.5 % de FV alcanzó una resistencia promedio de 1.80 MPa, equivalente a un incremento del 3.5 % frente al concreto patrón. No obstante, dicho valor resultó menor que el obtenido con una menor fracción de fibra, lo que sugiere que un contenido excesivo de refuerzo tiende a generar zonas de discontinuidad que disminuyen la adherencia matriz-fibra y, en consecuencia, la eficacia del refuerzo.

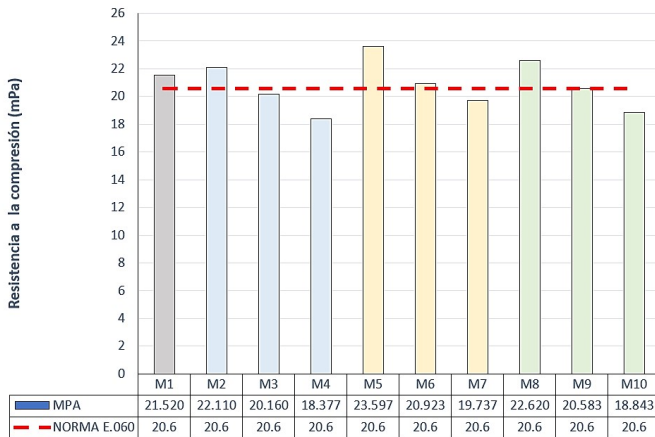


Fig. 11. Resistencia a Tracción Diametral.

Asimismo, según la Tabla VIII, el análisis estadístico de la desviación estándar (σ) presentó valores comprendidos entre 0.01 y 0.03 MPa, por lo tanto, se valida la consistencia de los resultados entre las distintas probetas evaluadas.

TABLA VIII
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DIAMETRAL A 28 DÍAS DE LOS DISEÑOS DE MEZCLA DE CONCRETO

	Dosificaciones									
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
P1	1.72	1.77	1.63	1.47	1.88	1.81	1.70	1.66	1.58	1.46
P2	1.76	1.78	1.61	1.45	1.90	1.79	1.67	1.63	1.60	1.51
$\bar{X}$	1.74	1.78	1.62	1.46	1.89	1.80	1.69	1.65	1.59	1.48
σ	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03

IV. DISCUSIÓN

Diversos análisis especializados han evidenciado que el empleo de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto parcial del cemento genera modificaciones significativas en el desempeño mecánico del concreto. Entre estos trabajos, Martínez et al. [1] demostraron que reemplazar el 10 % del cemento por CBCA reduce la resistencia a compresión en un 12 % respecto al concreto patrón.

Este descenso se atribuye principalmente a la menor presencia de clínker. Sin embargo, los autores destacan beneficios en durabilidad asociados a la reactividad puzolánica. En contraste, en la presente investigación se obtuvo una resistencia máxima de 23.6 MPa con una sustitución de 7 % de CBCA y 0.5 % de fibra de vidrio (FV), representando un incremento del 10.8 % frente al patrón (21.5 MPa). Este resultado sugiere un efecto sinérgico entre la CBCA y la fibra. Este efecto compensa la pérdida de cohesión causada por la sustitución de cemento. De manera similar, Ramírez et al. [2] indicaron que las mezclas con 5–10 % de CBCA logran resistencias a compresión en el rango de 22 MPa a 25 MPa, valores coincidentes con los obtenidos en este estudio. Dichos autores atribuyen este comportamiento a la refinación de la microestructura y la formación adicional de geles C–S–H secundarios, producto de la reacción entre la portlandita (Ca(OH)_2) y los componentes amorfos de la ceniza. En el caso de las mezclas con 17 % de CBCA, la resistencia a compresión disminuyó hasta 18.4 MPa, lo que concuerda con lo observado por Muthadhi y Kothandaraman [3], quienes reportaron que sustituciones superiores al 15 % reducen la resistencia entre 12 % y 20 % por el déficit de fases hidratantes y la formación de vacíos capilares adicionales.

Los ensayos realizados sobre la resistencia a tracción diametral evidenciaron un comportamiento diferenciado en las mezclas modificadas. En particular, la combinación que incorporó 7 % de CBCA junto con 0.5 % de FV registró un valor medio de 1.90 MPa, superando en 8.8 % al concreto patrón, cuya resistencia fue de 1.74 MPa. Dicho desempeño coincide con los márgenes documentados por Singh y Siddique [4], quienes informaron aumentos comprendidos entre 5 % y 11 % cuando se emplean materiales puzolánicos en conjunto con fibras sintéticas. Según estos autores, la presencia de fibras favorece un mecanismo de puenteo capaz de restringir la continuidad de la fisuración, lo que explica la mejora obtenida en este tipo de mezclas. Asimismo, Ganesan et al. [5] evaluaron concretos con 10 % de CBCA y fibras de polipropileno, encontrando resistencias a tracción entre 2.0 y 2.8 MPa, mientras que las mezclas sin fibras alcanzaron apenas 2.1 MPa. Este comportamiento es análogo al observado en el presente trabajo, donde la adición de FV en 0.5 % generó un efecto de refuerzo óptimo, mientras que mayores contenidos (1.5 %) redujeron ligeramente la adherencia matriz-fibra, disminuyendo la eficiencia del refuerzo a 1.80 MPa. Este efecto de saturación también fue documentado por Thomas y John [6], quienes indicaron que dosis excesivas de fibra tienden a generar conglomerados que dificultan la compactación y provocan pérdida de uniformidad en la mezcla. Por otra parte, el desempeño decreciente de las mezclas con altos porcentajes de CBCA (≥ 17 %) sin fibra, cuya resistencia a tracción se redujo hasta 1.46 MPa, coincide con los hallazgos de Khan et al. [7], quienes observaron que la sustitución superior al 15 % reduce significativamente la cohesión interna y la resistencia a tracción indirecta, al incrementarse la porosidad y disminuir el contenido de calcio reactivo. Sin embargo, los resultados muestran que emplear 7

% de CBCA junto con 0.5 % de fibra de vidrio mantiene un equilibrio adecuado entre resistencia a compresión y tracción, logrando un desempeño mecánico comparable o superior al de mezclas convencionales con adiciones como ceniza volante o escoria granulada.

V. CONCLUSIONES

Los ensayos realizados evidenciaron que la incorporación conjunta de CBCA y FV modifica significativamente el comportamiento mecánico del concreto, afectando su respuesta frente a solicitaciones estructurales. El análisis comparativo de la resistencia a compresión y tracción diametral mostró que tanto el reemplazo parcial de cemento por CBCA como la adición de FV no generan un efecto directamente proporcional, sino que dependen del equilibrio entre ambos componentes. Esto permitió identificar un punto de dosificación donde la mezcla logra un balance adecuado entre aporte puzolánico y refuerzo fibroso.

La configuración del diseño M5 con 7 % de CBCA y 0.5 % de FV resultó la más eficiente, alcanzando incrementos de 10.8 % y 8.8 % respecto al concreto patrón, en resistencia a la compresión y tracción diametral respectivamente. En contraste, el reemplazo del 17 % de cemento por CBCA redujo notablemente las propiedades mecánicas, con valores de 18.84 MPa en compresión y 1.46 MPa en tracción.

Los beneficios ambientales se evidencian en la disminución del consumo de clinker y en el aprovechamiento de un residuo agroindustrial abundante, esto contribuye a iniciativas alineadas con enfoques contemporáneos de sostenibilidad y economía circular en el sector construcción.

Se sugiere que futuras investigaciones profundicen en el estudio microestructural de estas mezclas a fin de esclarecer los mecanismos que gobiernan su funcionamiento, evaluar su respuesta frente a condiciones agresivas y determinar su viabilidad en elementos estructurales de mayor exigencia.

Desde el punto de vista estadístico, si bien se presentan valores promedio y desviaciones estándar, el diseño experimental multifactorial empleado permite la aplicación de un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la significancia de las variables independientes (porcentaje de CBCA y contenido de fibra de vidrio), así como su interacción (CBCA $\times$ FV). De manera preliminar, los resultados evidencian que ambas variables influyen en el comportamiento mecánico del concreto, observándose un efecto sinérgico en niveles bajos de sustitución (7 % CBCA y 0.5 % FV). Se recomienda que futuras investigaciones incorporen análisis inferenciales para confirmar la significancia estadística de estos efectos.

Desde una perspectiva económica, la sustitución parcial del cemento por CBCA puede representar una reducción en los costos de producción, al tratarse de un residuo agroindustrial de bajo valor. Sin embargo, la incorporación de fibra de vidrio podría incrementar el costo total de la mezcla. En consecuencia, es necesario evaluar el equilibrio entre desempeño mecánico y viabilidad económica. El presente estudio no incluye un análisis de costos detallado, lo cual se

reconoce como una limitación y una línea futura de investigación.

REFERENCIAS

- [1] A. Martínez, J. López y C. Ramírez, "Efecto de la ceniza de bagazo de caña de azúcar en las propiedades del concreto," *Revista de Investigación en Ingeniería Civil*, vol. 5, no. 2, pp. 45–54, 2019. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/356404471_EFECTO_DE_LA_CENIZA_DE_BAGAZO_DE_CANA_DE_AZUCAR_EN_LAS_PROPIEDADES_DEL_CONCRETO
- [2] L. Ramírez y M. Gómez, "Ceniza del bagazo de caña de azúcar para mejorar la resistividad y resistencia del hormigón," *Revista de Materiales de Construcción*, vol. 7, no. 3, pp. 101–110, 2020. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/364333426_CENIZA_DEL_BAGAZO_DE_CANA_DE_AZUCAR_PARA_MEJORAR_LA_RESISTIVIDAD_Y_RESISTENCIA_DEL_HORMIGON
- [3] D. Torres, R. Alarcón y P. Núñez, "Evaluación de resistencia a la compresión de concretos sustentables," *Revista Científica de Ingeniería*, vol. 8, no. 1, pp. 33–42, 2021. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/364355733_Evaluacion_de_resistencia_a_la_compresion_de_concretos_sustentables
- [4] M. Flores et al., "Análisis del desempeño de concreto con sustitución de ceniza de bagazo de caña en zapatas aisladas experimentales," *Revista Científica Multidisciplinaria*, vol. 7, no. 1, pp. 88–96, 2023. doi: 10.37811/cl_rcm.v7i1.4746.
- [5] P. Hernández y J. Ruiz, "Efecto de la ceniza de bagazo de caña de azúcar en las propiedades mecánicas del concreto permeable," *Revista de Tecnología de la Construcción*, vol. 4, no. 1, pp. 55–64, 2023. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/377550562_Efecto_de_la_ceniza_de_bagazo_de_cana_de_azucar_en_las_propiedades_mecanicas_del_concreto_permeable
- [6] J. Castro, "Influencia de la ceniza de bagazo de caña en el concreto," *High Tech*, vol. 4, no. 1, pp. 12–23, 2023. doi: 10.46363/high-tech.v4i1.3.
- [7] R. Morales y F. Pineda, "Evaluación de las propiedades mecánicas de concreto preparado con ARAT y CBCA," *Revista de Ingeniería y Materiales*, vol. 6, no. 2, pp. 76–84, 2023.
- [8] S. Delgado y T. Álvarez, "Efectos de la sustitución parcial de cemento por ceniza de bagazo de caña de azúcar en el asentamiento y resistencia a la compresión del concreto," *Revista Ingeniería y Sociedad*, vol. 12, no. 4, pp. 201–210, 2024.
- [9] P. Silva, "Substituição parcial do cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar na produção de concreto," *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, vol. 15, no. 3, pp. 150–162, 2024.
- [10] A. Singh y R. Kaushik, "Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, pp. 103–112, 2018.
- [11] Z. Chen et al., "Mechanical characterization of glass fiber reinforced concrete," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 9, 2024. doi: 10.1007/s41062-024-01429-1.
- [12] V. Kumar, "Effect of glass fibers on strength of concrete," *Journal of Emerging Science and Technology*, vol. 14, no. 165, pp. 1–8, 2023.
- [13] M. Ali et al., "Durability of glass fiber reinforced concrete," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 16, no. 5, 2022. doi: 10.1186/s40069-022-00525-9.
- [14] F. Ortega et al., "Microstructural performance of glass fiber concretes," *Journal of Materials Science and Engineering*, vol. 7, pp. 223–235, 2022.
- [15] R. Gupta, "Glass fibers reinforced concrete: Overview on mechanical properties," *Construction Materials Review*, vol. 6, no. 4, pp. 310–322, 2021.
- [16] H. Zhang et al., "Performance of hybrid fiber concretes with glass fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 272, 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.12180.
- [17] K. Lee, "Glass fiber reinforced concrete for sustainable construction," *E3S Web of Conferences*, vol. 412, 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202341203003.

- [18]Y. Wang et al., "Analytical modeling of fiber reinforced concrete," International Journal of Civil Engineering, vol. 2022, Art. ID 1531570.
- [19]D. Oliveira et al., "Experimental study on glass fiber concretes," Materials Today: Proceedings, vol. 33, pp. 231–239, 2021.
- [20]T. Johnson y P. Liu, "Glass fiber concrete: Advances in mechanical and durability properties," Wiley Journal of Civil Engineering and Materials, vol. 14, no. 2, pp. 78–91, 2022.
- [21]A. M. Neville, Properties of Concrete, 5th ed. London, U.K.: Pearson Education Limited, 2012.
- [22]P. K. Mehta y P. J. M. Monteiro, Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2014.
- [23]S. Mindess, J. F. Young y D. Darwin, Concrete, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2003.
- [24]G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho y E. M. R. Fairbairn, "Use of ultrafine sugar cane bagasse ash as mineral admixture for concrete," ACI Materials Journal, vol. 106, no. 5, pp. 531–538, 2009. doi: 10.14359/51663258.
- [25]A. Bahurudeen y M. Santhanam, "Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete," Construction and Building Materials, vol. 98, pp. 1–11, 2015. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.004.
- [26]G. C. Cordeiro, R. D. T. Filho, L. M. Tavares y E. M. R. Fairbairn, "Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars," Cement and Concrete Composites, vol. 34, no. 4, pp. 488–496, 2012.
- [27]K. Ganesan, K. Rajagopal y K. Thangavel, "Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material," Cement and Concrete Composites, vol. 29, no. 6, pp. 515–524, 2007.
- [28]T. A. Bhat y B. Bhattacharjee, "Glass fibre reinforced concrete and its applications: A review," Materials Today: Proceedings, vol. 33, pp. 2876–2881, 2020.
- [29]J. Branton, S. Das, S. Y. Kenno y C. Taylor, "Mechanical behaviour of glass fibre reinforced concrete made with glass fibres from thermally recycled wind turbine blade waste," Construction and Building Materials, vol. 120, pp. 439–448, 2016.
- [30]A. Bentur y S. Mindess, Fibre Reinforced Cementitious Composites, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.
- [31]B. Mobasher, Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2011.
- [32]ASTM C33/C33M-24a, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2024.
- [33]ASTM C29/C29M-23, Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2023.
- [34]ASTM C128-22, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2022.
- [35]ASTM C127-24, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2024.
- [36]ASTM C136/C136M-19, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2019.
- [37]ASTM C70-20, Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [38]ASTM C143/C143M-23, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2023.
- [39]ASTM C39/C39M-24, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2024.
- [40]ASTM C496/C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- [41]ASTM C1064/C1064M-23, Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2023.
- [42]NTP 339.127:2019, Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo, INACAL, Lima, Perú, 2019.
- [43]ACI Committee 211, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91, Reapproved 2009), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2009.