

Sugarcane ash: Compressive strength and rheology of a self-compacting concrete

Juan Mego Zapata, Ing.¹; Kevin Meza Caballero, Ing.²; Alexander Vega Anticona, Dr.³; Danny Chávez Novoa, MSc.⁴; Cinthya Alvarado, MSc.⁵; Hernán Alvarado-Quintana, Dr.⁶; Iván Vásquez Alfaro, Ing.^{7*}.

^{1,2}Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, juan.071.leo@gmail.com; kevinmezac@gmail.com;

⁵Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Privada del Norte, Perú; cynthia.alvarado@upn.edu.pe;

^{3,4,6,7}Departamento de Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, avega@unitru.edu.pe; dchavez@unitru.edu.pe; halvarado@unitru.edu.pe; ivasqueza@unitru.edu.pe

* Corresponding author: ivasqueza@unitru.edu.pe . Av. Juan Pablo s/n, Phone 044 633952

Abstract– In the present research work, the mechanical and rheological properties of a self-compacting concrete (CAC) were determined, with additions of sugar cane ash (CCA) as a pozzolanic material; plus, a superplasticizer additive to maintain workability. The mechanical properties were determined as a function of curing time. The CCA was collected from the cane fields during the harvest in the province of Ascope (Trujillo - Peru) after burning them, then it went through a grinding process using only the N°325 mesh pass-through in this case; the Portland cement (PC) used was the type I; the fine aggregates (coarse sand) and coarse aggregate were acquired from the quarries of El Milagro (Trujillo-Peru). The superplasticizer additive used was Euco Plastol 3000PC. The mix design was based on the recommendations stipulated in ACI – 211, the percentages of CCA additions were (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, and 3.5) %, and the superplasticizer additive was used at (0.69, 0.72, 0.77, 0.85, 0.98, 1.18, 1.45 and 1.89)% in both cases with respect to the weight of the cement used, the data collection times of mechanical tests (ASTM C39 and ASTM C469) were performed at (7, 14, 28 and 56) days after making the mixtures; In addition, characterization was carried out in the fresh state of the mixture, according to the ASTM C1611 and ASTM C1621 standards and the EFNARC (2002) and GPE (2005) specifications in order to evaluate their fluidity, the CCA was characterized by AT D, AT G, and RDX. The aggregates were characterized by the standards ASTM C136, ASTM C566, ASTM C29, ASTM C127, and ASTM C128. From the results obtained, we can mention that the addition of CCA exceeds the limit of the recommended water/fines ratio, although it has shown to improve the effectiveness of self-compacting concrete, partially; the evaluation of the filling capacity determined that the samples with the addition of CCA (0.5, 1.0, 1.5 and 2.0)% are class SF2, while the samples with the addition of (2.5, and 3.5)% belong to the SF3 class; the passability analysis according to ASTM 1621 classified the samples with pozzolan addition of (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, and 3.0)% as mixtures with no visible blocking, however for the sample with 3.5% of addition presents an apparent blockage, with respect to fluidity all samples were classified as VS2 type, however the samples with addition of CCA at 3.0 and 3.5% present a high degree of viscosity; the superplasticizer additive is the factor with the greatest influence on

the rheological properties of the CAC, the mechanical properties increased as a function of the curing time, among the values obtained are those of 622 kg/cm², in the case of compressive strength and a modulus of elasticity of 317.962 kg/cm², which are values that exceed the samples without the use of CCA, so these are considered to have pozzolanic properties.

Keywords-- sugar cane ash, self-compacting concrete, compressive strength, rheological properties, superplasticizer.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.308>

ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Ceniza de caña de azúcar: resistencia a la compresión y reología de un hormigón autocompactante

Sugarcane ash: Compressive strength and rheology of a self-compacting concrete

Juan Mego Zapata, Ing.¹; Kevin Meza Caballero, Ing.²; Alexander Vega Anticona, Dr.³; Danny Chávez Novoa, MSc.⁴; Cinthya Alvarado, MSc.⁵; Hernán Alvarado-Quintana, Dr.⁶; Iván Vásquez Alfaro, Ing.^{7*}.

^{1,2}Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, juan.071.leo@gmail.com; kevinmezac@gmail.com;

⁵Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Privada del Norte, Perú; cinthya.alvarado@upn.edu.pe;

^{3,4,6,7}Departamento de Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, avega@unitru.edu.pe; dchavez@unitru.edu.pe; halvarado@unitru.edu.pe; ivasqueza@unitru.edu.pe

* Corresponding author:

ivasqueza@unitru.edu.pe

Av. Juan Pablo s/n, Phone 044 633952

Resumen– En el presente trabajo de investigación se determinaron las propiedades mecánicas y reológicas de un concreto autocompactante (CAC), con adiciones de ceniza de caña de azúcar (CCA) como material puzolánico; más un aditivo superplastificante para mantener la trabajabilidad. Las propiedades mecánicas se determinaron en función del tiempo de curado. El CCA fue recolectado de los cañaverales durante la zafra en la provincia de Ascope (Trujillo - Perú) luego de quemarlos, después pasó por un proceso de molienda utilizando únicamente el pasante de malla N° 325 en este caso; el cemento portland (PC) utilizado fue tipo I; los agregados finos (arena gruesa) y agregado grueso (confitillo) fueron adquiridos de las canteras de El Milagro (Trujillo-Perú). El aditivo superplastificante utilizado fue Euco Plastol 3000PC. El diseño de la mezcla se basó en las recomendaciones estipuladas en ACI – 211, los porcentajes de adiciones de CCA fueron (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 y 3.5) %, el aditivo superplastificante se utilizó en (0.69, 0.72, 0.77, 0.85, 0.98, 1.18, 1.45 y 1.89) % en ambos casos con respecto al peso del cemento utilizado, los tiempos de toma de datos de los ensayos mecánicos (ASTM C39 y ASTM C469) se realizaron a los (7, 14, 28 y 56) días después hacer las mezclas. Además, se realizó la caracterización en estado fresco de la mezcla, según las normas ASTM C1611 y ASTM C1621 y las especificaciones EFNARC (2002) y GPE (2005) para evaluar su fluidez, los CCA se caracterizaron por ATD, ATG y DRX. Los agregados fueron caracterizados por las normas ASTM C136, ASTM C566, ASTM C29, ASTM C127 y ASTM C128. De los resultados obtenidos, podemos mencionar que la adición de CCA supera el límite de la relación agua/finos recomendada, aunque ha demostrado mejorar la efectividad del concreto autocompactante, parcialmente; la evaluación de la capacidad de llenado determinó que las muestras con adición de CCA (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0) % son clase SF2, mientras que las muestras con adición de (2.5, y 3.5) % pertenecen a la clase SF3; el análisis de transitabilidad según la norma ASTM 1621 clasificó las muestras con adición de puzolana de (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0) % como mezclas sin bloqueo visible, sin embargo para la muestra con 3.5% de adición presenta bloqueo aparente, con

respecto a la fluidez todas las muestras fueron clasificadas como tipo VS2, sin embargo las muestras con adición de CCA al 3.0 y 3.5% presentan un alto grado de viscosidad; el aditivo superplastificante es el factor de mayor influencia en las propiedades reológicas del CAC, las propiedades mecánicas aumentan en función del tiempo de curado, entre los valores obtenidos se encuentran los de 622 kg/cm², en el caso de la resistencia a la compresión y un módulo de elasticidad de 317.962 kg/cm², valores que superan a las muestras sin uso de CCA, por lo que se considera que tienen propiedades puzolánicas.

Palabras clave-- ceniza de caña de azúcar, concreto autocompactante, resistencia a la compresión, propiedades reológicas, superplastificante.

Abstract– In the present research work, the mechanical and rheological properties of a self-compacting concrete (CAC) were determined, with additions of sugar cane ash (CCA) as a pozzolanic material; plus, a superplasticizer additive to maintain workability. The mechanical properties were determined as a function of curing time. The CCA was collected from the cane fields during the harvest in the province of Ascope (Trujillo - Peru) after burning them, then it went through a grinding process using only the N° 325 mesh pass-through in this case; the Portland cement (PC) used was the type I; the fine aggregates (coarse sand) and coarse aggregate were acquired from the quarries of El Milagro (Trujillo-Peru). The superplasticizer additive used was Euco Plastol 3000PC. The mix design was based on the recommendations stipulated in ACI – 211, the percentages of CCA additions were (0.5, 1.0, 1.5 2.0, 2.5, 3.0, and 3.5) %, and the superplasticizer additive was used at (0.69, 0.72 0.77, 0.85, 0.98, 1.18, 1.45 and 1.89) % in both cases with respect to the weight of the cement used, the data collection times of mechanical tests (ASTM C39 and ASTM C469) were performed at (7, 14, 28 and 56) days after making the mixtures; In addition, characterization was carried out in the fresh state of the mixture, according to the ASTM C1611 and ASTM C1621 standards and the EFNARC (2002) and GPE (2005) specifications in order to evaluate their fluidity, the CCA was characterized by ATD, ATG, and RDX.

The aggregates were characterized by the standards ASTM C136, ASTM C566, ASTM C29, ASTM C127, and ASTM C128. From the results obtained, we can mention that the addition of CCA exceeds the limit of the recommended water/fines ratio, although it has shown to improve the effectiveness of self-compacting concrete, partially; the evaluation of the filling capacity determined that the samples with the addition of CCA (0.5, 1.0, 1.5 and 2.0) % are class SF2, while the samples with the addition of (2.5, and 3.5) % belong to the SF3 class; the passability analysis according to ASTM 1621 classified the samples with pozzolan addition of (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, and 3.0)% as mixtures with nonvisible blocking, however for the sample with 3.5% of addition presents an apparent blockage, with respect to fluidity all samples were classified as VS2 type, however the samples with addition of CCA at 3.0 and 3.5% present a high degree of viscosity; the superplasticizer additive is the factor with the greatest influence on the rheological properties of the CAC, the mechanical properties increased as a function of the curing time, among the values obtained are those of 622 kg/cm², in the case of compressive strength and a modulus of elasticity of 317.962 kg/cm², which are values that exceed the samples without the use of CCA, so these are considered to have pozzolanic properties.

Keywords-- sugar cane ash, self-compacting concrete, compressive strength, rheological properties, superplasticizer.

I.- INTRODUCCION

La construcción es considerada una de las actividades económicas más demandantes de mano de obra y ejerce un efecto multiplicador en la economía de los países en vías de desarrollo como es el caso del Perú, por lo que este sector está en constante evolución en temas de procesos, productos y caracterización de los mismos, en el mercado regional se ofrecen concretos especiales, entre ellos, el denominado concreto autocompactante (CAC), cuya principal característica es su alta fluidez, sin segregación, de esta forma tiene la capacidad de llenar los encofrados de alta densidad encapsulando el refuerzo sin acción mecánica, muchas de las obras emblemáticas de las regiones de nuestro país actualmente hacen uso de esta tecnología, siendo esta una opción en el sector debido a su relación costo/beneficio; además de la tendencia de construcción los diseños modulares altos, la demanda de estos concretos especiales se espera que se incrementen [1]. Por otro lado, el departamento de La Libertad, es el primer productor de caña de azúcar, esta región ha presentado un crecimiento de 45,8 % y concentró el 55,3 % de la producción total de caña de azúcar; a nivel nacional, la producción de caña de azúcar ascendió a 693 278 toneladas, superior en 8,8 % a lo alcanzado en similar mes del 2020, según el informe técnico, Perú: Panorama Económico Departamental del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), así que la cantidad de biomasa que se genera a partir de la caña de azúcar es una cifra a tener en cuenta, más si esta se quema a campo abierto, sin ningún tipo de control o en su defecto después de ser extraído los jugos, nuevamente se genera biomasa de caña de azúcar que es dispuesta en forma de combustible [2,3]; para tener una idea más clara de la cantidad de la generación de

residuos de bagazo de caña, podemos establecer que por cada tonelada de caña procesada se generan (270 - 290) kg de bagazo [4], y por cada tonelada de bagazo se produce 23,8 kg de ceniza [5], esto es más de 16 000 toneladas de cenizas de caña de azúcar (CCA) que se producen aproximadamente. Los residuos de procesos agrícolas se evalúan actualmente para mejorar las propiedades mecánicas de mezclas de cemento, así por ejemplo tenemos el uso de la ceniza de cascarilla de arroz con un alto contenido en sílice, el uso de estos residuos podría reducir el consumo de Clinker, principal componente del cemento, pues se ha reportado actividad puzolánica en estos residuos [6]. No debemos olvidar que la producción de Clinker emite CO₂ debido a los procesos térmicos a los que se somete especialmente la piedra caliza; por lo que su menor uso, disminuye las emisiones de CO₂, esperando no afectar de forma inapropiada las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas de cemento [3],[7]. La composición química de muestras orgánicas suele ser variable, pues dependen de las condiciones de crecimiento de las mismas; por lo que el potencial real de las cenizas de caña de azúcar (CCA), deben de ser evaluados y sea considerado un aditivo y/o puzolana en las mezclas de cemento, pues este residuo (CCA) tienen grandes cantidades de sílice en estado amorfo y/o cristalino, [8-9]. Algunas aplicaciones de estos residuos (CCA), tenemos la producción de cerámicos [10], compuestos de fibrocemento [11] y prefabricados de cemento [12].

Asimismo, se viene investigando la aplicación de diferentes tipos de cenizas en el concreto autocompactante que mejora sus propiedades mecánicas, reológicas y ambientales. [13] – [16]. Sin embargo, falta mayor investigación de la aplicación de la ceniza de caña de azúcar en las propiedades mencionadas.

Por otro lado los concretos autocompactantes (CAC), tienen alta capacidad de fluidez para cubrir encofrados a diferentes rangos de densidad de refuerzo simplemente por la acción de su propio peso, sin la necesidad de ningún tipo de compactación, sin segregación ni indicios de bloqueo [17]; de esta forma el objetivo del presente trabajo de investigación es evaluar el efecto de la adición de contenidos de CCA a una mezcla de cemento para la obtención de CAC, en función de su actividad puzolánica, haciendo uso de aditivo superplastificante para lograr las propiedades reológicas propias de este tipo de concreto. De forma específica se determinó la influencia de la adición de ceniza de caña en la resistencia a la compresión y reología del concreto autocompactante.

II.- MATERIALES Y MÉTODOS

A.- MATERIALES

Ceniza de caña de azúcar: Las muestras de ceniza de caña fueron obtenidas de los propios terrenos de cultivo después de que estos fueron quemados, el lugar fue, los

campos de la provincia de Ascope, La Libertad – Perú; las muestras fueron molidas y tamizadas, siendo utilizado solo el pasante de malla N.º 325. Se recolecto en total 25 Kg. El proceso de molienda se realizó en un molino de bolas por un tiempo de 48 horas.

Cemento: El cemento utilizado fue de tipo Portland I, de la marca Pacasmayo.

Agregados y agua: Se utilizaron agregados de las canteras de El Milagro (Trujillo-Perú). Los tamices (ASTM E11) fueron N.º 3/4, N.º 1/2, N.º 3/8, N.º 4, N.º 8, N.º 16, N.º 30, N.º 50, N.º 100, N.º 200. El agua para el proceso de mezcla y/o amasado fue agua potable.

Aditivo superplastificante: Euco Plastol 3000PC.

B.- SECUENCIA EXPERIMENTAL

Etapa 1: Caracterización de muestras de caña de azúcar (ATD y ATG) y las cenizas de caña de azúcar (DRX). El ATG y ATG se realizó en el equipo Setsys Evolution; se utilizó una atmosfera de nitrógeno. Temperatura máxima 910°C, velocidad de calentamiento de 20°C/min, para el caso de DRX, se utilizó un espectrómetro de Fluorescencia de Rayos x, de marca Bruker con el modelo S2 -Picofox (fuente de molibdeno); se utilizó pasante malla de 75 µm (ASTM C25).

Etapa 2: Caracterización de agregados: Granulometría (ASTM C136), Humedad (ASTM C566), Peso unitario (ASTM C29), Peso específico y absorción (ASTM C127) y (ASTM C 128). Los equipos se secado y tamiza utilizados son de la marca ELE International.

Etapa 3: Diseño de mezcla inicial: ACI 211; modificación por el uso de aditivo, adecuación a las especificación y directrices para la concreto autocompactante (EFNARC [2002]) y el grupo europeo para concreto autocompactante (GPE [2005]). Se utilizó una mezcladora de concreto (Power –Force/125 litros) realizándose un mezclado continuo durante 15 minutos.

Etapa 4: Ensayos en estado fresco de mezclas (ASTM C1611 y ASTM C1621), adecuación (EFNARC 2002) y (GPE 2005). La capacidad de relleno se realizó sobre superficie plana, no absorbente, rígida y horizontal, las marcas de diámetros realizados fueron de 550, 650, 750 y 850 mm, se utilizó el diámetro menor del cono a usar (Abrams), el volumen de concreto a utilizar por muestra fue de 7 litros. Según GPE(2005), los asentamientos se clasifican según la Tabla 1. EFNARC (2002) sugiere un valor por lo menos de 650 mm para un concreto autocompactante.

TABLA 1. CLASES DEL FLUJO DE ASENTAMIENTO (GPE, 2005)

Clase	Asentamiento(mm)	Aplicaciones
SF1	de 550 a 650	Estructuras de baja densidad de armaduras
SF2	de 660 a 750	Estructuras de moderada densidad de armaduras
SF3	de 760 a 850	Estructuras de alta densidad de armaduras

Para el caso de la fluidez, esta se realizó en una superficie plana, no absorbente, rígida y horizontal se trazó un diámetro de 500 mm (T₅₀₀) y el diámetro menor del cono a usar (Abrams). Se tomo el tiempo que tarda el concreto en alcanzar el círculo de 500 mm de diámetro, contado desde el inicio del levantamiento del cono. Se expresará con una precisión de ± 0.2 s. La especificación GPE (2005) clasifican al valor del resultado según la Tabla 2; en EFNARC (2002) indican mayores tiempos, siempre y cuando no presente indicios de segregación; la evaluación de la capacidad de paso, se realizó en una superficie plana, no absorbente, rígida y horizontal, se marcó la base con un diámetro de 300 mm y el diámetro menor del cono a usar (Abrams); se colocó el cono sobre el círculo de diámetro de 100 mm (cono invertido); se colocó el anillo J (diámetro central de 300 mm y de espesor 25 mm, con 16 varillas de acero lisas de diámetro de 16 mm espaciadas uniformemente alrededor del anillo), el volumen de concreto vertido fue de 7.0 litros de forma continua y sin ningún tipo de compactación; para este caso se midió el tiempo que tarda el concreto en alcanzar al círculo de 500mm, contado desde el inicio del levantamiento del cono. La Tabla 3 muestra las formas de evaluación de bloqueos. Además de los criterios mencionados en la evaluación del estado fresco de las mezclas, se evaluó de forma cuantitativamente la estabilidad del concreto autocompactante, mediante el denominado índice visual de estabilidad (VSI) cuyos valores se muestran en la Tabla 4; de cumplir con ello, la mezcla fue optimizada utilizando el aditivo superplastificante.

TABLA 2. CLASES DE VISCOSIDAD DE CONCRETO AUTOCOMPACTANTE (GPE, 2005)

Clase	T ₅₀₀ (s)	Aplicación
VS1	≤ 2	Adecuada capacidad de llenado aún con alta densidad de armadura. Propenso a presentar exudación y segregación
VS2	> 2	Disminución de acabo superficial, posibilidades de retraso de llenados, mejor distribución de presión de llenado

TABLA 3. EVALUACIÓN DE BLOQUEO. (ASTM C1621)

Diferencia entre el flujo de asentamiento y el flujo del anillo J	Evaluación de bloqueo
0 a 25 mm	Bloqueo no visible.
25 a 50 mm	Bloqueo mínimo a notable.
> 50 mm	Bloqueo notable a extremo.

TABLA 4. VALORES DEL ÍNDICE DE ESTABILIDAD VISUAL (ASTM C1611)

Valor VSI	Criterio
0 (muy estable)	No hay evidencia de segregación ni exudación de agua.
1 (estable)	No hay evidencia de segregación y se observa una ligera exudación como brillo en la superficie de la masa del concreto.
2 (inestable)	Se nota un halo ligero ≤ 10 mm y/o algún agregado apilado dentro de la masa de concreto
3 (muy inestable)	Se nota una clara segregación por un halo grande en el mortero > 10 mm y/o un apilamiento grande de agregado en el centro de la masa de concreto.

Etapa 5: Los ensayos en estado endurecido se hicieron según las normas ASTM C39 y ASTM C469; los tiempos de curado fueron de (7, 14, 28 y 56) días para el caso de los ensayos a compresión, mientras que el ensayo de módulo de elasticidad fue de (28 y 56) días; el equipo utilizado para estos ensayos fue de la marca ELE International – ADR 2000, la velocidad de carga fue de 5.30 kN/s, para el de compresión y de 4.25 kN/s, para el de módulo de elasticidad, además en este último ensayo, se utilizó micrómetros sujetos a dos anillos concéntricos durante el ensayo, los tamaños de las muestras en cada caso setomaron de las propias normas, de esta forma la actividad puzolánica se evaluó de forma mecánica (ensayos mecánicos descritos).

III.- RESULTADOS Y DISCUSION

A.- Análisis térmico de muestra de caña de azúcar

En la Fig. 1 se aprecia los datos correspondientes a los análisis de ADT y ATG de la muestra de caña de azúcar, de ellas se muestra una fuerte caída de % de masa sobre los 375°C hasta casi los 780°C, en el rango de temperaturas (700°C) que según [18], la quema de biomasa de caña de azúcar genera altos porcentajes de sílice amorfa; siendo la temperatura máxima de quema de caña 730°C, en promedio (medición de campo), se decidió usar de forma directa las cenizas de caña obtenidas de la quema en campo, los resultados del análisis químico de las muestras utilizadas se reportan en la Tabla 5.

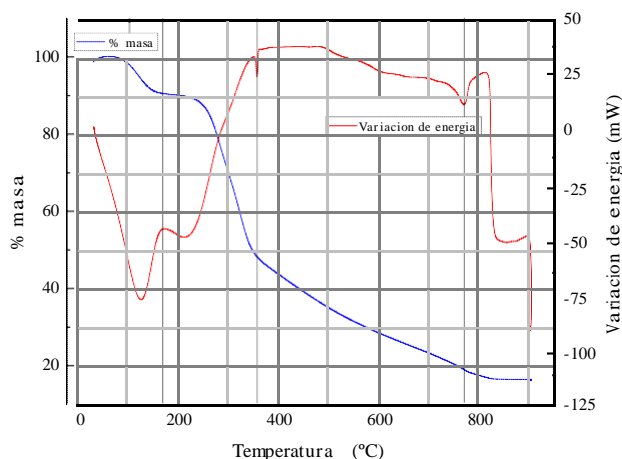


Fig. 1. Análisis térmico de muestra de caña de azúcar.

B.- Análisis químico de cenizas de caña de azúcar

La Tabla 5 muestra los porcentajes de componentes de las cenizas de caña de azúcar obtenidas, de ellas según ASTM C618 se clasifica como una puzolana de tipo ceniza volante de clase F.

C.- Caracterización de agregados

Arena fina: La Tabla 6 indica que la densidad relativa aislada

fue de 2.63 g/cm³, el porcentaje de absorción fue de 0.85%, el porcentaje de humedad fue de 1.10%, lo que señala que esta dentro del rango de densidades para agregados normales, agregados con baja porosidad, además de mínimo de adición de agua de amasado [19]. Los resultados obtenidos del peso unitario compacto seco (PUCS) y peso unitario suelto seco (PUSS) corresponden a 1872 kg/m³ y 1666 kg/m³ respectivamente; un módulo de finura es de 2.7; por lo mencionado y lo que se observa en la Fig.2 podemos concluir que el agregado fino posee una granulometría que favorece la trabajabilidad, docilidad y resistencia de la concreto.

TABLA 5. ANALISI QUIMICO DE CENIZAS DE CAÑA

Componente	%	Clasificación F (ASTM C618)
SiO ₂	79.12	70.00 % (mínimo)
Fe ₂ O ₃	0.68	
Al ₂ O ₃	0.57	
K ₂ O	2.93	
MgO	1.90	
Na ₂ O	0.11	
CaO	5.80	
P ₂ O ₅	1.05	
SO ₃	1.32	5.00% (máximo)
MnO	0.08	
ZnO	0.03	

TABLA 6. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO FINO

Descripción	Muestras			Unidad
	M-1	M-2	M-3	
Contenido de humedad (ASTM C566)	1.20	1.05	1.05	%
Promedio	1.10			
Peso unitario suelto seco (ASTM C29)	1668	1663	1667	kg/m ³
Promedio	1666			
Peso unitario compacto seco (ASTM C29)	1881	1841	1893	kg/m ³
Promedio	1872			
Densidad relativa (ASTM C128)	2.61	2.63	2.64	g/cm ³
Promedio	2.63			
Densidad relativa saturado (ASTM C 128)	2.64	2.65	2.66	g/cm ³
Promedio	2.65			
Densidad relativa aparente (ASTM C128)	2.67	2.69	2.70	g/cm ³
Promedio	2.69			
Absorción (ASTM C 128)	0.86	0.83	0.85	%
Promedio	0.85			

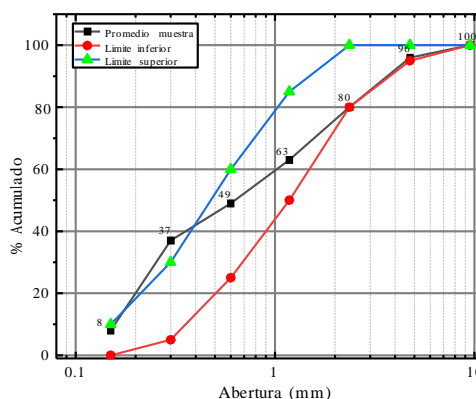


Fig. 2. Curva granulométrica del agregado fino.

Arena gruesa: La Tabla 7 indica que densidad relativa aislada fue de 2.42 g/cm³, absorción de agua de 3.99 %, el peso unitario compactado de 1490 kg/m³, el peso unitario suelto fue de 1273 kg/m³, el bajo peso unitario suelto se debe a su naturaleza de piedra chancada; una humedad de 0.88 % (no saturación de agua); debido a ello y según [19], el agregado cumple los requisitos para su uso en CAC. Respecto al análisis granulométrico del agregado grueso se encuentra dentro de la distribución óptima del huso (ASTM C33), como se puede observar en la Fig. 3, para elaborar un concreto dócil sin exigencia de una elevada cantidad de agua, con un tamaño máximo de 3/8” para aumentar la capacidad de paso y la resistencia a la compresión del concreto autocompactante.

TABLA 7. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO

Descripción	Muestras			Unidad
	M-1	M-2	M-3	
Contenido de humedad (ASTM C566)	0.87	0.88	0.89	%
Promedio	0.88			
Peso unitario suelto seco (ASTM C29)	1276	1268	1275	kg/m ³
Promedio	1273			
Peso unitario compacto seco (ASTM C29)	1482	1493	1495	kg/m ³
Promedio	1490			
Peso específico de masa (ASTM C127)	2.41	2.41	2.45	g/cm ³
Promedio	2.42			
Peso específico saturado superficialmente seco (ASTM C127)	2.51	2.51	2.55	g/cm ³
Promedio	2.52			
Peso específico aparente (ASTM C127)	2.67	2.66	2.71	g/cm ³
Promedio	2.68			
Absorción (ASTM C127)	4.05	3.92	4.00	%
Promedio	3.99			

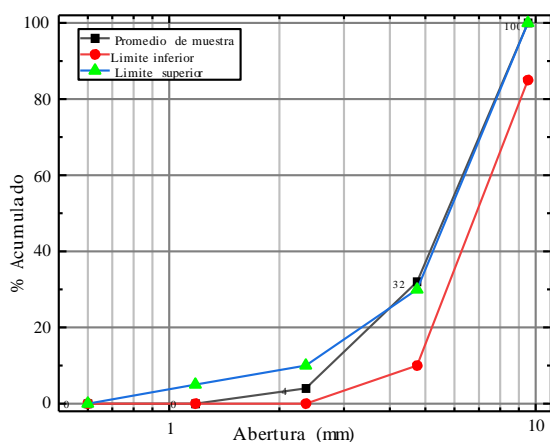


Fig. 3. Curva granulométrica del agregado grueso.

D. Diseño de mezcla – Aditivo superplastificante

Según recomendaciones de la norma ACI – 211. El diseño fue para una resistencia a la compresión a 28 días de 360 kg/cm². La Tabla 8 muestra la mezcla inicial propuesta, el diseño de mezcla fue también evaluada según los parámetros de EFNARC (2002) y GPE (2005), como se

muestra en la Tabla 9. La dosificación final del aditivo superplastificante se realizó de forma experimental, teniendo como criterio el valor de índice de estabilidad visual (VSI) durante el ensayo de flujo de asentamiento (ASTM C1611), requiriéndose una extensión mínima de 650 mm perteneciente a la clase SF2 (GPE, 2005), clase elegida por su versatilidad al poder ser empleada en distintos tipos de estructuras (sin segregación ni exudación); algunos de los resultados se muestran desde Fig. 4 hasta la Fig. 13. De la Fig. 4 se observa poca fluidez, la mezcla es parecida a un concreto convencional, no se evidencian ni exudación (EX) ni segregación (SEG); en los casos de las Fig. (5,6) se observa (EX) y (SEG); siendo en el caso de la Fig. 5 el caso de mayores valores, lo cual señala el efecto marcado del aditivo sobre la fluidez de la mezcla; en la Fig. 7, se evidencia una fluidez adecuada sin (EX) ni (SEG), evidenciando el efecto marcado nuevamente aditivo; para los casos de las Fig. (8, 9 y 10), se observa la capacidad de absorción que ejerce el uso de las cenizas y por lo tanto la necesidad de modificar el porcentaje de aditivo, en estos últimos tres casos no se observa ni (EX) ni (SEG). Por otro lado, como se aprecia en las Fig. (11 y 12), la presencia de (EX y SEG) debido al incremento del porcentaje de aditivo, por lo que es evidente la necesidad de evaluar la dosis adecuada de aditivo, según el tipo de fluidez de mezcla que se desea obtener, la Fig. 13 concuerda con lo mencionado a la adición de ceniza y la dosificación pertinente de aditivo; de la evaluación de la adición de cenizas y diversos porcentajes de aditivo se desarrolló la Fig. 14, la cual permite determinar la dosificación de cenizas y aditivo superplastificante, según las necesidades y/o características que se desean obtener, de esta forma se evidencia un método de campo para la determinación del uso de adición de cemento y aditivos, para ello se debería tener en cuenta los estándares de comparación del concreto a obtener, sin embargo esto dependería del tipo de adiciones que se pretende utilizar pero lo lograrlo se pueden estandarizar proceso de diseño de mezcla a voluntad.

TABLA 8. DISEÑO DE MEZCLA PATRÓN

Descripción	Cantidad	Unidad
Agua	217.69	L/m ³
Cemento	537.02	kg/m ³
Agregado grueso	710.97	kg/m ³
Agregado fino	821.22	kg/m ³

E. Resultados en estado fresco

En la evaluación de la capacidad de llenado se observó la relación directa entre el porcentaje de aditivo superplastificante y el asentamiento, en este caso el aditivo generó aumento de la fluidez de mezcla, además de la clasificación SF según los códigos GPE (2005), como se observa en la Fig. 15. Respecto a la fluidez (medido como velocidad de flujo), la Fig. 16 muestra una tendencia similar a la señalada en la Fig. 15, para la especificación del EFNARC (2002), el rango es (8-10) segundos, siempre y

cuando se cumplan con los requisitos con respecto a resistencia a la segregación y capacidad de paso, respecto a este punto en la Tabla 10, se muestran los datos de diferencias de alturas con el uso del anillo J; para la especificación EFNARC (2002) establece un límite de diferencias de alturas menor a 10 mm. Según lo descrito en la TABLA 3, las mezclas desarrolladas en su mayoría demuestran un bloqueo no visible, por lo que estas se pueden emplear en estructuras con alta densidad de refuerzos (Fig. 17).

TABLA 9. EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE MEZCLA

Componentes		Diseño patrón	EFNARC (2002)	GPE (2005)
Finos (kg/m ³)		537	400 - 600	380 - 600
Pasta (L/m ³)		315	-	300 - 380
Agua de diseño (L/m ³)		194	≤ 200	150 - 210
Árido grueso	Volumen (m ³)	29%	28 - 35%	-
	Peso (kg/m ³)	711	-	710 - 1000
Relación agua/finos		1.1	0.80 - 1.10	0.85 - 1.10

F. Evaluación VSI - ASTM C1611.

La evaluación de índice de estabilidad visual (VSI), para los ensayos de flujo de asentamiento de mezclas con adición de cenizas que se determinaron en la Fig. (4-13), permitieron evaluar la no presencia de segregación ni exudación en algunas de las muestras evaluadas, sin embargo la utilidad de evaluación se verificó para el caso de la presente investigación en el estado endurecido; pues allí se verificó la distribución del agregado grueso en las probetas a compresión y a ensayadas; así tenemos que para Fig. 18 (a, b, c, d), se observa distribución homogénea de agregado grueso; sin tendencia a un lado en particular, en el caso de la Fig. 18 (e, f, g, h), la tendencia es la misma, con la diferencia del cambio de color de la mezcla y en casos (f, g), visualmente se aprecia un mayor grado de compactación del concreto en el estado endurecido, respecto a las demás muestras ensayadas, esto se debe a la adición de las cenizas y como este ejerce su efecto reforzante esperado (actividad puzolánica), verificado mediante ensayo a resistencia a la compresión.

% Ceniza = 0	% Aditivo = 0.75
	
Extensión = 724 mm Exudación = Si Halo = Si, mayor a 10 mm Agrupación de agregado grueso = No se observa Valor VSI = 3	

Fig. 5. Fluidez de mezcla C:0/A:0.75 (C=% ceniza, A=%aditivo)

% Ceniza = 0	% Aditivo = 0.72
	
Extensión = 713 mm Exudación = Si Halo = Si, menor a 10 mm Agrupación de agregado grueso = No se observa Valor VSI = 2	

Fig. 6. Fluidez de mezcla C:0/A:0.72 (C=% ceniza, A=%aditivo)

% Ceniza = 0	% Aditivo = 0.69
	
Extensión = 703 mm Exudación = No se observa Halo = No se observa Agrupación de agregado grueso = No se observa Valor VSI = 0	

Fig. 7. Fluidez de mezcla C:0/A:0.69 (C=% ceniza, A=%aditivo)


% Ceniza = 0	% Aditivo = 0.65
	
Extensión = 424 mm Exudación = No se observa Halo = No se observa Agrupación de agregado grueso = No se observa Valor VSI = -----	

Fig. 4. Fluidez de mezcla C:0/A:0.65 (C=% ceniza, A=%aditivo)


% Ceniza = 1	% Aditivo = 0.69
	
Extensión = 483 mm Exudación = No se observa Halo = No se observa Agrupación de agregado grueso = No se observa Valor VSI = -----	

Fig. 8. Fluidez de mezcla C:1/A:0.69 (C=% ceniza, A=%aditivo)

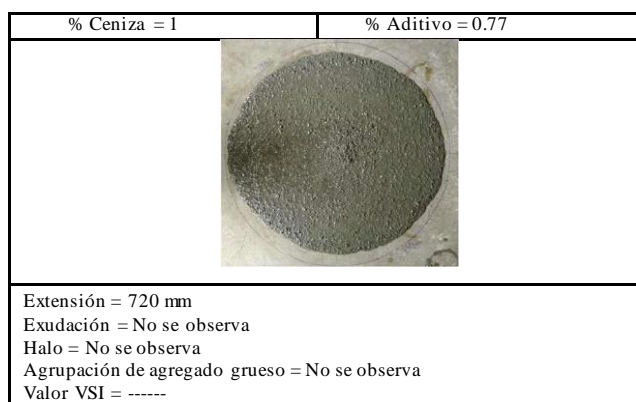


Fig. 9. Fluidez de mezcla C:1/A:0.77 (C=% ceniza, A=% aditivo)



Fig. 10. Fluidez de mezcla C:1/A:1.48 (C=% ceniza, A=% aditivo)



Fig. 11. Fluidez de mezcla C:1/A:0.8 (C=% ceniza, A=% aditivo)

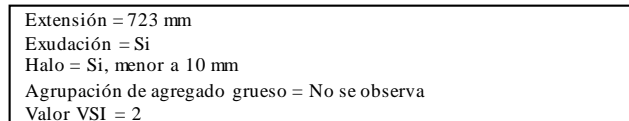
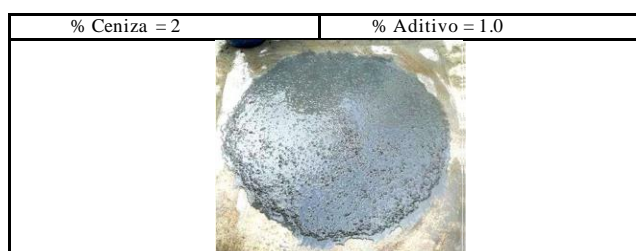


Fig. 12. Fluidez de mezcla C:1/A:1 (C=% ceniza, A=% aditivo)

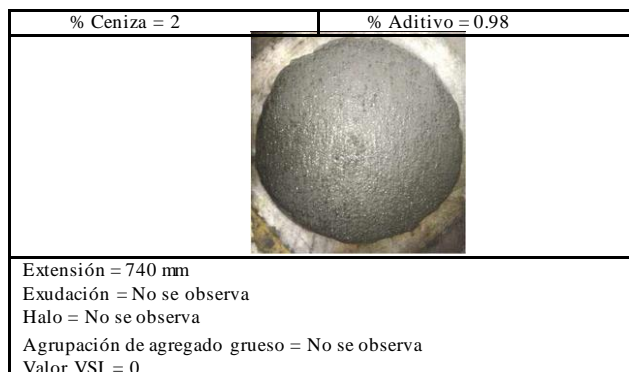


Fig. 13. Fluidez de mezcla C:2/A:0.98 (C=% ceniza, A=% aditivo)

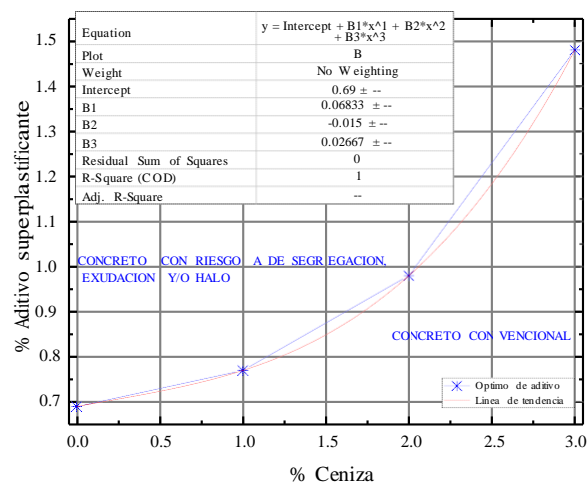


Fig. 14. Relación ceniza (%) versus Aditivo (%)

TABLA 10. ALTURAS DE MEZCLA DE CEMENTO – ANILLO J.

Adición (%)		Diferencia de altura promedio (mm)
Ceniza	Aditivo	
0.00	0.69	9.30
0.50	0.72	9.20
1.00	0.77	9.10
1.50	0.85	9.30
2.00	0.98	9.50
2.50	1.18	9.40
3.00	1.48	9.70
3.50	1.89	10.60

G. Caracterización en estado endurecido.

Resistencia a la compresión axial. Como se observa en la Fig. 19, el efecto combinado del uso de cenizas de caña de azúcar y de superplastificante incrementó los valores de resistencia a la compresión de algunas de las mezclas ensayadas, los datos que se presentan son de un grupo seleccionado de muestras y a descritos.

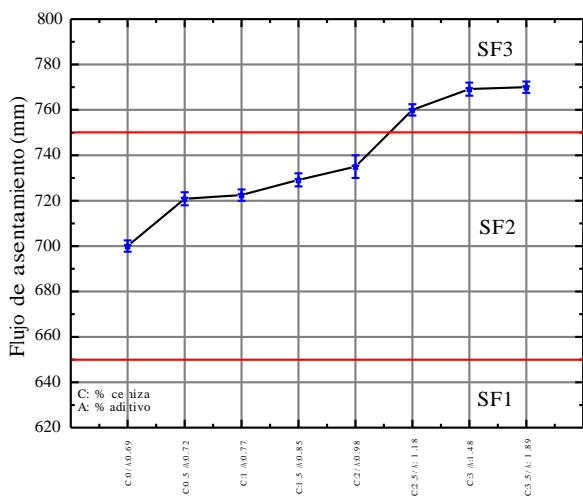


Fig. 15. Flujo de asentamiento de mezclas obtenidas

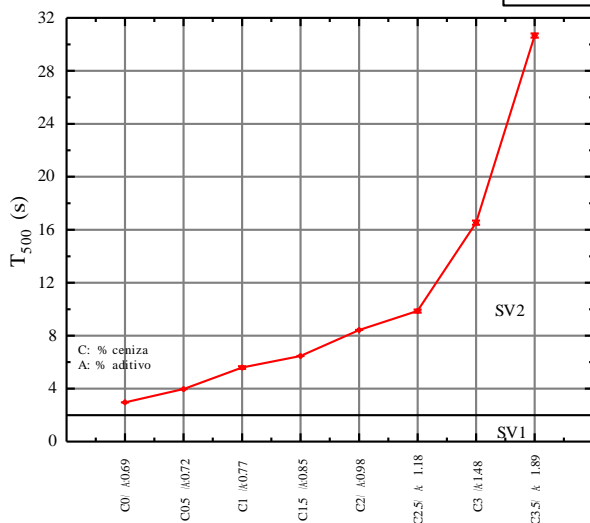


Fig. 16. Tiempo de velocidad del flujo de asentamiento

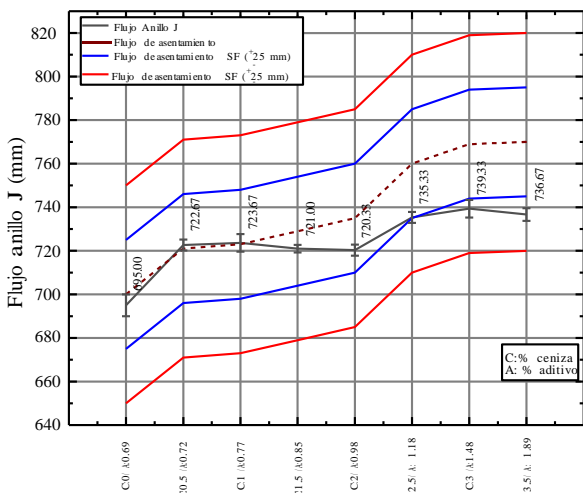
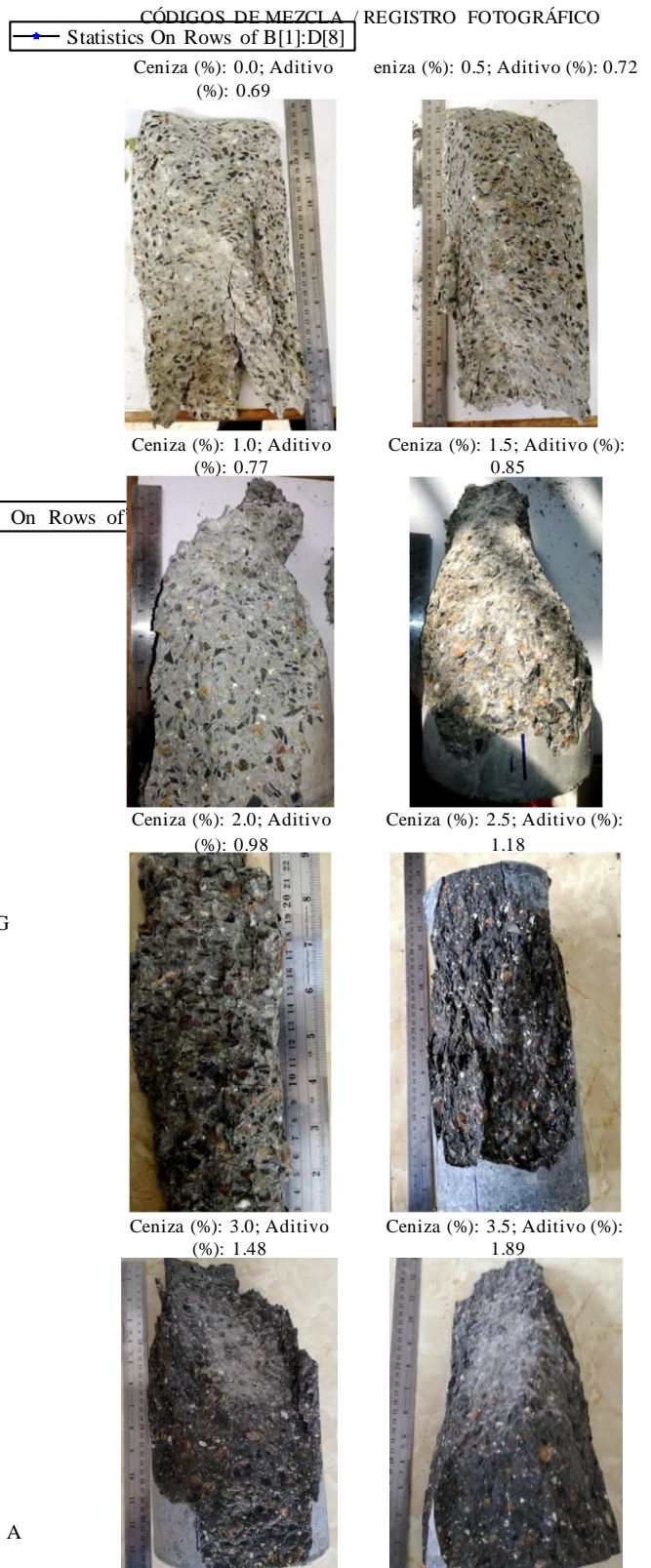


Fig. 17. Flujo de anillo J respecto a flujo de asentamiento (SF).



En valor mayor de resistencia a la compresión se obtuvo con la adición de cenizas al 3% y el uso de aditivo al 1.48% (655 kg/cm²), como se aprecia en la Fig. 19; a pesar del efecto de mejora de los valores de resistencia a la compresión debido al uso de aditivo y de cenizas, es evidente el efecto puzolánico de las cenizas utilizadas pues a partir de la tercera columna de datos de la misma figura (C:0.5/A:0.72) es evidencia el aporte a la resistencia a la compresión de las cenizas. Durante el proceso del conformado y curado se observó que las muestras con adiciones de ceniza al 3.5% presentaban fisuras en la cara superior del molde, éste fenómeno evidencia una fuerte retracción plástica causada por el exceso de finos a causa de la adición según la especificación del GPE (2005) y por la elevada superficie específica del cemento Portland tipo I, como lo manifiesta [19]

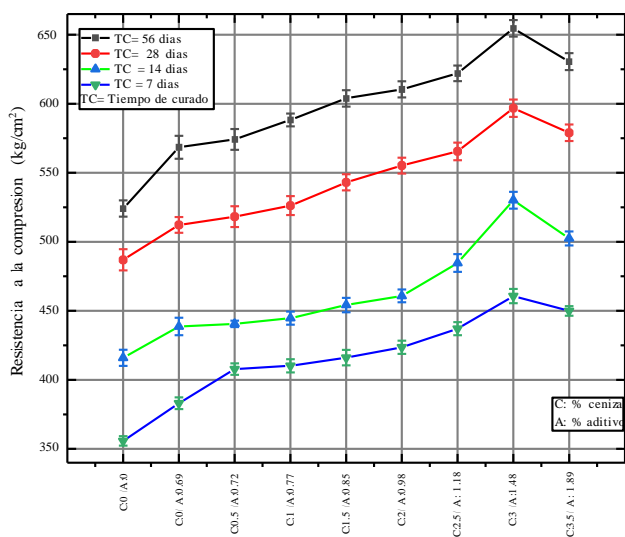


Fig. 19. Resistencia a la compresión axial de mezclas.

Módulo de elasticidad. De la Fig. 20 se observa que la mezcla que obtuvo el mayor valor alcanzado de módulo de elasticidad es el mismo que obtuvo el mayor valor de resistencia a la compresión, siendo la tendencia en ambos casos a ser creciente en comparación a las mezclas no adicionadas. Nuevamente en este caso se aprecia el efecto combinado de adición de ceniza y dosis de aditivo los cuales han mejorado los valores de módulo de elasticidad de las mezclas de cemento desarrolladas, el efecto combinado de estas ha mejorado la distribución del agregado grueso, ha permitido la disminución de la porosidad de más mezclas (efecto puzolana, acomodo de partículas por aditivo), ello en su conjunto han mejorado el comportamiento mecánico evaluado.

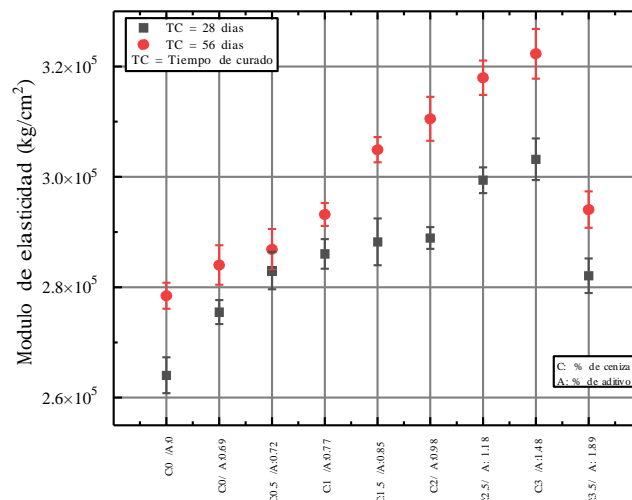


Fig. 20. Módulo de elasticidad de mezclas de cemento

IV. CONCLUSIONES

El agregado fino utilizado fue un material granular con baja absorción, peso unitario elevado, sin indicios de entumecimiento, sin exceso de finos, mientras que el agregado grueso al ser angular posee un regular grado de absorción, bajo peso unitario, granulometría continua con una adecuada densidad

La dosificación del concreto se determinó mediante la especificación ACI 211, además de cumplir los requerimientos estipulados por la GPE (2005), sin embargo, la adición de cenizas sobrepasa el límite de la relación agua/finos recomendado.

La evaluación de la capacidad de llenado determinó que las muestras con adición de ceniza son de clase SF2, en su mayoría, lo cual las hace útiles para elementos estructurales convencionales con encofrados simples con media a baja densidad de refuerzo, pero las adiciones de ceniza al (2.5, 3.0 y 3.5) % pertenecen a la clase SF3, siendo éste concreto de utilidad en aplicaciones en estructuras con alta densidad de refuerzos.

El análisis de la capacidad de paso (ASTM 1621) clasificó a las muestras con adición de cenizas, como mezclas con un bloqueo no visible, sin embargo, para la muestra con 3.5% de adición presenta un bloqueo aparente.

Con respecto a la fluidez se clasificó todas las muestras del tipo VS2 por su elevado nivel de cohesión de la muestra y con un buen potencial de resistencia a la segregación.

Respecto a la resistencia a la compresión (655 kg/cm²) y al módulo de elasticidad (322,306.51 kg/cm²) la adición de 3.0% de cenizas y 1.48% de aditivo logro el valor mayor a 56 días de curado. Por lo que podemos afirmar que las cenizas de caña utilizados tienen propiedades puzolánicas.

Finalmente resaltar la importancia ambiental de este trabajo ya que reutiliza la ceniza de caña de azúcar que es un residuo que se desperdicia normalmente. Sin embargo, la limitación sería que la cantidad de residuo existente no es tan abundante como la materia prima que se suele utilizar para el cemento. Se recomienda continuar investigando para encontrar nuevas aplicaciones de la ceniza de caña de azúcar y nuevos residuos que se puedan añadir al concreto autocompactante para mejorar sus propiedades.

V. AGRADECIMIENTOS

Laboratorio de Materiales Compuestos. Departamento de Ingeniería de Materiales. Universidad Nacional de Trujillo.

Laboratorio de Concreto y Reciclado. Departamento de Ingeniería de Materiales. Universidad Nacional de Trujillo.

Laboratorio de Materiales Cerámicos. Departamento de Ingeniería de Materiales. Universidad Nacional de Trujillo.

VI. REFERENCIAS

- [1] Cámara Peruana de la Construcción. (Octubre 2019). Construcción subió 63.8% en los nueve primeros meses del año. <https://www.capeco.org/entrada-noticia/construccion-subio-638-en-los-nueve-primeros-meses-del-ano>
- [2] Barroso, Luis & Vilaboa, Israel. (2013). Contaminación ambiental por quema de caña de azúcar. Un estudio exploratorio en la región central del estado de Veracruz. https://www.researchgate.net/publication/314091833_Contaminacion_ambiental_por_quema_de_cana_de_azucar_Un_estudio_exploratorio_en_la_region_central_del_estado_de_Veracruz
- [3] Mangi, Sajjad & Jamaluddin, Norwati & Ibrahim, Mohd Haziman & Abdullah, Abd Halid & Awal, A & Sohu, Samiullah & Ali, Nizakat. (2017). Utilization of Sugarcane Bagasse Ash in Concrete as Partial Replacement of Cement. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 271. 012001. 10.1088/1757-899X/271/1/012001.
- [4] CONAB. A geração termoeletrica com a queima do bagaço da cana de açúcar no Brasil, março/2011 [online] - Companhia Nacional de Abastecimento – Brasília, 2011. [Consultado em 15 de setembro 2016]. Disponible en: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-termoeletrica-com-a-queima-do-bagaco-de-cana-de-acucar/termoeletrica-com-a-queima-do-bagaco-de-cana-de-acucar-no-brasil-safra-2009-2010.pdf>
- [5] Federação das indústrias do estado de São Paulo/centro das indústrias do estado de São Paulo - FIESP/CIESP. Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar). [on line]. São Paulo: FIESP/CIESP, 2001. pp. 37-54. [Consultado em 15 de setembro 2016]. Disponible en: <http://www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=4505>
- [6] Cordeiro, G.C., Toledo Filho, R.D., Tavares, L.M., and Fairbairn, E.M.R. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. Cement and Concrete Composites, 30(5), pp. 410-418, 2008. 10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001
- [7] Fairbairn, E.M.R., Americano, B.B., Cordeiro, G.C., Paula, T.P., Toledo Filho, R.D. and Silvoso, M.M., Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO2 emissions reduction and potential for carbon credits. Journal of Environmental Management, 91(9), pp. 1864-1871, 2010. 10.1016/j.jenvman.2010.04.008
- [8] Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V., Díaz-Pinzón, L. and Ordóñez, L.M., Sugar-cane bagasse ash (SCBA): Studies on its properties for reusing in concrete production. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 77(3), pp. 321-325, 2002. 10.1002/jctb.549
- [9] Martirena Hernández, J.F.M., Middeendorf, B., Gehrke, M. and Budelmann, H., Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. Cement and Concrete Research, 28(11), pp. 1525-1536, 1998. 10.1016/S0008-8846(98)00130-6
- [10] Borlini, M.C., Mendonça, J.L.C.C., Pinatti, D.G., Conte, R.A., Vieira, C.M.F. e Monteiro, S.N., Cerâmica com cinza de bagaço de cana de açúcar: Avaliação da influência da cinza e da sua granulometria nas propriedades físicas e mecânicas. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2006.
- [11] Zardo, A.M., Bezerra, E.M., Martello, L.S. e Savastano Jr, H., Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como "filler" em compostos de fibrocimento. I conferência Latino-americana de construção sustentável x encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. pp. 18-21 julho 2004, São Paulo, Brasil, 2004.
- [12] Valenciano, M.C., Incorporação de resíduos agroindustriais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de tijolos de solo melhorado com cimento. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 67 P., 1999.
- [13] G. F. Huseien, A. R. M. Sam y R. Alyousef, "Texture, morphology and strength performance of self-compacting alkali-activated concrete: Role of fly ash as GBFS replacement", Construction and Building Materials, p. 121368, noviembre de 2020. Accedido el 29 de mayo de 2022. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121368>
- [14] R. H. Faraj, A. F. H. Sherwani, L. H. Jafer y D. F. Ibrahim, "Rheological behavior and fresh properties of self-compacting high strength concrete containing recycled PP particles with fly ash and silica fume blended", Journal of Building Engineering, p. 101667, julio de 2020. Accedido el 29 de mayo de 2022. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101667>
- [15] K. Saphouvong, K. Thepvongsa, C. Sonemanivong y S. Simixay, "The Properties of Self-Compacting Concrete Using Fly Ash from Hongsa Power Plant", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 849, p. 012071, mayo de 2020. Accedido el 29 de mayo de 2022. Disponible: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/849/1/012071>
- [16] H. Thiagarajan, M. Mapa y R. Kushwaha, "Investigation on the Rheological Behavior of Fly Ash Cement Composites at Paste and Concrete Level", Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, vol. 99, n.º 2, pp. 295-301, febrero de 2018. Accedido el 29 de mayo de 2022. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0284-9>
- [17] American Concrete Institute (2007), "ACI 237R-07: Self-Consolidating Concrete", (Farmington Hills, U.S.: ACI)
- [18] Guzmán, A., Gutiérrez, C., Anigó, V., Mejía de Gutiérrez, R. & Delvasto, S. (2011). Valoración puzolánica de la hoja de la caña de azúcar, Materiales de construcción, 61 (302), p. 213-225. 10.3989/mc.2011.54809
- [19] Fernández, M. (10ª edición). (2013). Hormigón. Garceta Grupo Editorial, Ibergarceta Publicaciones, S.