

Donde: M representa la masa del agua en gramos absorbida por la probeta, s la superficie de la cara sumergida en cm² y t el tiempo de duración de inmersión de la probeta en minutos.

TABLA XVIII
ENSAYO DE CAPILARIDAD

Especimen	A: Peso Inicial (g)	B: Peso Seco (g)	Superficie (cm ²)	Tiempo (min)	Capilaridad (g/cm ² xmin ^{1/2})
CEM70CBCA30	274.03	255.57	26.52	5.00	3.46
CEM60CBCA40	259.72	248.62	27.03	5.00	5.12
CEM50CBCA50	271.04	259.18	27.03	5.00	7.26

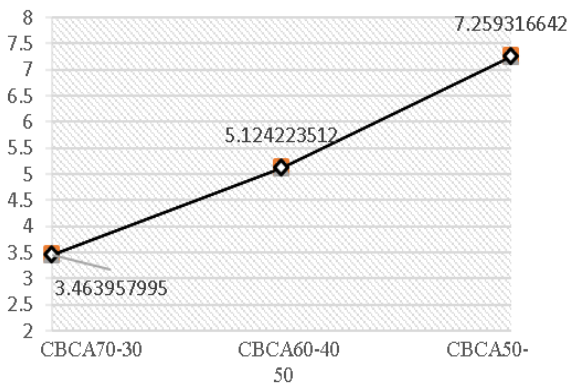


Fig. 12. Resultados ensayo de absorción de agua por capilaridad

M. Recuperación del CaCO₃ de las Conchas Marinas

Una vez realizado el reciclaje de las conchas marinas, se procedió a limpiarlas para eliminar restos de materia orgánica en tres fases, la primera con agua + hipoclorito de sodio – cloro- en un 2% (100 g) del contenido de agua de 5000 g para sumergir 50 g en peso de conchas marinas durante 24 horas hasta limpiar con agua sin cloro para una limpieza parcial, la segunda fase fue con una solución de sulfonato de alquilbenceno –base del detergente- en un porcentaje de 2% (100g) del contenido de agua de 5000 g para sumergir 500 g de peso en conchas durante 24 horas más, se procedió a enjuague con agua limpia y se dejó secar a la intemperie durante 8 horas.

La tercera fase consistió en disolver cal hidráulica en 5000 g de agua en un porcentaje del 2% (100g) del contenido de agua de 5000 g para sumergir 500 g de peso en conchas

durante 24 horas más, se procedió a enjuague con agua limpia y se dejó secar a la intemperie durante 8 horas más.

Posteriormente se aplicó una primera molienda y pulverización en una trituradora de mandíbulas marca Retsch, consiguiendo un tamaño de partícula de 3.18mm (1/8 pulg) al pasarlo por el tamiz de malla N° 6 dejando pasar el 100% aprox. Luego se procede a pesar la cantidad obtenida en una balanza digital para poder llevar las muestras a un molino giratorio de 18.5cm de diámetro y 24.5 cm de largo con 11 kg de bolas de acero (Fig. 13).

Y finalmente se llevó a calcinar en horno a temperaturas de 500°C, 750°C, 850°C y 1000°C con una velocidad de calentamiento de 10°C/ min, acorde a la tabla XIX.

TABLA XIX
CALCINACIÓN DE LA MUESTRA RECUPERADA DEL BERBERECHO

Muestra	Peso Inicial A (g)	Peso del Crisol B (g)	Peso Muestra Calcificada C (g)	Peso B+C	Pérdida por Ignición (%)	Tiempo de Calcificación (min)	Temperatura (°C)
CM01	50.00	178.65	40.50	219.15	9.50	120.00	500.00
CM02	50.00	181.63	36.57	218.20	13.43	180.00	500.00
CM03	50.00	182.17	31.83	214.00	18.17	120.00	750.00
CM04	50.00	175.35	29.95	205.30	20.05	180.00	750.00
CM05	50.00	182.52	26.44	208.96	23.56	120.00	850.00
CM06	50.00	175.45	23.28	198.73	26.72	180.00	850.00
CM07	50.00	180.26	25.96	206.22	24.04	120.00	1000.00
CM08	50.00	182.63	22.50	205.13	27.50	180.00	1000.00

En una siguiente fase se realizó la caracterización de los componentes de las conchas con alternancia de tamizaje para obtener un tamaño de partícula adecuado. Se usó la pistola de fluorescencia de rayos X: Bruker S1 Turbo SD con disparos a muestras crudas y calcinadas y un mínimo de tres lecturas por muestra para evitar errores. Además, se determina la densidad acorde a la norma ASTM C188-INEN 156 mediante el método del frasco volumétrico de Le Chatelier (9):

$$D_r = \frac{M(g)}{V(cm^3)} \quad (9)$$

Dónde: Dr indica la Densidad relativa (g/cm³), M la masa del material y V el volumen desplazado.



Fig. 13. Izquierda: Pesaje de material recuperado del berberecho. Centro y Derecha: Molino Giratorio.

Para el ensayo granulométrico se realizó un nuevo secado, para corroborar que el material no contenga agua en una mufla a temperaturas de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas, se deja reposar por 60 minutos. Por medio de cuarteo se toma una cantidad de la muestra y se procede a pesar para llevar a los tamices (ASTM E-11-70) N° 200 de $75\mu\text{m}$ y N° 325 de $45\mu\text{m}$. El contenido de humedad tuvo base en la norma ASTM C 566 bajo la fórmula (10):

$$P(\%) = \frac{W-D}{D} \times 100 \tag{10}$$

Donde: P indica el contenido de humedad de la muestra %, W la masa de la muestra original (g) y D la masa de la muestra (g).

TABLA XIX
CALCINACIÓN DE LA MUESTRA RECUPERADA DEL BERBERECHO

Muestra	Peso Inicial A (g)	Peso del Crisol B (g)	Peso Muestra Calcificada C (g)	Peso B+C	Pérdida por Ignición (%)	Tiempo de Calcificación (min)	Temperatura (°C)
M01	50.00	178.65	40.50	219.15	9.50	120.00	500.00
M02	50.00	181.63	36.57	218.20	13.43	180.00	500.00
M03	50.00	182.17	31.83	214.00	18.17	120.00	750.00
M04	50.00	175.35	29.95	205.30	20.05	180.00	750.00
M05	50.00	182.52	26.44	208.96	23.56	120.00	850.00
M06	50.00	175.45	23.28	198.73	26.72	180.00	850.00
M07	50.00	180.26	25.96	206.22	24.04	120.00	1000.00
M08	50.00	182.63	22.50	205.13	27.50	180.00	1000.00

N. Dosificaciones.

Se realizaron cinco combinaciones entre las muestras que obtuvieron mayor porcentaje de óxido de calcio (CaO) y una parte de CBCA. El criterio fue ir adicionando CaO desde un 30% hasta un 70%, y disminuir la CBCA desde el 70% hasta el 30%.

Antes de llevar las probetas a pruebas de resistencia, se las almacenó por medio de bolsas de plástico con cerrado hermético, procurando evitar el ingreso de aire para luego guardar en termos de poliestireno expandido (Tecnopor, Espumaflex) rellenos con carbón natural.

Una vez recuperado el CaO por medio de la calcinación, se inició la etapa de combinaciones con la ceniza de bagazo de caña de azúcar CBCA, resultando probetas de $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 16\text{cm}$ con base en la norma INEN 198 que fueron sometidas a pruebas de resistencia a la abrasión y capilaridad y en dimensiones de $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ para resistencia a la compresión acorde norma INEN 488. El primer curado de estas probetas fue a las 48 horas pues se trata de un material sin cemento.

TABLA XX
DOSIFICACIONES COMPUESTO CAO+CBCA

Especimen	CaO (g)	CBCA (g)	H ₂ O (g)	Arena (g)	Fluidificante (2% CaO)
CAO30CBCA70	192.00	448.00	268.80	1760.00	12.80
CAO40CBCA60	256.00	384.00	268.80	1760.00	12.80
CAO50CBCA50	320.00	320.00	268.80	1760.00	12.80
CAO60CBCA40	384.00	256.00	268.80	1760.00	12.80
CAO70CBCA30	448.00	192.00	268.80	1760.00	12.80

O. Resistencia a la compresión (CaCO₃)

Los especímenes tienen una dimensión de $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ ensayados a los 7, 14 y 28 días sometidos a compresión en el equipo Shimadzu Concrete 2000x, mediante una carga constante de 0.8 MPa/s. Fueron lijadas para eliminar posibles discontinuidades producidas por desmolde, luego se pesaron en una balanza de precisión y del mismo modo se procedió a medir todas las caras del espécimen.

TABLA XXI
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MPA

Especimen	7 días	14 días	28 días
CAO30CBCA70	0.29	0.41	0.42
CAO40CBCA60	0.32	0.38	0.45
CAO50CBCA50	0.33	0.42	0.51
CAO60CBCA40	0.31	0.54	0.87
CAO70CBCA30	0.39	0.58	1.32

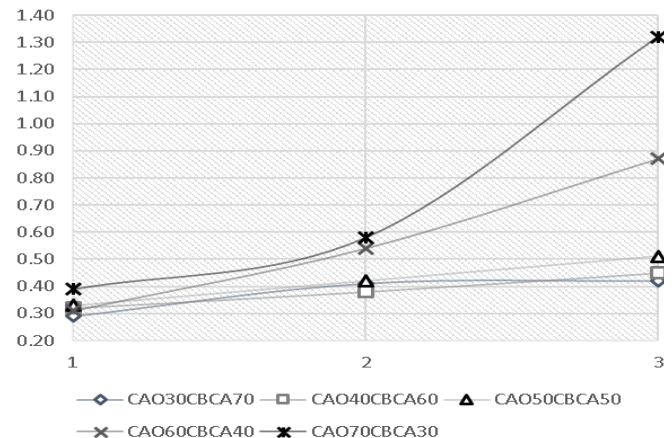


Fig. 14. Resultados Resistencia a la Compresión 7-21-28 días

P. Resistencia a la Abrasión (CaCO₃)

Para esta prueba se procede acorde al literal 2.3.12 de la norma NTC 5324, donde se calcula la cantidad de material desprendido tras la fricción en un tiempo establecido. El ensayo se aplicó a dos probetas de $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ después de 7, 14 y 28 días. Se calcula el coeficiente de abrasión Ca (11):

$$Ca\left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}\right) = \frac{S}{m_0 - m_1} \tag{11}$$

TABLA XXII
RESISTENCIA A LA ABRASIÓN (CM²/G) 7 DÍAS

Especimen	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Superficie de desgaste 16cmx3cm (cm ²)	Tiempo (min)	Coef. Abrasión (cm ² /g)	Media
CAO30CBCA70	458.26	367.70	48.00	60.00	0.53	0.51
	459.80	362.00	48.00	60.00	0.49	
CAO40CBCA60	442.75	370.00	48.00	60.00	0.66	0.63
	447.86	368.36	48.00	60.00	0.60	
CAO50CBCA50	462.15	427.16	48.00	60.00	1.37	1.17
	463.45	413.38	48.00	60.00	0.96	
CAO60CBCA40	460.23	434.59	48.00	60.00	1.87	1.62
	475.35	440.25	48.00	60.00	1.37	
CAO70CBCA30	482.77	479.58	48.00	60.00	1.50	1.17
	480.36	474.66	48.00	60.00	0.84	

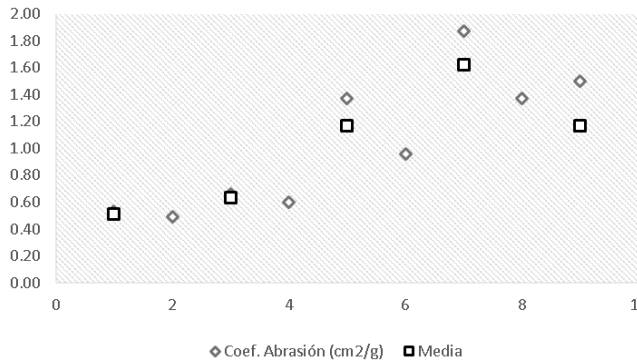


Fig. 15. Resultados Resistencia a la Abrasión 7 días.

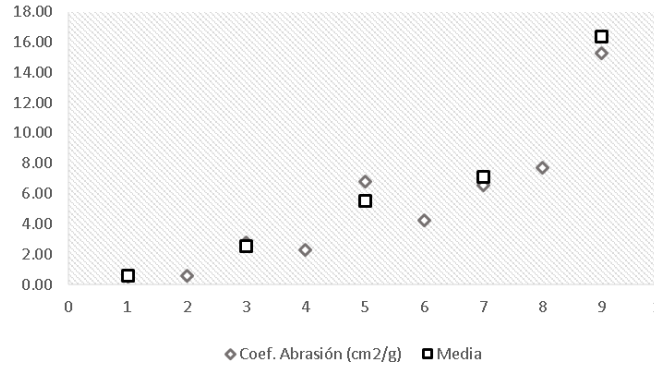


Fig. 17. Resultados Resistencia a la Abrasión 28 días.

TABLA XXIII

RESISTENCIA A LA ABRASIÓN (CM2/G) 14 DÍAS

Especimen	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Superficie de desgaste 16cmx3cm (cm ²)	Tiempo (min)	Coef. Abrasión (cm ² /g)	Media
CAO30CBCA70	457.52	399.14	48.00	60.00	0.82	0.89
	465.67	414.42	48.00	60.00	0.95	
CAO40CBCA60	449.70	403.82	48.00	60.00	1.37	1.48
	451.42	410.82	48.00	60.00	1.58	
CAO50CBCA50	485.00	450.57	48.00	60.00	6.46	6.18
	461.67	453.54	48.00	60.00	5.90	
CAO60CBCA40	456.48	447.85	48.00	60.00	5.56	6.73
	451.42	445.34	48.00	60.00	7.89	
CAO70CBCA30	468.20	460.20	48.00	60.00	6.62	8.99
	470.77	466.54	48.00	60.00	11.35	

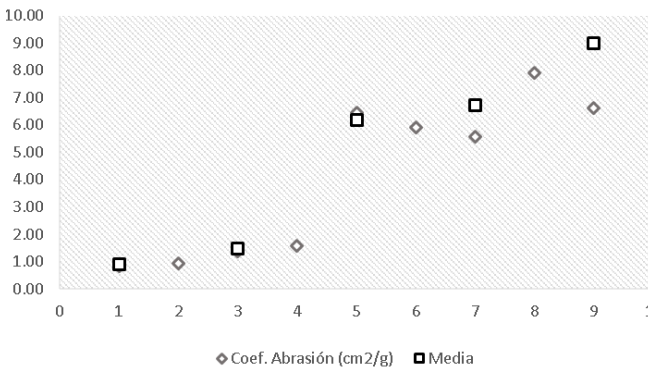


Fig. 16. Resultados Resistencia a la Abrasión 14 días.

TABLA XXIV

RESISTENCIA A LA ABRASIÓN (CM2/G) 28 DÍAS

Especimen	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Superficie de desgaste 16cmx3cm (cm ²)	Tiempo (min)	Coef. Abrasión (cm ² /g)	Media
CAO30CBCA70	429.07	353.72	48.00	60.00	0.54	0.56
	435.55	353.34	48.00	60.00	0.58	
CAO40CBCA60	432.62	415.15	48.00	60.00	2.75	2.52
	426.55	405.56	48.00	60.00	2.29	
CAO50CBCA50	435.26	428.22	48.00	60.00	6.82	5.52
	423.85	412.45	48.00	60.00	4.21	
CAO60CBCA40	442.12	434.80	48.00	60.00	6.56	7.13
	450.15	443.92	48.00	60.00	7.70	
CAO70CBCA30	428.97	425.82	48.00	60.00	15.24	16.35
	435.50	432.75	48.00	60.00	17.45	

Q. Absorción de Agua

Las probetas antes de llevar a medir se secaron en un horno por 24 horas a temperatura de 105°C, luego se dejaron reposar por 6 horas para posteriormente sumergirlas en agua durante 24 horas, luego se retiran y secan con una franela (12).

$$Absorción(\%) = \frac{M2-M1}{M1} \times 100 \tag{12}$$

TABLA XXV
ABSORCIÓN DE AGUA (%) 7-14-28 DÍAS

Especimen	Absorción 7 días	Absorción 14 días	Absorción 28 días
CAO30CBCA70	12.15	10.80	10.42
CAO40CBCA60	10.94	9.43	9.07
CAO50CBCA50	8.58	8.04	6.99
CAO60CBCA40	8.42	7.88	6.66
CAO70CBCA30	7.82	6.34	4.35

III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A efecto de la primera quema y molienda en la pérdida por ignición. - Se observó que la muestra CBCA06 a menor temperatura de quema inicial 400 °C y mayor tiempo 60min las partículas fibrosas de carbono se queman en mayor porcentaje, logrando una pérdida por ignición del 0.63% que está por debajo del 6% NC 618-12a [8].

La activación en primera instancia se realizó a 700°C por 90 min, obteniendo resultados idóneos por causa de cristalización. La muestra CBCA06, calcinada a 500 °C en el horno (HH) por 60 minutos, obtuvo la mejor activación puzolánica 72.16%, por encima de la norma NC 618-12a (SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃ ≥ 70 %), para clase F. Ver Tabla I. Se pone a consideración realizar una reproducción del ensayo para estudio de las condiciones tanto de especímenes como de laboratorio que permitió la activación.

Durante la primera calcinación hacia la activación puzolánica de las muestras de CBCA, se verificó la importancia de la segunda molienda, las muestras CBCA02, CBCA03 y CBCA04, se trituraron por 10 min obteniendo una actividad puzolánica máxima de 48.28%.

Debe considerarse que la activación puzolánica de la CBCA depende de la procedencia del bagazo de cada sector. Se determinó que entre más partículas finas obtenidas con pulverización se incluyan, tendrá mejor activación puzolánica debido a la eliminación de compuestos cristalinos en las partículas gruesas que posiblemente afecten su reactividad.

Otros resultados no despreciables se obtuvieron en la muestra CBCA03 (CBCA50-50) que se tamizo y pulverizo durante 15 minutos con una activación puzolánica de 57,52% y una pérdida de ignición de 4.88 % obteniendo una puzolana tipo C, según norma NC 618-12^a, que puede ser utilizada con como material de refuerzo.

El espécimen CBCA02 (CBCA60-40), se recomienda su utilización en mampostería hasta dos niveles bajo especificación de la norma NTC 5324, concluyendo que el porcentaje agregado de 8% de CBCA y 12% de cemento, ejercen una mejor dureza y densidad al bloque, entre mayor densidad de compactación mejor resistencia.

Según los resultados la adición de 8% de CBCA en combinación con 12% de cal mejora significativamente las propiedades mecánicas y la durabilidad de los bloques de tierra comprimida.

El uso de la CBCA como estabilizante puede arrojar un material con un refuerzo puzolánico prometedor, ya que se hace uso de un residuo vegetal reduciendo la emisión del CO₂ al no usar el cemento portland.

En cuanto a la adición de CaCO₃ recuperado del berberecho, se obtuvo los mejores resultados en la combinación 70% de CaCO₃ y 30% de CBCA en probetas evaluadas a los 7, 14 y 28 días, que aumentaron su resistencia a la compresión –en este caso- mayor a los 0.5 MPa (norma ASTM C-270) para morteros de baja resistencia. Cabe recalcar que se observó al momento de ruptura de la probeta que ésta no estaba totalmente seca al interior. El resultado de la resistencia a la abrasión avala un mínimo desgaste.

REFERENCIAS

- Arif, E., Clark, M. W. and Lake, N. "Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production," *Constr. Build. Mater.*, vol. 128, pp. 287–297, 2016.
- Astm, N. "El carbón y cenizas volantes crudo o calcinada puzolana natural para hormigón 1," pp. 1–5, 2014.
- Bahurudeen, A., Marckson, A. V., Kishore, A. and Santhanam, M. "Development of sugarcane bagasse ash based Portland pozzolana cement and evaluation of compatibility with superplasticizers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 465–475, 2014.
- de Soares, M. M., Garcia, D. C., Figueiredo, R. B., Aguilar, M. T. P., & Cetlin, P. R. (2016). Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO₂. *Cement and Concrete Composites*, 71, 20-25.
- Gessa Perera, Ana; Sancha Dionisio, M^a del Pilar. (2016). Alternativas de reducción de las emisiones de carbono en la producción de cemento. Propuesta de un modelo de evaluación. *Innovar*, [S.l.], v. 26, n. 60, p. 51-66.
- Lima, S. A., Varum, H., Sales, A. and Neto, V. F. "Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, p. 829-837.
- Minke, G, *Manual de construcción en tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. 3rd ed. Editorial Fin de siglo. 2008.199.
- Sánchez. V.G, *Morteros de barro estabilizados con fibras de paja, esparto y sisal para su uso como revestimientos*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, pp. 81. 2012.
- Setayesh Gar, P., Suresh, N. and Bindiganavile, V. "Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixture in concrete for resistance to sustained elevated temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 153, pp. 929–936, 2017.
- Vidal, D. et al., "Ceniza de bagazo de caña para elaboración de materiales de construcción: Estudio preliminar. Cane Bagasse Ash for Manufacture of Building Materials: Preliminary Study, Introducción," *Constr. Build. Mater.*, vol. 4, no. 48, pp. 641–646, 2014.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.