

Resistencia a la compresión y resistividad eléctrica de hormigones elaborados con materiales cementicios suplementarios y agregados reciclados.

Compressive strength and electrical resistivity of concrete made with supplementary cementitious materials and recycled aggregates.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Diego Juela¹, Jessica Bermeo¹, Daniela Alvarez²

Historial del artículo:

¹Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias Químicas, Campus Central, Av. 12 de Abril, 01.01.168, Cuenca, Ecuador
²Universidad de Cuenca, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Campus Central, Av. 12 de Abril, 01.01.168, Cuenca, Ecuador.
diego.juela@ucuenca.edu.ec, teléfono: +59 3 984789005

Recibido
11-09-2019
Aceptado
09-04-2020
Publicado
25-04-2020

Resumen

La utilización de residuos industriales dentro de la industria del concreto constituye una alternativa eficaz hacia el desarrollo sostenible. Este estudio tiene como objetivo analizar el efecto que produce la sustitución de cemento portland por ceniza de bagazo de caña (CBC), arcilla caolín (AC) y yeso dihidratado (YD), así como la sustitución de árido grueso y fino natural por residuos de hormigón reciclado (HR) y residuos de caucho pulverizado (RCP) respectivamente, en la resistencia a la compresión y resistividad eléctrica de una mezcla de concreto. Las mezclas de concreto se prepararon según el método ACI 211.1 con una relación de agua/materiales cementicios de 0.43. Por cada material se ensayaron tres porcentajes de reemplazo: CBC y AC al 5, 10 y 20%; YD al 5, 7.5 y 10%; HR al 10, 20 y 40%, y RCP al 3, 5 y 8%. A las muestras cilíndricas se probaron la resistencia a la compresión a los 3, 7 y 28 días, la resistividad eléctrica (RE) a los 28 días, y se compararon frente a un concreto convencional. Se observó que la adición de CBC al 10% incrementó la resistencia en 2.14%, mientras que cada 1% de reemplazo adicional de CBC aumenta RE en 0.45 unidades. AC y RCP disminuyen la resistencia en todos los reemplazos, pero mejoran la RE en 32.4% con 20% de AC, mientras que el 8% de RCP duplica la RE. Todos los reemplazos de YD reducen en gran medida la resistencia, pero ligeramente la RE, así un 10% de YD reduce 56.78% la resistencia, pero solo un 5% la RE. Por último, el porcentaje óptimo de HR se encontró en 20%, disminuyendo en apenas un 0.88% la resistencia y 10.9% de RE. Los hallazgos establecen que CBC, HR y RCP mejoran resistencia y resistividad eléctrica, por lo que serían adecuados para la aplicación en la industria de la construcción.

Palabras Clave:
Resistividad eléctrica
Ceniza de bagazo de caña
Hormigón reciclado
Caucho pulverizado.

Article history:

Received
11-09-2019
Accepted
09-04-2020
Available
25-04-2020

Abstract

The use of industrial waste within the concrete industry constitutes an effective alternative towards sustainable development. The objective of this study is to analyze the effect produced by the substitution of portland cement for sugarcane bagasse ash (SCBA), kaolin clay (KC) and gypsum dihydrate (GD), as well as the substitution of coarse and fine aggregate is analyzed by recycled concrete aggregates (RCA) and powdered rubber waste (PRW) respectively, in the compressive strength and electrical resistivity of a concrete mix. Concrete mixes were prepared according to ACI method 211.1 with a water/cementitious materials ratio of 0.43. Three replacement percentages were tested for each material: SCBA and KC at 5, 10 and 20%; GD at 5, 7.5 and 10%; RCA at 10, 20 and 40%, and PRW at 3, 5 and 8%. The cylindrical samples were tested for compressive strength at 3, 7 and 28 days, electrical resistivity (ER) at 28 days, and compared with a conventional concrete. It

Keywords:
Electrical resistivity
Sugar cane bagasse ash
Recycled concrete
Powdered rubber.

was observed that the addition of 10% SCBA was observed to increase strength by 2.14%, while each 1% of additional SCBA replacement increased ER by 0.45 units. KC and PRW decrease strength in all replacements, but improve ER by 32.4% with 20% KC, while 8% of PRW doubles ER. All GD replacements greatly reduce compressive strength, but slightly ER, thus 10% GD reduces strength 56.78%, but only 5% ER. Finally, the optimal percentage of RCA was found in 20%, decreasing strength by just 0.88% and ER 10.9%. The findings establish that SCBA, RCA and PRW improve compressive strength and electrical resistivity, so they would be suitable for application in the construction industry..

1. Introducción.

Luego del agua, el hormigón es el producto más consumido a nivel mundial, creando una huella de carbono elevada (Crow, 2008). De acuerdo con el informe de Chatham House del 2018, cada año se produce cerca de 4.4 billones de toneladas de concreto, y se espera que para el 2050 aumente a más de 5.5 mil millones toneladas debido a la rápida urbanización de los países pobres (Lehne & Preston, 2018). El impacto ambiental que causa el hormigón se analiza en base a la materia prima usada y al consumo energético para su producción. El hormigón básicamente posee un 12% en peso de material aglomerante o cementante, 8% en peso de agua y 80% en peso de agregados finos y gruesos (Brunatti & Souza, 2011). El cemento portland se produce por la calcinación de la caliza y arcillas en un proceso conocido como clinkerización. Un horno cementero, por cada tonelada de clínker que produce emite de 900 a 1000 kg de CO₂ (Hasanbeigi, Price, & Lin, 2012), y de 1.5 a 9.5 kg de NO_x (Bremmer & Eng, 2001). Además, se debe sumar los gases de combustión que emiten los motores que hacen girar al horno y equipos asociados dentro de la planta cementera, todo estos constituyen cerca del 40% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero dentro de la planta cementera (Saez, 2013). La totalidad de estas emisiones representan alrededor del 8% de las emisiones globales de CO₂ (Lehne & Preston, 2018). En cuanto al consumo de energía, el proceso de clinkerización, y la molienda del clínker para producir el cemento consumen 65 kWh y 2.72 GJ de energía por cada tonelada de material, respectivamente (Madlool, Saidur, Hossain, & Rahim, 2011). Por otro lado, con respecto a los áridos finos y gruesos constituidos por arena y grava, se estima que el consumo global de este material natural dentro de la industria del concreto es de 10 mil millones de toneladas anualmente (Reyes-sánchez, Tenza-abril, Verdu, & Reyes Perales, 2017). La extracción de este material virgen produce polución en ecosistemas acuáticos y terrestres, afectando su flora, fauna y paisaje (Hernández-Jatib et al., 2013). En las industrias concreteras, producir 1m³ hormigón con una relación agua/cemento de 0.5 causa la emisión de entre 347 y 351 kg de CO₂ (Jiménez, Domínguez, & Vega-Azamar, 2018), y se reportado que solo en el año 2012 se empleó más de 2 Gt de agua dulce (Miller, Horvath, & Monteiro, 2018), adicionalmente a esto se debe sumar aproximadamente 0.1 m³ de agua destinados para el lavado de los camiones hormigoneros y que

son vertidos en cursos de agua locales (Kumar, 2001). En base a esta problemática, investigadores de todo el mundo están en la búsqueda de nuevos materiales que reemplacen parcial o totalmente a las materias primas usadas en la elaboración del hormigón convencional, para lograr un desarrollo sostenible en la industria del concreto.

Varios estudios han comprobado que el cemento puede ser sustituido por materiales alternativos como puzolanas naturales, cenizas volantes, escoria de alto horno, humo de sílice, entre otros, manteniendo sus propiedades mecánicas, e incluso en varias de ellas, mejorándolas (Meyer, 2002). Investigaciones han demostrado que es posible reemplazar el 100% del cemento portland con cenizas volantes autoactivadas químicamente, mejorando propiedades de trabajabilidad, impermeabilidad y durabilidad (Samadi, 1996). La ceniza proveniente de la quema de residuos agrícolas constituye otra alternativa potencial dentro de la industria de construcción, debido a sus propiedades puzolánicas (Chandra et al., 2019). Dentro de estos, las cenizas de cascarilla de arroz (CCA) y de bagazo de caña (CBC) son las más relevantes, a causa de las cantidades considerables de desechos de los cuales provienen. Por ejemplo en Ecuador, las centrales eléctricas de las industrias del azúcar y el alcohol produjeron aproximadamente 140 mil toneladas de CBC en 2008 (CINCAE, 2008), las cuales nos son aprovechadas en su totalidad, pudiéndose emplear dentro de la industria de la construcción. Se ha verificado que reemplazando el cemento portland por 5 y 20% de CBC, se logra incrementar en 11% y 12% la resistencia a la compresión, respectivamente (Bahurudeen et al., 2015; Mangi et al., 2017). Se han reportado también efectos positivos en la durabilidad del concreto con la adición de CBC, de manera que disminuye al ataque de sulfatos, ácidos, y cloruros en el hormigón (Bahurudeen et al., 2015; Modani & Vyawahare, 2013).

Por otro lado, también se está investigando la forma de reemplazar los agregados naturales por agregados reciclados, tales como el residuos de construcción y demolición, vidrio, residuo de caucho pulverizado, material dragado, y en los últimos años se ha probado hasta biomasa como aserrín y fibra de coco (Paricaguan et al., 2013), de manera general, se busca aprovechar la gran cantidad de residuos generados por otras industrias. En 2016, la generación de residuos de construcción y



llantas de caucho usadas, alcanzó valores de alrededor 236 mil toneladas y 3 millones, respectivamente, solo en Ecuador (INEC, 2016). De ahí que el reemplazo de agregado natural grueso y fino por hormigón reciclado (HR) y residuo de caucho pulverizado (RCP) resulta una opción con un alto valor agregado y una alternativa ecológica, al convertir estos residuos en materia prima para ser usado en la industria del concreto. Desventajosamente, la mayoría de estudios han demostrado que las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, tracción, flexión y el módulo de elasticidad del concreto disminuyen, a medida que aumenta el porcentaje de HR y RCP (Silva et al., 2015; Ismail et al., 2017; Li et al., 2019; Mohammed & Adamu, 2018; Safiuddin et al., 2013; Silva et al., 2015a, 2015b; Thomas et al., 2018). No obstante, se ha encontrado que HR y RCP mejoran notablemente la durabilidad del hormigón (Bisht & Ramana, 2017; Gheni et al., 2019; Li et al., 2019; Pham et al., 2019; Souche et al., 2017; Thomas et al., 2016; Thomas et al., 2018), es por ello necesario encontrar un punto en el cual tanto la resistencia a la compresión y la durabilidad sean favorables.

En la mayoría de estudios, la durabilidad del hormigón es cuantificada a través de propiedades como resistencia al congelamiento-descongelamiento, absorción de agua, permeabilidad, contracción por secado, resistencia a la abrasión, penetración de iones cloruro, resistencia a ácidos y sulfatos, y resistencia a la carbonatación (Li et al., 2019). La resistividad eléctrica (RE) es otro indicador que en la última década ha sido satisfactoriamente empleada como parámetro para identificar las características de la edad temprana de un hormigón fresco, así como, un apoyo para predecir la durabilidad a largo plazo del concreto, tiene la ventaja de ser una técnica no destructiva, simple, rápida y de bajo costo (Azarsa & Gupta, 2017). Varios investigadores han pretendido establecer una relación entre la RE y las otras propiedades de durabilidad, sin embargo, aún existen controversias entre los resultados, por lo que es necesario realizar más investigación en esa área.

Sin duda que lograr la producción de hormigones con elevadas propiedades mecánicas y al mismo tiempo con buenas propiedades de durabilidad usando materiales cementicios suplementarios (SCM), rellenos, agregados reciclados y alternativos, y otros materiales respetuosos con el medio ambiente, es el reto que se plantean los investigadores. Por lo tanto, el principal objetivo de este estudio es evaluar el efecto que se produce en las propiedades de resistencia a la compresión y resistividad eléctrica, cuando el cemento portland, áridos gruesos y áridos finos naturales son sustituidos parcialmente por materiales alternativos dentro una mezcla de concreto. Se plantean por lo tanto el diseño de cinco tipos de mezclas de concreto alternativas, con 3 porcentajes de reemplazo cada una: 1) bagazo de caña, 2) arcilla caolín, y 3)

yeso dihidratado que reemplazan al cemento portland, mientras que 4) residuos de hormigón reciclado, y 5) caucho pulverizado reemplazan a los áridos gruesos y áridos finos naturales, respectivamente.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1 Mezcla de concreto convencional

Inicialmente se elaboró una mezcla de concreto convencional que consiste en cemento portland tipo GU con una gravedad específica de 1.14 (ASTM C188-17, 2017), módulo de finura de 74.5% (ASTM C204-16, 2016), y cuya composición química se detalla en la **Tabla 1**. Dentro de los agregados los siguientes materiales con densidad y % de absorción de agua indicados respectivamente: el árido fino (AFN) compuesto por arena de río, con 2.5 g/cm³ y 2.5% (ASTM C128-15, 2015), y el árido grueso (AGN) consta de piedra triturada o ripio con 2.4 g/cm³ y 1.65% (ASTM C127-15, 2015). Ambas granulometrías están dentro de los límites exigidos en la norma ASTM C33 (ASTM C33/C33M-18, 2018). Finalmente, agua de grifo fue utilizada para la mezcla del concreto convencional.

Tabla 1. Composición química del Cemento Portland, CBC, AC y YD.

Compuesto	Cemento Portland	CBC	AC	YD
SiO ₂	21.5	72.9	53.79	--
Al ₂ O ₃	4.4	5.6	29.75	--
Fe ₂ O ₃	0.21	3.8	2.66	--
TiO ₂	--	0.4	1.86	--
CaO	65.3	8.2	0.08	32.4
MgO	0.62	2.6	0.13	--
Na ₂ O	0.03	0.8	0.08	--
K ₂ O	0.12	3.2	1.38	--
SO ₃	4.18	0.1	--	46.6
P ₂ O ₅	--	1.5	--	--
H ₂ O	--	--	--	20.5
PF	3.07	0.7	10.2	0.5

2.2 Mezcla de concreto alternativo

Para estudiar el efecto en las propiedades de resistencia a la compresión y resistividad eléctrica, se prepararon cinco mezclas de concreto alternativo, tres de ellas reemplazando el cemento portland por: 1) ceniza de bagazo de caña (CBC), 2) arcilla caolín pretratada (AC), y 3) yeso dihidratado (YD). Estos dos últimos se agregarán en tamaño de partículas microfinas (<7µm) y ultrafinas (<5µm). Las otras dos mezclas de concreto alternativo fueron preparadas sustituyendo el árido fino y el árido grueso natural por residuos de caucho pulverizado (RCP) y hormigón reciclado (HR), respectivamente.

Tabla 2. Descripción de los tipos de muestra de hormigón elaboradas.

Muestra	Descripción
CC	Muestra de concreto convencional
CBC 5%	5 % de reemplazo de cemento por CBC
CBC 10%	10 % de reemplazo de cemento por CBC.
CBC 20%	20 % de reemplazo de cemento por CBC
AC 5%	5% de reemplazo de cemento por AC.
AC 10%	10 % de reemplazo de cemento por AC.
AC 20%	20 % de reemplazo por AC.
YD 5%	5 % de reemplazo de cemento por YD.
YD 7.5%	7.5% de reemplazo de cemento por YD.
YD 10%	10% de reemplazo de cemento por YD.
RCP 3%	3% de reemplazo de arena por RCP
RCP 5%	5 % de reemplazo de arena por RCP.
RCP 8%	8 % de reemplazo de arena por RCP.
HR 10%	10 % de reemplazo de árido grueso por HR
HR 20%	20 % de reemplazo de árido grueso por HR.
HR 40%	40% de reemplazo de árido grueso por HR.

Para cada una de estas mezclas alternativas se ensayaron tres porcentajes de reemplazo en peso: CBC y AC al 5, 10 y 20%; YD al 5, 7.5 y 10%; HR al 10, 20 y 40%, y RCP al 3, 5 y 8%, obteniéndose un total de 15 mezclas alternativas, cada una fue identificada tal como se ilustra en la **Tabla 2**, donde CC representa la mezcla de concreto convencional preparada según el apartado 2.1. Así, por ejemplo, la mezcla CBC 5%, implica que por cada 100 kg de cemento portland usado en CC, se reemplaza únicamente 5 kg de CBC, y los 95 kg restantes son de cemento portland.

La CBC fue obtenida como residuo de la planta de energía del Ingenio Azucarero La Troncal, Cañar, Ecuador. La AC se obtuvo de la mina San Marcos, Cañar, Ecuador, esta fue pretratada con agua oxigenada al 10% para eliminar la materia orgánica, secada a 110°C por 2 horas y posterior molienda. Mientras que YD se obtuvo de la trituración de residuos de estuco, con un posterior tamizado, secado a 110°C hasta obtener una humedad equiparable al cemento y seguido de una molienda para obtener partículas microfinas y ultrafinas. El residuo de caucho pulverizado se adquirió de los residuos dejados por los neumáticos de las aeronaves en zonas de aterrizaje del Aeropuerto Mariscal Lamar, Cuenca, Ecuador; estos son retirados con agua a alta presión, lavados y secados a temperatura ambiente, para luego desmenuzar y reducir su tamaño. Finalmente, el hormigón reciclado proviene de la trituración de muestras cilíndricas de hormigón existentes que

poseen una resistencia a la compresión entre 40 y 45 MPa. Las propiedades físicas de estos materiales se muestran en la **Tabla 3** y fueron determinadas usando las normas ASTM C128 (ASTM C128-15, 2015), ASTM C127 (ASTM C127-15, 2015) y ASTM C188 (ASTM C188-17, 2017). La composición química de CBC, AC y YD fue determinada por el método de fluoroscopia de rayos X (XRF) y se proporciona en la **Tabla 1**.

Tabla 3. Propiedades físicas de los materiales usados en la mezcla de concreto alternativo.

Mat.	Gravedad específica	Densidad Aparente (g/cm ³)	% Absorción de Agua	Distribución de tamaño
CBC	2.45	0.68	--	0.60-0.08 mm
AC	1.9	2.17	--	0.09-0.04 mm
YD	1.89	2.34	--	0.09-0.04 mm
HR	1.28	1.14	3.6	19.05 - 4.75 mm
RCP	1.39	0.87	0.75	1.18 - 0.075 mm

Además, en las muestras de concreto alternativo con CBC, AC y YD se utilizó un aditivo superplastificante Basf Master Glenium 3030 (ASTM C494/C494M-17, 2017) con el fin de mejorar la trabajabilidad medida con la prueba de asentamiento. En las mezclas concreto alternativo con RCP y HR no se usó el aditivo.

2.3 Diseño de mezcla

El diseño de mezcla se realizó en base al método ACI 211.1, el cual se basa en una relación agua/cemento fijada de acuerdo a la resistencia mecánica que se desea alcanzar a los 28 días. Estos datos se especifican en tablas de acuerdo a ensayos previos realizados en laboratorios. En este estudio se trabajó con una relación agua/cemento de 0,43 para una resistencia a la compresión aproximadamente de 45 MPa a los 28 días. Para cada tipo de muestra de hormigón de la **Tabla 2**, se determinaron las cantidades exactas requeridas del material cementante, agregados gruesos, y agregados finos en función del volumen total requerido para 3 cilindros de 100 mm x 200 mm. Todo esto basándose en la dosificación especificada para 1 m³ de concreto que se detalla en **Tabla 4** y **Tabla 5** para cada tipo de mezcla.

Tabla 4. Dosificación en kg de las mezclas alternativas con reemplazo de material cementante.

Designación de la mezcla	Cemento	AGN	AFN	Agua	CBC	AC	YD	Aditivo
CC	400.0	997.1	697.1	148.2	0	0	0	0.8
CBC 5%	380.0	997.1	697.1	148.2	20.0	0	0	2.1
CBC 10%	360.0	997.1	697.1	148.2	40.0	0	0	2.1
CBC 20%	320.0	997.1	697.1	148.2	80.0	0	0	2.1
AC 5%	380.0	997.1	697.1	148.2	0	20.0	0	2.1
AC 10%	360.0	997.1	697.1	148.2	0	40.0	0	2.1
AC 20%	320.0	997.1	697.1	148.2	0	80.0	0	2.1
YD 5%	380.0	997.1	697.1	148.2	0	0	20.0	2.1
YD 7.5%	370.0	997.1	697.1	148.2	0	0	30.0	2.1
YD 10%	360.0	997.1	697.1	148.2	0	0	40.0	2.1

Tabla 5. Dosificación en kg de las mezclas alternativas con reemplazo de agregado fino y grueso.

Designación de la mezcla	Cemento	AGN	AFN	Agua	RCP	HR
RCP 3%	400.0	997.1	676.2	148.2	20.9	0
RCP 5%	400.0	997.1	662.3	148.2	34.8	0
RCP 8%	400.0	997.1	641.4	148.2	55.7	0
HR 10%	400.0	897.4	697.1	148.2	0	99.7
HR 20%	400.0	797.7	697.1	148.2	0	199.4
HR 40%	400.0	598.3	697.1	148.2	0	398.8

2.4 Método de fundición y curado

La preparación y curado de los especímenes cilíndricos de concreto se elaboraron siguiendo la norma ASTM C192 (ASTM C192/C192M-18, 2018), bajo las siguientes consideraciones: para aquellas mezclas alternativas que contienen materiales que reemplazan al cemento portland, inicialmente se mezcló dicho material con el cemento portland durante 3 minutos, antes de agregarse a la mezcla. Se procedió de igual manera para aquellas mezclas que contenían agregados reciclados, mezclando con el agregado respectivo. La cantidad de aditivo superplastificante se mezcló con el agua. A la mezcla de hormigón fresca se determinó el asentamiento mediante el cono de Abrahms para que se mantenga entre 7.5 y 12.5 cm (ASTM C143/C143M - 15a, 2015) para una consistencia de concreto media, y se colocó en moldes cilíndricos de 100 mm x 200 mm. Luego de 24 h las muestras fueron desencofradas y curadas en agua a temperatura 23°C +2.

2.5 Evaluación de resistencia a la compresión y resistividad eléctrica

Las pruebas de resistencia a la compresión fueron llevadas a cabo según la norma técnica ASTM C-39 (ASTM C39/C39M-18, 2018). Las muestras cilíndricas de 100 mm x 200 mm fueron medidas, pesadas y ensayadas a los 3, 7 y 28 días de curado en húmedo. Los experimentos se realizaron en una máquina de prueba Marca Controls Modelo A32C02 con una capacidad de carga de 2000 kN y una velocidad de carga de 0.20 MPa/s (**Figura 1**).



Figura 1. Ensayo de resistencia a la compresión en una de las muestras cilíndricas de la mezcla de concreto alternativa

Los ensayos de resistividad eléctrica en masa (RE) se llevaron a cabo mediante el método uniaxial de dos puntos. Dicho método se basa en colocar dos electrodos en la superficie del concreto (generalmente dos placas metálicas paralelas). Al pasar la electricidad, se mide la diferencia de potencial entre los dos electrodos. Adicionalmente se coloca una esponja húmeda en la interfaz del electrodo y la muestra para asegurar una conexión eléctrica adecuada (Azarsa & Gupta, 2017). La **Figura 2** muestra el esquema de la prueba de resistividad eléctrica por el método uniaxial de dos puntos.

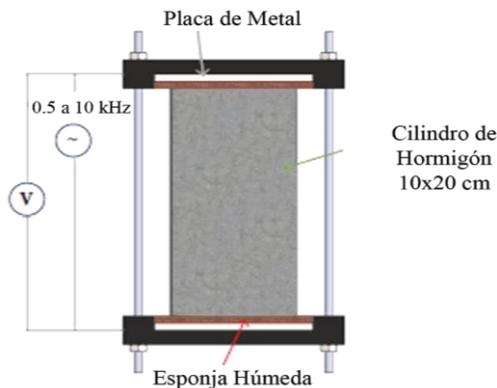


Figura 2. Esquema de la prueba de resistividad eléctrica por el método uniaxial de dos puntos en cilindros de concreto de 4 x 8 pulg (Alizadeh et al., 2015).

Para este estudio específicamente, las muestras cilíndricas usadas fueron ensayadas a los 28 días de curado en condición de superficie saturada seca (SSD) y el equipo usado fue Giatec Scientific RCON. Se aplicó una corriente eléctrica alterna de 1 kHz, luego la resistividad eléctrica en masa (RE) fue determinada por la corriente registrada, la caída de voltaje y la geometría de los cilindros, y se obtuvo mediante la aplicación de la ecuación 1 (Alizadeh et al., 2015).

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L} \quad (1)$$

Donde ρ es la resistividad eléctrica en masa ($\Omega \cdot m$), R es la resistencia eléctrica registrada (Ω), A es el área de la sección transversal del cilindro (m^2) y L es la altura de la probeta cilíndrica (m).

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Resistencia a la Compresión

Los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión para todas las mezclas se dan en la **Tabla 6**. Mientras que la **Figura 3** muestra los resultados de resistencia a la compresión para las 3 mezclas que poseen CBC, AC y YD en diferentes proporciones, y la **Figura 4** para las 2 mezclas que poseen HR y RCP en diferentes proporciones.

Tabla 6. Resistencia a la Compresión del cilindro convencional y alternativos en MPa.

Muestra	Tiempo		
	3 días	7 días	28 días
CC	16.75	27.28	46.35
CBC 5%	15.81	26.01	46.86
CBC 10%	15.25	25.05	47.34
CBC 20%	13.88	23.84	45.81
AC 5%	16.51	24.00	43.44
AC 10%	14.48	22.05	39.31
AC 20%	13.54	21.34	37.23
YD 5%	12.67	15.45	22.28
YD 7.5%	12.5	15.28	21.15
YD 10%	12.44	14.33	20.03
RCP 3%	13.59	22.49	36.97
RCP 5%	13.17	19.31	34.22
RCP 8%	14.29	21.06	32.15
HR 10%	17.08	27.11	46.12
HR 20%	16.67	26.92	45.94
HR 40%	16.56	26.14	44.37

De la **Tabla 6** se observa que la muestra de concreto convencional CC registró una resistencia a la compresión de 46.35 MPa a los 28 días, la cual es ligeramente superior al valor objetivo planteado en la dosificación, demostrando una correcta dosificación.

Cuando se adiciona CBC a la mezcla de concreto se observa que la resistencia de las muestras a los 28 días aumenta a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de CBC, este comportamiento se observa hasta un 10% de reemplazo, pues, un aumento adicional de CBC resulta en una disminución de la

resistencia, tal como sucede con la muestra CBC 20%. Resultados similares lo obtuvieron Fairbairn et al. (2010), en cambio, Setayesh et al. (2017), indican que con un reemplazo de 15% de CBC la resistencia se nivela con la mezcla de referencia, pero un aumento adicional conduce a una disminución. Mientras que Jagadesh et al. (2018) obtuvieron altas resistencias con un 20% de reemplazo máximo de CBC procesado vía molienda y posterior quema a 400°C. En base a estos estudios, se puede establecer que el valor óptimo se encuentra entre 10-15 % de CBC sin procesar y hasta un 20% cuando es procesado. Una cantidad posterior a estos valores actuará únicamente como material de relleno y no como puzolánico. El aumento de la resistencia que experimenta el concreto al adicionar CBC puede deberse por un lado al contenido de sílice amorfa (**Tabla 1**), el cual tiene una propiedad puzolánica al reaccionar con el hidróxido de calcio (subproducto de la reacción de hidratación del cemento) y producir más silicato de calcio hidratado (CSH) que es el responsable de las propiedades mecánicas del concreto (Akram et al., 2009; Chindaprasirt et al., 2008; Ganesan et al., 2007). Por otro lado, el tamaño fino de la CBC llena los vacíos en la estructura del concreto, así como facilita la reactividad debido a su alta superficie específica, de esta manera favoreciendo la resistencia a la compresión (Akram et al., 2009). También es importante destacar que la tasa de aumento de la resistencia de las mezclas con CBC es mayor en los últimos días que a edades tempranas, por lo que a edades mucho más tardías puede mejorar aún más la resistencia, y esto puede deberse netamente a las propiedades puzolánicas del CBC.

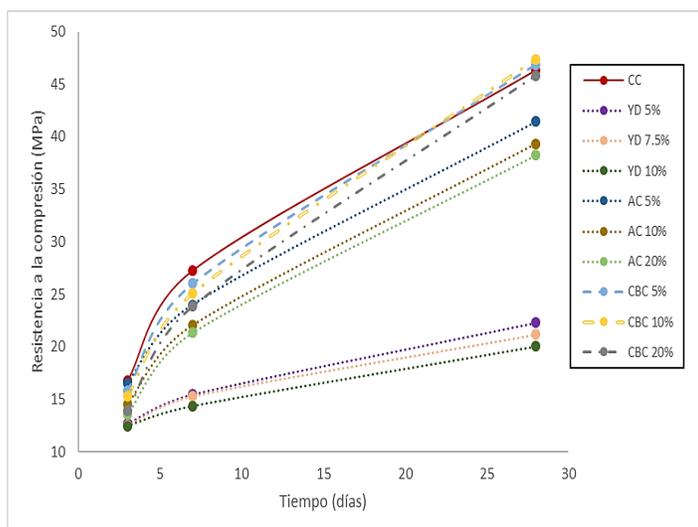


Figura 3 Resistencia a la compresión a los 3, 7 y 28 días de las mezclas concreto alternativo con CBC, YD y AC.

Por otro lado, el tamaño de las partículas de AC y YD se encuentran en el rango de las partículas microfinas y ultrafinas según la norma ASTM C33 (ASTM C33/C33M - 18, 2018). Es sabido que estas partículas han sido consideradas dañinas para el concreto y mortero pues comprometen las propiedades mecánicas y de durabilidad (Buth et al., 1964). Sin embargo, varios investigadores han encontrado efectos beneficiosos en el mortero al estudiar las partículas en tamaño microfino y ultrafino presentes como impurezas y arcillas en proporciones de hasta 15% (Quiroga et al., 2006), y 30% (Katz & Baum, 2006) en los agregados finos. En este estudio, se puede observar que el reemplazo de cemento por AC y YD con partículas microfinas y ultrafinas disminuye la resistencia del concreto, siendo esto más pronunciado cuando se usa YD. Principalmente, esto se debe a la reducción de la capacidad de trabajo debido a su alta área de superficie, lo que requiere un aumento en la cantidad de agua, que a su vez reduce la resistencia. Además, como AC y YD no son materiales cementantes a esas condiciones, la relación agua/materiales cementicios aumenta, aunque este aumento puede ser compensado con el superplastificante añadido, no es suficiente como para evitar la disminución a la resistencia. La razón por la que AC no se ve tan afectado como YD, puede deberse a su diferente comportamiento dentro de la mezcla. El mineral de la AC es la caolinita, un mineral como muy poca capacidad de absorber agua entre sus capas. Dentro de la matriz alcalina del concreto (debido al Ca(OH)_2), la caolinita se encuentra en forma inactiva y no interactúa con ninguno de los elementos de la matriz, únicamente siendo capaz de modificar sus cargas superficiales y de producir un estado de floculación entre las partículas de arcilla. El hecho de que la resistencia disminuya con el aumento de reemplazo de AC, se debe únicamente al incremento de la relación agua/cemento. Khelifi et al. (2013) manifiestan que, si la relación agua/cemento se mantiene constante, sin importar la cantidad de AC que se agregue, la resistencia es la misma.

Para el caso de YD, se sabe que el aluminato tricálcico (C3A) al combinarse con yeso y agua produce etringita, sin embargo, si YD está en cantidad excesiva, puede reaccionar con el Ca(OH)_2 de la hidratación del cemento y dar lugar a la formación de sulfoaluminatos cálcicos hidratados que producen procesos de expansión y ruptura, pérdida de cohesión de la pasta de cemento y las partículas de los agregados, y por consiguiente menor resistencia. Además, las mezclas con YD sufren una reducción de trabajabilidad mucho mayor que la mezclas AC, esto indica una mayor absorción de agua por parte de YD. En ambos casos YD y AC, actúan como agregados de alta demanda de agua.

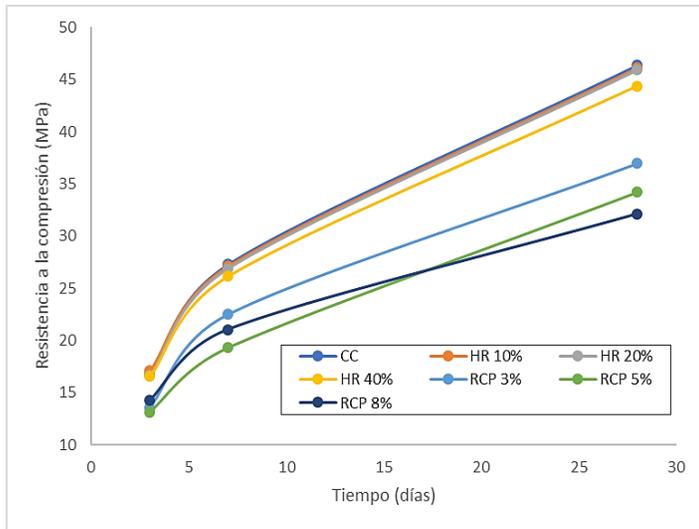


Figura 4 Resistencia a la compresión a los 3, 7 y 28 días de las mezclas concreto alternativo con HR y RCP.

En cuanto a los agregados reciclados, los resultados de los ensayos mecánicos evidencian que la resistencia a la compresión es fuertemente afectada y se ve reducida a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo del RCP. Siendo el 26.17% el porcentaje de reducción máxima con un 8% de RCP. Estos resultados difieren en pequeña medida a los resultados encontrados por Oviedo et al. (2008), en donde la sustitución del agregado grueso por 5%, 10% y 15% de caucho produce pérdidas en la resistencia a la compresión de 11.2%, 17.3% y 38% respectivamente. Se ha podido observar que para un mismo % de reemplazo, el % de reducción de la resistencia depende del tamaño de partícula del caucho usado. Siendo mayor cuanto más alto es el tamaño de partícula del caucho. Estos resultados confirman los hallazgos de otros investigadores (Bonnet, 2003; Segre & Joekes, 2000; Turatsinze & Garros, 2008). La razón principal de la disminución de la resistencia se ha atribuido a la baja adherencia entre las partículas de RCP y la matriz de cemento.

Para el caso del HR, la sustitución de 10, 20% y 40% disminuye la resistencia en 0.49%, 0.88% y 4.27% con respecto al cilindro convencional, estableciéndose que el 20% es el máximo a usar como reemplazo, ya que su disminución es insignificante. Este % máximo depende de las propiedades mecánicas del hormigón del cual se recicla, el tamaño y % de absorción de agua de HR y las proporciones de diseño de la nueva mezcla, como la relación agua/cemento. Así el % óptimo obtenido en otros estudios es 30% (Limbachiya et al., 2000) con hormigón reciclado de 50 MPa, 25% (Thomas et al., 2018) con un hormigón de 25 MPa, pero con una relación agua/cemento de 0.4. Muchos investigadores concuerdan que la razón principal de la

disminución de resistencia es atribuida al hecho de que la superficie de HR posee una capa de cemento residual que afecta las propiedades mecánicas (Musiket et al., 2016). Otro efecto que es importante destacar es el hecho de que el % de absorción de agua en HR es mayor que el árido grueso natural, indicando una mayor porosidad y menor densidad aparente, lo que lleva a obtener hormigones menos densos y menos resistentes.

El efecto que tiene el % de reemplazo de cada material estudiado con respecto a la resistencia a la compresión se observa en la **Figura 5**. De esta imagen se deduce que los únicos materiales que incrementan la resistencia o la mantienen en un rango aceptable son la CBC como material cementicio suplementario y el HR como reemplazo del agregado grueso. Especial interés tiene la CBC que alcanza un punto de inflexión al 10%.

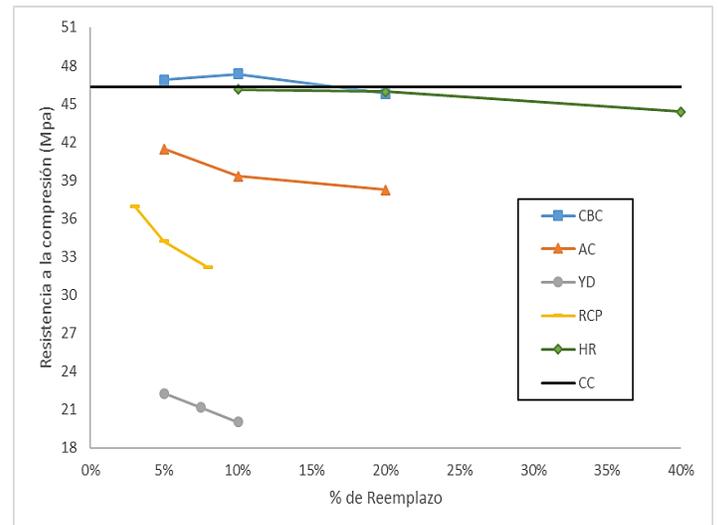


Figura 5 Influencia del % de reemplazo en la resistencia a la compresión a los 28 días.

3.2 Resistividad Eléctrica

El material que más beneficia a la resistividad eléctrica es el RCP, observándose que reemplazos de 3%, 5% y 8% incrementa la RE en un 11.9%, 76.75% y 99.9% respectivamente (**Figura 6**). Estos resultados pueden deberse a las propiedades poliméricas del RCP, que dentro del cilindro actúa como aislante eléctrico debido a su baja conductividad eléctrica. Además, su reducido tamaño se distribuye uniformemente en la mezcla evitando el paso de los iones a través del concreto. Resultados análogos han sido reportados por otros investigadores pero usando otros métodos para cuantificar la durabilidad del concreto, así Al-Akhras & Smadi (2004) reportaron una mayor resistencia a la penetración de los iones de cloruro para el mortero que contiene 5% y 10% de partículas de caucho

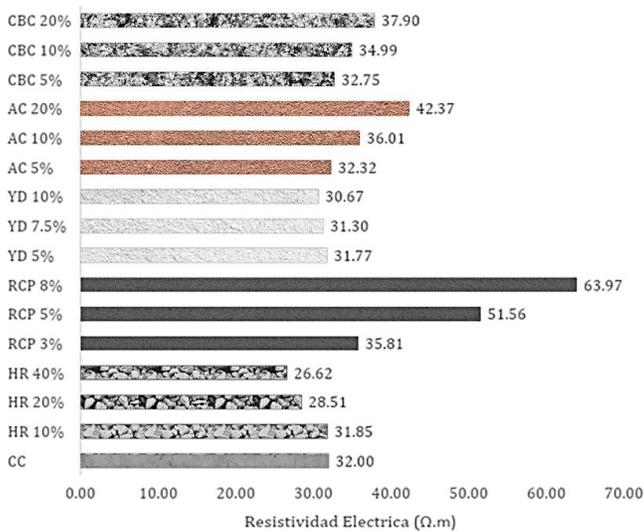


Figura 6. Resistividad eléctrica (RE) de los distintos cilindros alternativos y el cilindro convencional a los 28 días de curado.

Para el caso de CBC, un 20% de reemplazo incrementa la RE en 18.43 %. Se observa que por cada 1 unidad de % de reemplazo adicional, la RE aumenta en 0.45 unidades. Al igual que los resultados obtenidos en este estudio los resultados de Shafiq et al. (2014) muestran la eficacia del uso de CBA en la durabilidad de concreto realizado a través de la prueba de penetración de iones cloruro, establecieron que con solo un 5% de CBC, redujo la profundidad de penetración en un 50%. Rukzon & Chindaprasirt (2012), y Subramaniyan & Sivaraja (2016) también encontraron que la adición de CBC aumenta la resistencia a la penetración de cloruro y la permeabilidad. La razón del aumento de RE, se debe a la generación de CSH, la cual crea un hormigón mucho más compacto, con una cantidad mínima de poros, que obstaculizan la difusión de iones en el hormigón.

Un resultado particular es el obtenido con el AC, el cual mejora notablemente la RE en todas las proporciones usadas. Varias pueden ser las causas de este notable incremento: a) su tamaño microfino y ultrafino actúa como un material de relleno, disminuyendo la porosidad y aumentando RE, b) la superficie de las partículas de caolinita en la AC disminuye la concentración de álcalis e iones por procesos de adsorción e intercambio iónico, y c) La AC cuando es pura es bastante resistente a la acción química de los reactivos. Alguna o más de una de estas causas podrían actuar sinérgicamente beneficiando la RE. Por otro lado, el HR y la YD son los materiales en los cuales disminuye la RE. En HR la disminución es más pronunciada, la justificación a este resultado es la gran cantidad de poros que posee este material, en los cuales se aloja agua e iones, y debido a la que las pruebas de RE se llevan en condición SSD, el agua en los poros incrementa la conductividad eléctrica y disminuye la RE. En la

literatura existen resultados similares, el incremento en el porcentaje reemplazo de HR disminuye la resistencia a la penetración de los iones y la permeabilidad (Guo et al., 2018; Kisku et al., 2017; Wang et al., 2016). Los resultados con YD tienen cierta singularidad, debido al hecho de que un 10% de reemplazo de YD provoca una disminución de más del 50% de la resistencia a la compresión, pero reduce en apenas un 5% la RE. Los cilindros con YD, poseen por un lado menor relación agua/cemento, pero por otro lado las partículas microfinas y ultrafinas rellenan los poros afectando las soluciones del poro y contrarrestando el contenido de humedad superior, lo que lleva a disminución ligera de RE, pero a una excesiva de resistencia a la compresión debido a la falta de CSH.

De la bibliográfica consultada se puede evidenciar que los resultados obtenidos de la resistividad eléctrica poseen una correlación directa con las propiedades resistencia a la penetración de los iones y la permeabilidad, por lo que la RE podría ser usado como parámetro de la durabilidad. Aunque dicha correlación depende de la composición del hormigón, la relación agua/cemento, el uso de aditivos, entre otros (Guo et al., 2018). Por eso es necesario profundizar la investigación en ese campo.

4. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en las diferentes mezclas con los reemplazos estipulados, se concluye que:

- La ceniza de bagazo de caña (CBC) debido a sus propiedades puzolánicas mejora la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica, siendo el 10% el porcentaje óptimo de reemplazo.
- Las partículas microfinas y ultrafinas de la arcilla caolín (AC) y yeso dihidratado (YD) al reemplazar el cemento portland reducen notablemente la resistencia a la compresión debido a que no poseen propiedades puzolánicas, pero incrementan (para el caso de AC) y disminuyen ligeramente (para el caso de YD) la resistividad eléctrica a causa de su diminuto tamaño de partícula y las propiedades exclusivas de cada material.
- El máximo porcentaje de reemplazo de residuo de caucho pulverizado (RCP), reduce hasta un tercio de la resistencia de un cilindro convencional, no obstante, duplica la resistividad eléctrica, lo que podría favorecer la durabilidad de un hormigón.
- Todos los reemplazos de hormigón reciclado como sustituto del árido grueso no producen un descenso significativo en la resistencia a la compresión, sin embargo, en la resistividad eléctrica si disminución es hasta un 17% con respecto a un concreto convencional.



- Los resultados de la presente investigación mostraron que los mejores materiales de reemplazo para mejorar propiedades mecánicas y la resistividad eléctrica fueron: CBC como material cementicio suplementario, HR y RCP como agregados reciclado grueso y fino respectivamente. Por lo tanto, una mezcla de concreto sustentable a base de 10% CBC, 40% HR y 8% RCP podría ser factible con las propiedades deseadas y aplicable en diversos sectores de la construcción.
- La resistividad eléctrica en masa es una técnica efectiva que puede servir de apoyo para predecir la durabilidad de un hormigón a largo plazo. En este estudio se demuestra una correlación directa entre RE y la resistencia a la penetración de los iones cloruro así como con la permeabilidad, aunque esta relación podría estar influenciada por otros factores.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la compañía Hormicreteo, así como al Laboratorio de Suelos de la Universidad de Cuenca que han ofrecido la posibilidad de realizar este trabajo.

6. Bibliografía

- [1] Akram, T., Memon, S. A., & Obaid, H. (2009). Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 23(2), 703–712. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2008.02.012>
- [2] Al-Akhras, N. M., & Smadi, M. M. (2004). Properties of tire rubber ash mortar. *Cement and Concrete Composites*, 26(7), 821–826. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2004.01.004>
- [3] Alizadeh, A., Layssi, H., Ghods, P., & Salehi, M. (2015). Electrical Resistivity of Concrete: Concepts, applications, and measurement techniques. *Concrete International*, 2–3. Retrieved from www.concreteinternational.com/7CCi%7CMAY201541
- [4] ASTM C127 - 15. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/C127>
- [5] ASTM C128 - 15. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/C128>
- [6] ASTM C143 / C143M - 15a. (2015). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/C143>
- [7] ASTM C188 - 17. (2017). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/C188>
- [8] ASTM C192 / C192M - 18. (2018). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/C192>
- [9] ASTM C204-16. (2016). Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus. Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/C204.htm>
- [10] ASTM C33 / C33M - 18. (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates. Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/C33>
- [11] ASTM C39 / C39M - 18. (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/C39>
- [12] ASTM C494 / C494M - 17. (2017). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/C494>
- [13] Azarsa, P., & Gupta, R. (2017). Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 1–30. <https://doi.org/10.1155/2017/8453095>
- [14] Bahurudeen, A., Kanraj, D., Gokul Dev, V., & Santhanam, M. (2015). Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 59, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.004>
- [15] Bisht, K., & Ramana, P. V. (2017). Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 155, 811–817. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.131>
- [16] Bonnet, S. (2003). Effet de l'Incorporation des Granulats Caoutchouc sur la Résistance à la Fissuration des Mortiers'. *XXIEMES Rencontres Universitaires de Génie Civil*, 59–70.
- [17] Bremmer, T. W., & Eng, P. (2001). Environmental aspect of concrete: Problems and solutions. Plenary Session of the 1st All-Russian Conference on Concrete And Reinforced Concrete, 14. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/228806986_Environmental_aspect_of_concrete_Problems_and_solutions
- [18] Brunatti, C., & Souza, E. (2011). El hormigón y el ambiente. *Revista Hormigonar*, (25), 03–12. Retrieved from <https://docplayer.es/18146380-El-hormigon-y-el-ambiente-ing-carlos-brunatti-arq-edgardo-souza.html>
- [19] Buth, E., Don, L., & Hirsch, T. J. (1964). CORRELATION OF CONCRETE PROPERTIES . WITH TESTS FOR CLAY CONTENT OF Deleterious Materials in Concrete Research Project Number, (32). Retrieved from <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/71-1.pdf>



- [20] Chandra, S., Mbewe, P., Kong, S., & Šavija, B. (2019). Agricultural Solid Waste as Source of Supplementary Cementitious Materials in Developing Countries. *Materials*, 12(7), 1112. <https://doi.org/10.3390/ma12071112>
- [21] Chindaprasirt, P., Rukzon, S., & Sirivatnanon, V. (2008). Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*, 22(5), 932–938. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2006.12.001>
- [22] CINCAE. (2008). Utilización de subproductos de la caña de azúcar y de la industria alcohólica ecuatoriana para uso en la fertilización en los cultivos de caña. Retrieved from <http://cincae.org/utilizacion-de-subproductos-de-la-cana-de-azucar-y-de-la-industria-alcoholera-ecuadoriana-para-uso-en-la-fertilizacion-en-los-cultivos-de-cana/?format=pdf>
- [23] Crow, J. M. (2008). The concrete conundrum. In *Chemistry World* (Vol. 5). Retrieved from https://www.rsc.org/images/construction_tcm18-114530.pdf
- [24] Fairbairn, E. M. R., Americano, B. B., Cordeiro, G. C., Paula, T. P., Toledo Filho, R. D., & Silvano, M. M. (2010). Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits. *Journal of Environmental Management*, 91(9), 1864–1871. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2010.04.008>
- [25] Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2007). Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 515–524. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2007.03.001>
- [26] Ghani, A. A., Alghazali, H. H., ElGawady, M. A., Myers, J. J., & Feys, D. (2019). Durability properties of cleaner cement mortar with by-products of tire recycling. *Journal of Cleaner Production*, 213, 1135–1146. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.260>
- [27] Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T.-C., ... Wang, Y. (2018). Durability of recycled aggregate concrete – A review. *Cement and Concrete Composites*, 89, 251–259. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.03.008>
- [28] Hasanbeigi, A., Price, L., & Lin, E. (2012). Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6220–6238. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.07.019>
- [29] Hernández-Jatib, N., Ulloa-Carcasés, M., Almaguer-Carmenate, Y., & Ferrer, Y. R. (2013). EVALUACIÓN AMBIENTAL ASOCIADA A LA EXPLOTACIÓN DEL YACIMIENTO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN LA INAGUA, GUANTÁNAMO, CUBA. *Luna Azul*, 13. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n38/n38a09.pdf>
- [30] INEC. (2016). Módulo de Información Ambiental Económica en Empresas 2016. Retrieved from https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/EMPRESAS/Empresas_2016/P_RIN_RESUL_MOD_AMB_EMP_2016.pdf
- [31] Ismail, M. D., Alam, S. S., & Abdul Hamid, R. B. (2017). Trust, Commitment and Competitive Advantage in SMEs Export Performance. *Gadjah Mada International Journal of Business*, 19(1), 1. <https://doi.org/10.22146/gamaijb.22680>
- [32] Jagadesh, P., Ramachandramurthy, A., & Murugesan, R. (2018). Evaluation of mechanical properties of Sugar Cane Bagasse Ash concrete. *Construction and Building Materials*, 176, 608–617. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.05.037>
- [33] Jiménez, L. F., Domínguez, J. A., & Vega-Azamar, R. E. (2018). Carbon Footprint of Recycled Aggregate Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2018/7949741>
- [34] Katz, A., & Baum, H. (2006). Effect of High Levels of Fines Content on Concrete Properties. *ACI Materials Journal*, 103(6), 474–482. <https://doi.org/10.14359/18226>
- [35] Khelifi, H., Perrot, A., Lecompte, T., & Ausias, G. (2013). Design of clay/cement mixtures for extruded building products. *Materials and Structures*, 46(6), 999–1010. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9949-4>
- [36] Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S., & Dutta, S. C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 131, 721–740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>
- [37] Kumar, P. (2001). Reducing the Environmental impact of concrete. *Concrete International*, 13, 61–66. Retrieved from http://maquinamole.net/EcoSmartconcrete.com/docs/trm_ehta01.pdf
- [38] Lehne, J., & Preston, F. (2018). Chatham House Report Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete. In Chatham House Report. Retrieved from <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston.pdf>
- [39] Li, Y., Zhang, S., Wang, R., & Dang, F. (2019). Potential use of waste tire rubber as aggregate in cement concrete – A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 225, 1183–1201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.198>
- [40] Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, 33(9), 574–580. <https://doi.org/10.1007/BF02480538>



- [41] Madlool, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., & Rahim, N. A. (2011). A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2042–2060. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>
- [42] Mangi, S. A., Jamaluddin, N., Wan Ibrahim, M. H., Abdullah, A. H., Abdul Awal, A. S. M., Sohu, S., & Ali, N. (2017). Utilization of sugarcane bagasse ash in concrete as partial replacement of cement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 271, 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012001>
- [43] Meyer, C. (2002). *Concrete and Sustainable Development*. ACI Symposium Publication, 206, 501–512. <https://doi.org/10.14359/12272>
- [44] Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability*, 1(1), 69–76. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>
- [45] Modani, P. O., & Vyawahare, M. R. (2013). Utilization of Bagasse Ash as a Partial Replacement of Fine Aggregate in Concrete. *Procedia Engineering*, 51, 25–29. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.007>
- [46] Mohammed, B. S., & Adamu, M. (2018). Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. *Construction and Building Materials*, 159, 234–251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.098>
- [47] Musiket, K., Rosendahl, M., & Xi, Y. (2016). Fracture of Recycled Aggregate Concrete under High Loading Rates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(6), 04016018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001513](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001513)
- [48] Oviedo et al. (2008). Estudio del concreto hidráulico con adición de tiras de caucho de desecho de llanta. *Revista de La Escuela Colombiana de Ingeniería*, 18(17), 7–17.
- [49] Paricaguan, B., Albano, C., Vladimir, R., Camacho, N., Infante, J., & Muñoz, J. (2013). Efecto de las fibras de coco sobre la resistencia a la flexión de mezclas de hormigón. *Revista DYNA*, 88(4), 424–432. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6036/5646>
- [50] Pham, N.-P., Toumi, A., & Turatsinze, A. (2019). Effect of an enhanced rubber-cement matrix interface on freeze-thaw resistance of the cement-based composite. *Construction and Building Materials*, 207, 528–534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.147>
- [51] Quiroga, P., Ahn, N., & Fowler, D. W. (2006). Concrete mixtures with high microfines. In *ACI Materials Journal* (Vol. 103). Retrieved from <https://researchers.dellmed.utexas.edu/en/publications/concrete-mixtures-with-high-microfines-2>
- [52] Reyes-sánchez, J. A., Tenza-abril, A. J., Verdu, F., & Reyes Perales, J. A. (2017). Predicting modulus of elasticity of recycled aggregate concrete using nonlinear mathematical models. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 6(4), 703–715. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V6-N4-703-715>
- [53] Rukzon, S., & Chindapasirt, P. (2012). Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. *Materials & Design*, 34, 45–50. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2011.07.045>
- [54] Saez, E. (2013). Un cemento hidráulico ecológico - Construcción Pan-Americana. Retrieved September 8, 2019, from <https://www.construccion-pa.com/reportajes/un-cemento-hidraulico-ecologico/>
- [55] Safiuddin, M., Alengaram, U. J., Rahman, M. M., Salam, M. A., & Jumaat, M. Z. (2013). USE OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE IN CONCRETE: A REVIEW. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(6), 796–810. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.799093>
- [56] Samadi, A. (1996). *Treatment of Fly Ash to Increase its Cementitious Characteristics*. PhD Dissertation, Drexel University, Philadelphia, PA.
- [57] Segre, N., & Joekes, I. (2000). Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1421–1425. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00373-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00373-2)
- [58] Setayesh, P., Suresh, N., & Bindiganavile, V. (2017). Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixture in concrete for resistance to sustained elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 153, 929–936. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.07.107>
- [59] Shafiq, N., Elhsameed, A. A., & Nuruddin, M. F. (2014). Durability of Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) Concrete towards Chloride Ion Penetration. *Applied Mechanics and Materials*, 567, 369–374. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.567.369>
- [60] Silva, F. M., Gachet Barbosa, L. A., Lintz, R. C. C., & Jacintho, A. E. P. G. A. (2015). Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber. *Construction and Building Materials*, 91, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.027>
- [61] Silva, R. V., Brito, J., & Dhir, R. K. (2015a). Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 83, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.034>
- [62] Silva, R. V., Brito, J., & Dhir, R. K. (2015b). The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(7), 825–849. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.974831>



- [63] Souche, J.-C., Devillers, P., Salgues, M., & Garcia Diaz, E. (2017). Influence of recycled coarse aggregates on permeability of fresh concrete. *Cement and Concrete Composites*, 83, 394–404. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.002>
- [64] Subramaniyan, K. S., & Sivaraja, M. (2016). Assessment of Sugarcane Bagasse Ash Concrete on Mechanical and Durability Properties. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 24(S1), 257–262. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2016.24.S1.52>
- [65] Thomas, B. S., Kumar, S., Mehra, P., Gupta, R. C., Joseph, M., & Csetenyi, L. J. (2016). Abrasion resistance of sustainable green concrete containing waste tire rubber particles. *Construction and Building Materials*, 124, 906–909. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.110>
- [66] Thomas, J., Thaickavil, N. N., & Wilson, P. M. (2018). Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, 19, 349–365. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2018.05.007>
- [67] Turatsinze, A., & Garros, M. (2008). On the modulus of elasticity and strain capacity of Self-Compacting Concrete incorporating rubber aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), 1209–1215. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2008.06.012>
- [68] Wang, H., Sun, X., Wang, J., & Monteiro, P. J. M. (2016). Permeability of concrete with recycled concrete aggregate and pozzolanic materials under stress. *Materials*, 9(4), 252. <https://doi.org/10.3390/ma9040252>