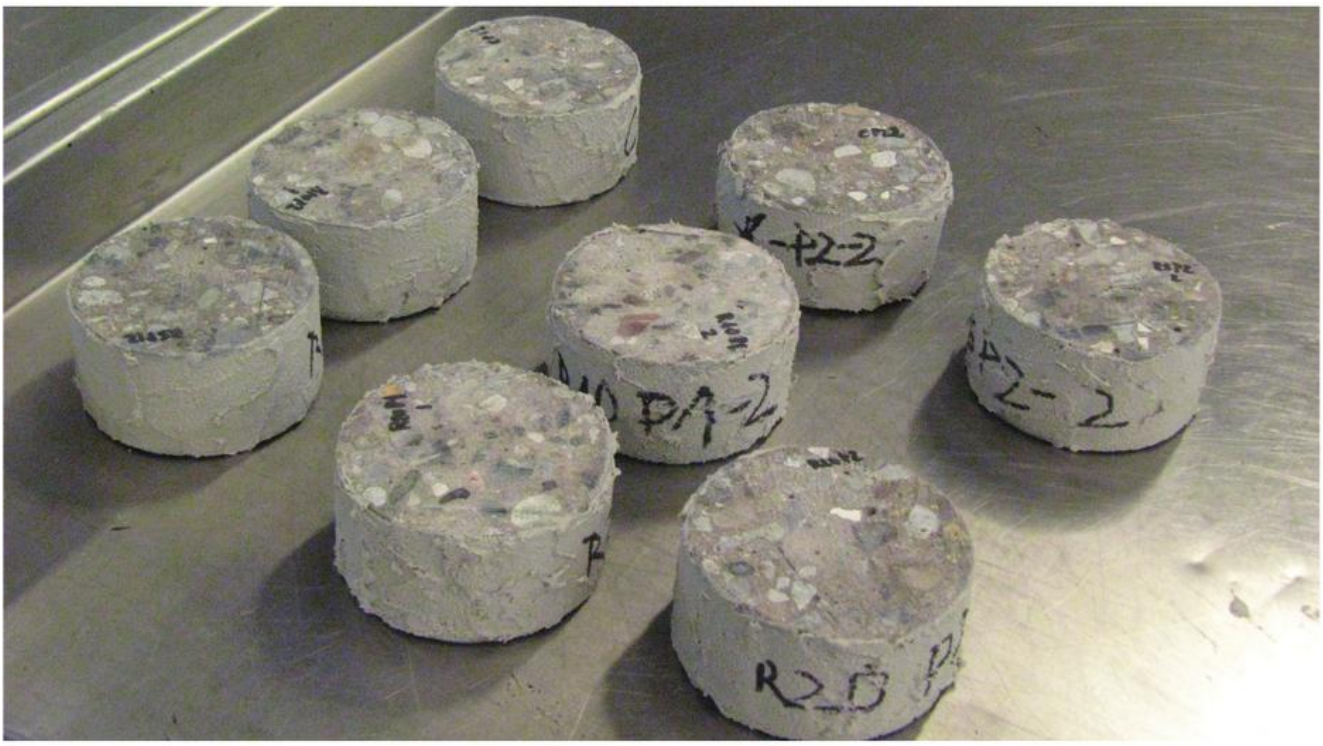

Evaluación del desempeño de hormigones con ceniza de cascarilla de arroz como material cementicio suplementario

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
Franco Zunino[1], Alumno de quinto año
Mauricio López[1], Profesor asociado
[1] ESCUELA DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El objetivo general de la investigación es analizar los efectos de la utilización de ceniza de cascarilla de arroz (CCA) como material cementicio suplementario en mezclas de hormigón, y a partir de los resultados, evaluar la proyección y aplicabilidad de dicho material en hormigones de alto desempeño usados en construcción. La relevancia de abordar el uso de nuevas adiciones minerales puede entenderse desde una perspectiva ingenieril al mejorar el desempeño del hormigón en algunos aspectos, como también desde la perspectiva ambiental, al permitir una reducción del porcentaje de clínker en el cemento y de las elevadas emisiones de CO_2 asociadas a su proceso de manufactura [1]. El proceso de fabricación del cemento se constituye hoy como una de las principales fuentes industriales de emisión de dióxido de carbono (CO_2). Datos de EPA [2] (Environmental Protection Agency, dependiente del gobierno de Estados Unidos), indican que la razón de producción de CO_2 es de 0,507 toneladas por cada tonelada de clínker producido.

La cascarilla de arroz es un subproducto de la producción de este cereal. Del total en peso, un 20% corresponde a cascarilla, la cual se compone en un 75% de material

orgánico y un 20% de sílice (SiO_2) aproximadamente. La ceniza de cascarilla de arroz se obtiene de la combustión de la cascarilla, con un rendimiento de producción cercano al 25% [3-5]. Si bien la combustión de la cascarilla para obtener ceniza también produce CO_2, si se logra insertar el uso de la cascarilla de arroz a un nivel más amplio, es posible optimizar la huella de carbono neta del sistema. Estudios realizados en Tailandia [6], donde ya se utiliza la cascarilla de arroz en centrales de poder pequeñas, han comprobado que la huella de carbono neta es significativamente menor, dado que, al ser un producto orgánico, el CO_2 liberado es recuperado a través del ciclo de carbono de la biomasa, ventaja comparativa frente a un combustible fósil.

METODOLOGÍA

Un saco de 12 kg. de cascarilla de arroz fue quemado en condiciones semi-controladas usando una cocinilla industrial hasta la calcinación total aparente. El proceso permitió eliminar gran parte del material orgánico presente en la cascarilla, dejando como resultado un material grisáceo oscuro (Figura 1A). La ceniza obtenida fue reprocesada en condiciones controladas al interior de una mufla, a 700°C durante 2 horas [3], con el fin de descartar cualquier residuo orgánico remanente y, a la vez, homogeneizar el estado de calcinación en todo el material. Como resultado del proceso se obtuvieron alrededor de 2,5 kg. de ceniza de aspecto gris claro (Figura 1B).

A) B)

Figura 1: A) Ceniza luego del quemado inicial,y B) ceniza posterior a calcinación controlada.

Con el fin de reducir y dar uniformidad al tamaño de partículas medio de la ceniza, se sometió al material a una molienda controlada por dos minutos en un molinillo vibratorio de dos elementos. El tamaño y características de las partículas del cemento Portland tipo I usado y de la ceniza obtenida fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

Con la ceniza obtenida se elaboraron probetas cúbicas, de 50 mm. de arista, de pasta de cemento en cuatro proporciones diferentes, utilizando 0, 5, 10 y 20% de sustitución en peso de cemento por ceniza de cascarilla de arroz. Se utilizaron tres probetas de cada mezcla para cada uno de los ensayos de resistencia a compresión a diferentes edades. Se elaboraron, además, probetas cilíndricas (10 cm. de diámetro y 20 de altura) y cúbicas (15 cm. de arista) de hormigón para realizar ensayos de absorción capilar, permeabilidad al ión cloruro y al aire. Las dosificaciones usadas en cada caso se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Dosificaciones de pasta de cemento y hormigón.

		W/B	Cemento Portland [kg/m³]	CCA [kg/m³]	Agregado Fino [kg/m³]	Agregado Grueso [kg/m³]
Pasta Cemento	Control	0,4	1363,5	/	/	/
	5%	0,4	1295,3	68,2	/	/
	10%	0,4	1227,1	136,3	/	/
	20%	0,4	1090,8	272,7	/	/
Hormigón	Control	0,6	343,1	/	1049,1	750,7
	5%	0,6	325,8	17,2	1049,1	750,7
	10%	0,6	308,5	34	1049,1	750,7
	20%	0,6	273,9	69,2	1049,1	750,7

Se utilizaron dos especímenes cilíndricos de 10 cm. de diámetro y 5 cm. de altura de cada mezcla, cortados de probetas diferentes, para los ensayos de absorción capilar y permeabilidad al ión cloruro. En el caso del ensayo de permeabilidad al aire, se utilizó una probeta cúbica por mezcla. Con el fin de determinar el porcentaje de sílice amorfa presente en la ceniza obtenida se utilizó, además, el método analítico descrito en Ref. [7].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parte 1 : Caracterización

Se determinó el peso específico del cemento Portland tipo I usado en todas las mezclas como el de la ceniza obtenida usando el procedimiento descrito en la norma ASTM C188. Se realizaron seis ensayos de determinación de sílice amorfa sobre tres muestras de CCA, previamente pulverizada. Por otra parte, se realizaron ensayos de pérdida por ignición (LOI) en muestras de ceniza y cemento, de acuerdo a la norma ASTM C114. Los resultados de los tres ensayos se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Densidad real de cemento y ceniza, porcentaje de sílice amorfa media libre en ceniza, LOI.

	Densidad [g/cm³]	% Sílice amorfa libre	LOI (%)
Cemento Pórtland tipo I	3,184	-	1,50
Ceniza de Cascarilla de Arroz	2,293	74,5%*	2,75

*Sobre la base de un patrón de sílice amorfa comercial (microsílice) de 97,2% de pureza.

El análisis microscópico sobre muestras embebidas en resina epóxica de cemento y CCA pulverizada se presenta en la Figura 2. En ellas se puede apreciar que el tamaño medio de partícula de la CCA es significativamente menor a los granos de cemento. Las imágenes fueron obtenidas en un equipo SEM JEOL 6060-LV utilizando electrones primarios, con un voltaje de aceleración de 15 kV.

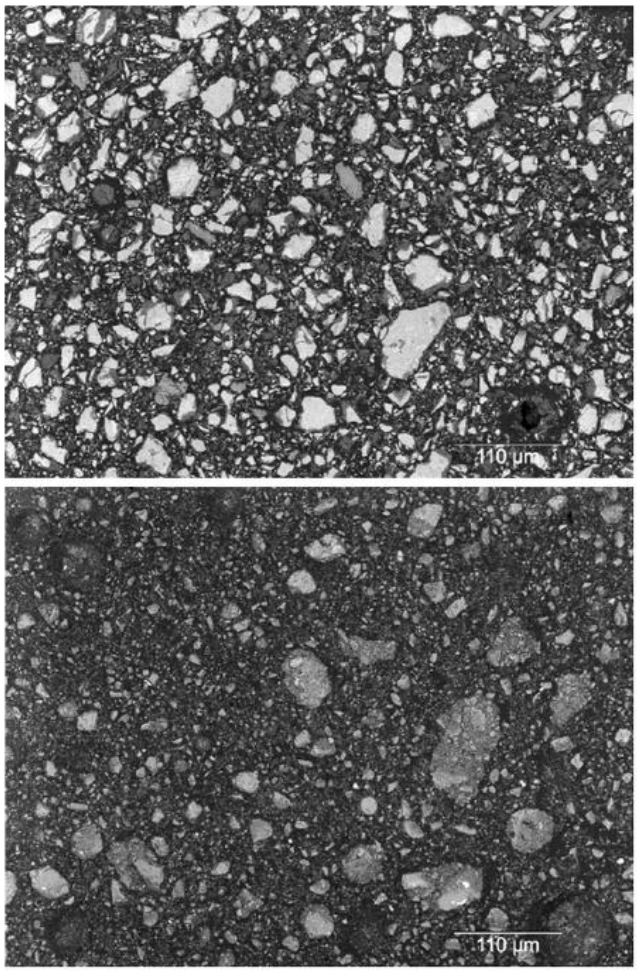

Figura 2: Microfotografías SEM de A) muestra de cemento Portland tipo I, 200×, BEI, B) muestra de CCA, 200×, BEI.

Parte 2 : Propiedades Mecánicas

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de las diferentes mezclas de pasta de cemento en probetas cúbicas de 50 mm. de arista se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3: Resultados ensayos de compresión en probetas de pasta de cemento.

	Resistencia a Compresión [MPa]				
	1 día	3 días	7 días	28 días	90 días
Control	14,72	36,39	42,12	52,91	75,78
5% CCA	10,2	31,49	47,47	55,63	72,52
10% CCA	12,48	32,87	39,90	41,07	47,46
20% CCA	20,37	52,81	54,88	71,58	77,74

En los resultados se observa que una sustitución de un 20% de cemento por ceniza de cascarilla de arroz no afecta en forma significativa la resistencia en comparación con la mezcla control. El comportamiento de la mezcla de 10% de sustitución en las edades de 28 y 90 días no se condice con los desempeños de la mezcla de 5 y 20% de reemplazo, por lo que puede suponerse que hubo influencia de variables externas a la mezcla (burbujas, condiciones de fraguado, falta de paralelismo en caras de la probeta) que no fueron contempladas ni controladas en este estudio.

Se observa que a edades tempranas el comportamiento de la mezcla con 20% de ceniza de cascarilla de arroz no afecta en forma significativa la resistencia en comparación con la mezcla control. El comportamiento de la mezcla de 10% de sustitución en las edades de 28 y 90 días no se condice con los desempeños de la mezcla de 5 y 20% de reemplazo, por lo que puede suponerse que hubo influencia de variables externas a la mezcla (burbujas, condiciones de fraguado, falta de paralelismo en caras de la probeta) que no fueron contempladas ni controladas en este estudio.

Se observa que, a edades tempranas, el comportamiento de la mezcla con 20% de ceniza de cascarilla de arroz es superior al de la mezcla control. Sin embargo, a 90 días dichas diferencias se acortan significativamente, alcanzando ambas mezclas una resistencia a la compresión estadísticamente equivalente.

Parte 3: Durabilidad

El nivel de permeabilidad al aire fue medido utilizando un equipo Permea-Torr según norma suiza SIA 262:2003, utilizando probetas cúbicas de hormigón de 15 cm. de arista, cuyos resultados para el coeficiente de permeabilidad al aire (KT, en m^2) y penetración de ensayo (L, en mm.) se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Resultados ensayos de permeabilidad al aire del hormigón a 90 días.

	Control	5% CCA	10% CCA	20% CCA
KT promedio [10^{-} m^2]	0,315	1,4	0,535	0,19
Desviación Estándar KT	0,077	0,141	0,332	0,042
L [mm]	35	47,5	38	29,5
Desviación Estándar L	1,414	0,707	4,242	3,535

Los ensayos de permeabilidad al aire no mostraron diferencias considerables en el valor del coeficiente de permeabilidad (KT) en las diferentes mezclas. Debe tenerse presente que el método utilizado es muy sensible a las diferencias en el contenido de humedad en las probetas y es ampliamente aceptado que hormigones con incorporaciones de materiales cementicios suplementarios poseen una matriz más cerrada, dificultando la pérdida de humedad interna, efecto observado en investigaciones previas [8].

Los resultados de los ensayos de absorción, realizados de acuerdo a la norma ASTM C-1585, se presentan en forma resumida en la Tabla 5, incluyendo los coeficientes normalizados inicial y tardío para cada probeta. Dado que la mayor parte de los valores de correlación (R^2) son inferiores al 98%, en la mayoría de los casos el valor del coeficiente de absorción, de acuerdo a la norma, no puede ser determinado. Este efecto ha sido observado previamente por los autores en mezclas de baja permeabilidad, apreciando una disminución de la correlación lineal exigida por la norma a medida que la capacidad de absorción capilar del hormigón disminuye [9].

Tabla 5: Resultados ensayos de absorción según ASTM C-1585 a 90 días.

	Probeta A				Probeta B				Promedios	
	I inicial [mm/s$^{1/2}$]	R^2	I tardío [mm/s$^{1/2}$]	R^2	I inicial [mm/s$^{1/2}$]	R^2	I tardío [mm/s$^{1/2}$]	R^2	I inicial [mm/s$^{1/2}$]	I tardío [mm/s$^{1/2}$]
Control	0,0137	0,9	0,0015	0,82	0,0124	0,99	0,0011	0,93	0,0130	0,0013
5% CCA	0,0085	0,74	0,0013	0,94	0,0106	0,90	0,0015	0,84	0,0096	0,0014
10% CCA	0,01	0,87	0,0006	0,91	0,012	0,99	0,001	0,86	0,011	0,0008
20% CCA	0,0124	0,90	0,0004	0,82	0,0098	0,90	0,0008	0,72	0,0111	0,0006

No se observan diferencias significativas en los valores del índice de absorción inicial entre las mezclas. Sin embargo, en el caso tardío se aprecia una clara tendencia de disminución del índice a medida que aumenta el porcentaje de sustitución en la mezcla, salvo en el caso de la mezcla con 5% de ceniza. Los resultados pueden atribuirse al menor tamaño promedio de partícula de la ceniza en comparación con el cemento, sumado a su menor peso específico, que se traduce en un mayor volumen de matriz cementicia al hacer sustituciones por peso de cemento.

Los resultados de los ensayos de permeabilidad al ión cloruro, de acuerdo a norma ASTM C-1202, se presentan en la Figura 3.

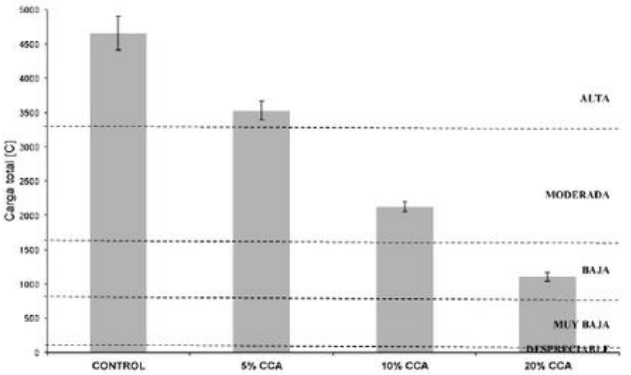

Figura 3: Clasificación de permeabilidad a ión cloruro para mezclas ensayadas, de acuerdo a norma ASTM C-1202 a 90 días.

El ensayo de permeabilidad a ión cloruro muestra un significativo decaimiento en los valores de carga total durante el ensayo a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución. Este ensayo mostró la evidencia más clara del mejoramiento en la permeabilidad del hormigón al utilizar sustituciones de CCA, y por ende, en sus propiedades para resistir los ataques del medio ambiente durante su vida útil. Los resultados anteriores no permiten establecer si un nivel de reemplazo mayor al 20% producirá mayores desempeños en la permeabilidad del material.

CONCLUSIONES

1.- La resistencia de la pasta de cemento no se ve afectada significativamente por sustituciones de hasta un 20% de cemento por ceniza de cascarilla de arroz, siendo los valores de resistencia a 90 días estadísticamente equivalentes con la mezcla control. No es posible determinar si sustituciones mayores al 20% tendrán resultados similares. Esto viabiliza la posibilidad de uso de CCA para disminuir la huella de carbono del hormigón, pues el desempeño del material final es sustentable desde una perspectiva ingenieril y ambiental simultáneamente.

2.- El menor tamaño promedio de partícula de la CCA respecto al cemento, sumado al menor peso específico de la ceniza, deriva en una disminución de la permeabilidad del concreto con sustituciones de cemento por ceniza a medida que dicho porcentaje de reemplazo en peso se incrementa. Esto debido a la interacción puzolánica de la ceniza en su carácter de material cementicio suplementario (interacción química) que genera matriz resistente secundaria en forma tardía durante la hidratación, ya su capacidad de llenar poros, dado su menor tamaño (interacción física).

3.- Si bien la resistencia no se vio afectada significativamente con ninguno de los niveles de sustitución utilizados a 90 días de edad, las diferencias de permeabilidad fueron evidenciadas con al menos dos de los tres ensayos utilizando con la mezcla de 10% y 20% de ceniza de cascarilla de arroz. Por ende, se concluye que niveles superiores a 10% de sustitución de cemento producen disminuciones en la permeabilidad cuantificables por diferentes métodos, lo que permitiría en teoría compensar la disminución de pH asociada a la reacción puzolánica de la ceniza por consumo de CH del hormigón. Lo anterior es relevante por el rol protector de armadura que cumple el hormigón en una estructura de hormigón armado.

4.- Se requiere investigación adicional que determine si la CCA es un material cementicio sumplementario competitivo en el mercado chileno, frente a las puzolanas naturales de origen volcánico que actualmente se utilizan en forma masiva o a las cenizas volantes provenientes de los procesos de generación termoeléctrica.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

La composición de la CCA es principalmente SiO_2 (S en nomenclatura química de cemento), lo que dentro de la gama de adiciones minerales para hormigón permite clasificarla como una puzolana. La reacción que permite que un material puzolánico genere estructura resistente de CSH depende de la presencia de hidróxido de calcio (CH) generado durante la reacción de hidratación del cemento Portland y de la disponibilidad de agua (H). Las ecuaciones simplificadas que describen el proceso [10] se presentan a continuación:

$$C_3S + H \xrightarrow{rápido} C-S-H + CH \qquad \text{Hidratación}$$

$$S + CH + H \xrightarrow{lento} C-S-H \qquad \text{Reacción puzolánica}$$

Dada la relativa baja disponibilidad de caliza y la abundancia de cenizas volcánicas (puzolanas naturales), en Chile se utiliza tradicionalmente un cemento Portland puzolánico que incorpora un porcentaje de puzolanas naturales. Este material se utiliza con el fin de mejorar el desempeño a largo plazo del hormigón y, paralelamente, permite bajar los costos de producción de cemento. Sin embargo, las propiedades mecánicas del hormigón fabricado con éste cemento son en general inferiores a las que se obtendría con cemento Portland puro a edad temprana, lo cual tiene implicancias directas en las metodologías constructivas y de dosificación para alcanzar las especificaciones de diseño de cada proyecto en particular.

GLOSARIO

Clínker: Producto color negro grisáceo resultante de la calcinación controlada de arcilla y piedra caliza en un horno rotatorio a temperaturas en torno a 1400ºC. El proceso que ocurre al interior del horno se denomina sinterización y es la principal causa de la alta huella de carbono de la industrial del cemento.

Cemento Portland: El cemento Portland se obtiene de mezclar aproximadamente 95% de clínker con 5% yeso y posee capacidades hidráulicas, es decir, endurece en contacto con agua. El cemento Portland es usualmente combinado con materiales cementicios suplementarios para entregarle propiedades determinadas de acuerdo a la necesidad.

Material Cementicio Suplementario: Son materiales capaces de reaccionar con los productos de la hidratación del cemento Portland, generando nueva matriz resistente que aporta a las características del material. Además de la reducción de contenido de cemento y los posibles impactos en costo que esto tenga, pueden mejorar el desempeño del hormigón en propiedades como resistencia y durabilidad.

Puzolana: Es una clase de material cementicio suplementario que se caracteriza por su alto contenido de sílice amorfo, el cual reacciona con el hidróxido de calcio (CH, o Portlandita) en la denominada reacción puzolánica, generando nueva matriz resistente en el hormigón que contribuye a la resistencia a largo plazo y a mejorar los indicadores de durabilidad del material. En Chile se utilizan puzolanas naturales de origen volcánico en los cementos clase alta resistencia y corriente que se comerializan en el mercado local.

Permeabilidad: Es la propiedad que gobierna la tasa de penetración de un fluido a través de un sólido poroso. En el caso del hormigón, los poros generados en la pasta de cemento, inicialmente llenos de agua, se secan paulatinamente durante la vida inicial del material, dejando espacios vacíos que permiten que agentes externos ingresen al material. El nivel de permabilidad dependerá de la interconexión existente entre los poros de la pasta.

Perdida por Ignición: Comúnmente denominado LOI por su sigla en inglés *(Loss on Ignition)*, se refiere a la pérdida de masa que experimenta un material al ser calcinado a altas temperaturas. Dicha disminución de la masa se produce por la pérdida de humedad y la ruptura de enlaces químicos, que originan liberación de gases desde la muestra. En el caso del cemento, la norma ASTM C114 establece una temperatura de calcinado de 950ºC.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Profesor Carlos Bonilla M., Ph.D., por su colaboración en la revisión y elaboración de este documento y por su constante apoyo en la prosecución de los objetivos enmarcados en este proyecto de investigación. También agradecen la colaboración y apoyo de los miembros del grupo de investigación ETG-UC (Engineering Technology of Concrete), y de los técnicos del laboratorio del departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción. Finalmente, agradecen la colaboración y respaldo de el grupo de analistas del área cementos del laboratorio RESMAT.

REFERENCIAS

1. Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M. and Bolio, H. Sustainable cement production - present and future. Cement and Concrete Research 41, 2011, 642-650.

2. E.P.A., United States. Industrial processes GHG emission. Greenhouse gas production report, 2007.

3. Della, V.P, Kühn, I. and Hotza, D. Rice Husk ash as an alternate source for active silica production. Materials Letters 57, 2002, 818-821.

4. Siddique, R. Waste Materials and By-Products in Concrete. [Berlin]: Springer, 2008.

5. Zain, M.F.M., Islam, M.N., Mahmud, F. and Jamil, M. Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material. Construction and Building Materials 25, 2011, 798-805.

6. Chungsangunsit, T., Shabbir, H. G. and Suthum, P. Environmental Assessment of Electricity Production from Rice Husk : A Case Study in Thailand. International Energy Journal 6, 2005.

7. Payá, J., J Monzó, M., Borrachero, V., Mellado, A. and Ordoñez, L.M. Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method. Cement and Concrete Research 31, 2001, 227-231.

8. Rodríguez de Sensale, G. Strength development of concrete with rice-husk ash. Cement and Concrete Composites 28, 2006, 158-160.

9. Van den Heede, P.,Gruyaert, E. and De Belie, N. Transport properties of high-volume fly ash concrete: Capillary water sorption, water sorption under vacuum and gas permeability. Cement and Concrete Composites 32, November 2010, 749-756. [cited 13 March 2012].

10. Mehta, P.K., and Monteiro, P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 3rd ed. [New York]: McGraw-Hill Professional, 2005.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

1 Franco Zunino
2 Profesor Mauricio López

1

2