

ALCONPAT/08

III Congreso Uruguayo y II Congreso Regional de
GESTIÓN DE LA CALIDAD, PATOLOGÍA y RECUPERACIÓN de la CONSTRUCCIÓN
3 al 5 de diciembre de 2008 / LATU / Auditorio y Hall / Montevideo - Uruguay

AVANCES EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN VERDE EN EL URUGUAY

Gemma Rodríguez de Sensale¹, B. Stela Sabalsagaray², Carola Romay³, Carlos Benavidez⁴

1. RESUMEN

El hormigón es el material de construcción de mayor empleo en todo el mundo. Las prácticas de producción tradicionales de este material han implicado un fuerte impacto negativo para el medio ambiente, vinculado a la importante emisión de CO₂ durante la producción de clínker y al consumo de combustibles fósiles, cuya explotación viene agotando los recursos naturales.

Sin embargo, y debido en gran medida a los grandes volúmenes empleados, el hormigón representa desde otro punto de vista, una alternativa para la minimización del impacto ambiental al posibilitar la reconversión de importantes cantidades de residuos provenientes de otras industrias, en materia prima sustituta del cemento o de agregados finos.

Basado en esta virtud, ya desde la década de 1990, se ha trabajado, con especial énfasis en los países europeos como Dinamarca, para establecer las condiciones necesarias para la producción de un hormigón de bajo impacto ambiental, el denominado HORMIGÓN VERDE, y en la optimización de las estructuras que lo emplean.

Algunos de los avances alcanzados muestran por una parte, la viabilidad del empleo de residuos para la producción de hormigones verdes cuyas propiedades mecánicas y de durabilidad son comparables e incluso superiores a las de hormigones convencionales, y por otra parte, han contribuido a una diversificación de usos y aplicaciones posibles para estos nuevos hormigones, los cuales presentan propiedades particulares.

En nuestro país, los estudios relativos a la incorporación de residuos en los hormigones son aún incipiente. En este trabajo se presentan algunos de los avances alcanzados en relación al estudio de hormigones elaborados con materiales locales que emplean dos tipos de residuo: ceniza proveniente de la quema de la cáscara de arroz (CCA) y polvo retenido en electrofiltros (PEF) durante la producción de clínker. Los resultados obtenidos muestran la viabilidad de su empleo en la producción de Hormigón Verde a escala nacional y las propiedades específicas de los mismos.

Palabras Clave: Hormigón, Hormigón Verde, Residuos, Ceniza de cáscara de arroz, Polvo de electrofiltro

¹ Profesor Agregado, Instituto de Ensayo de Materiales, Facultad de Ingeniería- UdelaR.

² Asistente, Instituto de Ensayo de Materiales, Facultad de Ingeniería- UdelaR

³ Ayudante, Instituto de Ensayo de Materiales, Facultad de Ingeniería- UdelaR

⁴ Ayudante, Instituto de Ensayo de Materiales, Facultad de Ingeniería- UdelaR

2. ANTECEDENTES EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN VERDE

El hormigón representa desde 1960, según Brunauer y Copeland, el material de mayor empleo en la industria de la construcción y su producción está basada en el empleo de cemento Pórtland, fabricado a partir del consumo de combustibles fósiles en hornos que generan importantes niveles de emisión de CO₂.

Los efectos perjudiciales desde el punto de vista ambiental que esta actividad industrial produce, son sin embargo aspectos fácilmente reversibles, si se tiene en cuenta que existe la posibilidad de incorporar como insumo en la producción de hormigón, grandes volúmenes de residuos industriales que constituyen en la actualidad factores de riesgo de contaminación ambiental. Integrando estos residuos es posible adicionalmente minimizar el consumo de cemento Pórtland convencional y de agregados finos, lo que reduce significativamente las emisiones contaminantes y las acciones degradatorias producidas por la explotación de las canteras.

En este sentido, ya en los años `70 pueden encontrarse propuestas relacionadas con el empleo de residuos en la producción de hormigones y morteros, con el doble objetivo de minimizar el gasto de recursos naturales necesarios para la producción de cemento y la disposición o eliminación de residuos. Entre estas propuestas pueden citarse en Europa las investigaciones y aplicaciones de hormigones incorporando fibras de madera, que fueron originalmente desarrolladas por el centro de Investigaciones Técnicas de Finlandia, entre los años 1984 y 1987. Estas dieron origen a una planta de fabricación de paneles de hormigón con fibras de madera destinadas a la construcción de viviendas.

A nivel regional existen múltiples antecedentes sobre elaboración de hormigones y morteros con fibras de coco, plátano, bagazo de caña henequén y algunos tipos de bambúes, etc, llevada a cabo en México, Cuba y Colombia, entre otros países de América Latina

Siguiendo esta línea de trabajo y con especial énfasis en los países europeos como Dinamarca, surge hacia la década de 1990, el concepto del HORMIGÓN VERDE, un hormigón de bajo impacto ambiental aplicable a estructuras que optimizan el empleo de los materiales y recursos energéticos.

En este marco de desarrollo se inscribe el Proyecto Europeo TESCOP, que tiene por objetivo desarrollar tecnologías limpias para la producción de hormigón, reduciendo la formación de CO₂ y el consumo de recursos en extinción (combustibles fósiles). Una de sus principales líneas de investigación se basa en el desarrollo de hormigones con residuos inorgánicos como sustituto de cemento o arenas.

Acompañan a estos avances, las experiencias realizadas por el Dr. Anu Ramaswami y su equipo en la Universidad de Colorado, quienes han trabajado con la inclusión de cenizas volantes como sustituto del cemento, obteniendo hormigones de propiedades mecánicas y de durabilidad superiores al hormigón convencional. Las cifras arrojadas por este estudio muestran que la sustitución de 20% del cemento equivale, para la ciudad de Denver, a la eliminación de las emisiones de carbono de 10.000 vehículos por año.

Otros antecedentes, provenientes de nuestra región pueden hallarse, por ejemplo, en los trabajos sobre morteros incorporando viruta de cuero y hormigones con agregados resultantes del reciclaje de hormigones, realizados en el Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica, LEMIT, La Plata, Argentina.

Los antecedentes presentados proponen analizar la viabilidad de producir y caracterizar al HORMIGÓN VERDE no sólo a través del estudio tradicional de sus propiedades mecánicas y de durabilidad, sino desde la óptica del desarrollo sostenible que incluye consideraciones ambientales y productivas integrales. Este nuevo enfoque requiere adicionalmente un tratamiento normativo particular, que de cuenta de las singularidades de material elaborado y potencie la difusión de las ventajas de sus diversos usos.

En nuestro país, los estudios relativos a la incorporación de residuos en los hormigones son aún incipientes, tanto como el desarrollo de hormigones y morteros con fines constructivos no tradicionales.

En este trabajo se presenta los resultados obtenidos en relación a la elaboración de hormigones (de alta resistencia, convencionales y autocompactantes), con materiales locales que emplean dos tipos de residuo: ceniza proveniente de la quema de la cáscara de arroz (CCA) y polvo retenido en electrofiltros durante la producción de clínker (PEF), indicando las propiedades específicas de los mismos.

3. HORMIGONES CON CENIZA DE CASCARA DE ARROZ

3.1 La cáscara de arroz como residuo agroindustrial y el empleo de la CCA en hormigones

En los últimos años Uruguay ha sido escenario de una creciente producción arrocerá, alcanzando en la zafra 2006-2007 valores cercanos a 1.145.500 toneladas de arroz. Cada tonelada de arroz procesada genera 200 kg de cáscara, de constitución mineralógica altamente contaminante y que en Uruguay es parcialmente reducida a ceniza. Los importantes volúmenes de ceniza residual acumulados y su estructura predominantemente cristalina, perjudicial para la salud humana, son dos aspectos fundamentales que justifican el estudio de su empleo alternativo.

Los grandes países productores de arroz, han sido a nivel internacional quienes han desarrollado la mayor cantidad de estudios con el objetivo de dar utilización a este residuo eliminando sus factores de riesgo de contaminación ambiental y los costos asociados a su disposición final. Entre las alternativas de mayor perspectiva destaca su empleo como insumo en la elaboración de hormigones, debido al importante volumen de residuo que puede ser incorporado y las propiedades particulares que es capaz de conferir al material.

Siguiendo esta línea de investigación y en el marco de los Proyectos CSIC, “Estudio sobre las propiedades mecánicas de hormigones de alta resistencia elaborados con materiales disponibles en nuestro medio y la influencia de la incorporación de la ceniza de cáscara de arroz” y “Estudio sobre la influencia de la incorporación de ceniza de cáscara de arroz residual uruguaya en la durabilidad de hormigones de alta resistencia y convencionales”, realizados en la Facultad de Ingeniería de UdelaR, se elaboraron y estudiaron hormigones fabricados con ceniza de cáscara de arroz nacional, optimizada mediante molienda.

El objetivo fundamental de estos trabajos consistió en la evaluación en primer lugar de las propiedades mecánicas (resistencia a compresión, resistencia a tracción por compresión diametral, a tracción en flexión y módulo de deformación); y en segundo lugar de las propiedades de durabilidad que inciden de forma directa en el empleo económico y seguro del material y que están vinculadas a la permeabilidad al agua (penetración al agua a presión) y permeabilidad al aire, resistencia a la penetración de iones cloruro, resistencia a sulfatos y ácidos, reacción álcali – agregado, resistencia a ciclos de congelación y deshielo, resistencia a altas temperaturas y resistencia a la abrasión.

La etapa experimental se basó en la elaboración de mezclas y morteros de diferentes relaciones agua/(cemento+CCA) (0.50, 0.40 y 0.32) y porcentajes de sustitución de cemento por ceniza de cáscara de arroz (CCA) residual uruguaya de 5%, 10%, 15% y 20%, los que fueron comparados con hormigones de referencia sin CCA..

La Tabla 1 sintetiza los métodos de ensayo aplicados.

Tabla 1. Métodos de ensayo aplicados

Propiedad estudiada	Método de ensayo
Resistencia a compresión	UNIT-NM 101
Resistencia a tracción por comp.	UNIT NM 08
Resistencia a tracción por flexión	UNIT NM 55
Módulo de deformación	UNIT 1088
penetración de agua a presión	UNIT-NM 57:
Permeabilidad al aire	SIA 262/1:2003.
Resistencia a sulfatos	ASTM C1012 *
Resistencia a ácidos	ASTM C267 **
Reacción álcali-sílice	ASTM C227/ ASTM C1260/01
Abrasión	UNIT 6:42 / UNIT 7:42
Penetración de iones cloruros	Collepari et al (1970) Civello y Traversa (1991) Civello (2000)
Resistencia a altas temperaturas	Barragán et. al (1997)
Congelación y deshielo	ASTM 666-03
Energía de Fractura	Recomendaciones del Comité 50-FMC de RILEM

* Los tiempos de inmersión según SILVA FILHO (1994), IRASSAR (1990), IRASSAR, DI MAIO, BATIC (1995).

** La metodología indicada fue la sugerida en MEHTA y FOLLIARD (1995)

3.2 Resultados obtenidos y discusión

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para las diferentes propiedades:

Resistencia a la compresión (fc): Los hormigones presentaron aumentos de los valores medios al avanzar la edad y disminuir la relación agua / (cemento +CCA).

La interacción existente entre el porcentaje de CCA y la edad muestra un comportamiento diferenciado de la acción de la CCA en las diferentes edades estudiadas. En las primeras edades cuanto mayor es el porcentaje de CCA menor la resistencia a compresión, sin embargo a edades mayores, se obtuvieron en los hormigones con CCA mayores resistencias que en los hormigones sin CCA.

Resistencia a la tracción (ft): En la resistencia a la tracción por compresión diametral la importancia o influencia de las dos variables consideradas: relación agua / (cemento + CCA) y porcentaje de CCA fue muy significativa. Si bien en todas las relaciones agua aglomerante estudiadas los valores obtenidos con y sin CCA no diferían significativamente entre si, en la relación 0.40 con 15 % y 20 % de CCA la resistencia a la tracción por compresión diametral disminuyó en relación al hormigón sin ceniza.

En la resistencia a la tracción por flexión, las variables consideradas (relación a / (c+CCA) y porcentaje de CCA, fueron significativas. Los valores obtenidos en los hormigones con CCA fueron mayores que los de los hormigones sin CCA, excepto en la relación agua/aglomerante de 0.32 con 15% y 20% de CCA donde los valores obtenidos no diferían significativamente de los del hormigón de control (sin CCA).

Módulo de deformación (Ec): Los hormigones con CCA desarrollaron excelentes resultados a los 28 días de edad, comparados con los hormigones sin ceniza.

La Tabla 2 sintetiza los resultados obtenidos para los hormigones sin ceniza y con 10% y 20% de sustitución de cemento por ceniza para estas propiedades mecánicas.

Tabla 2. Resultados de propiedades mecánicas de hormigones sin y con incorporación de CCA

agua/cemento +cca	% cca	fc 28 d (MPa)	fc 1 año (MPa)	ft, comp. Diam.	ft flexión	Ec 28 d (Gpa)
0.5	0	32.99	41.27	2.85	3.88	30.56
	10	31.50	48.46	2.82	4.12	32.75
	20	34.91	45.07	2.83	4.14	32.66
0.4	0	42.35	58.31	3.48	4.63	30.8
	10	50.41	61.73	3.39	5.31	33.38
	20	40.73	57.60	3.04	4.99	35.92
0.32	0	55.50	74.13	3.63	5.36	33.6
	10	60.42	80.28	3.57	6.08	34.48
	20	54.85	80.19	3.54	5.21	36.3

Permeabilidad al aire, penetración de agua a presión (permeabilidad al agua) y penetración de cloruros: En relación a la penetración de agua a presión y a la permeabilidad al aire, para los hormigones con $a/(cemento+CCA)$ de 0.4 y 0.32, los resultados de las mezclas con y sin ceniza no presentan diferencias significativas. Para los hormigones con relación agua/aglomerante de 0.5 las mezclas que incorporan CCA, si bien muestran mayor permeabilidad que las mezclas sin ceniza, presentan un correcto desempeño, ubicándose dentro de la clasificación “normal.” De esto se deduce que la CCA residual uruguaya actúa como filler llenando los poros y no induce efectos negativos en la permeabilidad. La figura 1 muestra los equipos empleados para determinación de permeabilidad al aire y al agua (penetración de agua a presión)

**Figura 1.** Equipos para la determinación de permeabilidad al aire (a) y al agua (b)

En relación a la penetración de iones cloruros cuanto menor es la relación agua/(cemento+CCA) menor es la profundidad media de penetración de los iones cloruro y menor es el valor del coeficiente de difusión de estos. El porcentaje ideal de sustitución de cemento por CCA residual uruguaya para hormigones que van a sufrir ataque por cloruros es del 15%. Hormigones con relación agua/(cemento+CCA) de 0.32 y 15% de sustitución de cemento por CCA residual uruguaya presentaron el mejor desempeño frente al ataque de cloruros.

La Tabla 3 presenta una síntesis de los resultados obtenidos para permeabilidad al aire (coeficiente K_t , resistividad eléctrica ρ_{\square} y calidad) y permeabilidad al agua (profundidad media de penetración D_m y profundidad máxima de penetración $D_{máx}$) y penetración de cloruros (coeficiente de difusión D).

Tabla 3. Resultados de permeabilidad al agua, al aire y penetración de cloruros de mezclas con incorporación de CCA

agua / cemento + cca	% CCA	Permeabilidad al agua: penetración de agua a presión		Permeabilidad al aire		Penetración de cloruros	
		Dm (mm)	D máx (mm)	Kt (10^{-16} m^2)	α (kΩcm)	Calidad del hormigón	Coefficiente de Difusión D
0.5	0%	22.4	27.0	0.079	10	Buena	5.60
	10%	29.2	40.0	0.303	11	Normal	4.59
	20%	29.2	36.4	0.322	10	Normal	7.52
0.4	0%	15.3	25.2	0.018	17	Buena	3.17
	10%	16.9	28.2	0.043	12	Buena	2.68
	20%	10.2	15.8	0.034	12	Buena	6.21
0.32	0%	8.8	17.0	0.019	-	Buena	1.86
	10%	8.0	18.8	0.016	18	Buena	2.21
	20%	13.0	19.9	0.018	17	Buena	1.94

Resistencia al ataque de sulfatos y ácidos: La resistencia del hormigón al ataque de sulfatos mejora con el 10% de CCA en hormigones convencionales y con 15% de CCA en hormigones con agua/(cemento+CCA) ≤ 0.4 , respecto a hormigones sin CCA.

Todas las relaciones agua/aglomerante presentaron una mejor respuesta al ataque de ácidos cuando contenían ceniza que cuando no la contenían. Para relación agua/(cemento+CCA) de 0.32 los hormigones con 5% y 10% de CCA presentan los mejores desempeños. En la relación agua/aglomerante 0.4 hasta un 20% de CCA presenta buenos resultados y en el caso de la relación agua/(cemento+cca) de 0.5 destacan los hormigones con 10% de ceniza.

Reacción álcali-sílice: Fueron estudiados morteros elaborados con agregado reactivo y con agregado no reactivo. Los del primer grupo demostraron que a mayor porcentaje de ceniza mayor es el efecto inhibitor de la reacción, la cual resulta nula para el 30% de ceniza. Los morteros sin agregado reactivo, con 10 y 20% de ceniza presentaron una reducción de la expansión en comparación con morteros de referencia sin ceniza.

Ciclos congelación y deshielo: Los morteros estudiados, analizados a partir de la variación de la resistencia a compresión respecto de morteros de referencia no sometidos a los ciclos de congelación y deshielo, indicaron que aquellos elaborados con 20% de ceniza, para cualquiera de las relaciones agua/aglomerante, resultaron mas resistentes a estos ciclos.

Resistencia a altas temperaturas: Evaluada en función de la variación de la resistencia a compresión de hormigones sometidos a ciclos de alta temperatura, los resultados obtenidos frente a esta propiedad permitieron observar comportamientos diferenciados de acuerdo a la relación agua/aglomerante. Para los hormigones con agua/(cemento+CCA) de 0.5, el mejor desempeño se obtuvo con 15% de CCA; mientras que en hormigones de relación agua/(cemento+CCA) < 0.4 el porcentaje ideal de ceniza fue el de 5%.

Resistencia a la abrasión: Los resultados obtenidos mostraron que, para las diferentes relaciones agua/aglomerante, el porcentaje óptimo de sustitución de cemento por CCA es del orden del 15%.

Energía de fractura: Si bien existe una tendencia a un comportamiento mas frágil cuando se emplea CCA, la energía involucrada en el proceso de fractura, en los casos estudiados, fue menor que la generada por cambios de agregados y niveles relativos de resistencia entre la

pasta y los agregados. En el caso particular de 10% de CCA se produjo una reducción de la energía de fractura cercana al 10%.

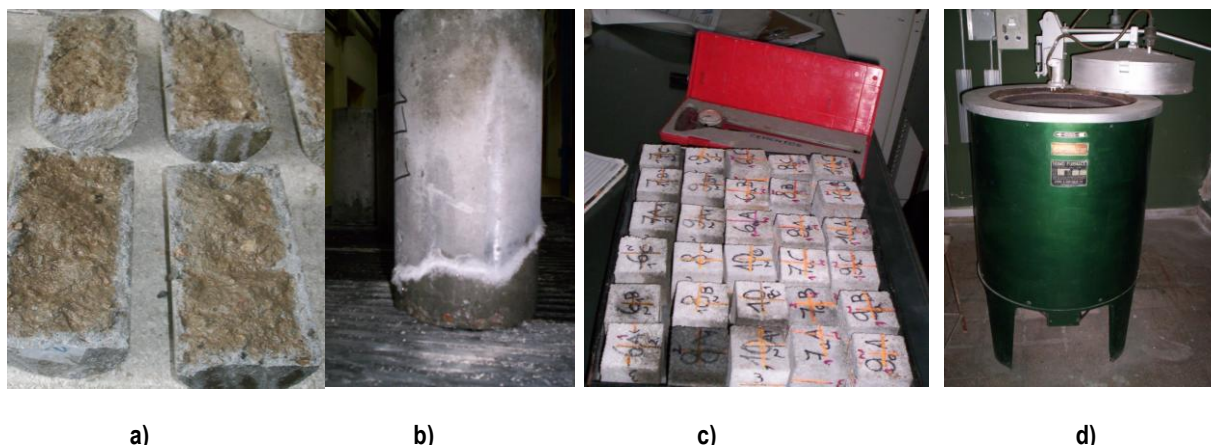


Figura 2. Probetas sometidas a penetración de cloruros (a), a sulfatos (b), ciclos congelación y deshielo (c) y horno de alta temperatura (d).

3.3 Consideraciones sobre la elaboración de hormigones con CCA

Los resultados obtenidos han permitido comprobar la viabilidad de incorporar CCA como sustituto del cemento Pórtland para hormigones convencionales, de alto desempeño y alta resistencia así como verificar que cuando la CCA residual uruguaya es optimizada mediante molienda, su superficie específica y tamaño permiten elaborar hormigones con porcentajes de CCA óptimos según las diferentes aplicaciones de los mismos.

4. HORMIGONES CON POLVO DE ELECTROFILTRO

4.1 El empleo del polvo de electrofiltro (PEF), en la producción de hormigones

El Polvo de electrofiltro (PEF) es un sub-producto obtenido en la fabricación del cemento Pórtland. Se trata de un polvo muy fino de apariencia similar al cemento, compuesto por partículas muy pequeñas que son recogidas en la precipitación electrostática durante la producción del clínker. Según Siddique 1988, la producción de este residuo es de 30 millones de toneladas mundiales por año; cierta cantidad de este polvo vuelve a los hornos pero entre un 30% y un 50% es tratado como residuo industrial. Solamente en EEUU los números revelan que se producen por año, aproximadamente 15 millones de toneladas. En Uruguay el volumen de producción de este residuo es de 9 toneladas diarias por cada horno de clínker en funcionamiento.

A causa de la gran cantidad de producción de este residuo se han estudiado sus aplicaciones en diferentes campos, siendo los de mayor difusión la estabilización y solidificación de residuos y aguas residuales, insumo del cemento Pórtland, de cementos -asfalto para pavimentos y materia prima de productos de albañilería y fertilización de suelos entre otros.

De la variedad de usos posibles, su utilización en aplicaciones relacionadas a la industria de la construcción y en particular de la industria cementera, surge como una alternativa de gran interés debido a los grandes volúmenes de residuos que pueden ser empleados en la misma.

En el marco del proyecto CSIC “Estudio de propiedades de hormigones autocompactantes en estado endurecido e influencia de la incorporación de polvo de electrofiltro como filler” en curso, se han estudiado las propiedades mecánicas (resistencia a compresión, resistencia a tracción por flexión y módulo de deformación) y de durabilidad (permeabilidad al aire,

penetración al agua a presión y reacción álcali agregado) de hormigones autocompactantes con la inclusión de polvo de electrofiltro. En investigaciones anteriores se pudo determinar que si este polvo posee características de filler, es apto para la elaboración de hormigones autocompactantes. El PEF empleado en las investigaciones ha sido suministrado por una de las empresas productoras de cemento del país, posee características de filler (UNE-EN 12620). Las mezclas estudiadas corresponden a hormigones con 40% de pasta con 0%, 20%, 30% y 40% de sustitución de cemento por PEF y 38% de pasta con 0% y 20% de sustitución de cemento por PEF. Estos hormigones fueron comparados con hormigones convencionales con igual contenido de pasta.

4.2 Resultados obtenidos y discusión

Resistencia a compresión (f_c): La sustitución de cemento por PEF produce una disminución de la resistencia a compresión y tracción menor que la correspondiente al % de cemento sustituido. La resistencia a compresión en todos los hormigones (sin y con PEF) fue mayor a 40 MPa ($f_c > 400 \text{ kg/cm}^2$).

En relación al módulo de deformación (E_c) de las mezclas de hormigón autocompactante con PEF, los resultados no presentan una variación significativa respecto a las mezclas de referencia (sin PEF). Con el mayor porcentaje de sustitución (40%) se observa que la disminución del E_c es mucho menor que el % de cemento sustituido.

En la Tabla 4 se indican los resultados correspondientes a las propiedades mecánicas.

Tabla 4. Resultados de propiedades mecánicas de mezclas con incorporación de PEF y mezclas de referencia sin PEF

% PASTA / % PEF	f_c 28 días (MPa)	f_c 91 días (MPa)	F_t por flexión	Módulo de deformación 28 días (Gpa)
HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES				
40 / 0	62.6	66.0	7.21	33.7
40 / 20	58.4	60.3	7.5	33.4
40 / 30	53.7	65.2	5.9	36.04
40 / 40	41.0	46.3	4.7	29.75
38 / 0	65.8	72.5	7.6	34.95
38 / 20	53.5	59.3	6.6	32.37
HORMIGONES CONVENCIONALES				
40 / 0	55.6	69.5	7.3	33.49
38 / 0	53.5	56.6	6.6	32.22

En cuanto a la permeabilidad al agua y al aire todas las mezclas de HAC (sin y con PEF) presentaron comportamientos similares y comparables con los hormigones convencionales, observándose que la sustitución de 30% y 40% de cemento en relación a la permeabilidad al aire proporciona hormigones de calidad normal.

La Tabla 5 sintetiza los resultados obtenidos relativos a permeabilidad al aire (coeficiente K_t y resistividad eléctrica ρ y calidad) y al agua (profundidad media de penetración D_m y profundidad máxima de penetración $D_{máx}$), para las mezclas con incorporación de PEF y las mezclas de referencia sin PEF.

Tabla 5. Resultados de permeabilidad al aire y al agua de mezclas con incorporación de PEF y mezclas de referencia

% PASTA / % PEF	Permeabilidad al agua: penetración de agua a presión		Permeabilidad al aire		Calidad del hormigón
	Dm (mm)	D màx (mm)	Kt (10^{-16} m^2)	$\rho_{\text{a}}(\text{k}\Omega\text{cm})$	
HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES					
40 / 0	6.5	12.8	0.0053	13.3	Buena
40 / 20	8.2	12.4	0.0044	8.0	Buena
40 / 30	8.3	12.2	0.0793	7.7	Normal
40 / 40	10.8	15.6	0.1120	6.0	Normal
38 / 0	6.8	11.4	0.0180	14.7	Buena
38 / 20	5.9	9.9	0.0230	9.0	Buena
HORMIGONES CONVENCIONALES					
40 / 0	7.8	13.0	0.0100	13.0	Buena
38 / 0	8.5	13.6	0.0453	13.5	Buena

Los resultados obtenidos hasta el momento, en el desarrollo de este proyecto, resultan auspiciosos en relación a la viabilidad de la utilización del PEF en la elaboración de hormigones autocompactantes con materiales nacionales. Se espera que otros resultados, de estudios sobre reacción álcali – agregado y de retracción en ejecución, permitan verificar su desempeño en relación a estas propiedades.

5. CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados presentados han permitido establecer un escenario auspicioso para la elaboración de hormigones a partir de la incorporación de dos diferentes residuos de industrias nacionales. A partir de los mismos se ha verificado que es posible obtener hormigones de prestaciones comparables a los hormigones convencionales con un menor consumo de cemento, reduciendo así el impacto ambiental negativo que representan las emisiones de CO_2 y el consumo de combustibles fósiles de alto costo en la producción de clínker y simultáneamente, resolviendo el problema de la disposición final de estos residuos.

De la misma manera, los avances alcanzados permiten plantear la posibilidad de analizar la incorporación de otros residuos, así como de estudiar la elaboración de materiales de propiedades diferenciadas a los hormigones convencionales, que también puedan ser aplicados de manera masiva para usos constructivos, evitando el uso indiscriminado de hormigones de carácter estructural, cuando esto no es estrictamente necesario (pavimentos, morteros, rellenos, etc.)

De acuerdo al Protocolo de Kioto de 1997, que entró en vigor en febrero de 2005, el dióxido de carbono (CO_2) resultante principalmente de la quema de combustibles fósiles, deforestación y cambios en el uso de tierras tropicales es actualmente responsable de más del 60% del aumento del efecto invernadero. En nuestro país, el 50% de CO_2 corresponde al sector del transporte, mientras que a la industria de cemento le corresponde el 6%.

Teniendo en cuenta estos datos, se entiende que estas líneas de investigación, puede ser consideradas como algunas de las directrices capaces de transformar a la producción nacional de hormigón en una producción de HORMIGÓN VERDE, acompañando los procesos de mejoramiento de la calidad ambiental, que hoy se presentan como impostergables.

6. BIBLIOGRAFÍA

BRUNAUER,S., COPELAND, LE. "The chemistry of Concrete", Scientific American, April 1964.

Danish Technological Institute. Centre for Green concrete. www.dti.dk. Setiembre 2008.

University of Colorado. www.greenprintdenver.org Setiembre 2008.

GIACCIO, G; RODRÍGUEZ DE SENSALE, G; ZERBINO,R. "Failure mechanism of normal and high-strength concrete with rice-husk ash". En: *Cement and Concrete Composites*. 2007 vol. 29, Issue 7. UK: Ed. R.N. Swamy, Publ. ELSEVIER Ltd, 2007. pp. 566-574.

RODRÍGUEZ DE SENSALE, "Strength development of concrete with rice-husk ash", En: *Cement and Concrete Composites*. 2006 vol. 28, Issue 2, ISSN: 0958-9465. UK: Ed. R.N. Swamy, Publ. ELSEVIER Ltd, 2006. pp.158-160.

RODRÍGUEZ DE SENSALE, G; SABALSAGARAY, B.S., CABRERA J., MARZIOTTE, L., ROMAY, C. "Diseño de hormigones autocompactantes – Propuesta para su dosificación", En: anales de la XXXII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, 2006, Brasil. Campinas Brasil. Versión electrónica. 8pp.

GIACCIO, G; RODRÍGUEZ DE SENSALE, G; ZERBINO,R. "Fracture energy of rice-husk ash concrete", En: *ACI Special Publication 228 – Seventh International Symposium on the Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete*, 2005, vol.1, ISBN 0-87031-180-8. USA: Editor: Henry D. Russell, American Concrete Institute Special Publication 228, SP 228-9, 2005. pp. 111-122.

RODRÍGUEZ DE SENSALE, G., DERRÉGIBUS, M.T., SABALSAGARAY, B.S., CABRERA J., MARZIOTTE, L., ROMAY, C. "Characterization of local fillers". En: Proceedings of Second North-American Conference on the Design and use of Self-Consolidating Concrete and Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, vol 1, 2005, USA, Editor Surendra Shah, Published by Hanley Wood LLC, 2005. pp. 151-158.

SIDDIQUE, R. "Waste Materials and By - Productos in Concrete".2008. ISBN: 978-3-540-74293-7. USA.: Editorial: SPRINGER DISTRIBUTION CENTER GmbH, 2008. p 414.

RODRÍGUEZ DE SENSALE, G.."Estudio sobre las propiedades mecánicas de hormigones de altas resistencia elaborados con materiales disponibles en nuestro medio y la influencia de la incorporación de la ceniza de cáscara de arroz". Montevideo, 2005, Informe Final, CSIC, IEM, Facultad de Ingeniería UDELAR. p 135.

RODRÍGUEZ DE SENSALE, G. et al. "Hormigones Autocompactantes". Montevideo, 2006, Informe Final, PDT, IEM, Facultad de Ingeniería UDELAR. p 196.

RODRÍGUEZ DE SENSALE, G. et al. "Estudio de la durabilidad de hormigones de altas resistencia y convencionales e influencia de la incorporación de ceniza de cáscara de arroz uruguayo". Montevideo, 2007, Informe Final, CSIC, IEM, Facultad de Ingeniería UDELAR. p 111.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la CSIC por el financiamiento de los referidos proyectos de Investigación y a las empresas nacionales Hormigones Artigas S.A. y Arroz Uruguayo S.A, que han suministrado los residuos investigados y han posibilitado alcanzar los resultados presentados.