

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Empleo de residuos de industria cementera y arrocera en micro-hormigón para paneles de viviendas de interés social en Uruguay

B.S. Sabalsagaray ⁽¹⁾, A.G. Boiani ⁽²⁾ y G. Rodríguez de Sensale ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Aglomerantes, Agregados y Hormigones, IEM, Universidad de la República, Uruguay.

⁽²⁾ Agencia Nacional de Vivienda, Uruguay.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5936>

RESUMEN

Sistemas constructivos no tradicionales como el denominado Emmedue (M2) se utilizan actualmente en Uruguay para viviendas de interés social con subsidio gubernamental. Este sistema se basa en el empleo de paneles auto-portantes formados por poliestireno expandido y malla de acero cuyo diseño les permite recibir micro-hormigón en obra. La ceniza de cáscara de arroz y el polvo de electro-filtro de industria cementera son residuos muy abundantes en nuestro país sin aplicación específica. Por eso en este trabajo a partir de un micro-hormigón convencional y uno de alto desempeño, se estudia la variación de la resistencia a compresión cuando se realizan mezclas binarias sustituyendo 10, 20 y 30% de cemento por estos residuos, luego se estudia la incidencia económica que se produce por su empleo en la construcción de viviendas dúplex de 2 y 3 dormitorios, basadas en el sistema M2 manteniendo la resistencia a compresión del micro-hormigón no inferior a 25MPa. Los resultados alcanzados permiten concluir que hay porcentajes óptimos de sustitución de cemento por las adiciones estudiadas que producen beneficios económicos y medioambientales con su empleo.

PALABRAS CLAVE: micro-hormigón; ceniza de cáscara de arroz; polvo de electrofiltro; resistencia a compresión; costes.

1.- INTRODUCCIÓN

Sistemas constructivos no tradicionales se están utilizando actualmente en Uruguay para construcción de viviendas de interés social con subsidio gubernamental. Tal es el caso de un sistema denominado Emmedue (M2) que se basa en el empleo de paneles auto-portantes formados por poliestireno expandido y malla de acero cuya morfología de diseño les permite recibir micro-hormigón proyectado en obra.

En el sistema M2 para permitir la proyección del hormigón (en especial sobre el panel vertical y el inferior de la losa) se limita la granulometría del agregado, de allí que se emplea micro-hormigón ya que no contiene agregado grueso, requiriendo una elección y

control adecuado de materiales constitutivos, métodos de dosificación y elaboración para alcanzar los requerimientos esperados. El espesor del micro-hormigón proyectado en cada una de las caras de los paneles verticales del sistema M2 se indica como mínimo de 3cm, siendo en la práctica de 3,5cm; mientras que en los paneles losa son de 5cm y 3cm para las carpetas de compresión y flexión, respectivamente; siéndole exigida una resistencia mínima a compresión al micro-hormigón de 25 MPa a los 28 días de edad [1].

La ceniza de cáscara de arroz y el polvo de electro-filtro de industria cementera son residuos muy abundantes en nuestro país que no tienen aplicación específica y generan serios problemas medio-ambientales. Por ello, el objetivo del trabajo es encontrar una aplicación para estos residuos, sustituyendo parte de cemento por ellos, sin comprometer las características mecánicas de los paneles habitualmente construidos con el sistema M2 a los efectos de reducir los costos de producción de las viviendas de interés social con subsidio gubernamental.

Por eso en este trabajo, primeramente, a partir de un micro-hormigón convencional y uno de alto desempeño, se estudia la variación de la resistencia a compresión a los 28 días de edad cuando se realizan mezclas binarias sustituyendo entre el 10 y el 30% de cemento por los dos residuos a emplear. Luego se estudia la incidencia económica que se produce con dichos micro-hormigones en la construcción de viviendas dúplex de 2 y 3 dormitorios, basadas en el sistema de paneles M2 manteniendo la resistencia a compresión del micro-hormigón no inferior a 25MPa.

2.- PLANEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.- Materiales

Los materiales componentes del micro-hormigón son básicamente los mismos que los de un hormigón, excepto que no tiene agregado grueso, o sea contiene: cemento Portland, agregados finos, agua, adiciones y aditivos. Por ello a continuación se presentan los materiales empleados junto con consideraciones tomadas para su elección a los efectos de su empleo en el sistema M2.

Cemento Portland: tipo I normal (CPN) cuyas características se presentan en la tabla 1.

Aditivo: Al elaborar micro-hormigón para proyectar en el sistema M2 la elección de un superplastificante bueno y eficaz es crucial, siendo importante estudiar la compatibilidad entre el cemento, el aditivo a emplear y el logro de una consistencia adecuada para el equipo de proyección que se emplea en dicho sistema, ya que se limita el rango del asentamiento obtenido con el ensayo de cono de Abrams (12 a 18 cm) [2, 3]. Para ello se usaron los métodos simplificados que se utilizan con mayor frecuencia: el de mini-asentamiento (minislump) y el del cono Marsh [4], siendo seleccionado un aditivo superplastificante basado en policarboxilatos con densidad de 1.10kg/l para ser empleado en los micro-hormigones de este trabajo.

- Agregado: fino, siendo una arena de río con tamaño máximo 4,75 mm, peso específico 2,55 y módulo de finura de 2,62.
- Adiciones: se estudian dos residuos industriales locales que no tienen aplicación específica en Uruguay: polvo de electro-filtro (PEF) de una industria cementera nacional y ceniza de cáscara de arroz proveniente de quema de cáscara de arroz para generación de energía eléctrica (CCA) la cual es parcialmente cristalina. En la tabla 1 se presentan sus características, siendo determinado el Índice de Actividad Puzolánica [5], IAP, con el cemento empleado. Es de observar que la CCA es puzolánica [6], su IAP es mayor de 75%, mientras que el PEF no lo es pero cumple con las características de un filler [7].
- Agua: potable proveniente de red de abastecimiento local.

Tabla 1. Características físicas y químicas del cemento y las adiciones empleadas

	CPN	PEF	CCA
<u>Propiedades físicas</u>			
Masa espec. absoluta, kg/m ³	3140*	2750	2160
Superficie específica, Blaine, m ² /kg	325 *	687	892
<u>Análisis químico, %</u>			
Óxidos de sílice (SiO ₂)	20 *	12	83
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	4,9 *	2,8	<2
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	3,62 *	1,7	0,24
Óxido de calcio Total (CaO)	61,5 *	46	0,29
Óxido de magnesio (MgO)	2,81 *	1,9	0,13
Óxido de manganeso (MnO)	-	0,28	0,25
Óxido de sodio (Na ₂ O)	0,29 *	-	-
Óxido de potasio (K ₂ O)	1,08 *	<2	2
Óxido de azufre (SO ₃)	1,79 *	0,37	0,02
Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	-	-	0,78
Óxido de cal libre (CaO)	1,10 *	-	-
Pérdida al fuego	0,01 *	33	11,01
Índice de Actividad Puzolánica (IAP), %	100	57	81

* datos suministrados por el fabricante

2.2.- Dosificación

Se realizaron en un mezclador distintos micro-hormigones con cemento, las adiciones, agua y aditivo. Se trabajó con relaciones agua/(CP+adición) de 0,50 y 0,36 para el micro-hormigón convencional (MH) y de alto desempeño (MHAD), respectivamente. La dosificación básica de los micro-hormigones sin adición se presenta en la Tabla 2. Fueron estudiadas anteriormente para paneles en nuestro país [8]; luego se sustituyeron el 10%, el 20% y el 30% del peso del cemento por las adiciones, no alterando el contenido de aditivo en relación a la dosificación básica.

Tabla 2. Dosificación básica de los micro-hormigones estudiados

Denominación	Arena/CP	Agua/CP	CP (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
MH	3	0,50	536	1608	266	2,25
MHAD	2	0,36	707	1413	252	3

2.3. – Fabricación de probetas, realización de ensayos, selección de dosificaciones

Con las cantidades de materiales indicadas anteriormente se hicieron micro-hormigones en mezcladora de 3 velocidades siguiendo el procedimiento indicado en la norma UNIT ISO 679-2009[9]; se llenaron tres probetas de 40x40x160mm de cada dosificación, las cuales a las 24 horas se desmoldaron y colocaron en agua saturada con cal hasta los 28 días de edad; luego las probetas primeramente se rompieron a flexión y finalmente cada mitad se ensayó a compresión, siguiéndose la mencionada norma para todo ello. A los efectos del empleo de los micro-hormigones en paneles basados en el sistema M2 se seleccionaron aquellas dosificaciones cuya resistencia a compresión no fuera inferior a 25MPa [1].

2.4. – Cálculo de costes

Se calculó el coste por metro cúbico de cada uno de los micro-hormigones seleccionados. Los precios unitarios considerados para el cálculo fueron los de Uruguay en julio de 2017. El precio del cemento fue U\$ 0,28/kg; el de la arena U\$ 0,011/kg (U\$ 12,5/m³) y el del aditivo superplastificante de U\$ 8,40/kg. El polvo de electro-filtro usado, PEF, es un residuo de las industrias de cemento empleado esporádicamente en Uruguay como filler para hormigón autocompactante que no tiene adicional coste al productor de hormigón excepto el de su transporte de allí que se asume para el PEF el precio internacional del filler calizo cuyo coste es de U\$0,025/kg (U\$60/m³) [10]; la ceniza de cáscara de arroz residual uruguayo es un residuo de la producción de energía eléctrica en base al empleo de cáscara de arroz como biomasa, en Uruguay se producen 80 ton/día de CCA por lo que hay serios problemas con su deposición y su coste en el peor de los casos es el del transporte desde la empresa donde se produce a las fábricas de cemento, ya que en distintas oportunidades es cero para la segunda; asumiendo el precio internacional de la ceniza de cáscara de arroz china entre U\$80 y U\$300 (según sea cristalina o amorfa), en este trabajo se considerará el promedio para la CCA ya que es parcialmente cristalina, por lo que su coste será de U\$0,19/kg.

En la Figura 1 se presentan detalles de los paneles realizados con el sistema M2.

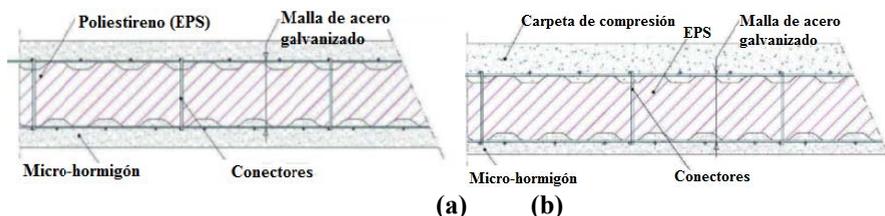


Figura 1. Detalles de paneles simples empleados como: (a) muros; (b) losas

Para el estudio de costes se seleccionaron viviendas de interés social de 2 y 3 dormitorios (2D y 3D, respectivamente), basadas en dicho sistema de paneles, cuyas plantas se presentan en la Figura 2.



Figura 2.Plantas de viviendas empleadas para el cálculo de costes: (a) 2D ; (b) 3D

Los espesores del micro-hormigón empleados en Uruguay para los paneles verticales (muros) son de 3,5cm mientras que para los horizontales (losa) son de 5cm y 3cm en las carpetas de compresión y tracción, respectivamente [1]. Se hizo el metraje de micro-hormigón necesario para las dos viviendas tipo seleccionadas en base al empleo de dichos espesores de micro-hormigón y se calculó el coste del mismo necesario para su construcción. A los efectos de extraer conclusiones se calculó también el coste de los micro-hormigones por MPa de resistencia a compresión.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Resistencia a compresión

La tabla 3 presenta los resultados de resistencia a compresión a los 28 días de edad de todos los micro-hormigones estudiados, siendo f_c el promedio de resistencia a compresión de 6 ensayos, σ la desviación estándar, CV el coeficiente de variación, MH el micro-hormigón convencional, MHAD el micro-hormigón de alto desempeño. Las sustituciones de cemento por adición se expresan luego del tipo de micro-hormigón, indicándose primeramente el porcentaje en peso y luego el nombre de la adición empleada. La variación de resistencia de cada tipo de micro-hormigón con adición en relación a la del que es realizado sólo con cemento, sin adición, se indica como Δf_c .

Tabla 2. Resultados obtenidos de resistencia a compresión a los 28 días de edad

Tipo	Sustitución (%)	f_c (MPa)	σ (MPa)	CV (%)	Δf_c (%)
MH	0	30,15	0,26	0,86	-
	10% CCA	31,30	0,18	0,56	+3,81
	20% CCA	27,62	0,21	0,77	-8,39
	30% CCA	22,11	0,04	0,19	-26,67
	10% PEF	25,45	0,63	2,45	-15,59
	20% PEF	25,76	0,19	0,75	-14,56
	30% PEF	26,20	0,16	0,60	-13,10
	0	43,08	0,15	0,36	-
	10% CCA	49,00	0,31	0,63	+13,74
MHAD	20% CCA	43,73	0,46	1,06	+1,50
	30% CCA	35,50	2,30	6,48	-17,60
	10% PEF	59,93	3,06	5,10	+39,11
	20% PEF	54,60	2,11	3,87	+26,74
	30% PEF	45,72	1,54	3,37	+6,12

Las dosificaciones estudiadas presentan resistencia a compresión mayor a 25 MPa, excepto el micro-hormigón convencional con sustitución de 30% de cemento por CCA, por lo que dicha dosificación no será considerada para los estudios de costes ya que no cumple la exigencia de resistencia del sistema M2.

Se observa claramente que en MH el empleo de adiciones disminuye la resistencia en relación a la referencia sin adición, excepto con 10%CCA donde aumenta escasamente,

mientras que en el MHAD la aumentan, excepto con 30% de CCA. Los resultados obtenidos muestran comportamientos muy diferentes de las adiciones según se trate de micro-hormigón convencional (MH) o de alto desempeño (MHAD) como lo muestra Δf_c , obteniéndose mejores resultados en MHAD que en MH lo cual posiblemente es debido a que su microestructura más compacta favorece el efecto puzolánico de la CCA y el filler del PEF.

3.2.- Cálculo de costes

En la tabla 3 se presenta el coste por m^3 de los micro-hormigones estudiados que cumplen el requisito de resistencia del sistema M2 (f_c mínima de 25MPa), su diferencia en % (Δ), el coste por MPa de resistencia de cada micro-hormigón, y finalmente los costes del micro-hormigón necesario para las viviendas de 2 y 3 dormitorios de la figura 2.

Tabla 3. Resultados obtenidos del estudio de costos

Tipo	Sustitución	U\$/m ³	Δ (%)	U\$/MPa	Costo en US\$	
					2D	3D
MH	0	172	-	5,7	2922	3387
	10% CCA	167	-2,80	5,34	2840	3292
	20% CCA	162	-5,60	5,87	2758	3196
	10% PEF	158	-7,95	6,22	2690	3117
	20% PEF	144	-15,90	5,61	2458	2848
	30% PEF	103	-40,13	3,93	1749	2027
MHAD	0	226	+31,41	5,24	3841	4451
	10% CCA	220	+27,73	4,48	3733	4326
	20% CCA	213	+24,02	4,87	3625	4200
	30% CCA	207	+20,30	5,83	3516	4075
	10% PEF	208	+20,92	3,47	3534	4096
	20% PEF	190	+10,47	3,48	3228	3741
	30% PEF	172	0,00	3,76	2922	3387

Con el empleo de las dos adiciones estudiadas los resultados obtenidos muestran claramente que se disminuyen los costes por m^3 del micro-hormigón convencional y de alto desempeño (MH y MHAD, respectivamente), siendo mayor la economía obtenida cuanto mayor es el porcentaje de sustitución de cemento por ellas.

Considerando la diferencia de coste entre cada dosificación con relación al MH sin adición (Δ), empleando adiciones en todas las dosificaciones de MH se reducen los costes mientras que en las de MHAD se incrementan, excepto con sustitución de 30% de cemento por PEF, donde se obtiene el mismo valor con MHAD que con el MH de referencia sin adición. Con 30% de sustitución de cemento por PEF se obtiene una economía considerable en el costo por m^3 del micro-hormigón convencional (cercana al 40%), mientras que cuando se emplea dicha sustitución en MHAD se obtiene el mismo coste que con MH sin adición.

Considerando el coste por MPa de resistencia en los MHAD, en todas las dosificaciones estudiadas, los costes disminuyen en relación al MH sin adición, siendo menores con PEF que con CCA, excepto con 30% de sustitución de cemento por CCA. No existen diferencias significativas de U\$/m³ entre los distintos porcentajes de empleo de PEF. En todos los micro-hormigones estudiados los costes menores por MPa se obtienen con 30% de sustitución de cemento por PEF no existiendo diferencia significativa entre MH y MHAD.

Desde el punto de vista medio-ambiental las mejores dosificaciones son aquellas en las que se utilizan las mayores cantidades de residuos, de allí que se obtienen con 30%PEF en MH, mientras que en MHAD con 30% de sustitución de cemento para cualquiera de las dos adiciones empleadas (CCA y PEF). Por este motivo el 30% de sustitución de cemento por PEF puede ser considerado el porcentaje óptimo, ya sea para micro-hormigón convencional como de alto desempeño, en base al coste por m³, por MPa y medio-ambiental de todos los micro-hormigones estudiados.

En base a los costes de los micro-hormigones necesarios para construir viviendas de 2D y 3D, presentados en las dos últimas columnas de la Tabla 3, sustituyendo el 30% de cemento por PEF desembolsando la misma cantidad de dinero se puede: (a) financiar igual cantidad de viviendas realizadas con MHAD que con MH, lo cual tiene grandes ventajas para el medio-ambiente; (b) en MH realizar el micro-hormigón de dos viviendas de 2D y una de 3D mientras que sin emplear adición sólo 2 viviendas de 2D; (c) con MH realizar el micro-hormigón de 3 viviendas de 3D mientras que sin emplear adición sólo de 2 viviendas de 3D; lo cual muestra las ventajas de su empleo en la construcción de viviendas de interés social con financiación gubernamental, pudiendo representar economías realmente significativas en planes de construcción de vivienda con apoyo estatal.

4.- CONCLUSIONES

Las conclusiones más relevantes del presente trabajo son las siguientes:

- Las dos adiciones residuales estudiadas, con características diferentes, siendo una puzolánica y otra no, pueden ser empleadas para micro-hormigón obteniéndose resistencias a compresión a los 28 días que cumplen el requisito indicado por el sistema M2 (fc mínima de 25 MPa), excepto con el 30% de sustitución de cemento por CCA en micro-hormigón convencional (MH).
- Los resultados obtenidos muestran comportamientos muy diferentes de las adiciones según se trate de micro-hormigón convencional (MH) o de alto desempeño (MHAD)
- Con el empleo de las dos adiciones estudiadas los resultados obtenidos muestran claramente que se disminuyen los costes por m³ del micro-hormigón convencional y de alto desempeño (MH y MHAD, respectivamente), siendo mayor la economía obtenida cuanto mayor es el porcentaje de sustitución de cemento por ellas.
- Con el 30% de sustitución de cemento por PEF se obtiene una economía considerable en el coste por m³ del MH (cercana al 40% del coste sin adición), mientras que cuando se emplea dicha sustitución en MHAD se obtiene el mismo coste que con MH sin adición.

- En todos los micro-hormigones estudiados los costes menores por MPa se obtienen con el 30% de sustitución de cemento por PEF, no existiendo diferencia significativa entre MH y MHAD.
- Desde el punto de vista medio-ambiental los mejores resultados se obtienen con 30% de PEF en MH, mientras que en los MHAD se obtienen con el mismo porcentaje de sustitución de cemento con las dos adiciones empleadas (CCA y PEF).
- El 30% de sustitución de cemento por PEF puede ser considerado el porcentaje óptimo, ya sea para micro-hormigón convencional como de alto desempeño, en base al coste por m³, por MPa y medio-ambiental de todos los micro-hormigones estudiados.

Los resultados presentados muestran la viabilidad del empleo de las adiciones estudiadas y las ventajas de su empleo, según se trate de MH u MHAD, en la construcción de viviendas de interés social pudiendo representar economías realmente significativas en planes de construcción de vivienda con apoyo gubernamental.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, Documento de Aptitud Técnica (DAT) del sistema Emmedue, Dirección Nacional de Vivienda (DINAVI-MVOTMA), DAT G-Serie 1: SC001/2012, (2012).
- [2] Advanced Building System, Sistema constructivo EMMEDUE: Especificaciones Técnicas, http://es.mdue.it/files/2012/06/Especificaciones_tecnicas.pdf
- [3] Méndez Lora, K.R., 'Paneles estructurales de poliestireno expandido: análisis energético en el clima tropical-húmedo de Santo Domingo y aplicado a la vivienda social (caso sistema Emmedue)', Tesis de Master, ETSAB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España (2014).
- [4] Aitcin, P.C., 'High performance concrete', E & FN Spon, London, UK (1998).
- [5] UNIT 1035:1998, 'Materiales puzolánicos. Determinación de actividad puzolánica. Índice de actividad puzolánica con cemento. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT), Montevideo, Uruguay (1998).
- [6] UNIT 1047:1999, 'Materiales puzolánicos. Definiciones y requisitos. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, Montevideo, Uruguay (1999)
- [7] UNE EN 12620:2003+A1:2009, 'Aridos para hormigón', Asociación Española de Normalización (AENOR), Madrid, España (2009)
- [8] Rodríguez de Sensale, G., Rodríguez Viacava, I., Rolfi, R., Aguado, A., 'Micro-hormigón autocompactante con fibras de polipropileno'. IV Congreso iberoamericano sobre hormigón autocompactante, BAC2015, Porto, Portugal, 10p, (2015).

- [9] UNIT-ISO 679:2009 (ISO 679:2009, MOD), 'Métodos de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas', Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, Montevideo, Uruguay (2009).
- [10] Rodriguez de Sensale, G., Rodriguez Viacava, I., Aguado, A., 'Simple and Rational Methodology for the Formulation of Self-Compacting Concrete Mixes', *Journal of Materials in Civil Engineering(ASCE)*, 28(2), (2016), 4015116-1 a 4015116-10