

# Hormigones autocompactantes con residuo de perlita expandida

Lucas M. Sánchez<sup>1</sup> & Silvia B Palazzi<sup>2</sup>

(1) *Laboratorio. de Ensayo de Materiales. Departamento de Construcciones y Obras Civiles. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Universidad Nacional de Tucumán.*  
lucasmsanchez@gmail.com

(2) *Laboratorio. de Ensayo de Materiales. Departamento de Construcciones y Obras Civiles. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Universidad Nacional de Tucumán.*  
spalazzi@herrera.unt.edu.ar

**RESUMEN:** El hormigón sustentable es el material de construcción del presente y del futuro por lo que el trabajo estudia el empleo de un residuo industrial puzolánico en la fabricación de hormigones autocompactantes. El residuo proviene de una industria local que fabrica perlita expandida cuya materia prima es un vidrio volcánico. Se elaboraron hormigones autocompactantes con 20% de residuo como adición mineral activa, como incorporación o como semi-reemplazo del contenido unitario del cemento del hormigón que se toma como patrón. En estado fresco se evaluaron la fluidez, la viscosidad y la capacidad de pasaje mediante los ensayos de diámetro de extendido,  $T_{50}$  y J-Ring. En estado endurecido se evaluaron las resistencias a compresión y tracción indirecta, el módulo de elasticidad y succión capilar a la edad de 28 días. Los resultados obtenidos permiten incorporar valor agregado al residuo y se convierte en una solución ambientalmente saludable tanto para la industria que lo produce como para la industria del hormigón.

## 1 INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas ecológicos mundiales es el cambio climático, que se debe fundamentalmente a la acumulación de gases "de efecto invernadero" (GEI) en la atmósfera, como resultado de actividades tales como el uso de combustibles fósiles y la deforestación a gran escala, entre otros. Los GEI más importantes son el dióxido de carbono, el óxido nitroso, el ozono y los clorofluorocarburos, cuyas concentraciones se están elevando progresivamente desde mediados del siglo XVIII (Cortés Arreguín (2012)). La industria cementera genera 1 tonelada de dióxido de carbono por cada tonelada de clinker que produce, una cifra impactante si se tiene en cuenta la producción anual global de clinker.

Otro problema ambiental es la generación de cantidades enormes de residuos, mucho de los cuales

pueden ser reciclados o reutilizados. El problema radica en la falta de gestión de los mismos que debería basarse en una jerarquía de prioridades que ordena de modo decreciente el interés de las acciones posibles de la siguiente manera:

- Minimizar en lo posible el uso de materias.
- Reducir residuos.
- Reutilizar materiales.
- Reciclar residuos.
- Recuperar energía de los residuos.
- Enviar la cantidad mínima de residuos al vertedero.

El concepto de desarrollo sostenible en la tecnología del hormigón se ha incorporado con un fuerte compromiso. Así, la necesidad de ahorrar energía y materias primas en la fabricación del

cemento Pórtland ha llevado a la aparición de los cementos compuestos que tienen menos clinker que un cemento normal y una o más adiciones minerales activas o inertes, naturales o subproductos de diversas industrias; el reciclado de restos de hormigón como inerte o la inclusión de residuos para la elaboración de nuevos hormigones son algunos caminos abordados.

El trabajo reemplaza parcialmente al cemento de un hormigón autocompactante (HAC) por un residuo industrial de tal forma de obtener propiedades mejores o iguales al hormigón patrón sin residuo. Las hipótesis de trabajo logran en forma directa una disminución del uso de cemento y el reciclaje del residuo, dos puntos elementales en el cuidado del medio ambiente.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales utilizados en la fabricación de los HAC son los mismos que se emplean para un hormigón convencional, pero las proporciones utilizadas en su dosificación son distintas, espe-

cialmente en lo relativo al contenido de materiales finos, para evitar riesgos de segregación.

Por otra parte, la utilización de aditivos superfluidificantes de última generación o modificadores de la viscosidad es imprescindible a la hora de obtener hormigones autocompactantes, ya que se busca una adecuada combinación de fluidez y viscosidad del hormigón que asegure que el hormigón sea capaz de compactarse por su peso propio rellenando todo el encofrado sin sufrir bloqueo por la presencia de la armadura.

### 2.1 Cemento

Para la fabricación de los HAC, se pueden utilizar todos los tipos cementos existentes en el mercado. Se eligió trabajar con Cemento Pórtland Normal CPN40 por ser de aceptable calidad y precio para hormigones de alta resistencia, de finura suficiente para hormigones autocompactantes y de buena disponibilidad en el mercado local.

El fabricante proporciona el protocolo del cemento donde lo caracteriza física y químicamente bajo la Norma IRAM 50.000, reflejado en las tablas Tabla 2 y Tabla 1, respectivamente.

Tabla 1. Protocolo del cemento CPN40. Análisis físico.

ENSAYOS FÍSICOS	UM	RESULTADO	Requisito IRAM
Retenido tamiz 75 $\mu$	%	2,5	< 15
Superficie específica (Blaine)	m <sup>2</sup> /Kg.	328	> 250
Expansión en autoclave	%	0,01	< 1
Tiempo fraguado inicial	h:min	2:15	> 0:45
Tiempo fraguado final	h:min	3:15	< 10:00

Tabla 2: Protocolo del cemento CPN40. Análisis químico.

ANÁLISIS QUÍMICO	UM	RESULTADO	Requisito IRAM
Pérdida por calcinación (PPC)	%	3,01	< 4
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	%	2,91	< 3,5
Oxido de magnesio (MgO)	%	1,88	< 5
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	%	20,33	-
Oxido de calcio (CaO)	%	51,73	-
Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	4,89	-
Oxido de sodio (Na <sub>2</sub> O)	%	0,52	-
Oxido de potasio (K <sub>2</sub> O)	%	0,77	-
Oxido de sodio equivalente (Na <sub>2</sub> O + 0,658 K <sub>2</sub> O)	%	1,03	-

### 2.2 Agregados

No existen limitaciones en cuanto a la naturaleza de los agregados para la fabricación de los HAC, sin embargo suelen plantearse consideraciones sobre su tamaño máximo. Se utilizó agregado grueso de 9,5 mm de tamaño máximo pues el hormigón sería para llenar un elemento estructural prefabricado, cumpliendo con las recomenda-

ciones<sup>1</sup> más usuales que indican que este no debe superar los 20 mm.

Se optó por trabajar con canto rodado debido a la ventaja de alta disponibilidad y a que su forma favorece la trabajabilidad del hormigón necesitando menos pasta para lograr los mismos resultados que los obtenidos con agregados triturados. Tanto el agregado grueso como la arena provienen de canteras del Río Salí, principal fuente de provisión de agregados de la provincia de Tucumán. Las propiedades de los mismos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de los agregados.

PARÁMETRO	UM	NORMA	ARIDO GRUESO	ARIDO FINO
Módulo de fineza		IRAM 1505	5,62	2,88
Tamaño máximo	mm	IRAM 1505	9,5	
Cantidad de finos	%	IRAM 1540	0,99	1,69
Peso específico	Kg/dm <sup>3</sup>	IRAM 1533	2,67	2,63
Peso unitario suelto	Kg/dm <sup>3</sup>	IRAM 1548	1,49	1,70
Vacíos	%	IRAM 1548	44,3	35,5

### 2.3 Adición mineral puzolánica: Residuo

El residuo utilizado como adición para este trabajo es un residuo de la industria de fabricación de perlita expandida.

La perlita es una toba volcánica, con un contenido de agua relativamente alto, procedente de San Antonio de los Cobres, Provincia de Salta. Para su explotación la operación de minado se realiza a cielo abierto. En cuanto a la producción, parte de la misma se procesa en una planta de molienda y clasificación, de las 900 tn producidas, aproximadamente 700 tn van dirigidas a la planta ubicada en la provincia de Tucumán y el resto va a la planta de expandido de Rosario de Santa Fe. En ambas se obtiene perlita expandida para diferentes usos.

Una propiedad excepcional de la perlita es que se expande a más de 20 veces su volumen original cuando es calentada hasta su nivel de ablandamiento. Este proceso de ablandamiento es causado por la presencia del agua dentro del mineral crudo. Cuando este es calentado a unos 900°C aproximadamente, el agua atrapada en la estructura de la perlita se evapora y obliga al material ablandado a expandirse (Figura 1).

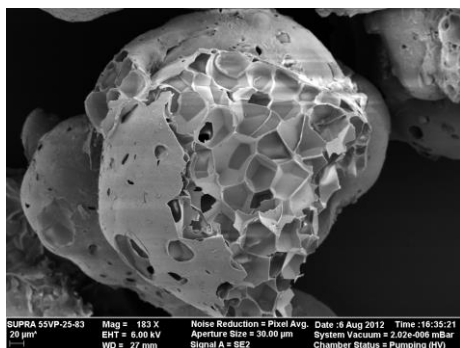


Figura 1. Imagen del microscopio electrónico de barrido de partículas de residuo de perlita expandida

La perlita expandida se usa como auxiliar filtrante para distintas industrias, perlita criogénica para el aislamiento de tanques y recipientes de plantas procesadoras de componentes del aire a temperaturas muy inferiores a los - 100°C y como agregado liviano en la industria de la construcción permitiendo una notable reducción en el cálculo de estructuras gracias a su bajo peso específico, logrando una disminución de hasta el 30% en los costos.

En este trabajo se emplea el residuo proveniente de la fabricación de auxiliar filtrante cuyo peso específico, promedio de 6 muestras, es de 1,86 kg/dm<sup>3</sup> con una desviación muestral de 0,046 kg/dm<sup>3</sup>.

Tabla 4. Análisis Químico.

ELEMENTO	PORCENTAJE
SiO <sub>2</sub>	77.81 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.58 %
Fe <sub>2</sub> O	0.27 %
TiO <sub>2</sub>	<0.01 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03 %
MnO	0.05 %
CaO	0.76 %
MgO	0.06 %
Na <sub>2</sub> O	0.53 %
K <sub>2</sub> O	4.67 %
SO <sub>3</sub>	<0.01 %

Tabla 5. Análisis Físico.

TAMIZ	RETENIDO gr	RETENIDO %
# 16	0.0165	0.06
# 32	2.8520	10.13
# 60	6.1915	21.98
# 100	10.5385	37.42
# 250	6.8665	24.38
Fondo	1.7	6.04

La empresa fuente del residuo proveyó el análisis químico y físico que se muestran en las Tabla 4 y Tabla 5, respectivamente. Estudios anteriores (Anaya (2003)), alentados por los buenos resultados de éstos análisis que indican una alta composición de sílice y aceptable superficie específica, han demostrado que éste residuo es un muy buen inhibidor de la reacción álcali-sílice. También se estudió su actividad puzolánica, determinándose

en forma cuantitativa, según la Norma IRAM 1654, el índice de puzolanidad  $I_p = 79 \%$ .

## 2.4 Aditivo

Se utilizó un aditivo superplastificante de 4ª generación, basado en la tecnología de los éteres carboxílicos, que no contiene cloruros y es de bajo tenor de álcali.

Al inicio del proceso de mezcla del hormigón, los polímeros aumenta la carga negativa de las partículas del cemento y las dispersa por repulsión eléctrica al igual que los fluidificantes tradicionales, pero la cadena lateral vincula al polímero central y genera una instancia estéril que estabiliza la habilidad de las partículas de cemento a separarse y dispersarse. La cadena estéril provoca una barrera física a lo largo de la cadena electrostática entre los granos de cemento. De ésta forma se obtiene un hormigón fluido con una reducción de agua. Los datos técnicos del producto utilizado están en la Tabla 6.

Tabla 6. Datos técnicos del superfluidificante.

DATO TÉCNICO	VALOR
Aspecto físico	Líquido poco turbio
Peso específico	1,09 kg/dm <sup>3</sup>
Ph	5,5 a 7,5
Cloruros	< 0,1 %
Contenido de álcali (Na <sub>2</sub> O o equivalente)	< 5mg/l
Sulfatos	< 1 mg/l
Componentes de riesgo	Ninguno

## 3 MÉTODO

En la Tabla 7 se muestra la dosificación del HAC Patrón (denominado LP) y en la Tabla 8 las recomendaciones propuestas por EFNARC para HAC. Se eligió una baja relación agua/cemento de 0,35 y una deficiencia de agregado grueso para poder lograr una buena cantidad de finos ya que la primera elección implica un alto contenido de cemento y la segunda un alto contenido de agregado fino. La dosis de aditivo de 3,60 Kg por m<sup>3</sup> (0,7% del peso de cemento) se determina experimentalmente aumentando su cantidad hasta que se logre una buena fluidez sin perder estabilidad de la mezcla y partiendo de la dosis correspondiente al punto de saturación (0,6%) evaluado en pasta con el cono de Marsh.

Tabla 7: Dosificación del hormigón patrón.

MATERIAL	UM	CANTIDAD
Agua	dm <sup>3</sup>	180
Cemento	Kg	514
Agregado fino	Kg	800
Agregado grueso	Kg	800

Aditivo	Kg	3,60 [0,7%]
---------	----	-------------

El siguiente paso es proponer las hipótesis de cuánto y cómo agregar el residuo de perlita expandida en el hormigón. En base a las conclusiones de un estudio anterior, (Achaval (2010)) se adopta una cantidad fija de residuo e igual al 20 % del contenido unitario de cemento (CUC) del hormigón que se toma como patrón (LP).

Esta cantidad de residuo se agrega de dos maneras distintas. La primera es un semi-reemplazo (LIR), esto significa que se reemplaza un 10% del contenido unitario de cemento (CUC) del hormigón patrón y un 10% se incorpora.

Tabla 8. Recomendaciones para HAC.

PARÁMETRO	UM	CANTIDAD	RECOMENDACIÓN <sup>2</sup>
Volumen Ag. Grueso	dm <sup>3</sup>	242	300 a 340
Relación A/polvo		0,88	0,8 a 1,0
Contenido de agua	dm <sup>3</sup>	180	160 a 180
Vol fino/Vol mortero		51 %	40 a 50%
Vol de pasta	dm <sup>3</sup>	343	340 a 390

La segunda es la de incorporar el 20% del residuo manteniendo el CUC del hormigón patrón (LI). De igual modo que para el hormigón patrón, se determinó la cantidad de aditivo mediante ensayos tal que se logre un extendido similar al del patrón sin que segregue. Las dosificaciones de éstos hormigones se adjuntan en la Tabla 9.

Tabla 9. Dosificación de las hipótesis.

MATERIAL	UM	LIR	p/1m <sub>3</sub>	LI	p/1m <sup>3</sup>
Agua	dm <sup>3</sup>	180	173	180	170
Cemento	Kg	463	444	514	485
Agregado fino	Kg	800	769	800	756
Agregado grueso	Kg	800	769	800	756
Residuo	Kg	103	99	103	97
Aditivo	%	1,2	1,2	1,3	1,3

El hormigón se fabrica en laboratorio, con una hormigonera basculante de 120 litros de capacidad. Al aditivo se lo pesa en una balanza electrónica de 0,01 gr de precisión y al resto de los materiales, en una báscula electrónica de pie de 50 gr de precisión. La jornada de hormigonado empieza con un pastón de empaste de 10 litros en el que se estima una dosis de aditivo. En el próximo pastón de 20 litros se ajusta la dosis de aditivo y se hacen los ensayos de extendido, T<sub>50</sub> y J-Ring que darán base para adoptar la dosis final

del aditivo. Luego se fabrica un pastón de 35 litros con el que se realizan todos los ensayos en estado fresco que caracterizan al hormigón. Por último, con un pastón de 85 litros se llenan 36 probetas cilíndricas normalizadas de 10 x 20 cm y se llenan hasta la mitad 6 probetas cilíndricas normalizadas de 15 x 30 cm para el ensayo de penetración de agua a presión. Al tratarse de HAC, el llenado de las probetas se realiza de una sola vez sin compactación. Al otro día se desmoldan las probetas y se curan de forma normalizada hasta la fecha de ensayo. El procedimiento se repite para cada hormigón.

Los ensayos que se realizaron al hormigón en estado fresco son el diámetro de extendido,  $T_{50}$  (Foto 2 y 3), Índice visual de estabilidad (ASTM C 1611) (Foto 4), J-Ring (ASTM C 1621), Peso Unitario (IRAM 1562) y contenido de aire (IRAM 1602).



Foto 2. Ensayo de extendido y  $T_{50}$



Foto 3. Torta de HAC



Foto 4. Índice de observación visual (VSI=0)

Para cada ensayo en estado endurecido a las edades de 28, 60 y 90 días se utilizaron 3 probetas para asegurar la representatividad de los resultados. Los ensayos realizados son: compresión (IRAM 1546), módulo de elasticidad (ASTM C469), tracción por compresión diametral (IRAM 1534), succión capilar (IRAM 1871) y penetración de agua a presión (IRAM 1554).

#### 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este trabajo se presentan, en la Tabla 10, los resultados de los ensayos en estado endurecido sólo a la edad de 28 días.

Tabla 10. Resultados de los ensayos.

ENSAYO	UM	LP	LIR	LI
Extendido	cm	67	65	65
$T_{50}$	seg	2,6	5,7	6,6
J-Ring	cm	62	61	57
Peso Unitario	Kg/dm <sup>3</sup>	2,29	2,27	2,27
Volumen de aire	dm <sup>3</sup>	40	50	50
VSI (índice de estabilidad visual)		0	0	1
Compresión	MPa	62,0	70,0	74,2
Módulo de Elasticidad	MPa	3514 5	3365 2	3705 9
Tracción Indirecta	MPa	7,53	8,57	8,80
Succión capilar	gr/m <sup>2</sup> /se g	3,05	2,81	2,44
Penetración de agua	mm	6,5	5,2	3,0

#### 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las mejoras en las propiedades en estado endurecido logradas en los hormigones con residuo son para tener en cuenta. Si comparamos respecto al patrón la resistencia a compresión, aumenta un 13% para el hormigón LIR y un 23% para el LI; la resistencia a tracción, aumenta un 14% en el hormigón LRI y un 17% para el LI; la succión capilar disminuye un 8% para el LIR y un 20% para el LI; la penetración de agua a presión disminuye un 20% para el LIR y un 54% para el LI. Los resultados a la edad de 28 días, que son los que se presentan en el trabajo, no difieren de los obtenidos a las edades de 60 y 90 días, lo que indica que la actividad puzolánica del residuo se desarrolla en su totalidad hasta dicha edad.

Los puntos en contra son el aumento de la viscosidad que puede llegar a limitar el campo de aplicación de estos HAC con residuo, y el aumento de la dosis de aditivo necesaria para mantener el extendido, una componente de peso en la ecuación económica del hormigón. Claro está que en la ecuación de sustentabilidad donde además se deben tener en cuenta otros factores como la autocompactabilidad (menor consumo de energía por la no compactación, ahorro de mano de obra),

el menor consumo de cemento (menos emanaciones de CO<sub>2</sub>) y la valoración de un residuo industrial, justifican ampliamente su uso.

La alternativa de la utilización de residuo de perlita expandida en HAC tiene un balance muy beneficioso pues además de ser puzolánico inhibe la reacción álcali-sílice que puede desarrollarse en determinados hormigones elaborados con los agregados del río Salí que son deletéricos. El proyecto en el que se enmarca este estudio busca la aplicación viable de las hipótesis en empresas locales del medio en las que se emplean HAC.

## 6 REFERENCIAS

- Achával, N. “Hormigón autocompactante con residuo industrial puzolánico”, *Tesis de grado*, Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina (2010), 76 páginas.
- Anaya D., Leiva L., Castría N. “Usos de adiciones minerales activas del NOA para inhibir la reacción álcali-sílice en hormigón autocompactantes”, *Memorias XIV Reunión Técnica de la AATH* (2003)
- Cortes Arreguín, J. J. “Principales problemas ecológicos”, disponible online en: [www.monografias.com/trabajos11/mundi/mundi.shtml](http://www.monografias.com/trabajos11/mundi/mundi.shtml) (acceso: 13/06/2012).
- Fava, C. y Fornasier, G. “Hormigones especiales”, Capítulo 3, Hormigón autocompactante. 1ª Edición, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (2004), 354 páginas.
- Jonhson, W y Rigueira, V. “Estudio de la sensibilidad e influencia de la Composición en las propiedades reológicas y mecánicas de los hormigones autocompactantes”, *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España (2007), 342 páginas.
-