

TÍTULO: OBTENCIÓN DE MEZCLAS DE RELLENO FLUIDO A PARTIR DE GRANULOMETRÍAS DE RECHAZO DE LOS PROCESOS DE MACHAQUEO

ÁREA TEMÁTICA A: Aplicaciones de los áridos. Calidad de producción y de producto. Áridos para hormigones, prefabricados, morteros, carreteras, balasto, escollera y otras aplicaciones

AUTORES: D. Revuelta Crespo¹, L. Fernández Luco², L. Álvarez Fernández³, P. Carballosa⁴

¹ Dr. Ing. Industrial, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc) – CSIC, Tel. 91 302 04 40, drevuelta@ietcc.csic.es

² Dr. Ing. Civil, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Tel. 91 442 91 66, lfdezluco@ieca.es

³ Dr. en Geología, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Tel. 91 442 91 66, lalvarez@ieca.es

⁴ Ing. de Materiales, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc) – CSIC, Tel. 91 302 04 40, carballosa@ietcc.csic.es

RESUMEN

En la reducción de residuos provenientes de la producción de áridos, uno de los objetivos que se persigue es el aprovechamiento integral del producto, ya se trate de un yacimiento o el procesamiento de rocas de cantera. Por lo general, es previsible una acumulación de stock de materiales finos, y una forma de revalorizarlos es la búsqueda de nuevas aplicaciones. Una de estas aplicaciones la constituyen los rellenos fluidos de

densidad controlada, que son materiales autocompactantes, de resistencia modulable, con consistencia muy fluida y que se pueden emplear en sustitución de los habituales rellenos granulares compactados. Entre sus aplicaciones, merece citarse el relleno de excavaciones, la ejecución de sub-bases de cimientos, bases para pavimentos y relleno de túneles y pozos. Entre sus principales ventajas, puede mencionarse la versatilidad en las operaciones de llenado, fundamentalmente de volúmenes complejos, y su economía, gracias a su rapidez de colocación y ahorro en personal y equipos de compactación. Adecuadamente diseñado, puede ser fácilmente re-excavable en caso de necesitar intervenciones posteriores. Su uso está muy extendido en algunos países europeos, e incluso existen guías ACI de recomendación. Este trabajo muestra las ventajas que representan las fracciones finas para la producción de los rellenos fluidos de densidad controlada, ya que contribuyen a la estabilidad y docilidad de la mezcla, que se consigue combinando bajos contenidos de cemento y aditivos espumantes diseñados ad-hoc.

PALABRAS CLAVE: Reaprovechamiento de residuos, relleno fluido, aditivos espumantes

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración de la División de Áridos de Holcim España, S.A., y de BASF Construction Chemicals España S.L.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de emplear áridos con granulometrías determinadas en función de la aplicación a la que van destinados (morteros, hormigones, mezclas bituminosas,

zahorras, etc.) hace que en cualquier planta de fabricación de áridos se genere un volumen de material con granulometrías no válidas para ninguna de las aplicaciones reglamentadas. La eficiencia del proceso de fabricación dependerá de varios factores¹. En las plantas de extracción de áridos naturales, el rendimiento es función, lógicamente, de la granulometría del material en estado bruto, y del posterior método de clasificación. En las plantas de fabricación de áridos por machaqueo, el rechazo depende más bien del tipo de dispositivos de machaqueo empleado, de la disposición de los mismos, y por supuesto del posterior método de clasificación².

Las operaciones de machaqueo, aun las destinadas a producir partículas de gran tamaño, producen una gran cantidad de partículas finas por la propia naturaleza de fractura por impacto y desgaste, por lo que en las canteras de machaqueo las fracciones de rechazo están por lo general constituidas en su mayor parte por granulometrías de árido fino, con un gran contenido de polvo. Sin embargo, puesto que los productos obtenidos en una planta de machaqueo no dependen tanto del material en bruto sino del propio proceso, las granulometrías de rechazo suelen presentar una gran uniformidad.

Los rellenos fluidos de baja resistencia controlada son materiales cementicios autocompactantes, empleados como alternativa de relleno mediante suelo compactado. Aunque no se emplean en España, su uso está muy extendido en otros países, especialmente en el continente americano. En Estados Unidos a este tipo de materiales se los conoce como Materiales de Baja Resistencia Controlada (MBRC), e incluso se han publicado Guías de Aplicación, como la ACI 229R-99³. Aunque el término Material de Baja Resistencia Controlada se puede emplear para describir una familia de mezclas para aplicaciones muy variadas, y de hecho la ACI 116R⁴ define los MBRC como materiales que resultan en resistencias a la compresión inferiores a 8,3 MPa, la

mayoría de las aplicaciones requieren resistencias a la compresión inferiores a los 2 MPa.

En el caso de los rellenos fluidos, este material se emplea para el relleno de zanjas, agujeros, o cualquier otro tipo de cavidad. Para el caso de suelos, hablando en términos de tensiones admisibles, un suelo muy bien compactado rondaría entre los 0,3 y los 0,7 MPa⁵. Entre las ventajas de este material que pueden citarse son la disponibilidad, ya que puede fabricarse a partir de materiales locales o incluso, tal como se expone en este trabajo, a partir de granulometrías de rechazo; la facilidad de fabricación y transporte, ya que puede fabricarse en plantas de hormigón preparado y transportarse en camiones hormigonera; la facilidad de colocación, ya que puede bombearse, no requiere compactación, y apenas requiere trabajos de nivelación; al no requerir compactación, la anchura de la zanja o el tamaño de la excavación pueden reducirse; son versátiles, ya que variando los componentes pueden conseguirse distintos grados de fluidez o resistencia; son resistentes y durables, ya que su resistencia está en el orden de la de rellenos de suelo con buena compactación, pero son menos permeables, y por tanto más resistentes a la erosión; mejoran la seguridad en la obra, ya que no se requiere que los operarios entren en las zanjas; reduce los costes, ya que aunque el coste del material sea más elevado, requiere menos maquinaria y tiempo para su colocación, y permite la circulación de tráfico rodado mucho antes; a diferencia de los rellenos con hormigones pobres, puede reexcavarse, lo que facilita las labores de mantenimiento posteriores.

Las propiedades de los rellenos fluidos están a caballo entre las de un suelo y las del hormigón. Se fabrican a partir de materiales similares a los empleados en la fabricación del hormigón, y se coloca con equipos similares a los de este material. En servicio exhibe características propias de los suelos. Sin embargo, la principal propiedad que

distingue a los rellenos fluidos de otra clase de rellenos es, tal como su propio nombre indica, la fluidez. Esta característica del estado fresco permite al material rellenar completamente los huecos, nivelarse prácticamente sin ayuda de medios externos, y no necesitar compactación mecánica, a diferencia de los materiales de relleno convencionales. Puesto que las propiedades en el estado fresco se parecen más a las del hormigón o lechadas, la fluidez de los rellenos fluidos se contempla mejor en términos de tecnología del hormigón.

La fluidez de los rellenos fluidos puede variar de rígida a fluida, dependiendo de los requerimientos. Aunque pueden emplearse los métodos de ensayo desarrollados para medir la fluidez del hormigón autocompactante⁶, al no necesitar valores de escurrimiento tan elevados, se han desarrollado métodos propios. La ASTM D6103⁷ emplea un molde cilíndrico de 75 x 150 mm, que se emplea de modo similar al ensayo de escurrimiento para hormigones autocompactantes⁸. Empleando el método ASTM, se considera que la mezcla posee buena fluidez cuando no hay segregación aparente y el material alcanza un diámetro de al menos 200 mm.

En cuanto a los materiales que lo componen, puede emplearse cualquier tipo de cemento. Los áridos, el constituyente que entra en mayor proporción en la mezcla, no requieren cumplir todos los requerimientos exigidos para la fabricación de hormigones o morteros, como se verá a continuación. Eso sí, la estabilidad de las mezclas se consigue mediante el empleo de aditivos inclusores de aire y espumantes. La inclusión de aire mejora la trabajabilidad, por lo que el contenido de agua puede reducirse, reduce la retracción, estabiliza la mezcla controlando la exudación y reduciendo la segregación de las partículas más gruesas, reduce la densidad, y controla el desarrollo de la

resistencia. Cantidades elevadas de aire mejoran la capacidad de aislamiento térmico y la resistencia al hielo-deshielo de las mezclas.

PLAN EXPERIMENTAL

Materiales empleados

Este trabajo presenta los resultados obtenidos al incorporar el aditivo espumante SKW-2 proporcionado por BASF Construction Chemicals España S.L., a un mortero de cemento. El árido fue tomado de los acopios de rechazo de la planta de machaqueo de áridos que la empresa Holcim España, S.A. posee en Valdilecha (Madrid). Se comprueba que es un árido fino, con gran cantidad de material que pasa por el tamiz de 0,063 mm, y que no cumple con las especificaciones y recomendaciones de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 para su empleo como arena para la fabricación de hormigones. A continuación se muestra la caracterización física de la misma.

Tabla 1. Propiedades físicas de la arena empleada

Característica	Norma de ensayo	Resultado
Densidad	UNE-EN 1097-6	2,5 g/cm ³
Absorción de agua	UNE-EN 1097-6	3,2%
Finos que pasan por el tamiz de 0,063 mm	UNE-EN 933-1	11,8%

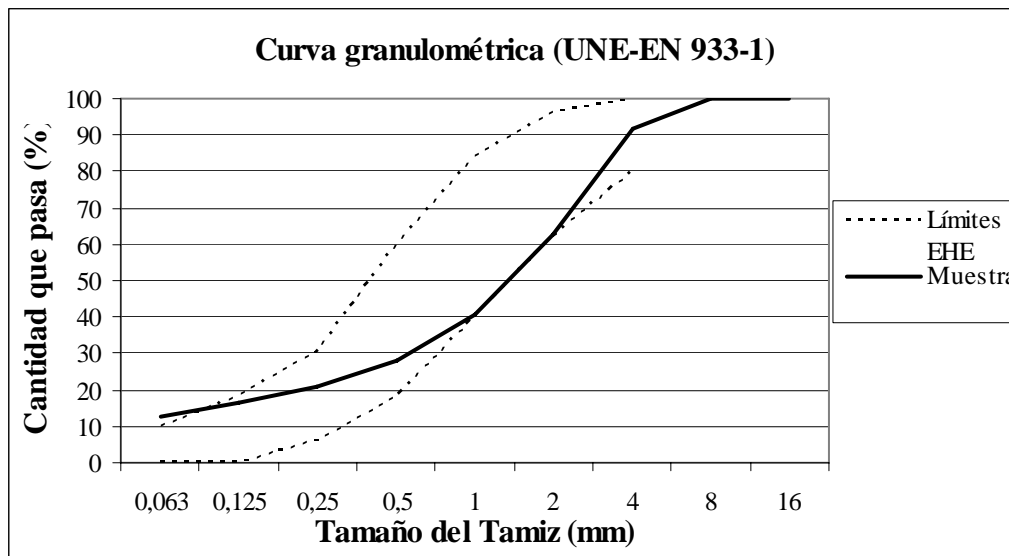


Figura 1. Granulometría de la arena empleada

El resto de materiales constituyentes del mortero eran un cemento CEM I 42,5R (UNE-EN 197-1), y agua potable de la red de distribución de Madrid.

Determinación del contenido de aire y de la resistencia mecánica (7 días) para distintas dosificaciones de aditivo

Para la determinación de la resistencia mecánica de morteros no normalizados, el criterio usual establece determinar, para una cierta proporción cemento/arena, la cantidad de agua necesaria para conseguir una fluidez determinada. A tal efecto, se fijó una relación cemento/arena de 1/5 en peso, y se fijó una relación agua/cemento en peso de 1, variando la dosificación de aditivo espumante (0,05%, 0,1%, 0,2% y 0,3% en peso del cemento). La fluidez de la mezcla se determinó según el método ASTM D6103. Las resistencias mecánicas se determinaron sobre prismas de mortero de 4x4x16 cm, tras 7 días de conservación en cámara seca con temperatura de 20 ± 2 °C y humedad relativa de $50 \pm 5\%$. Las probetas se fabricaban por vertido de una sola vez, sin aplicar ningún

medio extra de compactación. Se decidió esa condición de conservación con objeto de estimar si el relleno era capaz de desarrollar resistencias suficientes a edades tempranas en condiciones desfavorables de conservación. El contenido de aire se midió por técnicas de presión, en estado fresco (UNE-EN 1015-7), y la densidad se determinó en estado endurecido (UNE-EN 1015-10) tras los 7 días de curado para cada una de las mezclas.

Determinación del contenido de aire y de la resistencia mecánica (7 días) para distintas relaciones cemento/arena

Esta serie de pruebas se realizaron para dos dosificaciones de aditivo distintas (0,05% y 0,10%) en peso del cemento, y variando la relación cemento/arena (1/5 y 1/7).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinación del contenido de aire y de la resistencia mecánica (7 días) para distintas dosificaciones de aditivo

La incorporación del aditivo en pequeñas dosis provoca la incorporación de aire en cantidades superiores al 40%. La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos.

Se observó que el aumento en la dosis de aditivo producía un incremento en la cantidad de aire incorporado, pero sólo hasta cierta proporción (Figura 2). A partir de cierto punto, parece producirse una disminución en la efectividad del aditivo, ya que decrece la cantidad de aire incorporado. Este hecho se ve confirmado por las medidas de densidad y resistencia a la compresión (Figuras 3 y 4). La variación de la densidad y la resistencia son inversamente proporcionales a la cantidad de aire ocluido, como era de

esperar. Se obtuvieron densidades entre los 1,1 y los 1,4 g/cm³, y resistencias entre los 0,20 y los 0,55 MPa, lo cual significa que los rellenos fluidos ensayados poseen unas propiedades similares a las de suelos compactados.

Tabla 2. Resultados de escurrimiento, aire ocluido, densidad y resistencia a la compresión en función de la dosis de aditivo, para una relación cemento/arena de 1/5 en peso, y una relación agua/cemento de 1

Propiedad	Norma de ensayo	Dosis de aditivo en peso del cemento			
		0,05%	0,10%	0,20%	0,30%
Escurrecimiento (mm)	ASTM D6103	240	245	230	230
Aire ocluido (%)	UNE-EN 1015-7	45	46	57	54
Densidad (g/cm³)	UNE-EN 1015-10	1,36	1,31	1,11	1,20
Resistencia (MPa)	UNE-EN 1015-11	0,55	0,40	0,20	0,35

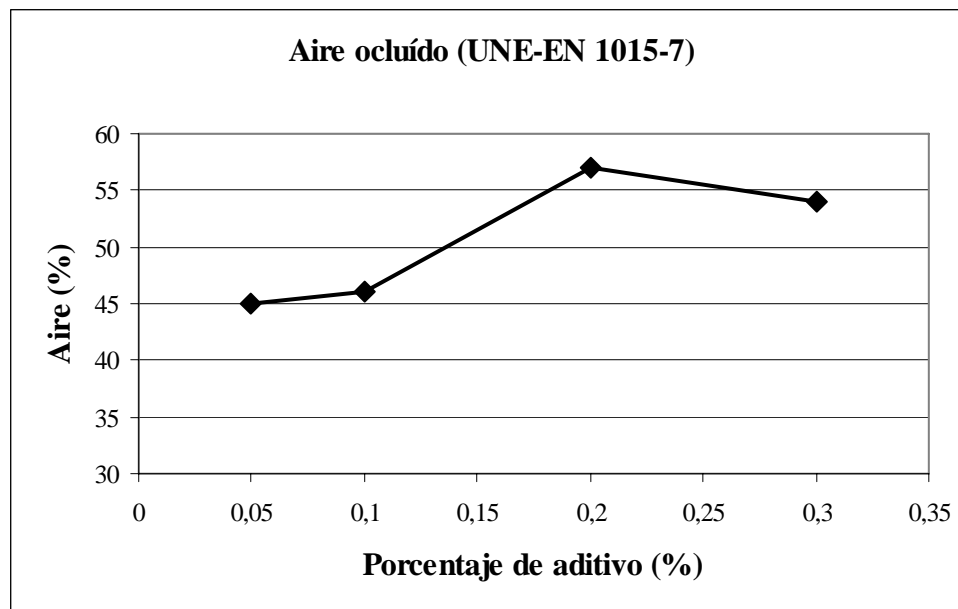


Figura 2. Variación en la inclusión de aire en función de la dosis de aditivo espumante

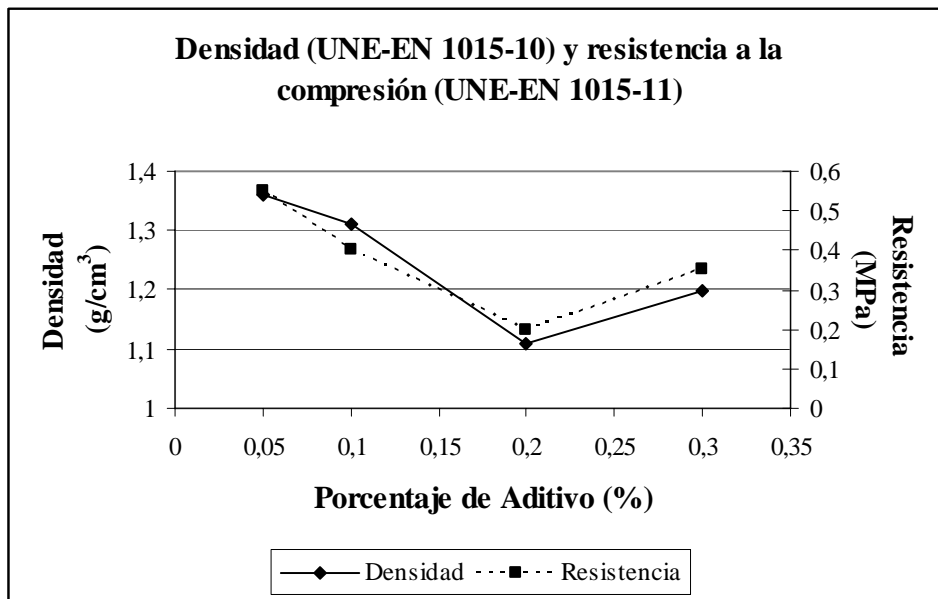


Figura 3. Variación en la densidad y la resistencia a la compresión en función de la dosis de aditivo espumante

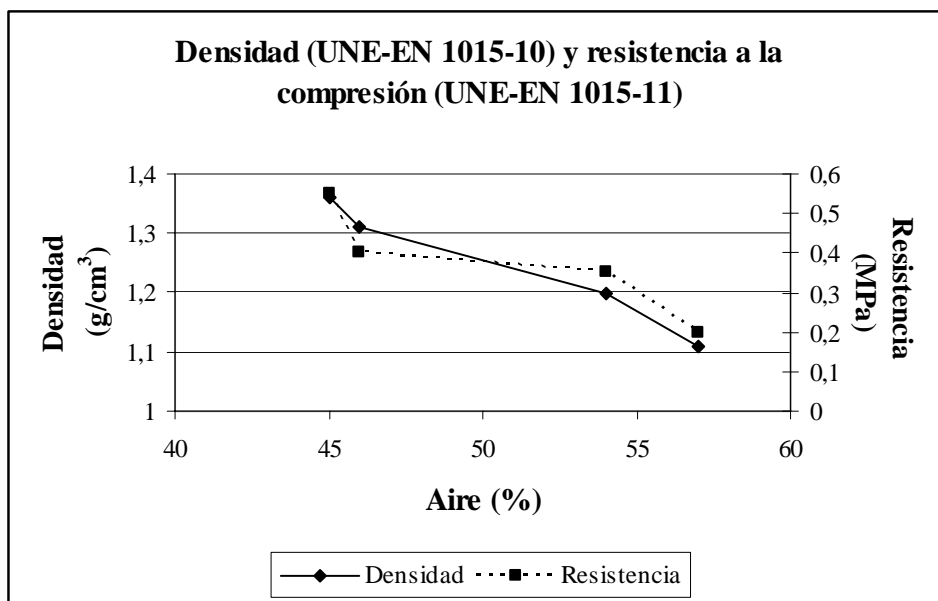


Figura 4. Variación en la densidad y la resistencia a la compresión en función del aire incorporado

En cuanto a la fluidez, todas las mezclas superaron los 200 mm indicados en el ACI 229R para considerar a las mezclas como fluidas. Los valores de escurrimiento son similares entre sí, sin que se pueda inferir una relación clara con la dosis de aditivo.

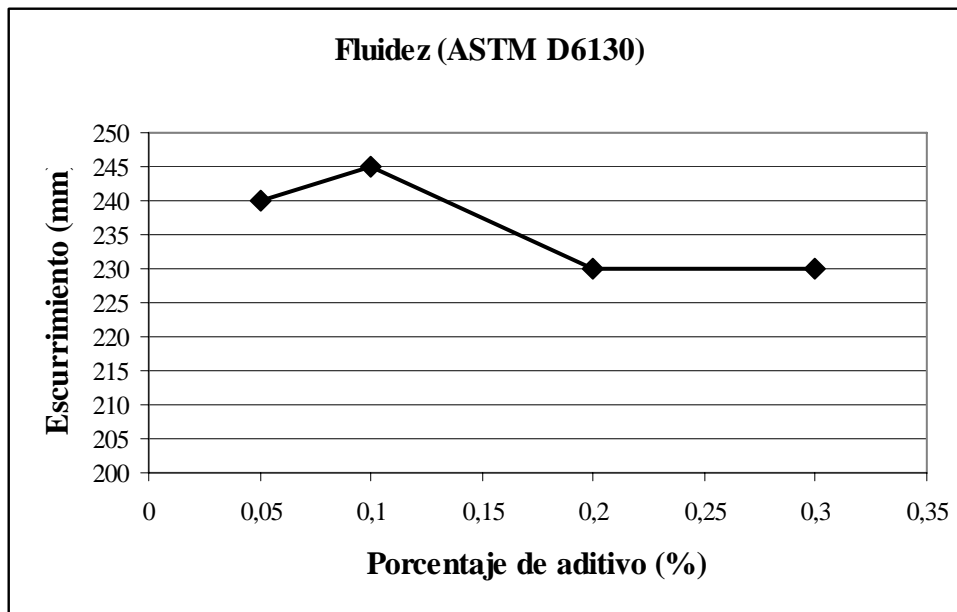


Figura 5. Variación en la fluidez en función del aire incorporado

Determinación del contenido de aire y de la resistencia mecánica (7 días) para distintas relaciones cemento/arena

La Tabla 3 a continuación recoge los resultados obtenidos al variar la proporción cemento/arena. La variación del contenido de arena apenas tuvo influencia en la cantidad de aire incorporado y en las densidades en el estado endurecido (Figura 6). La fluidez disminuyó ligeramente (Figura 7), tal como cabía esperar por ser mezclas con menor contenido de agua, aunque siempre manteniéndose por encima de los 200 mm. El efecto más notable del aumento del contenido de arena es en la resistencia a la compresión (Figura 7). Este resultado es coherente con el hecho de la disminución efectiva del contenido de cemento por m^3 de las mezclas.

Tabla 3. Influencia de la proporción cemento/arena en las propiedades del relleno fluido

Proporción cemento/arena	1/5		1/7	
	0,05	0,1	0,05	0,1
Dosis de aditivo (%)	0,05	0,1	0,05	0,1
Escurecimiento (mm)	240	245	236	230
Aire ocluido (%)	45	46	43	49
Densidad (g/cm ³)	1,36	1,31	1,37	1,38
Resistencia (MPa)	0,55	0,40	0,23	0,10

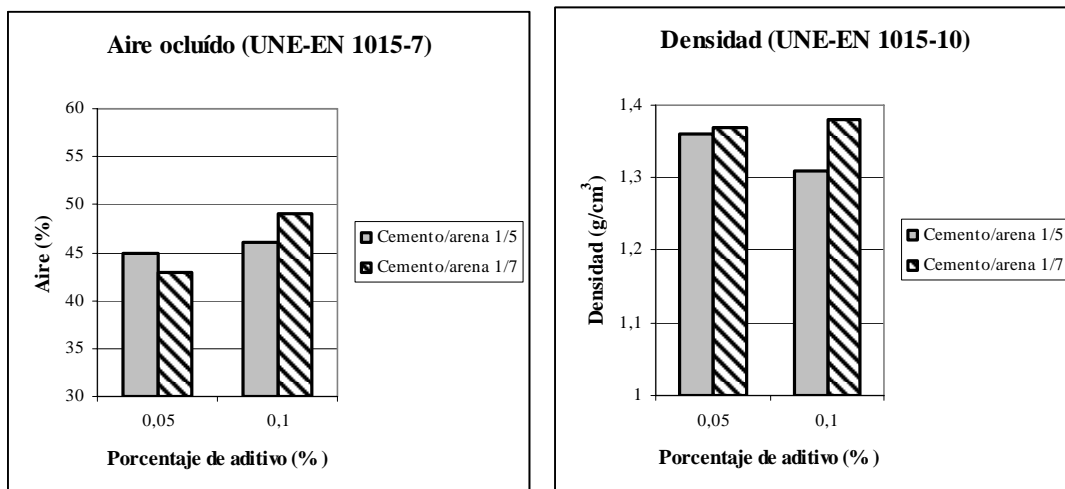


Figura 6. Comparación del aire ocluido y la densidad en rellenos fluidos con diferente relación cemento/arena

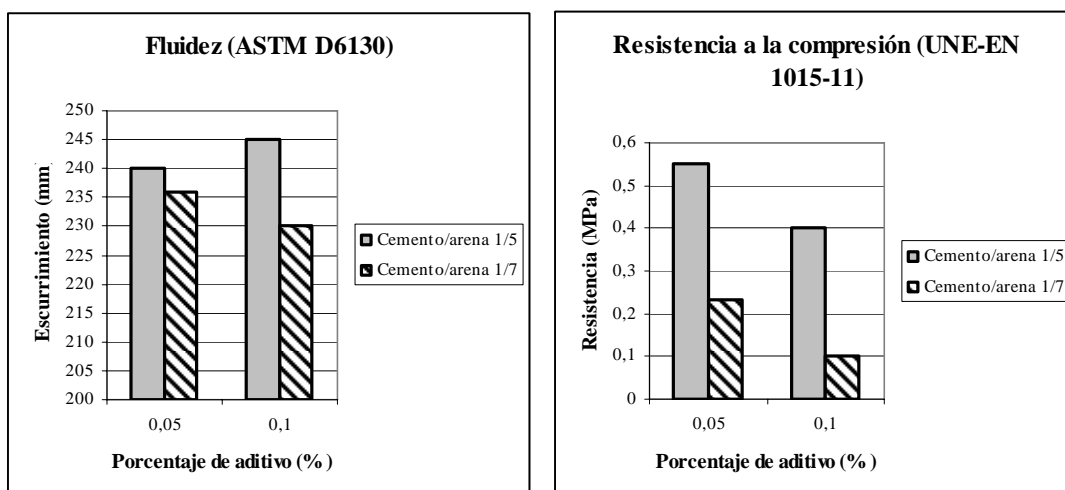


Figura 6. Comparación de la fluidez y la resistencia a la compresión en rellenos fluidos con diferente relación cemento/arena

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que es posible la utilización de fracciones de árido excedentes, generalmente con alto contenido de finos, para la obtención de rellenos fluidos de resistencia baja controlada.

El empleo de un aditivo espumante junto con la arena, cemento y altas relaciones agua/cemento permite la obtención de mezclas con un gran contenido de aire ocluido (por encima del 40%) y con un bajo contenido de cemento (hasta 170 kg/m^3), que no presentan segregación, poseen una elevada fluidez, y no necesitan de compactación mecánica adicional.

La cantidad de aire ocluido es función de la cantidad de aditivo empleado, aunque parece existir un punto máximo de incorporación de aire a partir del cual la efectividad del aditivo decrece.

La densidad de las mezclas y la resistencia a la compresión son directamente proporcionales a la cantidad de aire incorporado, y para una relación cemento/arena de 1 a 5 en peso, las densidades varían entre los $1,1$ y los $1,4 \text{ g/cm}^3$, y las resistencias a la compresión a los 7 días, con curado en ambiente seco, entre los $0,20$ y los $0,55 \text{ MPa}$. En caso de aumentar la cantidad de arena de la mezcla, la cantidad de aire incorporado y la densidad se mantienen similares a las mezclas más ricas en cemento. La fluidez baja y se produce una disminución apreciable en la resistencia a la compresión, puesto que las mezclas son menos ricas en cemento y agua.

Los valores obtenidos para la densidad y resistencia son similares a los que cabe esperar en un suelo muy bien compactado empleado como relleno en zanjas. Por ello, las mezclas estudiadas son susceptibles de empleo como relleno fluido para zanjas y cavidades.

La alta fluidez de las mismas y la ausencia de compactación mecánica las convierte en una solución muy rápida, económica y segura para este tipo de aplicaciones.

REFERENCIAS

- ¹ Smith, M.R., Collins, L., *Aggregates*, Geological Society Engineering Geology Special Publication No. 17, 2001.
- ² Mellor, S.H. *An Introduction to Crushing and Screening*, Institute of Quarrying, Nottingham, 1990.
- ³ ACI Committee 229, *ACI 229R-99: Controlled Low-Strength Materials (Reapproved 2005)*, American Concrete Institute, 2005.
- ⁴ ACI Committee 116, *ACI 116R: Cement and Concrete Terminology*, American Concrete Institute, 2000.
- ⁵ Jofré, C., *Rellenos con morteros y hormigones fluidos de baja resistencia controlada*; Rutas, Vol.67, pp. 5-21, 1998.
- ⁶ Revuelta, D., Fernández Luco, L., *Hormigón Autocompactante – Visión General*, Hormigón y Acero, Vol nº 228-229, pp. 133 – 137, 2003.
- ⁷ ASTM Subcommittee D18.15, *ASTM D6103 Standard Test Method for Flow Consistency of Controlled Low Strength Material (CLSM)*, ASTM, 2004.
- ⁸ Comité Técnico de Normalización CTN-83, *UNE 83361. Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez. Ensayo del escurrimiento*. AENOR, 2007.