

PROPIEDADES MECÁNICAS Y ACÚSTICAS DE HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS Y NEUMÁTICOS FUERA DE USO

**¹Rodríguez López, C.; ²Parra Costa, C.; ¹Miñano Belmonte, I.; ¹Martinez Periago, S.;
¹Benito Saorin F.J.; ¹López Ayerra, J.; ³Sánchez Martín, I.**

**¹Centro Tecnológico de la Construcción Región de Murcia, Polg. Oeste, 30820,
Alcantarilla, España**

**²Departamento de Arquitectura y Tecnología de Edificación, Universidad Politécnica
de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 30203 Cartagena, España.**

**³Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, 03080, Alicante, España
e-mail: *crodriguez@ctcon-rm.com**

RESUMEN

El progreso industrial lleva asociado la generación de grandes volúmenes de residuos que, en la mayoría de los casos, acaban en los vertederos, desperdiciando su potencial como materias primas para otros sectores industriales, como es el sector de la construcción, por lo que debe considerarse su reutilización en nuevas aplicaciones e incorporación como subproducto en el campo de los materiales de construcción, dando lugar a materiales más ecoeficientes y respetuosos con el medioambiente.

Este trabajo estudia el empleo de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición, y caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) en la fabricación de hormigones. La fracción fina natural ha sido sustituida por un 10% en volumen de los subproductos industriales analizados.

El comportamiento físico, mecánico y las propiedades acústicas de los hormigones ha sido comparado con los hormigones de referencia. En los resultados se observa una reducción de las resistencias mecánicas y del módulo de elasticidad por el empleo de áridos reciclados y NFU. Se muestra que los hormigones fabricados con la fracción fina de áridos reciclados y NFU podrían ser empleados con todas las garantías en hormigones para aplicaciones no estructurales.

Keywords: Árido reciclado, neumático fuera de uso, hormigón, propiedades mecánicas, propiedades acústicas.

1.- Antecedentes

Cada día crece la presión y concienciación social en el campo de la construcción para aumentar el reciclaje de residuos, tanto los derivados de su propia actividad como los procedentes de otros sectores, como es el caso de los neumáticos fuera de uso (NFU), con el objeto de preservar el medioambiente. Este reciclaje supone ventajas tales como reducir la cantidad de residuos que se destinan a vertedero sin aprovechamiento y la obtención de una nueva materia prima, con lo que se reduce la cantidad de recursos naturales primarios a extraer [1]. Muchos países, en especial los del primer mundo, están en la actualidad revisando sus legislaciones a favor de un futuro más sostenible y ecológico. En este contexto, el Real Decreto 105/2008 [2] regula la producción y gestión de los RCD. El fin perseguido es llegar a un desarrollo sostenible, fundamentándose en la prevención, reutilización, reciclado y revaloración. Prohíbe el vertido de los RCD sin previo tratamiento para suscitar el reciclaje y revalorizar los residuos que llegan a las plantas de tratamiento. En cuanto a los neumáticos se regula su vertido, según la directiva Europea 1999/31/CE, en la que se estableció que a partir del 16 de julio del 2003, no se admitirá ningún vertedero con neumáticos usados enteros, ni siquiera los troceados. El Real Decreto 1619/2005 [3] establece la gestión correcta de los NFU y la responsabilidad del productor, haciendo a los fabricantes e importadores responsables de su correcta gestión, una vez se agote su vida útil.

Según los datos recogidos en el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRC) [4] incluido en el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR), que establece la situación actual de los RCD en nuestro país, estima que los residuos en el año 2005 fueron de 34.845.329 Tn, siendo su tasa de reciclaje en torno al 15%. En este mismo año, la Unión Europea, generó cerca de tres millones de toneladas de NFU. Por ello, parece importante incidir de forma enérgica sobre el reciclaje y la revalorización de este tipo de residuos.

La resistencia a compresión disminuye a medida que aumenta la proporción de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición, tanto para la fracción gruesa como para la fina [5, 6-9, 10-13]. Las pérdidas de resistencia son mayores a medida que las relaciones a/c son más bajas [6, 7], o en los hormigones de mayores categoría resistente [9]. Respecto a la influencia de la fracción fina y gruesa reciclada, la incorporación de áridos finos produce menores pérdidas de resistencia para porcentajes de sustitución bajos, si bien, para porcentajes de sustitución mayores las resistencias se igualan [9]. Otros autores [8], han encontrado que la sustitución de un 100% por la fracción fina reciclada produce unas pérdidas de resistencia del 18%, menores que las obtenidas para un 100% de sustitución de la fracción gruesa con unas pérdidas de resistencia del 24%, debido a las dificultades de compactación de los áridos gruesos cerámicos. El uso de la fracción fina también es propuesto por otros autores [14]. En cambio, en otras investigaciones realizadas con hormigón reciclado con sustituciones de árido reciclado fino de hormigón no se han obtenido buenos resultados [15, 16]. Debido a estas diferencias, el uso de la fracción fina probablemente no debería descartarse en un futuro, aunque son necesarias más investigaciones al respecto.

El objetivo de esta investigación es evaluar el empleo de la fracción fina de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición, y caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) en la fabricación de hormigones.

2.- Programa experimental

2.1.- Materiales y dosificaciones propuestas

El estudio se llevó a cabo para seis dosificaciones diferentes, con el objeto de comparar las propiedades que aportan los diferentes áridos finos reciclados en el

hormigón convencional. Se realizaron dos series de hormigones; la primera utilizando dos fracciones de áridos 0/3 y 5/12 (HT1), y una segunda empleando únicamente una fracción fina 0/3 (HT). Para ello se fabricaron dos hormigones de referencia con únicamente árido natural de origen calizo “1.HT1 y 1.HT” (referencia), y el resto que contenían material granular procedente de neumático fuera de uso “2.HT1Caucho y 2.HT Caucho”, árido reciclado procedente de residuos de bovedillas prefabricadas de hormigón “3 .HT Prefabricado” y árido de material cerámico reciclado procedente de ladrillos “4. HT Cerámico”. En la fig. 1 se indican las granulometrías de los áridos empleados. Todos los hormigones se elaboraron con un CEM IIIa, con una resistencia inicial normal de $42,5 \text{ N/mm}^2$, de acuerdo a la Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08, además en el caso de los HT1 estos contenían un aditivo superplastificante BASF “MasterGlenium 303SCC”.

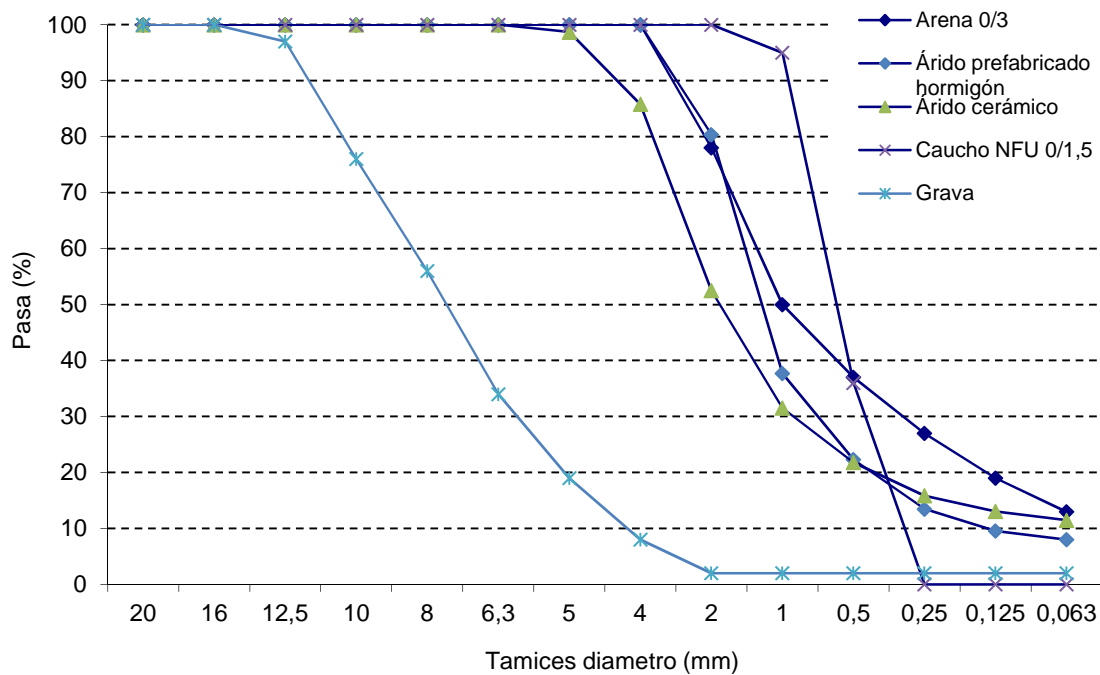


Fig. 1 “Curvas granulométricas de los áridos empleados”. Fuente: el autor.

Para determinar la dosificación de los hormigones estudiados se ha decidido mantener fija la relación a/c, actualmente es el factor más concluyente ya que independiente de otros factores, afecta a la porosidad tanto de la matriz como de la zona transición, además los diferentes áridos reciclados empleados se dosifican en un porcentaje del 10% (volumen) sobre el total de los áridos. Las proporciones adoptadas se muestran en la Tabla 1 siguiente.

Nomenclatura empleada	Cemento (Kg/m ³)	Agua (Kg/m ³)	SP (Kg/m ³)	Grava (Kg/m ³)	Arena caliza (Kg/m ³)	Residuos		
						NFU (Kg/m ³)	Hormigón reciclado (Kg/m ³)	Cerámico (Kg/m ³)
1.HT1 (referencia)	283,5	201	2,835	660,96	1423,9	0	0	0
2. HT1-Caucho	283,5	201	2,835	660,96	1215	84	0	0
1.HT (referencia)	400	280	0	0	1800	0	0	0
2. HT-Caucho	400	280	0	0	1620	73	0	0
3. HT-Prefabricados	400	280	0	0	1620	0	170	0
4. HT-Cerámicos	400	280	0	0	1620	0	0	131

Tabla 1 “Dosificaciones propuestas”. Fuente: el autor.

2.2.- Ensayos de laboratorio

De todas las dosificaciones se sacaron muestras y/o probetas para realizar el siguiente plan de ensayos:

- Asentamiento. El ensayo de consistencia se realiza siguiendo lo establecido en la UNE EN 12350-2:2009 Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento, con el fin de analizar la oposición del hormigón fresco a experimentar deformaciones.
- Resistencia a compresión a 60 días. El ensayo se efectuó siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN 12390-3:2009/AC: 2011. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas, sobre probetas cilíndricas de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro. La resistencia a compresión media se calculó a partir de los resultados de tres probetas; curadas durante 60 días en una cámara húmeda a 20 °C y un 99 % de humedad. En todos los casos las probetas se refrentaron con mortero de azufre.
- Modulo de deformación a 60 días. La medición se llevó a cabo mediante la realización de tres ciclos de carga / descarga. El módulo elástico se determinó de acuerdo a la pendiente de carga de la curva de tensión/deformación. El ensayo se realizó según la norma UNE EN 12390-13:2014 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión. Se emplearon probetas cilíndricas de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro.
- Resistencia a flexión a 60 días. UNE-EN 12390-5:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas. La resistencia a flexotracción se realizó sobre a probetas prismáticas de sección cuadrada, de diez centímetros de lado y cuarenta centímetros de longitud, fabricadas y conservadas según UNE-EN 12390-1: 2009 y UNE-EN 12390-2: 2009.
- Coeficiente de absorción acústica. Se realizó usando un tubo de impedancia de un diámetro de 3,45 cm con un rango de frecuencias de trabajo de 500 a 5000 Hz, siguiendo el procedimiento descrito en la UNE-EN ISO 10534-2:2002 Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia. (ISO 10534-2:1998). Se fabricaron 2 probetas de cada tipo

de hormigón con un espesor de 4 cm. Los valores representados son la media de las 2 muestras ensayadas.

2.3.- Resultado y discusión

2.3.1.- Asentamiento

En la fig. 2 se muestran los resultados obtenidos correspondientes a la consistencia o trabajabilidad de cada hormigón en estado fresco, medida a través del cono de Abrams. Los resultados obtenidos muestran un cono de Abrams de 1 cm para el caso del HT1 y HT1-Caucho.

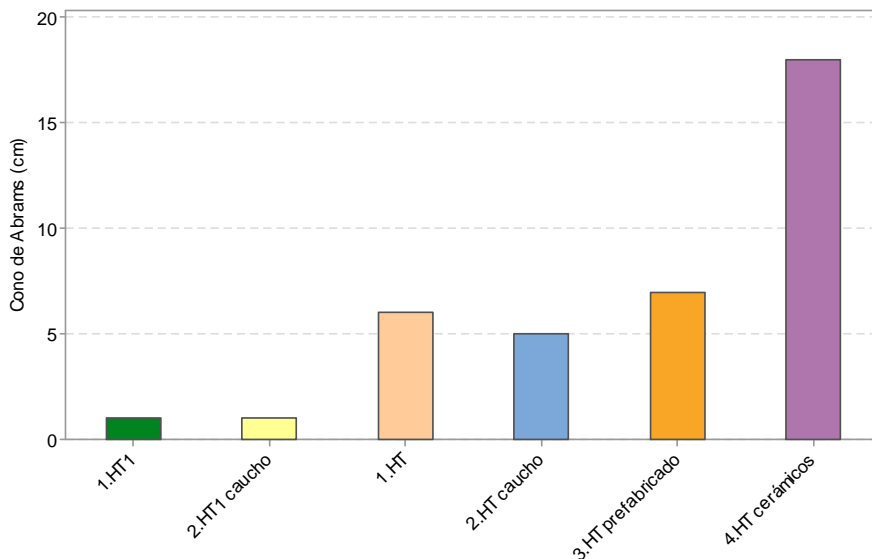


Fig. 2 “Histograma de resultados cono de Abrams, medida en cm”. Fuente: el autor.

Las dosificaciones 4.HT-Ceramico, presenta un cono de Abrams mayor que el resto ya que los áridos fueron previamente saturados, con el consecuente incremento del cono de Abrams respecto al resto de mezclas. Por otro lado el empleo de NFU provoca en las mezclas que se retire parte del liquido empleado, manteniéndolo adherido a sus paredes lo que hace que el hormigón sea más seco.

2.3.2.- Resistencia a compresión y flexión

Los resultados arrojados de los ensayos de resistencia a flexión y compresión de las muestras confeccionadas se muestran en el histograma de la fig. 3 y fig. 4. Observando en la fig. 3 y fig. 4 que las dosificaciones de referencia “1.HT y 1. HT1”, efectuadas con árido natural calizo, tienen un mayor rendimiento en comparación con el resto de dosificaciones, tanto a compresión como a flexión.

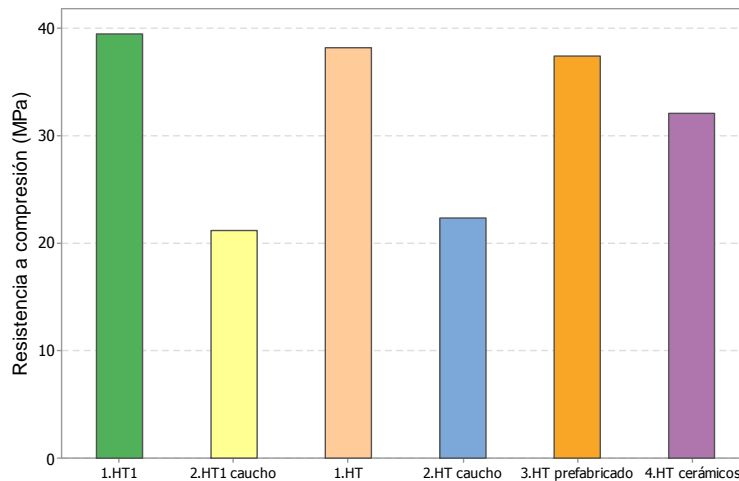


Fig 3. “Histograma de resistencia a compresión 60 días (MPa)”. Fuente: el autor.

La resistencia del hormigón reciclado a compresión con áridos procedentes de machaqueo de residuos de bovedillas de hormigón (3. HT Prefabricado), es similar al hormigón convencional de referencia. Esto en parte puede justificarse como consecuencia de la absorción de agua de la pasta de cemento por parte de los áridos reciclados, que modifica la relación a/c real de la mezcla, disminuyendo la misma y por ende, mejora la resistencia. En cambio los áridos cerámicos empleados presentan una resistencia a compresión inferior a los del hormigón convencional con valores en torno al 15,9% respecto al de referencia, ya que previamente se pre-satura el árido cerámico y por ende disminuye la resistencia dado que el resto de áridos no fueron pre-saturados. Además la resistencia del árido reciclado cerámico es menor que la del árido natural.

El efecto del caucho en las mezclas induce a una caída en la resistencia del orden de 15 a 18 MPa respecto al de referencia. La disminución de la resistencia observada en la fig. 3, puede ser debida al comportamiento diferencial entre la pasta de cemento y el caucho, los cuales han de estar pegados y trabajar conjuntamente, cuando el hormigón está sometido a tensiones, el caucho tiende a deformarse más elásticamente hecho que no acontece en la pasta, produciéndose tensiones internas dentro del hormigón que proporcionan la aparición de fisuras en el contorno o interfase del caucho, debilitando al elemento frente a las sollicitaciones de compresión [16].

La fig. 4 muestra los resultados de los valores medios de resistencia a flexión, medido en MPa. Al igual que ocurría con los resultados de resistencia a compresión, con la sustitución del árido natural por árido reciclado, los diferentes muestras presentan una disminución respecto al de referencia. En el caso de las dosificaciones de caucho se muestra una disminución mayor en torno al 30% respecto del hormigón de referencia.

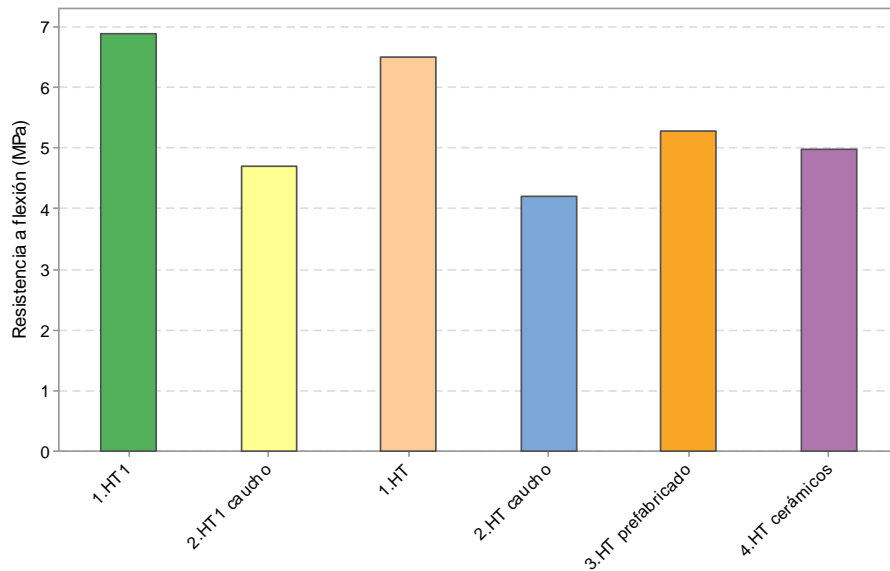


Fig. 4. “Histograma de resistencia a flexión a 60 días, medido en MPa”. Fuente: el autor.

En definitiva, la introducción de árido reciclado de construcción y de NFU en la mezcla provoca un descenso en las resistencias, tanto a flexión como a compresión, a excepción del 3.HT-Prefabricados, que presenta una resistencia a compresión similar al de referencia (1.HT).

2.3.3.- Modulo de deformación

La fig. 5 muestra los resultados de los valores medios de módulo de deformación estáticos. Observamos con claridad la pérdida de módulo de deformación que experimentan los hormigones con áridos reciclados, no obstante el valor medio de 3. HT-Prefabricado” es muy similar al de referencia.

En la sustitución del árido natural por caucho se muestra una disminución en los valores del módulo con pérdidas en torno al 30% respecto del hormigón de referencia. Se tiende a disminuir el modulo secante de elasticidad estabilizado debido a la presencia de este material, como se observa en la fig. 5. Como es sabido al sustituir el 10% del volumen del árido calizo por caucho, disminuye el modulo .El hormigón con caucho tiene gran facilidad para deformarse en presencia de una sollicitación a compresión, creando unas tensiones internas dentro de la pasta de cemento que favorece la aparición de microfisuras entre el árido y pasta.

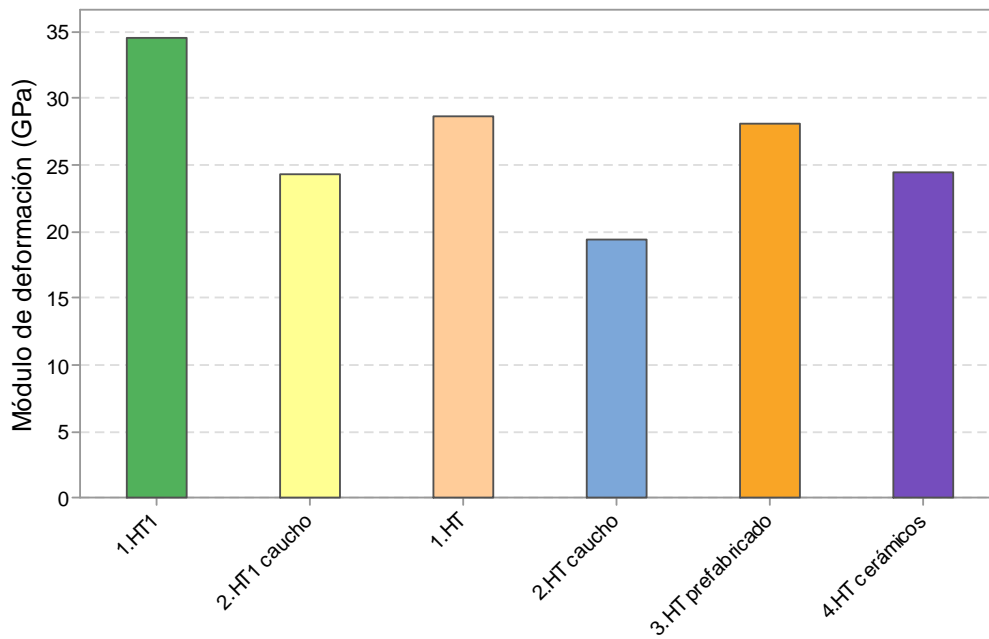


Fig. 5 “Histograma de módulo de deformación (GPa)”. Fuente: el autor.

2.3.4.- Coeficiente de absorción acústica

El coeficiente de absorción acústica “ α ” se emplea como parámetro para evaluar la capacidad de los hormigones fabricados para absorber el sonido. Cuando un material absorbe las ondas del sonido a la perfección, el valor de “ α ” es 1, mientras que un material que no absorbe el sonido en absoluto tendría un “ α ” de 0. En general, el hormigón convencional tiene un valor de “ α ” entre 0,05 y 0,10 [17].

La fig. 6 muestra el coeficiente de absorción obtenido para el rango de frecuencias estudiado. Entre medidas de un mismo tipo de hormigón se obtuvieron diferencias de “ α ” de hasta 0,08, por lo que las diferencias observadas entre los distintos tipos no pueden ser consideradas significativas, presentando todos los hormigones estudiados un coeficiente de absorción similar, que varía entre 0,05 y 0,2 para el rango 1000-5000 Hz.

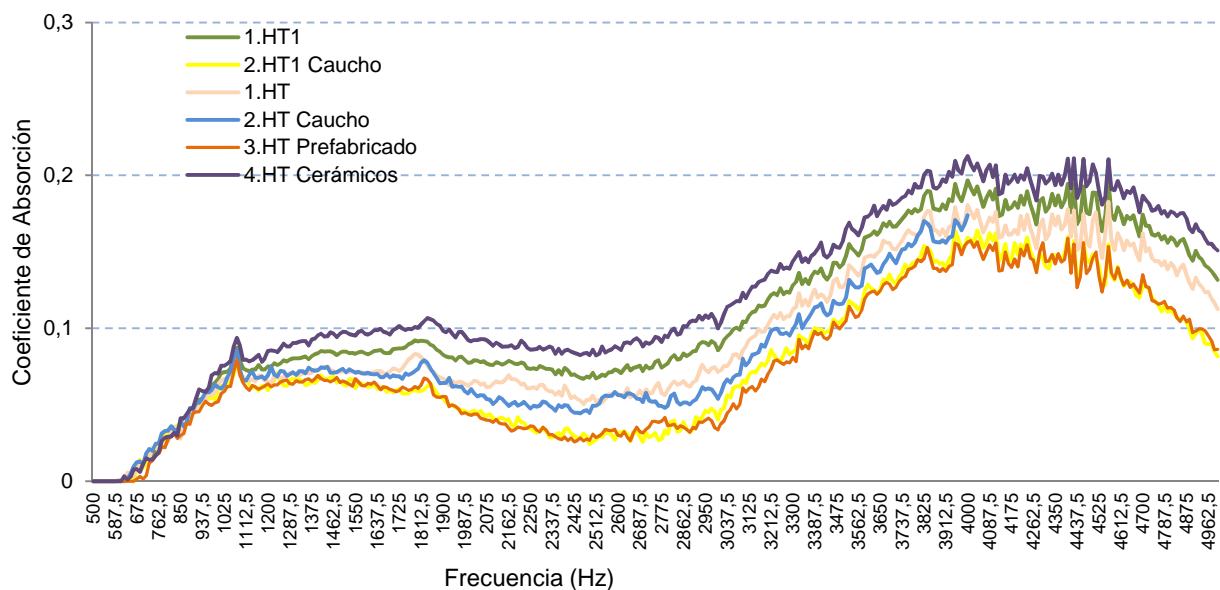


Fig. 6 “Gráfica coeficiente de absorción”. Fuente: el autor.

2.4.- Conclusiones

- Los hormigones con árido reciclado presentan una disminución de la resistencia a compresión, no obstante, presentan un mayor potencial para deformarse plásticamente. El modulo de elasticidad tiende a incrementarse a medida que aumenta su resistencia a compresión, siendo las dosificaciones de referencia las que mayor resistencia a compresión presentan, por ende al aumentar su resistencia a compresión el hormigón tiende a perder “ductilidad”, se vuelve más frágil. La rotura dúctil que presentan las dosificaciones que contienen neumático fuera de uso y árido reciclado cerámico, con un modulo de deformación menor respecto al de referencia (disminución en torno al 30%), puede ser de utilidad en elementos constructivos sometidos a deformaciones.
- En la sustitución del árido natural por árido reciclado y neumático fuera de uso, se muestra una disminución en los valores de resistencia a flexión del 30% respecto del hormigón de referencia.
- Las medias aritméticas de los resultados obtenidos en el 1.HT y 3.HT prefabricados, se puede considerar que presentan el mismo nivel de resistencia a compresión, y por tanto la sustitución de un 10% del árido natural por arena reciclada procedente de residuos de bovedillas prefabricadas de hormigón, no altera la resistencia a compresión, fortificando la posibilidad de emplear este tipo de materiales en numerosas aplicaciones.
- El coeficiente de absorción acústica no presenta diferencias por el empleo de áridos reciclados, obteniéndose valores similares a los hormigones de referencia.

REFERENCIAS

- [1] Rodriguez, C (2013). Estudio sobre la incorporación de áridos mixtos reciclados en prefabricados de hormigón vibrocomprimido no estructurales. Trabajo Final de Máster Ingeniería de los Materiales, el Agua y el Terreno. Universidad de Alicante. Alicante.
- [2] Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.
- [3] Real Decreto 1619/2005, 30 de Diciembre (2005). Sobre la gestión de neumáticos fuera de uso.
- [4] II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2008-2015 (II PNRCD). http://www.cepcos.es/Uploads/docs/pnir_anexo_06.pdf
- [5] Martínez-Lage I.; Martínez-Abella F.; Vázquez-Herrero C.; Pérez-Ordóñez J.L.(2012)3 Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 37, 171-176.
- [6] Chen H.; Yen T.; Chen K.H (2003). Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 33, 125-132.
- [7] Mas B.; Cladera A.; Francisco Pitarch, T.O. (2012). Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. *Construction and Building Materials*, 27, 612-622.
- [8] Lovato P.S.; Possan E.; Dal Molin D.C.C.; Masuero A.B. (2012). Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 26, 437-447.
- [9] Mas B.; Cladera A.; Bestard J.; Muntaner D.; López C.E.; Piña S.; Prades J. (2012). Concrete with mixed recycled aggregates: Influence of the type of cement. *Construction and Building Materials*, 34, 430-441.

- [10] X. ESPINAR (2009). Aportación a la Construcción sostenible: Prefabricados de hormigón con árido reciclado vibrocomprimidos. *Revista Demolición & reciclaje*, 46, 68-75.
- [11] Ana de Guzmán Báez (2010). Estudio de las propiedades fundamentales de elementos prefabricados de hormigón no estructurales, con incorporación de áridos reciclados en su fracción gruesa y fina. Tesis de Máster Universidad Politécnica de Madrid 2010
- [12] Sousa J.G.G.; Bauer E.; Sposto R.M.(2003) Empleo de residuos de la construcción civil como áridos reciclados. Producción de bloques de hormigón. *Materiales de Construcción*, 53, 271-272.
- [13] Poon, C.S.; Kou S.C.; Wan H.W.; Etxeberria M. (2012). Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 36, 881–889.
- [14] Evangelista L.; De Brito J. (2007). Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29, 397–401.
- [15] Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural, ACHE, Grupo de trabajo 2/5. Utilización del árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Monografía 11, 2006.
- [16] González-Fonteboa B.; Martínez-Abella F. (2008). Concrete with aggregates from demolition waste and silica fume. *Material and mechanical properties. Build Environ*, 43, 429-37.
- [17] Royano, V.; Valls, S.; Marilda, B.; Vazquez, E. (2011) Estudio de hormigones con adición de polvo de neumáticos fuera de uso (NFU). A: Jornada de Recerca i Innovació a l'Escola de Camins. "Jornada de Recerca i Innovació a l'Escola de Camins". Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins Canals i Ports de Barcelona.
- [18] Neithalath N, Weiss J, Olek J.(2006). Characterizing enhanced porosity concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance. *Cem Concr Res*; 36:2074–85.