

03-025

### CONSIDERATION OF EFFECTIVE WATER IN THE WATER/CEMENT RATIO FOR THE MANUFACTURE OF RECYCLED CONCRETE

Laserna Arcas, Santiago<sup>1</sup>; Montero Martinez, Jesus<sup>2</sup>; Cervera  
Gascó, Jorge<sup>1</sup> <sup>1</sup> ETSIAM - UCLM, <sup>2</sup> ETSIAM- Universidad de  
Castilla-La Mancha

The manufacture of recycled concrete (RC) is not very widespread for structural purposes mainly due to the uncertainty that involve the use of recycled aggregates (RA). Their manufacture is often constrict in own techniques of conventional concrete (HC), without considering that it's necessary to modify certain concepts in the dosage designs. Thereby, the specific water absorption and initial humidity of the RA suggests that water movements on the mix of concrete paste are different in relation HC. This experiment proposes to modify the use of the traditional concept of water to the concept of free or "effective water" and verify the effect on the water/cement (W/C) ratio. Thus, a method for calculating and estimating the water balance in the dosage are proposed, thereby concrete manufacture comparing total or effective W/C has been analysed. Also, governed by the water absorption speed, a mixing method based on the two-stage mixing method, with a dry pre-mix step and without saturation treatment of RA has been designed to let the industrial production. Results show the critical time to consider on the mix and demonstrate that an increase of total water does not result in a strength reduction provided that W/C effective kept constant.

**Keywords:** *Recycled concrete; Dosage; effective water; W/C effective*

### CONSIDERACIÓN DEL AGUA EFECTIVA EN LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO PARA LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN RECICLADO

La fabricación del hormigón reciclado (HR) para aplicaciones estructurales no se encuentra muy extendida debido principalmente a la incertidumbre que presenta el manejo de los áridos reciclados (AR). Su fabricación se suele encorsetar en técnicas propias del hormigón convencional (HC), sin reparar en la necesidad de modificar determinados conceptos en el diseño de las amasadas. Así, la especial absorción y humedad inicial del AR plantea que los movimientos de agua en el amasado sean diferentes en relación al HC. Esta experimentación propone modificar el concepto de agua utilizado tradicionalmente hacia el concepto de Agua libre o eficaz, verificando su repercusión sobre la relación agua/cemento (A/C). Se detalla un método para el cómputo y estimación del balance de agua en la dosificación y la fabricación mediante la comparativa de la relación A/C efectiva. Además, regido por las velocidades de absorción se diseña un método de mezcla basado en la mezcla de doble etapa, con premezclado en seco y AR sin presaturar que posibilite su acoplamiento a la fabricación industrial. Los resultados especifican los tiempos mínimos a considerar en el mezclado y demuestran que el incremento de A<sub>total</sub> de la mezcla reciclada no penaliza la resistencia manteniendo constante la relación A/C efectiva.

**Palabras clave:** *Hormigón Reciclado; Dosificación; Agua efectiva, A/C efectiva*

Correspondencia: Santiago Laserna Arcas [santiago.laserna@uclm.es](mailto:santiago.laserna@uclm.es)

Agradecimientos: A la Consejería de Educación, Cultura y Deportes de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, por la financiación del proyecto PPII- 2014-004-P.

## 1. Introducción

Pese a estar permitido por la normativa que regula las estructuras de hormigón en España (EHE-08, 2008) la utilización de hormigón reciclado (HR) con fines estructurales no acaba de cuajar entre los diferentes agentes que intervienen en la construcción. Uno de los principales factores viene determinado por la visión generalizada de que el material reciclado penaliza en torno a un 10-25% las propiedades resistentes del hormigón (ACHE, 2006). Además, respecto a la aplicación a gran escala aparece como un inconveniente extra el desconocimiento en el manejo de los áridos reciclados en relación a los áridos convencionales y su adaptación al proceso de fabricación del hormigón. Las diferencias frente al material convencional radican principalmente en la mayor porosidad de los áridos reciclados debido al contenido de mortero adherido al árido, que procede del hormigón original (Etxeberría, Vazquez y Marí, 2006), y que influyen directamente sobre la absorción de agua, densidad, y dureza.

Debido a esto, autores como Ravindrarajah y Tam (1985) o Hansen *et al.* (1992), sostienen que el hormigón fabricado con estos áridos necesita un 5-10% más de la cantidad de agua que el hormigón convencional (HC) para conseguir la misma trabajabilidad. Directamente relacionado con ello, proponen que este suplemento afecta directamente a la relación Agua-Cemento (A/C), pudiendo provocar un efecto perjudicial en la resistencia por una relación A/C excesiva, recomendándose emplear una cantidad de cemento superior a la estricta (entre el 5-15%) que permita compensar la bajada de resistencia por este efecto (Hansen y Narud, 1983; Barra, 1996; ACHE, 2006).

Aparece en este punto el concepto de *Agua libre o Agua efectiva*, caracterizada como la cantidad de agua que realmente queda disponible para la hidratación del cemento y por tanto para desencadenar la reacción del mismo, que no resulta de especial atención en la fabricación de hormigón convencional pero que al fabricar hormigón reciclado modifica significativamente los balances de agua de la mezcla. Así, algunos autores como Paw y Rousseau (1986); Barra (1996) o Nealen y Rühl (1997), mencionan la importancia de este concepto para la fabricación de hormigón reciclado y su influencia en la consistencia y la resistencia final obtenida. De este modo, a pesar de las recomendaciones de ACHE (2006) que concluye que la metodología de dosificación del hormigón reciclado no difiere particularmente de las técnicas utilizadas para la dosificación del hormigón convencional, lo cierto es que necesita de determinados matices ideológicos debido a sus características especiales de porosidad.

Por tanto, paralelamente a esta propiedad vienen derivados diversos factores a estudiar específicamente en la fabricación del hormigón reciclado. El primero de ellos plantea la posibilidad de compensar esta absorción, bien sea con fenómenos de pre-saturación o desecación del árido, y cuya extrapolación a la fabricación industrial lo convierte en alternativas poco viables. Aparece una vertiente que asemeja el árido reciclado con áridos ligeros (Kobayashi y Kawano, 1988), de manera que se realizan un aporte extra de agua en mitad del amasado correspondiente a la absorción originada en 30 minutos por los AR, consiguiendo igualar las consistencias al final del amasado.

Además, aparecen diversas corrientes de cómo realizar el proceso de mezcla. Experiencias de Otsuki, Miyazato y Yodsudjai, (2003) y Vivian Tam, Gaob y Tam (2005) indican que los mejores resultados se consiguen con métodos de doble etapa, en los que se realiza un premezclado en seco para posteriormente añadir la cantidad de agua establecida. Estos

métodos suponen tiempos de mezclado demasiado cortos, que teniendo en cuenta la velocidad de absorción del árido reciclado hacen que para la consistencia obtenida disminuya drásticamente en poco tiempo. Younis y Pilakoutas (2013) proponen una modificación de estos métodos, incrementado el tiempo de premezclado, lo que permite mejorar la estabilidad de la consistencia final de la mezcla. Sin embargo, no realiza premezclado en seco de árido más cemento, etapa que, según propone Vivian Tam y Tam (2008) en una de sus modificaciones, pueda rellenar las áreas débiles en el árido reciclado y por lo tanto desarrollar una mejora de la conexión Árido Reciclado-Matriz Cementante.

## 2. Objetivos

Con estos antecedentes, el objetivo de este trabajo es el de estudiar las diferencias de ambas modalidades de dosificación de Agua (total y efectiva), centrando la atención sobre el efecto la relación  $A_{efectiva}/C$  como parámetro comparativo entre diferentes mezclas desde un punto de vista resistente.

Además, para poder adaptar la fabricación de hormigón reciclado a una producción a mayor escala que la experimental, se propone un método de mezcla propio, basado en las metodologías de doble etapa, en la velocidad de absorción del árido reciclado y en los balances de agua, que resulte de fácil implementación en cualquier planta convencional de fabricación de hormigón.

## 2. Materiales y metodología

Se han realizado una serie de ensayos para la fabricación de hormigón reciclado (HR), con el principal objetivo de comparar diferentes modalidades de dosificación. Así, se tiene una modalidad que utiliza la cantidad de Agua Total ( $A_{total}$ ) constante entre las diferentes series de hormigón, y otra que utiliza la cantidad de Agua Libre o Efectiva ( $A_{efectiva}$ ) constante.

Como  $A_{total}$  se considera todo el aporte de agua que dispone la mezcla, siendo la suma de: agua de amasado ( $a_{am}$ ) + agua aportada por los áridos ( $a_{agg}$ ) + agua aportada por el aditivo ( $a_{ad}$ ) + agua presente en los elementos de amasado ( $a_{eam}$ ). Por el contrario, para el cómputo del  $A_{efectiva}$  se utiliza un balance de humedades, de manera que se determina la cantidad de agua absorbida ( $W_{abs}$ ) como la suma de agua que absorbe cada fracción de árido que participa en la mezcla, calculándose el balance según la Ecuación (1):

$$A_{ef} = (a_{am} + a_{agg} + a_{adv} + a_{eam}) - W_{abs} \quad (1)$$

de manera que se diferencian las siguientes modalidades de fabricación:

- **$A_{total}/C$  constante:** se realizaron un total de 20 amasadas, con el objetivo de comprobar el comportamiento del árido reciclado en sus diferentes proporciones en relación a la consistencia y la resistencia a compresión, ya que la cantidad  $A_{total}$  se mantiene fija en todas las muestras.
- **$A_{efectiva}/C$  constante:** con un total 46 amasadas y el objetivo de fundamentar la utilización del concepto  $A_{efectiva}$  así como establecer la comparativa frente al hormigón patrón en cuanto a las características de consistencia y resistencia. Se plantea que a igual cantidad de cemento, si la cantidad de agua efectiva es similar, la relación de  $A/C$  será también similar entre diferentes amasadas, independientemente que una necesite mayor cantidad de  $A_{total}$  para conseguir la misma resistencia debido a la mayor absorción del árido reciclado.

Las amasadas se fabricaron en diferentes días durante todo el año y puesto que los áridos se almacenan a la intemperie, se tiene una representatividad de los diferentes estados de

humedad iniciales reales de los áridos, permitiendo estudiar el efecto de este factor en las propiedades en estado fresco.

En las dosificaciones del hormigón se utilizaron:

- dos tipologías de árido natural: Árido Natural Rodado de origen silíceo (ANR) y Árido Natural Triturado de origen calizo (ANT);
- tasas de sustitución de árido grueso natural por árido grueso reciclado (r) de 0%, 20%, 50% y 100%, en volumen;
- dos configuraciones de distribución granulométricas de áridos: continuas (GC) y discontinuas (GD);
- árido reciclado gruesos (4-20mm) procedente de residuos de construcción y demolición específicos de hormigón estructural (R);
- contenidos de cemento de 260, 300 y 340 kg/m<sup>3</sup>;
- como aditivo se utiliza un único superplastificante, en diferentes proporciones según la cantidad de cemento utilizada para conseguir la consistencia blanda en la amasada control (r=0%), pero constante para los diferentes niveles de (r) de la misma serie.

El diseño de las mezclas se realizó utilizando tres fracciones granulométricas [0-4mm], [4-10 mm] y [10-20mm], acorde a la Curva de Fuller (Fuller y Thompson, 1907) para un tamaño máximo de árido de 20 mm, ajustando la mezcla objetivo por mínimos cuadrados a dicha curva. La mezcla se realiza en una hormigonera de tambor rotativo de 140 litros y 750 mm de diámetro, con las que una vez concluido el proceso se confeccionan probetas cilíndricas de Ø150mm y 300 mm de altura según la normativa UNE 12390-2 (2009). Con las probetas se determinó la resistencia a compresión (con dos repeticiones) según la norma UNE-EN 12390-3 (2009), utilizando una prensa de 2000 kN.

### **3.1. Determinación de la humedad inicial y la absorción.**

Especial atención se presta a la determinación de la absorción y a la humedad inicial de cada fracción en el momento de su utilización, de manera que se sigue una metodología que permite realizar las correcciones de agua oportunas acordes a la ecuación de balance de agua en cada modalidad.

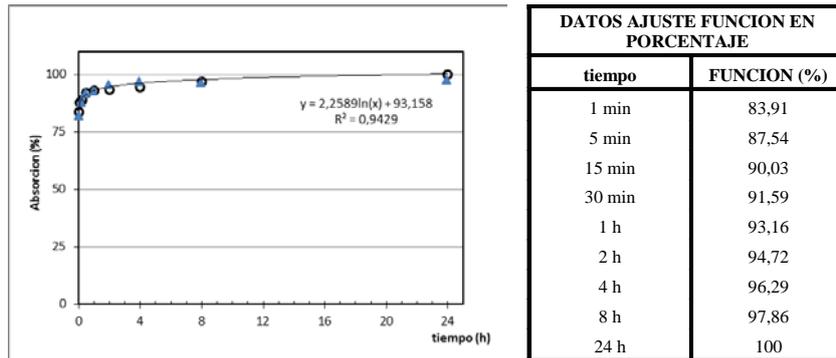
La absorción de cada fracción se determina siguiendo la norma UNE-EN 1097-6 (2006). Para la determinación de la humedad del árido se utiliza un procedimiento particular de secado en estufa a 105°C y 2 horas, encontrando que en este periodo se consiguen resultados similares a un secado en estufa de 24 h (R=1,00) para los contenidos de humedad inicial que se manejan. El objetivo de reducir el tiempo de determinación viene condicionado por el criterio de establecer una solución práctica de cara a la fabricación, ya que la determinación en 24 horas hace que la muestra pierda la significatividad del estado real de humedad, ya que trascurrido este periodo las condiciones de humedad pueden variar significativamente. Por ello, con el objetivo de poder mantener una producción continua dentro del mismo día se adopta un tiempo de 2 horas. Para mantener la humedad del material, se tapa el material con una lámina plástica opaca y se protege de la incidencia directa del sol hasta el momento de la fabricación.

La explicación al tiempo de 2 horas de secado resulta del tiempo mínimo necesario de preparación en esta experimentación hasta la confección de la mezcla. Sin embargo, pensando en su aplicación a un proceso de producción a mayor escala, la determinación de la humedad inicial puede ser reducida considerablemente hasta los 30-45 minutos, agilizando así el proceso con una alta operatividad.

### 3.2. Determinación del método de mezcla.

Como método de mezcla se utiliza un método propio basado la metodología de doble etapa propuesta por Vivian Tam y Tam (2008), estableciendo diferencias con éste en la definición de las etapas y sus tiempos, que son adaptados en función de la velocidad de absorción de agua por el árido reciclado. El objetivo es utilizar un método de mezcla que permita trabajar con las teorías de  $A_{efectiva}/C$  siendo posible extrapolar la metodología a la fabricación industrial, lo que implica la simplicidad del mismo. De este modo, se realiza un estudio de la velocidad de absorción de agua por el árido reciclado. Los niveles de absorción en función del tiempo para dos muestras de árido reciclado se recogen en la figura 1.

**Figura 1. Velocidad de absorción en función del tiempo para el material reciclado.**



De este análisis se desprende que, tras los primeros 15 minutos el árido utilizado es capaz de absorber aproximadamente el 90 % del agua requerida para su saturación, para después evolucionar de una forma lenta hasta el nivel máximo de absorción a las 24 horas, coincidiendo con las teorías de Nealen y Rühl (1997) cuando aplican de forma simultanea el aditivo en las amasadas de HC y de HR. Por lo tanto, tras estos primeros 15 minutos, es asumible que el hormigón reciclado no presentará cambios singulares de consistencia frente a los que pueda presentar un hormigón convencional.

Con este tiempo como referencia, y con los buenos resultados en la resistencia final obtenidos por Vivian Tam y Tam (2008) con la etapa de premezclado en seco de los áridos junto al cemento, se diseña el método que se describe en la tabla 1. Los tiempos que aquí aparecen han sido ajustados tras diversas modificaciones hasta obtener los tiempos mínimos con los que se obtiene una mezcla estable en las amasadas recicladas al final del proceso.

**Tabla 1. Proceso de mezcla diseñado para la fabricación de hormigón reciclado.**

Fase de mezclado	Tiempo del proceso (minutos)		
	por fase	acumulado	acumulado con agua
1.- Mezclado de los áridos en "seco"	2,5	2,5	---
2.- Adicción de cemento y mezclado en seco	2,5	5	---
3.- Adicción del 80% del agua de mezclado	3	8	3
4.- Adicción del aditivo.	1	9	4
5.- Adicción del agua restante y mezclado final	12	21	16
6.- Medida de la consistencia	5	26	21
7.- Reamasado final	4	30	25
<b>TOTAL</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>25</b>

Como se puede ver, en el paso nº 6 se determina la consistencia de la mezcla, de manera que han transcurrido 16 minutos desde que se inicia la fase de adición de agua en la mezcla, superior al tiempo de absorción de 90% determinado anteriormente. La determinación de esta propiedad se realiza mediante ensayo de asentamiento en cono de Abrams, siguiendo la norma UNE-EN 12350-2 (2006).

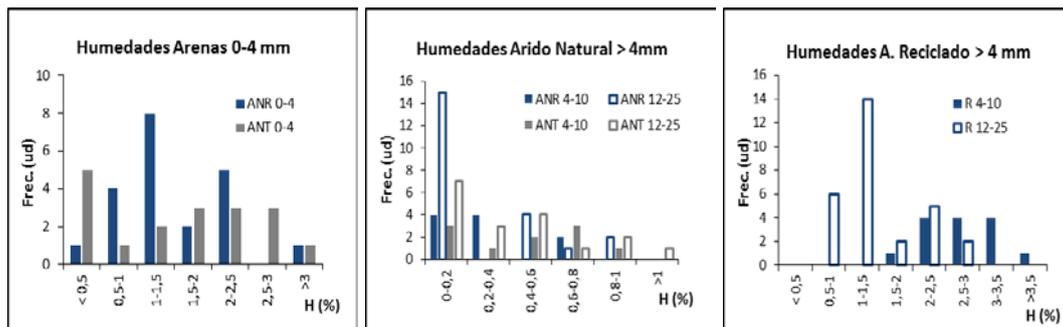
#### 4. Resultados

A continuación se muestran los principales resultados de las amasadas fabricadas, centrando la atención sobre los resultados del movimiento del agua, la importancia de establecer el parámetro comparativo  $A_{\text{efectiva}}$  entre amasadas, así como la consistencia y resistencia finales obtenidas.

##### 4.1. Estado de humedad inicial de los áridos.

La determinación del estado de humedad inicial para cada fracción justo en el momento de la fabricación se representa en el figura 2. Se recogen los valores de humedad por rangos y su frecuencia, lo que permite establecer de forma visual los valores más probables de humedad de cada fracción y tipo de árido.

**Figura 2.- Valores de humedad inicial y frecuencia de las diferentes fracciones de áridos utilizadas.**



Los resultados muestran claramente cómo el estado de humedad inicial del árido reciclado es diferente respecto a las que se obtienen simultáneamente en los áridos convencionales. Así, mientras que rara vez los áridos gruesos convencionales pasan de una humedad del 1%, siendo los resultados más frecuentes valores entre 0-0,5%, los áridos reciclados se mueven en un rango de entre 0,5-3,5%, siendo los valores más frecuentes de 1-1,5% para la fracción (10-20mm) y de 2-3,5% para la fracción (4-10mm), con valores máximos de 2,78% y 4,10% respectivamente, asemejándose más a valores propios de una arenas que a la de un árido natural.

Por tanto, el efecto de no considerar esta humedad inicial al pasar de utilizar directamente por sustitución árido convencional por árido reciclado puede obviar incorporaciones importantes de agua en la mezcla que desvirtúen el comportamiento respecto al esperado para el hormigón convencional, sobre todo en periodos húmedos. En la tabla 2 se expone un ejemplo de una amasada tipo donde se muestran estas diferencias. Así, considerando una amasada estándar de 750 kg de arena [0-4mm], 675 kg de gravilla [4-10mm] y 550 kg de grava [10-20 mm] en un hormigón convencional, con los valores máximos manejados de humedad inicial, el hormigón puede pasar de un aporte por parte de los áridos gruesos convencionales de 14,9 litros de agua, a un aporte de 42,4 litros de agua que aportaría la fracción reciclada, suponiendo así un incremento de 26,5 litros de agua. Este valor corresponde a un 18% del contenido total de agua para una amasada estándar

caracterizada por una dosificación de 150 l/m<sup>3</sup> es decir, casi una quinta parte del agua prevista.

**Tabla 2. Ejemplo de desfase de agua tras el balance de humedades en HR respecto a HC.**

Fracción	Árido Grueso Convencional (AN)			Árido Grueso Reciclado (R)		
	Cantidad (kg)	H <sub>max</sub> (%)	Agua (l)	Cantidad (kg)	H <sub>max</sub> (%)	Agua (l)
Gravilla [4-10mm]	675	0,9	6,07	675	4,01	27,1
Grava [4-10mm]	550	1,61	8,85	550	2,78	15,3
TOTAL	---	---	14,9	---	---	42,4
Desfase		(ref)	0			+ 26,5

#### 4.2. Método de mezcla.

Como resultado del método de mezcla, la fabricación completa se consigue en 21 minutos, quedando perfectamente mezclado y con el 100% de agua aplicada al finalizar el paso 5. En la tabla 1 se extiende el tiempo necesario hasta los 30 minutos por motivos de la experimentación debido a que posteriormente se determina la consistencia y se fabrican las probetas de control.

Desde el punto de vista de los tiempos mínimos, se observa cómo partir de los 10 minutos posteriores a la aplicación del total de agua prevista, la cantidad de Agua libre se encuentra casi estabilizada por la absorción, de manera que las diferentes amasadas se encuentran en condiciones similares de consistencia y trabajabilidad entre series (figura 3), coincidiendo con los resultados obtenidos por Nealen & Rühl (1997) De esta manera, para acabar de homogeneizar este periodo se selecciona un tiempo de 12 minutos de amasado tras la incorporación de la cantidad total de agua, siendo un tiempo acorde con los tiempos de saturación propuestos por Hansen *et al.* (1992). Reducir el periodo de amasado a tiempos inferiores al propuesto da como resultado mezclas muy líquidas e inestables respecto a la mezcla control (r=0%) ya que pierden rápidamente la consistencia obtenida. Este tiempo de amasado necesario es significativamente más elevado que el propuesto por Vivian Tam *et al.* (2005 y 2008) o Otsuki, Miyazato y Yodsudjai, (2003) donde los periodos de mezclado final tras la incorporación total de Agua son de entre 90-120 segundos, acercándose más a las modificaciones propuestas por Younis y Pilakoutas (2013), con la diferencia de que en su investigación dejan reposar la mezcla durante 10 minutos tras la incorporación de la mitad de agua, y previo a añadir la cantidad de cemento, para posteriormente realizar un amasado final de 120 sg cuando se incorpora todo el agua.

Desde el punto de vista de producción industrial es posible implementar el método a la producción de hormigón en central, ya que únicamente es necesario un periodo de 9 minutos en el que el camión hormigonera este ocupando el puesto en la planta, tiempo tras el cual queda incorporado todo el material en el interior de la cuba, habiendo culminados las etapas de premezclado en seco y pre-humectación de la mezcla, y tras el cual perfectamente puede realizarse el resto de amasado sin ocupar el espacio destinado a la dosificación de los materiales.

**Figura 3.- Cono obtenido en amasada GC R-ANR 300/efect 100% reciclado tras diferentes tiempos (5, 8, 12, 15 min) tras la aplicación total del agua de amasado**



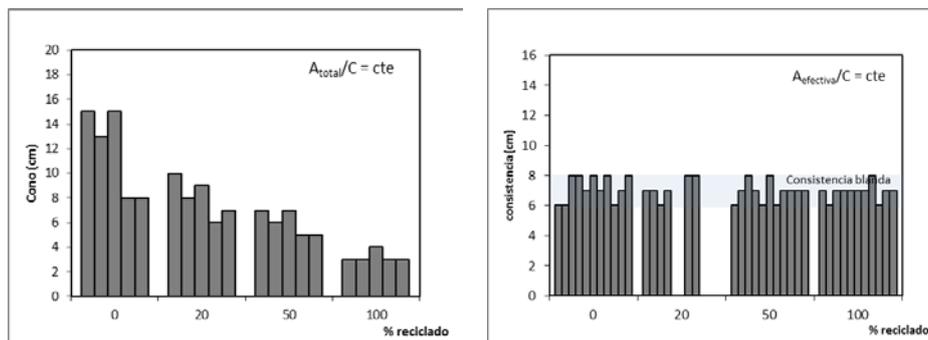
Como mejora al método de Younis y Pilakoutas (2013) la metodología propuesta permite una fabricación más rápida y su adaptación a la producción industrial, ya que posibilita incorporar todos los componentes de forma ininterrumpida, sin necesidad de volver a pasar por el punto de dosificación o de permanecer en él el tiempo requerido por la absorción del reciclado o de volver para la adición del cemento.

### 4.3. Resultados de A/C y consistencia.

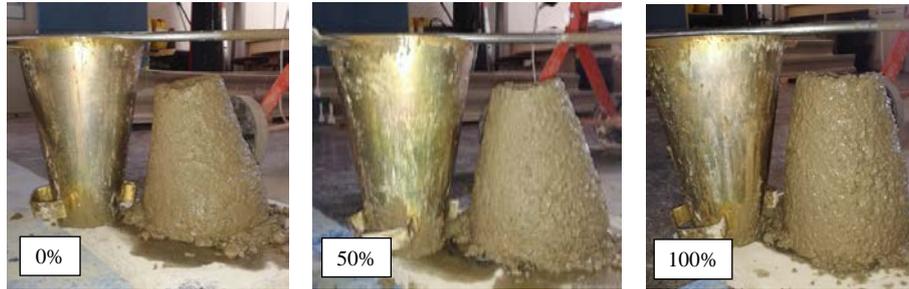
Demostrada la importancia del cómputo de la humedad inicial para las diferentes fracciones de árido, a continuación se estudia el efecto de las distintas modalidades de relación A/C utilizadas respecto a la tasa de reciclado en la mezcla. Para comprobar la efectividad del método de mezcla y la estabilidad de la misma, se relaciona este factor con la consistencia obtenida al final del proceso.

En primer lugar se analiza la evolución de las diferentes modalidades de relación A/C respecto a la tasa de reciclaje. La figura 4 muestra los resultados de las diferentes amasadas realizadas según las modalidades descritas en la metodología. Como muestra esta figura, cuando se utiliza la metodología de  $A_{total}/C$ , conforme se incrementa la tasa de reciclado se disminuye proporcionalmente la consistencia, como resulta esperable debido a la mayor absorción del árido reciclado. Sin embargo, cuando se utiliza  $A_{efectiva}/C$ , y a pesar de que la cantidad de Agua total sea cada vez mayor, la consistencia es similar en todas las mezclas (figura 5).

**Figura 4.- Consistencia obtenida tras el proceso de mezclado en las modalidades de  $A_{total}/C$  y  $A_{efectiva}/C$**

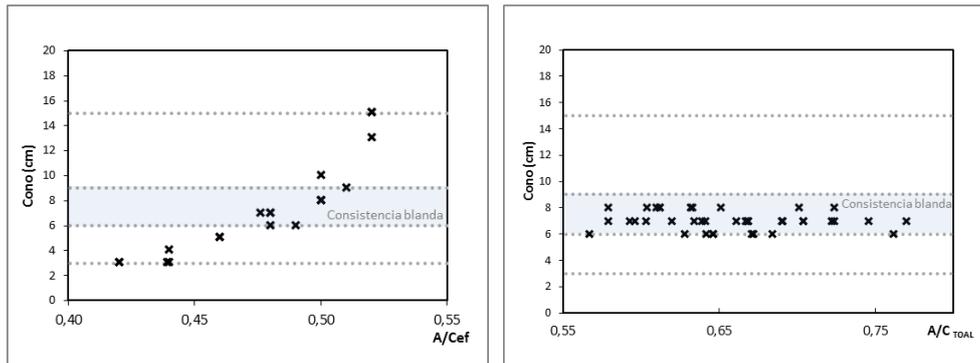


**Figura 5.- Consistencias de la misma serie con  $r= 0 - 50$  y  $100$  % en la modalidad  $A_{efectiva}/C=cte$ .**



De similar forma, los mismos resultados se obtienen cuando se compara la consistencia con las cantidades de  $A/C$  total y efectiva (figura 6) de cada una de las amasadas realizadas para cada modalidad. Así, en la parte de la izquierda se representan los resultados para la modalidad que utiliza la cantidad de Agua Total constante en la dosificación de las diferentes series, mientras que en la parte de la derecha se muestra la modalidad en la que la dosificación se realiza considerando la cantidad de Agua efectiva constante entre series.

**Figura 6.- Consistencia y relación  $A/C$  para las modalidades de  $A_{total}/C=cte$  y  $A_{efectiva}/C=cte$**



De este modo, se demuestra como la consistencia está directamente relacionada con el nivel de agua efectiva con el que se diseñan las mezclas, obteniendo en las amasadas de  $A_{total}/C = cte$  un descenso proporcional de la misma conforme disminuye el nivel de agua libre. Cuando se dosifica manteniendo la cantidad de agua efectiva constante, el nivel de consistencia se mantiene dentro del rango blando para el cual se diseña, a pesar de que cada vez el nivel de agua total se incrementa debido a la absorción del reciclado. Como conclusión a estos resultados, y coincidiendo con lo que especifican autores como Ravindrarajah y Tam (1985) o Hansen *et al.* (1992) es necesario una cantidad extra de agua cada vez mayor conforme aumenta la tasa de reciclado para mantener el nivel de consistencia respecto a la amasada control. Dicho nivel de agua dependerá del estado de humedad inicial de cada fracción de árido y de la absorción del mismo, siendo fundamental controlar este parámetro en el momento justo de la fabricación para realizar un correcto balance de agua y poder determinar de forma adecuada el agua de amasado.

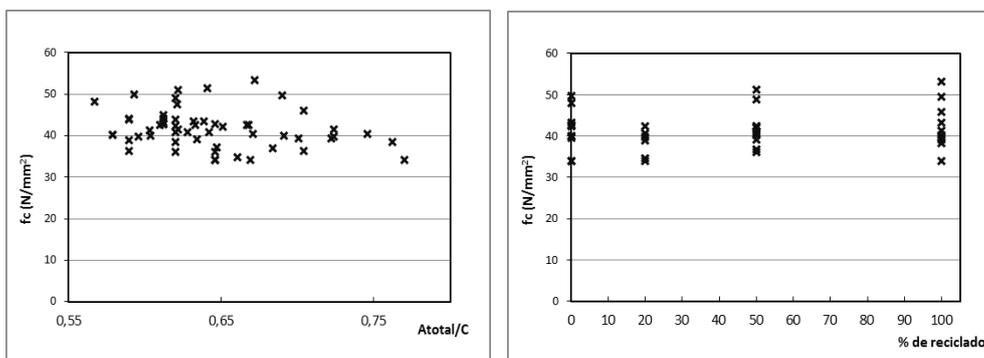
Sin embargo, no resulta lógico que este aumento de agua lleve asociado un incremento de nivel de cemento por este incremento en la cantidad de Agua total para mantener la relación  $A/C$  según proponen Hansen y Narud (1983), Barra (1996) o ACHE (2006), ya que el factor realmente comparativo es el nivel de agua libre o agua efectiva, siendo este el agente que realmente repercute en la consistencia final así como en la posterior hidratación del cemento, y que con este balance se mantendría constante. Así, de la misma forma, el nivel

resistente de la mezcla tampoco se verá directamente afectado por este incremento de agua, sino por la mera inclusión del árido reciclado, ya que del mismo modo, el cemento dispone de la misma cantidad de agua para su reacción.

#### 4.4. Resultados sobre la resistencia a compresión.

En la figura 7 se representan los resultados de resistencia a compresión de las diferentes amasadas frente a la relación  $A_{total}/C$ , en función del nivel de reciclado utilizado. Como se puede ver, la resistencia obtenida en estas amasadas varía entre los valores de 33,9 N/mm<sup>2</sup> y 53,2 N/mm<sup>2</sup>, siendo el valor medio de resistencia de 41,3 N/mm<sup>2</sup>. Como demuestra la figura 7, la cantidad de agua total, medida a través de la relación  $A_{total}/C$  no está directamente relacionada con la resistencia final obtenida ( $R=-0.247$ ), de manera que se vuelve a poner de manifiesto que un incremento de agua necesario para solventar la pérdida de consistencia debido a la absorción del árido reciclado no necesita llevar a aparejado un incremento de cemento que mantenga la relación  $A/C$ . Así, se observa como los valores más altos se dan en las mezclas que utilizan las tasas de reciclado más altas ( $r=100\%$ ) y que por ello necesitan incrementar la cantidad de agua total respecto a su control ( $r=0\%$ ).

**Figura 7.- Resistencia a compresión, relación  $A_{total}/C$  y nivel de reciclado para las amasadas fabricadas**



De este modo, el nivel de resistencia final depende de otros factores, considerándose establecer criterios comparativos entre amasadas con la misma relación  $A_{efectiva}/C$ , que proporcionen similares consistencias, así como matrices cementantes de similar característica resistente. Un análisis más detallado sobre los resultados de resistencia obtenidos en las amasadas con relación  $A_{efectiva}/C$  se puede encontrar Laserna, Montero y Cervera. (2015).

## 5. Conclusiones

Las principales conclusiones que se derivan de esta experimentación son las siguientes:

- Se ha diseñado un método de mezcla específico para la fabricación de hormigón reciclado (HR), fundamentado en los tiempos de absorción mínimos del árido reciclado, con el cual se obtienen mezclas con similar consistencia al hormigón convencional una vez finalizado el proceso, y que resulta fácilmente aplicable a la producción de hormigón a gran escala.
- La dosificación de las mezclas de HR debe realizarse mediante el cómputo del agua libre, y por tanto se debe utilizar la relación  $A_{efectiva}/C$  para establecer criterios comparativos entre las diferentes mezclas. Así, es fundamental controlar los balances de humedad a fin de aplicar la cantidad de agua de amasado adecuada, por lo que computar el nivel de humedad inicial del árido reciclado es determinante.

- Utilizando el método de mezcla propuesto se puede fabricar HR utilizando áridos en su estado natural de humedad, sin necesidad de tratamientos de presaturado o desecación, y sin necesidad de incrementar la cantidad de aditivo respecto a la amasada control.
- Es cierto que para poder paliar la bajada de consistencia al incorporar áridos reciclados es necesario incrementar la cantidad de  $A_{total}$ . Sin embargo, este incremento no necesariamente lleva aparejado un incremento de la cantidad de cemento para mantener la relación A/C como proponen algunos autores, puesto que el nivel de  $A_{efectiva}$  es similar para conseguir las mismas consistencias, y por tanto, la matriz cementante dispone de la misma cantidad de agua para su reacción. Además, este incremento de Agua total no es el causante de la bajada de resistencia observada por algunos autores.

## BIBLIOGRAFÍA

- ACHE, (2006). Monografía 11: Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Comisión 2-GT2/5-“Hormigón Reciclado”.
- Barra, M, (1996.) Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación con hormigón armado. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- EHE-08, (2008). Instrucción del Hormigón Estructural, Ministerio de Fomento, Madrid, España.
- Etxeberria, M, Vázquez, E, Marí, A.R, (2006). Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Mag. Concr. Res.* 58:683–90.
- Fuller, W.B, Thompson, S.E, (1907). The laws of proportioning concrete. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. LIX, No. 2, pp. 67-143.
- Hansen, T.C, Narud, H, (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International* Vol 5 nº1; pp 79-83.
- Hansen, T.C, Schulz, R.R, Hendricks, C.F, Molin, C, Lauritzen, E.K, (1992). *Recycling of demolished Concrete Masonry*. Report of Technical committee 37-DCR Demolition and Reuse of Concrete. RILEM.
- Kobayashi, S. & Kawano, H. (1988) Properties and usage of recycled aggregates concrete. Demolition and Reuse of concrete and masonry, vol 2. *Reuse of demolition waste, Proceedings of the second International Rilem Symposium*. Ed Y.kasai; pp547-556. Noviembre 1988, ISBN 0-412-32110-6
- Laserna, S, Montero, J, Cervera, J, (2015). Fabricación de hormigón con áridos reciclados. Influencia de los áridos convencionales en las propiedades resistentes. *VIII Congreso Ibérico de Agroingeniería*. Orihuela-Algorfa (España).
- Nealen, A. Rühl, M, (1997). Consistency aspects in the production of concrete using Aggregates from recycled Demolition Materials. *In Darmstadt Concrete - Annual Journal* 12, TU Darmstadt, 1997.
- Otsuki, N, Miyazato, S.I, Yodsudjai, W,(2003). Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. *J Mater Civil Eng*, 15(5):443–51
- Paw, C, Rousseau, E, (1986). Equipment Performance and mixing Techniques. *Batiement International Building Research and Practice*. Vol 14 nº3, pp 164-169.
- Ravindrarajah, R.S, Tam, C.T, (1985). Proprieties of concrete made with crushed concrete as coarse Aggregate. *Magazine of concrete research*. vol 37 nº 130 pp 29-38.
- UNE-EN 12350-2, 2006. *Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de Asentamiento*. AENOR

- UNE-EN 12390-2, (2009). *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*. AENOR.
- UNE-EN 12390-3, (2009). *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*. AENOR.
- UNE-EN 1097-6, 2001/A1, (2006). *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*. AENOR.
- Vivian Tam W.Y, Gaob, X.F, Tam C.M, (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cem and Conc Res* 35,1195 – 1203.
- Vivian Tam, W.Y, Tam, C.M, (2008). Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMA<sub>sc</sub>. *Constr Build Mater* 22, 2068–2077.
- Younis, K, Pilakoutas, K, (2013). Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete. *Const Build Mater* 49, 688–701.