

# Evaluación de hormigones reciclados mediante ensayos no destructivos

## *Evaluation of recycled concrete by means of non destructive tests*

A. A. DI MAIO\*, L. P. TRAVERSA\*\*

\*CONICET-LEMIT Facultad de Ingeniería Reg. La Plata, (\*\*) CIC-LEMIT

Fecha de recepción: 20-XII-02

Fecha de aceptación: 25-V-03

ARGENTINA

### RESUMEN

*La escasez de recursos naturales y los problemas ambientales, producto de los depósitos de residuos de construcción y/o demolición, han llevado al uso del hormigón reciclado como árido para la producción de nuevos hormigones. En este trabajo se presentan resultados de resistencia a compresión, números de rebote, velocidades ultrasónicas, presiones Break-off y momentos torsores determinados en hormigones de diferentes niveles de resistencia elaborados con áridos gruesos reciclados en un 25 y 75% respecto de un hormigón de referencia (sin árido reciclado). El método Break-off y el de torsión presentan, a la edad de 28 días, una única curva de correlación, hecho que permitiría estimar la resistencia a compresión utilizando correlaciones determinadas para el mismo conjunto de materiales. Este procedimiento no puede ser aplicado con el método ultrasónico, ya que las velocidades disminuyen fuertemente a medida que se incrementa el porcentaje de árido grueso reciclado utilizado. El ensayo de rebote, por la alta dispersión de resultados que presenta debido a la heterogeneidad de los áridos reciclados, hace que no sea recomendable para estimar la resistencia a compresión.*

### SUMMARY

*The use of recycled concrete as aggregate for the production of new concretes is a consequence of the shortage of natural resources and the environmental problems due to the storage of residual building materials. In this paper the following results are given: compressive strength, rebound numbers, ultrasonic pulse velocity, Break-off pressure and torsional moment, all of them determined on concretes of different strength level elaborated with recycled coarse aggregate in 25% and 75% in respect of a reference concrete (without recycled aggregate). The Break-off and the torsion method present, at 28 days, only one correlation curve; this would allow to estimate the compressive strength using the correlations determined for the same group of materials. It is impossible to apply this procedure when using the ultrasonic method, since the velocity diminishes strongly as the percentage of recycled coarse aggregate increases. With respect to the rebound method, its high dispersion due to the heterogeneous aggregates makes it not advisable in order to perform a strength estimation.*

**PALABRAS CLAVE:** árido reciclado, resistencia, rebote, pulso ultrasónico, Break-off, torsión.

**KEYWORDS:** recycled aggregate, strength, rebound, ultrasonic pulse, Break-off, torsion

### 1. INTRODUCCIÓN

El volumen de materiales de desecho originados en demoliciones, reconstrucciones y/o restauraciones de estructuras de hormigón, se ha incrementando aceleradamente en el mundo. Este hecho ha significado

### 1. INTRODUCTION

*The volume of waste materials originated in demolition, rebuilding and restoration works of concrete structures has suffered worldwide a dramatic increase. On the field of civil engineering, this fact is*

que, en el campo de la ingeniería civil, su interés alcance un nivel relevante ya que las necesidades crecientes de materia prima y, fundamentalmente, los problemas ambientales que origina la acumulación de los materiales de desecho, han llevado a la búsqueda de usos alternativos de los mismos, siendo su empleo como áridos en la elaboración de hormigones, una de las alternativas que aparece como una solución tecnológica para su disposición final.

Para que un material de desecho pueda ser utilizado en la elaboración de hormigones, como es el caso de hormigones viejos que se trituran y utilizan como áridos, es necesario conocer sus propiedades. Los hormigones triturados presentan una elevada absorción de agua motivada por la presencia de espesores variables de mortero y/o pasta adheridos al árido original. Esta situación provoca modificaciones en las características de las mezclas frescas y también en el hormigón endurecido. Por tal motivo, resulta necesario evaluar en laboratorio el comportamiento físico-mecánico de estos hormigones, a fin de poder cuantificar posteriormente diferentes características remanentes de los mismos en estructuras construidas (1). En principio, y como condición necesaria, los hormigones elaborados con áridos reciclados procedentes de la trituración de hormigones, deben cumplir con los mismos requisitos que se exigen a un hormigón convencional elaborado con áridos naturales de densidad normal, tales como resistencia, deformabilidad, durabilidad, etc. (2).

En este trabajo se presentan estudios sobre hormigones reciclados elaborados con áridos gruesos provenientes de la trituración de hormigones de una misma razón agua/cemento. Se evaluaron hormigones de distintos niveles de resistencia en los cuales el árido grueso original fue reemplazado por hormigón triturado en un 25 y 75%, los que fueron comparados con hormigones de referencia (sin árido reciclado). A la edad de 28 días se determinaron la resistencia a compresión y otras propiedades del hormigón mediante la aplicación de los ensayos de rebote, ultrasonido, *Break-off* y momento torsor que, con fines tecnológicos, están reconocidos internacionalmente como Ensayos No Destructivos (END). El último de ellos ha sido desarrollado por los autores del presente trabajo (3).

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiales y mezclas

En los estudios realizados se evaluaron cuatro grupos de hormigones con diferentes razones agua-cemento (0,40; 0,48; 0,65 y 0,70) en los cuales el árido grueso natural fue reemplazado en un 25 y 75% por hormigón

*relevant due to the environmental problems caused by the storage of this kind of materials. Taking too in account the increasing need of raw materials, the natural consequence was the search of alternative uses for waste materials, representing its use as aggregates in the concrete elaboration the best solution for its ultimate disposal.*

*In order to use a waste material in the elaboration of concrete -for instance, crushed and recycled old concretes-, its properties need to be known. Recycled aggregates present a high water absorption, caused by variations of the thickness in the mortar or paste which are stuck to the original aggregate. This situation modifies the features of fresh mixtures and of hardened concrete. Therefore it is necessary to evaluate in the laboratory the physical-mechanical behaviour of this concretes, in order to make possible the later quantification of different characteristics which remain in built structures (1). In principle and as necessary condition, those concretes elaborated with recycled aggregates from the concrete crushing must fulfil the same requirements than a conventional concrete made with natural aggregates of normal density, such as strength, deformability, durability, etc. (2).*

*In this paper, studies about concretes elaborated with recycled coarse aggregates from the crushing of concretes with the same water-cement ratio are presented. Concretes with different strength levels were evaluated, replacing the original coarse aggregate with 25 and 75% of recycled aggregate, and the comparison was made with reference concretes (without recycled aggregates). At the age of 28 days the compressive strength was evaluated, together with other properties, through the respective tests of rebound numbers, ultrasonic pulse velocity, Break-off pressure and torsional moment, all of them internationally recognized as Non-Destructive Tests (NDT). The last of them has been developed by the authors of the present paper (3).*

## 2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

### 2.1. Materials and mixtures

*Four concrete groups with different values of the water-cement ratio (0.40; 0.48; 0.65 and 0.70) were evaluated; on them, the natural aggregate was replaced by 25 and 75% crushed concrete (recycled*

triturado (árido reciclado) de tamaño máximo 25 mm, dando origen a los denominados hormigones R-25 y R-75 respectivamente, cuyas propiedades fueron evaluadas comparativamente con un hormigón de referencia (sin árido reciclado) denominado R-0. El árido reciclado se obtuvo por trituración de un hormigón de razón agua-cemento 0,50, elaborado con cemento portland con filler calcáreo, piedra partida granítica de tamaño máximo 19 mm y arena silícea natural.

Las mezclas en estudio fueron elaboradas empleando cemento portland con filler calcáreo y arena silícea natural. Como árido grueso natural se empleó una combinación de dos piedras partidas graníticas con tamaños nominales 10-30 mm y 6-20 mm de forma tal de ajustarse a la distribución granulométrica del árido reciclado. Los áridos reciclados presentan una textura, absorción y densidad diferente a los naturales. En la Tabla 1 se presentan las proporciones (en peso seco) y el peso por unidad de volumen (P.U.V.) determinado según la Norma ASTM C-138-81. Debe mencionarse que, en todos los casos, los áridos gruesos (naturales y reciclados) fueron saturados durante 24 horas antes de la elaboración de los hormigones.

Se moldearon probetas cilíndricas (150x300 mm) sobre las que se determinó el número de rebote mediante un esclerómetro con una energía de percusión de 0,225 kg; el tiempo de pasaje de ondas ultrasónicas con un equipo de 54 kHz de frecuencia y precisión de 0,1  $\mu$ s

aggregate) with 25 mm maximum size. The concretes obtained were respectively denominate R-25 and R-75; its properties were compared with those of a reference concrete (without recycled aggregate), named R-0. The recycled aggregate was obtained by crushing a concrete with 0.50 water-cement ratio, made with portland cement containing calcareous filler, crushed stone 19 mm maximum size and natural siliceous sand.

The studied mixtures were elaborated employing portland cement with calcareous filler and natural siliceous sand. A combination of two granite crushed stones with 10-30 mm and 6-20 mm nominal size was employed as natural coarse aggregate, according to the granulometric distribution of the recycled aggregate. The texture, absorption and density of recycled aggregates are different to those of natural ones. The proportions (expressed as dry weight) and the unit weight, determined following ASTM C 138-81, are shown in Table 1. In all cases, the coarse aggregates (natural and recycled) were saturated during 24 hours before the elaboration of concretes.

Cylindrical specimens (150x300 mm) were cast and the following tests were performed on them: rebound number, determined with a Schmidt hammer of 0.225 kg percussion energy; ultrasonic pulse velocity, with a equipment of 54 kHz frequency and 0.1  $\mu$ s

TABLA 1/TABLE 1

Proporciones de las mezclas ( $\text{kg/m}^3$ ) y propiedades del hormigón en estado fresco  
*Mix proportions ( $\text{kg/m}^3$ ) and properties of fresh concrete*

Hormigón Concrete	Relación a/c / Water-cement ratio											
	0.40			0.48			0.65			0.70		
	R-0	R-25	R-75	R-0	R-25	R-75	R-0	R-25	R-75	R-0	R-25	R-75
Agua / Water	155			155			155			155		
Cemento Cement	388			320			238			221		
Árido Fino Fine Agg.	781			850			913			1020		
Árido Grueso Natural Natural Coarse Agg.	1040	780	260	1040	780	260	1040	780	260	1040	780	260
Árido Grueso Reciclado Recycled Coarse Agg.	----	239	716	----	239	716	----	239	716	----	239	716
P.U.V. ( $\text{kg/m}^3$ ) U. W. ( $\text{kg/m}^3$ )	2430	2405	2355	2425	2400	2345	2410	2385	2335	2405	2380	2330

y luego la resistencia de rotura a compresión. Además, se elaboraron prismas de 150x150x900 mm en los que se realizaron, sobre cilindros de 50 mm de diámetro y 70 mm de altura obtenidos mediante calado, ensayos *Break-off* y de torsión. Los mismos se realizaron a la edad de 28 días, luego de permanecer las muestras en cámara húmeda (HR: 95%; T: 20 ± 2 °C) durante dicho período.

## 2.2. Resultados y discusión

Las trabajabilidades de todas las mezclas, medidas mediante el cono de Abrams, estuvieron comprendidas entre 8 ± 2 cm, lo cual debe ser atribuido a que se ha trabajado con los áridos saturados, hecho que motivó que las diferencias de absorción existentes entre los áridos naturales y reciclados no modificara la demanda de agua. Los P.U.V. determinados en el hormigón fresco disminuyen a medida que se incrementa el porcentaje de árido reciclado utilizado, ya que este material posee una menor densidad que el árido natural.

En las Figuras 1a, 1b, 1c, 1d y 1e se presentan, para las distintas razones agua-cemento analizadas, los resultados de resistencia a compresión, número de rebote, velocidad ultrasónica, presión *Break-off* y momentos torsores respectivamente, obtenidos en los distintos hormigones.

La Figura 1a muestra que para cada una de las razones agua-cemento evaluadas, las resistencias a compresión determinadas a la edad de 28 días son prácticamente coincidentes en la totalidad de los hormigones evaluados, pudiéndose indicar que, para

precision; and finally the compressive strength. Besides, prisms of 150x150x900 mm were elaborated; on cylinders of diameter 50 mm and height 70 mm drilled on them were performed the *Break-off* and torsion tests, at the age of 28 days and after having remained that time in a moist room (RH: 95%; T: 20 ± 2 °C).

## 2.2. Results and discussion

The consistence of all mixtures, measured through the Abrams cone, were around 8 ± 2 cm; this is probably due to the fact that concretes were made with saturated aggregates, and subsequently that the absorption differences present among natural and recycled aggregates do not modify the water demand. The unit weight values measured on fresh concrete diminish with increasing percentages of recycled aggregate, since the density of this kind of aggregate is lower than the density of the natural one.

The results of tests of compressive strength, rebound number, ultrasonic pulse velocity, *Break-off* pressure and torsional moment, obtained with different types of concrete, are shown respectively in the Figures 1a, 1b, 1c, 1d and 1e.

In Figure 1a, for each water-cement ratio, the values of compressive strength measured at the age of 28 days are almost coincident in all concretes. The sample

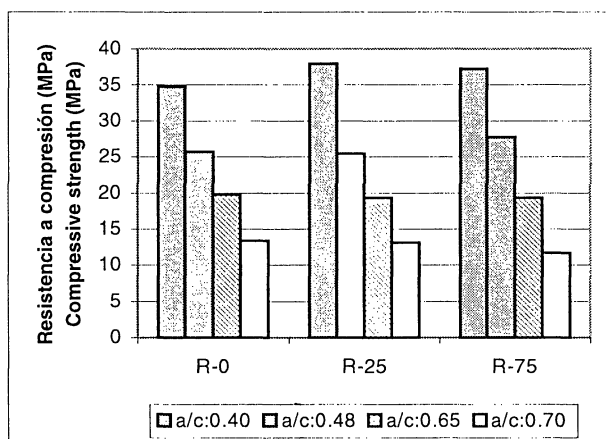


Figura 1a.- Resistencias a compresión de los hormigones evaluados.

Figure 1a.- Values of compressive strength of the studied concretes.

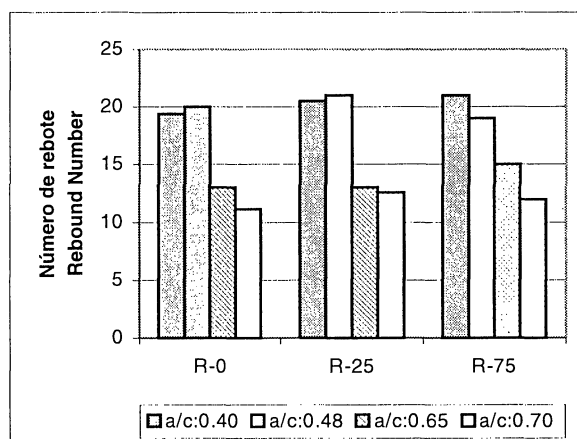


Figura 1b.- Números de rebote determinados en los hormigones evaluados

Figure 1b.- Values of rebound number of the studied concretes.

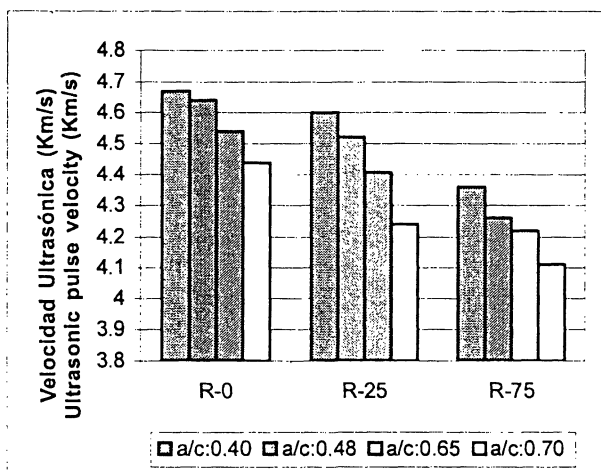


Figura 1c.- Velocidades ultrasónicas obtenidas en los hormigones evaluados.

Figure 1c.- Values of ultrasonic pulse velocity of the studied concretes.

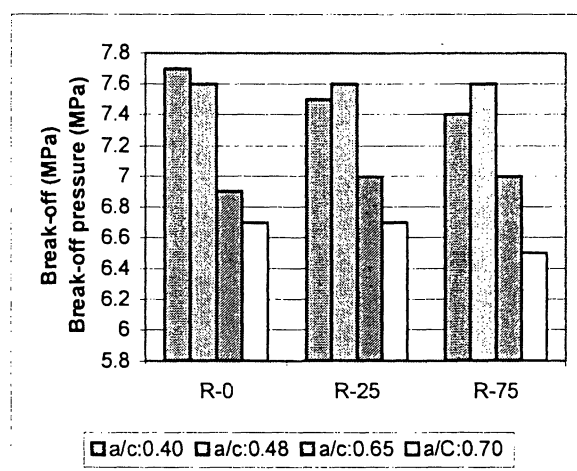


Figura 1d.- Presiones Break-off determinadas en los hormigones evaluados.

Figure 1d.- Values of Break-off pressure of the studied concretes.

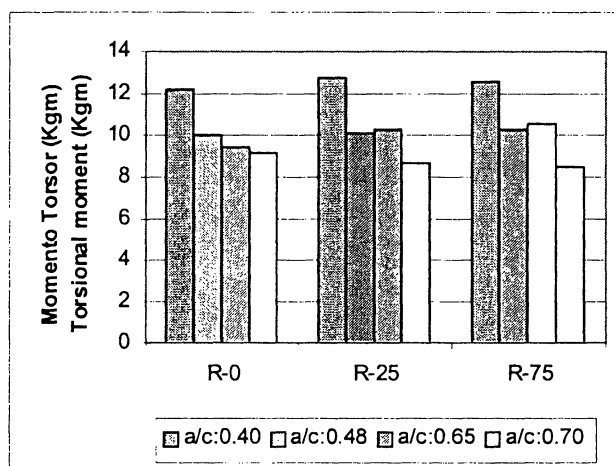


Figura 1e.- Momentos torsores determinados en los hormigones evaluados.

Figure 1e.- Values of torsional moment of the studied concretes.

el caso del hormigón R-25, correspondiente a la relación a/c 0,40, se verifica un pequeño incremento de la resistencia respecto del hormigón de referencia, hecho que ya fue detectado en trabajos previos (4).

Con relación a los resultados obtenidos con el método de rebote puede observarse en la Figura 1b que no se obtuvieron comportamientos similares en los diferentes hormigones evaluados, ya sea cuando se comparan los resultados de una misma razón agua-cemento como, también, entre todos ellos, ya que en algunos casos, el rebote ha experimentado un pequeño incremento a medida que se incorporó un mayor porcentaje de árido reciclado.

R-25 ( $w/c = 0.40$ ), shows a little strength increase respect to the reference concrete; this fact was observed too in previous papers (4).

With respect to the rebound method results, it is observed in Figure 1b that the different studied concretes do not show a similar behaviour. This fact appears not only when results of samples with the same water-cement ratio are compared, but also when the comparison extends to all samples, since in some cases the rebound number has suffered a slight increase when the percentage of recycled aggregate becomes higher.

Respecto de las velocidades ultrasónicas (Ver Figura 1c) se confirma que se produce un decrecimiento de las mismas a medida que se incrementa la razón agua-cemento. Por otro lado, si se analizan las velocidades correspondientes a cada hormigón, se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de árido reciclado se produce un decrecimiento de la velocidad, atribuible a una menor densidad del material, hecho que ya fue observado en experiencias previas en hormigones elaborados con 50 y 100% de áridos reciclados (5). Si para cada razón a/c se comparan las velocidades de los hormigones R-0 respecto del R-25 se observa una disminución de la misma que va desde un 1,7% para la razón a/c 0,40 y luego, en forma creciente, hasta alcanzar para la razón a/c 0,70 una disminución del orden del 4,5%. Si esta misma comparación se efectúa entre el hormigón R-0 y el R-75, se observa que para todas las razones a/c evaluadas se produce una disminución de la velocidad similar y del orden del 7,0%. Este hecho está directamente relacionado con la disminución de densidad que poseen los hormigones con altos porcentajes de áridos reciclados.

En la Figura 1d se indican los resultados del ensayo *Break-off*, en el cual se produce la rotura por flexión de un pequeño cilindro de hormigón, observándose que las presiones determinadas en los hormigones de referencia respecto de las obtenidas en los elaborados con áridos reciclados correspondientes a una misma razón a/c, son prácticamente coincidentes, produciéndose una pequeña disminución a medida que se incrementa la razón a/c. Este hecho estaría indicando que el empleo de áridos gruesos reciclados tampoco modifica la resistencia a flexión del hormigón, coincidente con los resultados obtenidos por Hansen (6).

Si se analizan los resultados obtenidos mediante el ensayo de torsión (Figura 1e) puede observarse que los mayores momentos torsores se obtuvieron en los hormigones de mayor nivel resistente tanto en el hormigón R-0 como en los R-25 y R-75. En los hormigones de razones a/c 0,48 y 0,70 los momentos torsores son prácticamente coincidentes, mientras que en los de razones a/c 0,40 y 0,65, los momentos torsores en los hormigones R-25 y R-75 son levemente superiores a los determinados en los R-0.

Las presiones *Break-off* y el momento torsor se encuentran directamente vinculados con la resistencia a flexión y torsión del hormigón, respectivamente, por lo cual es lógico que los citados parámetros varíen con la resistencia del material.

*Figure 1c shows a decreasing ultrasonic pulse velocity as the water-cement ratio increases. Besides, when analysing the velocities corresponding to each concrete, it is possible to note that an increase of the recycled aggregate percentage has as consequence a decrease of the velocity, attributable to the lower density of the material; this fact was already observed in previous experiences performed on concretes with 50 and 100% of recycled aggregates (5). When, for each value of the water-cement ratio, the velocity of concrete R-0 is compared with that of R-25, a decrease is observed ranging from 1.7% (w/c = 0.40) to 4.5% (w/c = 0.70). The same comparison, made between R-0 and R-75, shows a velocity decrease of the same order, around 7.0%. This fact is directly linked with the decrease of density shown by those concretes with high recycled aggregate percentage.*

*Figure 1d shows the results of Break-off test, consisting in the tensile break-off of a little concrete cylinder; it is to be observed that for the same water-cement ratio, the pressures measured on the reference concretes were practically coincident with corresponding to recycled aggregates. It is observed only a slight decrease with the increasing of w/c ratio. This fact would mean that the use of coarse recycled aggregates does not modify either the tensile strength of concrete; the results obtained by Hansen (6) agree with this observation.*

*The results obtained in the torsion test (Figure 1e) show that the greatest values of torsional moment were obtained in the case of concretes with the greatest strength level; this is valid for R-0, R-25 and R-75. In those concretes with water-cement ratio equal to 0.48 and 0.70, the torsional moments are almost coincident, while in those with w/c ratio equal to 0.40 and 0.65 the torsional moments of concretes R-25 and R-75 are slightly higher than those of R-0.*

*The values of Break-off pressure and torsional moment are respectively linked with the tensile strength and the torsional strength of concrete; naturally, those parameters will change with the material resistance.*

### 2.3. Correlaciones entre la resistencia a compresión y los parámetros determinados con cada ensayo no destructivo

En las Figuras 2a, 2b, 2c y 2d se presentan las correlaciones determinadas entre la resistencia a compresión ( $f'c$ ) y la velocidad ultrasónica ( $V$ ), número de rebote ( $R$ ), presión *Break-off* (PBO) y momentos torsores ( $Mt$ ) respectivamente, obtenidos en los hormigones de referencia (R-0) y en los elaborados con diferentes porcentajes de áridos gruesos reciclados (R-25 y R-75).

### 2.3. Correlations among compressive strength and those parameters determined on each non-destructive test.

Figures 2a, 2b, 2c and 2d show respectively the correlations among compressive strength ( $f'c$ ) and ultrasonic pulse velocity ( $V$ ), rebound number ( $R$ ), Break-off pressure (BOP) and torsional moments ( $Mt$ ); these values were obtained with the reference concretes (R-0) and with those elaborated with different percentages of recycled coarse aggregates (R-25 and R-75).

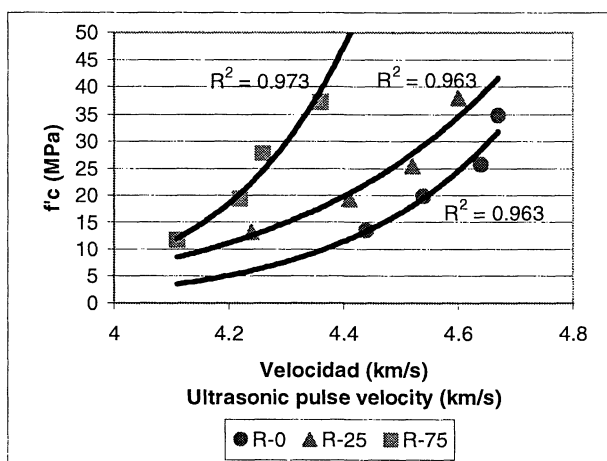


Figura 2 a.- Relación entre la resistencia a compresión y la velocidad ultrasónica.

Figure 2 a.- Relationship between compressive strength and ultrasonic pulse velocity.

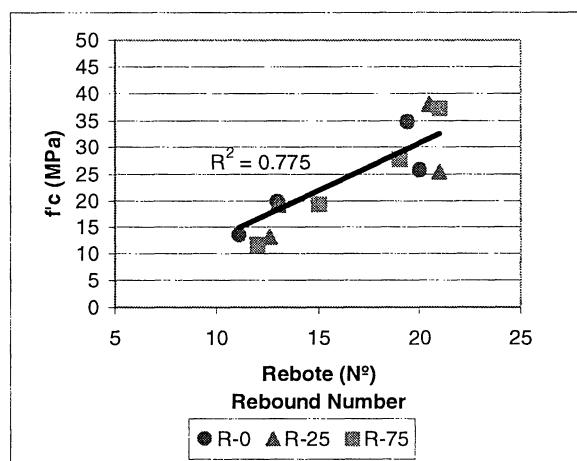


Figura 2 b.- Relación entre la resistencia a compresión y el número de rebote.

Figure 2 b.- Relationship between compressive strength and rebound number.

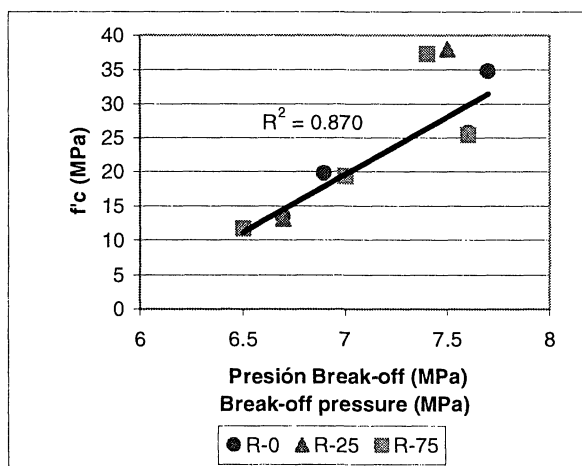


Figura 2 c.- Relación entre la resistencia a compresión y la presión Break-off.

Figure 2 c.- Relationship between compressive strength and Break-off pressure.

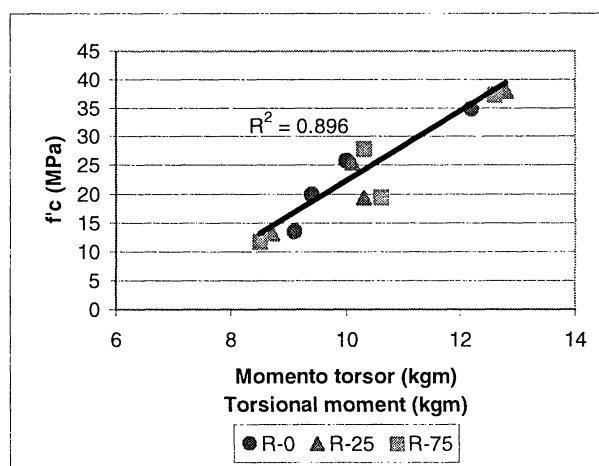


Figura 2 d.- Relación entre la resistencia a compresión y el momento torsor

Figure 2 d.- Relationship between compressive strength and torsional moment.

En la Figura 2a se pueden observar claramente tres conjuntos de puntos que conforman curvas de correlación entre  $f'c$  y  $V$  correspondientes a los hormigones R-0, R-25 y R-75 respectivamente. Este hecho está indicando que en aquellos casos en que se quiera estimar la resistencia a compresión mediante el empleo del método ultrasónico empleando curvas de correlación  $f'c-V$  obtenidas previamente; deberá tenerse muy en cuenta el tipo de hormigón a evaluar, ya que para diferentes porcentajes de áridos gruesos reciclados las curvas experimentan comportamientos muy diferenciados.

En tal sentido y considerando lo expresado respecto a los resultados indicados en la Figura 1c, al producirse una notable disminución de las velocidades ultrasónicas a medida que se incorpora mayor cantidad de árido grueso reciclado y mantenerse las resistencias a compresión prácticamente constantes en cada nivel (Figura 1a), es imposible emplear una curva obtenida para un hormigón con un cierto porcentaje de árido reciclado cuando se quiera estimar la resistencia de otro hormigón sin conocer previamente en qué porcentaje se lo ha empleado y cuáles son las características del mismo, fundamentalmente respecto al volumen de mortero que pudiera tener adherido, hecho que modifica considerablemente las velocidades ultrasónicas al modificar la densidad del árido reciclado. Este comportamiento es similar a cuando se emplean áridos naturales de diferente mineralogía y distintas densidades.

Las correlaciones entre  $f'c-R$  (Figura 2b) no presentan modificaciones sensibles entre los diferentes hormigones evaluados, por lo tanto podría indicarse que existe prácticamente una única recta que los vincula con una correlación baja ( $R^2 = 0,775$ ). El hecho indicado se observa también en las correlaciones obtenidas entre  $f'c-PBO$  (Figura 2c) en donde no aparecen diferencias entre el hormigón R-0 respecto del R-25 y R-75. Este hecho puede ser atribuido, tal como pudo observarse en la Figura 1d, a que la resistencia a flexión del hormigón elaborado con árido natural respecto a los que poseen diferentes porcentajes de árido reciclado es prácticamente coincidente, motivo por el cual no se ven modificadas las correlaciones entre las presiones y la resistencia a compresión.

Las correlaciones entre  $f'c-Mt$  tienen un comportamiento similar al anterior (Figura 2d), pudiéndose considerar que existe una única correlación, ya que para todos los hormigones en estudio, a medida que se incrementa la  $f'c$ , se observa un incremento similar en los  $Mt$ .

*In Figure 2a it is possible to observe clearly three sets of points: they constitute correlation curves between  $f'c$  and  $V$ , respectively corresponding to R-0, R-25 and R-75 concretes. This fact indicates that when the purpose is to estimate the compressive strength through the ultrasonic method employing correlation curves  $f'c-V$  previously obtained, it will be necessary to consider the type of concrete to be evaluated, since for different percentages of recycled coarse aggregates, the curves behave in very different ways.*

*Taking on account the comments about the results of Figure 1c, as ultrasonic velocities markedly diminish with the addition of greater amounts of recycled coarse aggregates -with compressive strength virtually constant at each level (Figure 1a) - it is impossible to apply a curve obtained for a concrete with a certain percentage of recycled concrete when the aim is to estimate the strength of another concrete; a necessary condition for performing this is to know previously its percentage and its basic features, particularly the mortar volume which may be stuck, modifying substantially the ultrasonic velocities as the density of recycled aggregate varies. This behaviour is similar to the use of natural aggregates with different mineralogy and different density values.*

*The correlations between  $f'c$  and  $R$  (Figure 2b) do not show appreciable modifications among the different concretes; then, practically one only curve exists, linking them with a low correlation ( $R^2 = 0.775$ ). This fact is observed too in the correlations between  $f'c$  and BOP (Figure 2c), with no differences among the concretes R-0, R-25 and R-75. As it was observed in Figure 1d, this fact may be caused by the fact that the tensile strength of concretes elaborated with natural aggregate are practically coincident with that of concretes with different percentages of recycled aggregate; the correlations between pressure and compressive strength are not changed either.*

*The correlations between  $f'c$  and  $Mt$  behave in a similar way to formerly described (Figure 2d); then, it is possible to assume that one only correlation exists, since in all studied cases, an increase of  $f'c$  has as consequence a similar increase of  $Mt$ .*



Debe indicarse, sin embargo, que todas las correlaciones establecidas entre la resistencia a compresión y el parámetro que se evalúa con cada uno de los ensayos no destructivos empleados, fueron determinadas a la edad de 28 días, por lo que son válidas hasta dicha edad, motivo por el cual pueden ser de gran utilidad para evaluar la calidad del hormigón durante la etapa de construcción y recepción.

### 3. CONCLUSIONES

En base a las experiencias realizadas, particularmente considerando los reemplazos de áridos gruesos reciclados efectuados y la edad de ensayo, pueden plantearse las siguientes conclusiones vinculadas con la evaluación de este tipo particular de hormigones mediante Ensayos No Destructivos (END).

- a) Se confirma que las resistencias a compresión de los hormigones de referencia respecto de los elaborados con áridos reciclados obtenidos de hormigones con razones agua-cemento igual a 0,50, para cada una de las razones agua-cemento evaluadas, son prácticamente coincidentes.
- b) Los métodos *Break-off* y torsión permitirían estimar, hasta la edad evaluada, la resistencia a compresión de hormigones elaborados con áridos gruesos reciclados mediante el empleo de una única curva de correlación obtenida previamente en laboratorio con el mismo conjunto de materiales.
- c) El método de rebote también presenta una única curva de correlación, sin embargo se detecta una dispersión de valores que puede considerarse elevada, originada en la modificación del módulo de elasticidad de los áridos reciclados comparativamente con la de los áridos naturales. Por tal motivo, los valores de resistencia estimados pueden verse afectados, situación que debe sumarse a que las determinaciones son de carácter superficial.
- d) La velocidad ultrasónica se encuentra fuertemente influenciada por la densidad del material, por lo cual se obtienen curvas de correlación diferenciadas entre el hormigón elaborado con árido normal respecto de los que poseen diferentes porcentajes de árido reciclado. Esta situación plantea que, en aquellos casos en que se desea estimar la resistencia a compresión, es necesario obtener en laboratorio curvas de correlación empleando el mismo conjunto de materiales y porcentajes iguales de áridos reciclados.

*However, it must be pointed out that all correlations set between compressive strength and the parameter to be evaluated on each non-destructive test, were made at the age of 28 days. Its validity reaches, then, until that age, and they may be useful to evaluate the quality of concrete during the stages of building and receipt.*

### 3. CONCLUSIONS

*Taking into account the performed experiences, particularly the replacement with recycled coarse aggregates and the age of tests, the following conclusions relating to the evaluation of this special type of concrete through Non-Destructive Tests (NDT) can be expressed:*

- a) It has been confirmed that the compressive strength values of reference concretes practically agree with those of concretes made with recycled aggregates from concretes with 0.50 water-cement ratio, and that this agreement is valid for all tested water-cement ratios.*
- b) The Break-off and torsion methods will allow to estimate -until the assessed age- the compressive strength of concretes made with coarse recycled aggregates through an only correlation curve previously obtained at the laboratory with the same materials set.*
- c) The rebound number shows one only correlation curve too, but a dispersion of values considered as high is detected, generated by the modification of the elastic modulus of recycled aggregates in comparison with that one of natural aggregates. Hence, the estimated strength values may be modified, and this situation must be added to the fact that the determinations are superficial.*
- d) The ultrasonic pulse velocity is markedly influenced by the density of the material; for this reason, the correlation curves of concrete made with normal aggregate are different to those with variable percentages of recycled aggregate. Therefore, when the value to estimate is the compressive strength, it is necessary to obtain in the laboratory correlation curves with the same set of materials, and the same percentages of recycled aggregates.*

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) Leite, M. B., Pedroso, P.H. y Dal Molin, D.C. *Agregado reciclado para concreto: Proposta de desenvolvimento de um método para determinacao da taxa de absorcao do material*. Proc. 42 Congreso Brasileiro del Hormigón. IBRACON-2000. Fortaleza, Brasil (2000).
- (2) Grübl, P. and Rühl, M. "German Committee for Reinforced Concrete (DafStb) – Code: Concrete with Recycled Aggregates". Proc. Int. Symposium Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregates. University of Dundee, London (1998).
- (3) Di Maio, A. A. and Traversa, L.P. *A New Nondestructive Testing (NDT): Torsion Test to Evaluate Compressive Strength in Concrete Structures*. A.S.T.M. Journal Cement, Concrete and Aggregates. Vol.16, N°1 (1994), pp.73-77.
- (4) Di Maio, A. A., Giaccio, G. y Zerbino, R. *Hormigones con agregados reciclados*. Ciencia y Tecnología del Hormigón, n° 9 (2002), pp. 5-10.
- (5) Di Maio, A. A., Gutiérrez, F. y Traversa, L.P. Comportamiento físico mecánico de hormigones elaborados con agregados reciclados. Proc. 14ta. Reunión Técnica A.A.T.H. Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Buenos Aires, Argentina. (2001). pp. 37-44.
- (6) Hansen, T. C. and Narud, H. *Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate*. Concrete International (1983), pp.79-83.

\* \* \*