

## EVALUACIÓN DEL CONCRETO CON BAJAS RELACIONES AGUA/CEMENTO Y AGREGADOS CALIZOS DE ALTA ABSORCIÓN

RÓMEL G. SOLÍS-CARCAÑO<sup>1</sup>, ERIC I. MORENO<sup>2</sup>, ERICK ARJONA-OTERO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería. email: tulich@uady.mx

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería. email: emoreno@uady.mx

<sup>3</sup>Estudiante de posgrado. Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería. email: erickarjona@gmail.com

Recibido: mayo 2011

Recibido en forma final revisado: octubre 2012

### RESUMEN

El concreto es un material compuesto cuyo desempeño depende fundamentalmente de las propiedades de la matriz de la pasta de cemento y de las partículas de roca que se agregan a ésta. Se ha comprobado que la calidad de la pasta de cemento se hace mayor si se utilizan bajas relaciones entre el agua y el cemento, y que las propiedades de los agregados dependen principalmente del tipo de roca y de la forma de las partículas. El objetivo del estudio que se reporta fue determinar el límite de resistencia que se puede obtener en concretos fabricados con un tipo específico de agregados calizos triturados de alta absorción. Se probaron concretos fabricados en laboratorio con seis relaciones agua/cemento y dos tamaños de agregado grueso. Se concluyó que es posible diseñar con los agregados estudiados concretos de  $f'c$  de hasta 500 kg/cm<sup>2</sup>.

*Palabras clave:* Agregados calizos, Concreto, Porosidad, Relación agua/cemento, Resistencia.

## EVALUATION OF CONCRETE WITH LOW WATER/CEMENT RATIO AND HIGH ABSORPTION LIMESTONE AGGREGATES

### ABSTRACT

Concrete is a composite material that depends mainly on the properties of the cement paste matrix and on the stone particles that are aggregated to the paste. It has been proved that the quality of the cement paste is improved if low water/cement ratios are employed, and that the aggregate properties depend mainly on the type of rock and the particle shape of them. The aim of this study was to determine the compressive strength limit that can be obtained from concrete involving a specific type of crushed limestone aggregate of high absorption. Testing of concrete specimens involved six water/cement ratios and two sizes of coarse aggregate. It was concluded that it is possible to design concrete elements of  $f'c$  up to 500 kg/cm<sup>2</sup> with the aggregate studied.

*Keywords:* Compressive strength, Concrete, Limestone aggregate, Porosity, Water/cement ratio.

### INTRODUCCIÓN

El concreto es un material compuesto constituido por una matriz de pasta de cemento hidratado y un grupo de partículas de roca de diferentes tamaños. De aquí que el desempeño de este material dependa fundamentalmente de las propiedades de cada uno de estos dos componentes, así como de la interfase que se genera entre ellos.

Como en la mayoría de los materiales, la calidad de la pasta de cemento es una función inversa de su porosidad, propiedad que depende de la cantidad de productos hidratados generados a partir de los compuestos contenidos en el cemento. Se ha comprobado que la calidad de la pasta de cemento se hace mayor si se utilizan bajas relaciones

entre el agua y el cemento ( $A/C$ ) -es decir, la mayor cantidad de cemento y la menor cantidad de agua posibles- lo cual minimiza la red de poros capilares (Neville & Brook 1998).

Los agregados utilizados en el concreto suelen tener muy diversas características dependiendo principalmente de las propiedades físicas y químicas de la roca madre, y de la forma de las partículas (O'Reilly, 1997). La amplia utilización del concreto como material de construcción se basa en que se fabrica utilizando los agregados que se encuentra disponibles en cada región del orbe; lo anterior, aunado a su versatilidad y durabilidad, ha hecho que el concreto sea el material más utilizado del mundo (Hernández, 2008).

En algunas regiones se cuenta con depósitos no consolidados de arenas y gravas, como son las terrazas aluviales, las llanuras de inundación o los cauces de corrientes de agua, en los cuales se acumulan materiales que se han producido lentamente por medio de la fragmentación natural de la roca. Las composiciones mineralógica y petrográfica de las arenas y gravas depositadas, suelen ser muy heterogéneas, ya que las partículas pueden provenir de diferentes fuentes; las partículas depositadas por corrientes de agua son predominantemente de cuarzo (Popovics, 1992). Este tipo de agregado proveniente de depósitos naturales – denominados de mina– es el más utilizado en el mundo, ya que generalmente no requiere de proceso industrial alguno, lo cual lo hace relativamente barato.

Sin embargo, también existen regiones que carecen de agregados de mina en las cuales la roca madre es extraída de la corteza terrestre, utilizando explosivos y/o maquinas excavadoras, y posteriormente es fragmentada por medio de trituración mecanizada. Este tipo de agregados se denominan triturados y requieren de un proceso de cribado y clasificación de los tamaños de las partículas. La calidad de los agregados triturados depende, además del tipo de roca madre, de la génesis geológica y la variabilidad litológica (Maya, 2003). Las formas de las partículas que se producen generalmente son angulosas y planas, lo cual provoca una mejor interfase entre ellas y la matriz de pasta de cemento; pero a la vez exige una mayor cantidad de agua de mezclado.

De las rocas de origen sedimentario que se utilizan para la fabricación de agregados triturados para concreto, la más común es la de roca caliza. En general, las calizas presentan gran diversidad ya que su estructura cristalina depende principalmente de la presión bajo la cual se produjo el estrato, pudiendo ser débiles y porosas para presiones relativamente bajas, o densas y resistentes si se formaron bajo presiones altas. En lugares donde el nivel de aguas freáticas es somero, la roca es generalmente porosa y absorbente. Neville (1996), reporta un rango de absorción de 0 a 15 % para este tipo de agregado, aunque la Asociación del Cemento Portland (Kosmatka et al. 2002) considera, de manera general para la producción de concreto, una absorción hasta de 4% para el agregado grueso y de hasta 2% para el agregado fino. Agregados con valores mayores a éstos pueden ser considerados de alta absorción.

El objetivo del estudio que se reporta fue determinar el límite de resistencia que se puede obtener con concretos fabricados usando un tipo específico de agregados calizos triturados de alta absorción. Lo anterior se logra utilizando bajas relaciones A/C, y sin adicionar materiales puzolánicos, los

cuales pueden no ser una opción económica para aquellas regiones en las que no se obtienen de manera natural por actividad volcánica, ni como subproducto industrial.

Los agregados utilizados en el estudio provinieron de la formación geológica denominada Carrillo Puerto, ubicada en la Península de Yucatán en el sureste mexicano; esta formación geológica es una unidad constituida por sedimentos calcáreos marinos del Cenozoico (Pacheco & Alonzo, 2003). Representa una extensa planicie que forma parte de la provincia geográfica de la Llanura del Golfo y del Caribe, con características morfológicas y estructurales bastante uniformes. La antigüedad de estas calizas se encuentra en un rango que va del Eoceno-Paleoceno hasta el Holoceno-Pleistoceno.

De acuerdo con estudios químicos reportados, la composición de las rocas calizas de la formación Carrillo Puerto tienen aproximadamente un 77% de carbonato de calcio y 13% de carbonato de magnesio; también se encontró que contienen un 2,25% de arcillas y un 1,11% de sílica; otros compuestos identificados fueron: óxido de hierro (0,08%), sulfatos (0,004%), nitratos (0,004%) y cloruros (0,002%) (Pacheco & Alonzo, 2003).

Resultados de pruebas mecánicas realizadas en rocas calizas de esta formación geológica han sido publicados (Alonzo & Espinosa, 2003), siendo los valores medios los siguientes: resistencia a la compresión 283 kg/cm<sup>2</sup>, densidad relativa 2,17, absorción 7,11% y módulo de elasticidad 1 203 772 kg/cm<sup>2</sup>. En contraparte, rocas calizas de poca absorción suelen presentar resistencias a la compresión superiores a 1000 kg/cm<sup>2</sup> (Ortiz et al. 1995).

La variabilidad en las principales propiedades del tipo específico de agregado calizo utilizado se puede observar en las Tablas 1 y 2.

**Tabla 1.** Estadística descriptiva de las propiedades de arenas trituradas provenientes de la formación Carrillo Puerto

| Propiedades                                      | Media | Máximo | Mínimo |
|--|-------|--------|--------|
| Peso específico seco suelto (kg/m <sup>3</sup> ) | 1340  | 1505   | 1153   |
| Módulo de finura                                 | 2,81  | 3,20   | 2,50   |
| Densidad relativa                                | 2,47  | 2,55   | 2,37   |
| Absorción (%)                                    | 4,93  | 7,60   | 3,00   |
| Finos (%)  | 18,11 | 26,00  | 4,00   |

Estas tablas presentan estadísticos calculados a partir de datos que han sido publicados anteriormente (Cerón *et*

al. 1996; Solís & Moreno, 2008). Las características más notables de estos agregados son su alta absorción, su baja densidad y su gran porcentaje de partículas finas.

**Tabla 2.** Estadística descriptiva de las propiedades físicas de gravas trituradas provenientes de la formación Carrillo Puerto

| Propiedad  | Media | Máximo | Mínimo |
|--|-------|--------|--------|
| Peso específico seco suelto (kg/m <sup>3</sup> )   | 1153  | 1224   | 1065   |
| Peso específico seco compacto (kg/m <sup>3</sup> ) | 1267  | 1358   | 1162   |
| Densidad relativa                                  | 2,35  | 2,48   | 2,22   |
| Absorción (%)                                      | 6,43  | 10,10  | 3,80   |
| Finos (%)  | 4,01  | 9,00   | 1,00   |
| Desgaste (%)                                       | 30    | 47     | 23     |
| Tamaño máximo de agregado (%)                      | 19    | 25     | 19     |

## METODOLOGÍA

La unidad de análisis estudiada fue el concreto fabricado con agregados pétreos de alta absorción producidos a partir de la trituración de roca caliza, extraída de una formación geológica constituida por sedimentos calcáreos marinos.

Para la fabricación del concreto se utilizaron 6 relaciones (en masa) entre el agua y el cemento (A/C): 0,20, 0,25, 0,30, 0,35, 0,40 y 0,45, y dos tamaños máximos de agregado grueso (TMA): 3/8" y 3/4", ambos de alta absorción. Se fabricaron concretos con 8 dosificaciones, mismas que resultaron de las combinaciones de las A/C y los TMA, según se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Lotes de concreto fabricados por cada dosificación

| Relación A/C | Tamaño de agregado grueso |      |
|--------------|---------------------------|------|
|              | 3/4"                      | 3/8" |
| 0.20         | -                         | 2    |
| 0.25         | 3                         | 3    |
| 0.30         | 3                         | 2    |
| 0,35         | 2                         | -    |
| 0,40         | 2                         | -    |

**Tabla 4.** Propiedades físicas de los agregados pétreos utilizados

| Agregado   | Peso volumétrico seco suelto (kg/m <sup>3</sup> ) | Peso volumétrico seco compacto (kg/m <sup>3</sup> ) | Densidad relativa | Absorción (%) | Módulo de finura |
|------------|---|---|-------------------|---------------|------------------|
| Arena      | 1 398   | -   | 2,42              | 5,1           | 2,83             |
| Grava 3/8" | 1 269   | 1 357   | 2,38              | 6,0           | -                |
| Grava 3/4" | 1 197   | 1 239   | 2,28              | 8,0           | -                |

| Relación A/C | Tamaño de agregado grueso |      |
|--------------|---------------------------|------|
|              | 3/4"                      | 3/8" |
| 0,45         | 1                         | -    |

La investigación se inició fabricando concretos con combinaciones de A/C (0,40 y 0,45) y TMA (3/4") que ya habían sido estudiadas con anterioridad. Seguidamente se utilizaron A/C menores y en el momento en el que se observó un cambio de pendiente en la relación A/C-resistencia se optó por utilizar agregado grueso de 3/8", siguiendo las recomendaciones tomadas de la bibliografía (ACI 363R-10 2010). En general, se realizaron dos muestreos para cada combinación de A/C y TMA, con excepción de los siguientes casos: 0,45 con 3/4", que ya ha sido muy estudiado; 0,30 con 3/4", 0,25 con 3/4", y 0,25 con 3/8", en las que se decidió añadir una réplica adicional para mejorar la certidumbre los resultados.

El diseño de las mezclas se hizo de acuerdo al método de volúmenes absolutos (ACI 211 2001). El cemento utilizado fue tipo CPC-30 (cemento Portland compuesto de 30 MPa) de fabricación mexicana (ONNCCE 1999), equivalente al Portland Tipo I con adición de caliza. Para darles la fluidez necesaria a las mezclas se utilizó un reductor de agua de alto rango superplastificante Tipo A (ASTM C-494 2008) libre de cloruros. En la Tabla 4 se presentan las principales características de la muestra de agregados utilizada para la fabricación de los lotes de concreto (ASTM C29 2008, ASTM C127 2008, ASTM C128 2008 y ASTM C136 2008).

El procedimiento de compactación de las probetas fue por medio de vibración externa (ASTM C1176 2008). Una vez endurecidas y desmoldeadas las probetas se curaron por inmersión hasta el día en que se realizaron las pruebas (ASTM C192/C192M 2008), con excepción de aquellas que fueron probadas a 90 días de edad, en las cuales el curado húmedo finalizó a los 28 días.

Para cada lote de concreto se midió la resistencia a la compresión axial (ASTM C192/192M 2008) a los 28 días –denominada en adelante como la resistencia–, y para aquellos con A/C de 0,25 y 0,30 se midió la resistencia también a 7 y 90 días; a los concretos con estas dos A/C

también se les midió la porosidad (ASTM C642 2008) a los 28 días de edad. Para todas las pruebas se utilizaron probetas cilíndricas de 100 mm (4") de diámetro por 200 mm (8") de altura moldeadas en laboratorio.

Por cada lote de concreto se realizaron cinco repeticiones a la medición de la resistencia y dos repeticiones a la de la porosidad. El procedimiento experimental fue duplicado o triplicado, con excepción de una dosificación, como se aprecia en la Tabla 3. El análisis de los datos consistió en estadística descriptiva (media y desviación estándar), pruebas de diferencia de medias (Levene y Student), y análisis de regresión lineal (método de mínimos cuadrados).

## RESULTADOS

La Tabla 5 presenta para cada lote de concreto los valores promedio de resistencia a 28 días, así como los de la porosidad para las A/C señaladas antes; también incluye la cantidad de cemento utilizada en cada lote fabricado.

El lote de concreto que alcanzó la mayor resistencia a la compresión tuvo una relación A/C de 0,25, con 960 kg/m<sup>3</sup> de cemento; relación entre los agregados finos y grueso (en masa) de 0,50, agregado grueso con TMA de 3/8"; y adición de 18 ml de aditivo superplastificante por m<sup>3</sup> de cemento. El revenimiento medido en la mezcla fue de 8 cm, y ésta presentó consistencia plástica.

A la edad de 28 días, la resistencia del concreto de este lote fue 556 kg/cm<sup>2</sup> con desviación estándar ( $\sigma$ ) de 21,40 kg/cm<sup>2</sup>. El promedio de la resistencia a esta misma edad de los tres lotes de concretos fabricados con la dosificación descrita, fue de 542 kg/cm<sup>2</sup> con  $\sigma$  de 13,50 kg/cm<sup>2</sup>. Para cada lote de concreto fabricado se presenta en la Figura 1 la relación entre las variables A/C y resistencia promedio a 28 días.

A la edad de 90 días, la resistencia del concreto del lote arriba descrito fue de 603 kg/cm<sup>2</sup> con  $\sigma$  de 10,76 kg/cm<sup>2</sup>; ésta fue la mayor resistencia que se midió en el estudio. El promedio de la resistencia a esta misma edad de los tres lotes fabricados con esa dosificación, fue de 585 kg/cm<sup>2</sup> con  $\sigma$  de 18,77 kg/cm<sup>2</sup>.

En relación con la cantidad de cemento utilizada por m<sup>3</sup> de concreto, se observó que a partir de aproximadamente 850 kg/m<sup>3</sup> los incrementos de cemento no produjeron aumentos significativos en la resistencia a la compresión del material, aun cuando la A/C se hizo variar de 0,20 a 0,30 (Figura 2).

Lo anterior se probó para los seis lotes de concreto fabricados con agregado de 3/8" y cantidades de cemento superiores a 850 kg/m<sup>3</sup>, los cuales se dividieron en dos grupos (de tres lotes cada uno), el primero con cantidades de cemento entre 866 y 960 kg/m<sup>3</sup> y el segundo con cantidades entre 1 040 y 1300 kg/m<sup>3</sup>. Las medias de las resistencias de estos dos grupos fueron de 529 y 531 kg/

**Tabla 5.** Resistencias a la compresión y porosidades a 28 días, y principales parámetros de las mezclas

| A/C  | Tamaño máximo de agregado grueso (pulgadas) | Cantidad de cemento (kg/m <sup>3</sup> ) | Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> ) | Porosidad (%) |
|------|---|--|--|---------------|
| 0,20 | 3/8   | 1 300                                    | 550  | -             |
| 0,20 | 3/8   | 1 300                                    | 514  | -             |
| 0,25 | 3/4   | 960                                      | 434  | -             |
| 0,25 | 3/4   | 960                                      | 480  | 16,86         |
| 0,25 | 3/4   | 960                                      | 448  | 17,32         |
| 0,25 | 3/8   | 1 040                                    | 529  | 15,46         |
| 0,25 | 3/8   | 960                                      | 556  | 15,06         |
| 0,25 | 3/8   | 866                                      | 542  | 15,26         |
| 0,30 | 3/4   | 800                                      | 412  | -             |
| 0,30 | 3/4   | 800                                      | 415  | 17,84         |
| 0,30 | 3/4   | 1 040                                    | 467  | 18,93         |
| 0,30 | 3/8   | 866                                      | 488  | 16,79         |
| 0,30 | 3/8   | 800                                      | 453  | 16,62         |
| 0,35 | 3/4   | 628                                      | 391  | -             |
| 0,35 | 3/4   | 628                                      | 431  | -             |
| 0,40 | 3/4   | 537                                      | 334  | -             |
| 0,40 | 3/4   | 537                                      | 377  | -             |
| 0,45 | 3/4   | 466                                      | 307  | -             |

cm<sup>2</sup>, respectivamente. La diferencia entre las medias de los dos grupos no fue significativa de acuerdo a la prueba de Levene asumiendo igualdad de varianzas entre grupos (significancia de 0,20, con valor del estadístico F de 2,29), y a la prueba de Student asumiendo varianzas no iguales (significancia de 0,92, con valor de estadístico t de -0,101).

Para las tres edades que se incluyeron en el estudio (7, 28 y 90 días) se compararon las resistencias promedio de los concretos que resultaron de hacer variar la A/C (0,25 y 0,30) y el TMA del agregado grueso (3/4" y 3/8") (Figura 3). Se observó que para cada A/C las mayores resistencias se obtuvieron con el agregado grueso de menor tamaño; y cuando se combinó el agregado más pequeño (3/8") y la A/C mayor (0,30) la resistencia fue aproximadamente igual que cuando se utilizó agregado mayor (3/4") y A/C menor (0,25). Según los datos pareciera ser que el efecto de la disminución en el tamaño del agregado compensó el incremento de la A/C en cinco centésimas, obteniéndose resistencias similares a las tres edades de prueba.

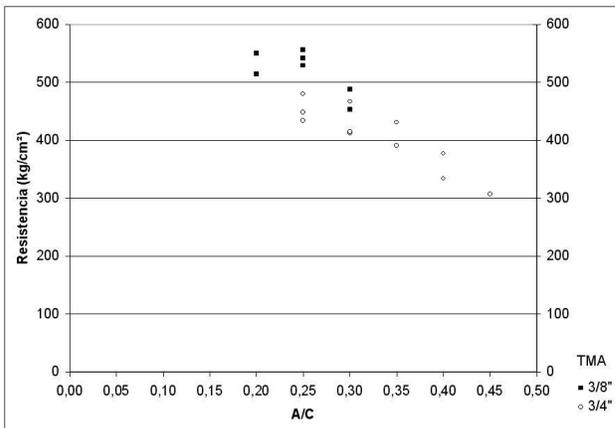


Figura 1. Resistencia a la compresión a 28 días obtenida para diferentes valores de la relación A/C

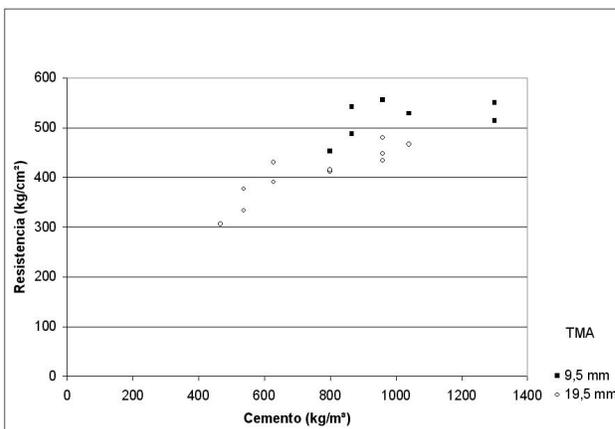


Figura 2. Resistencia a la compresión a 28 días obtenida para diferentes cantidades de cemento

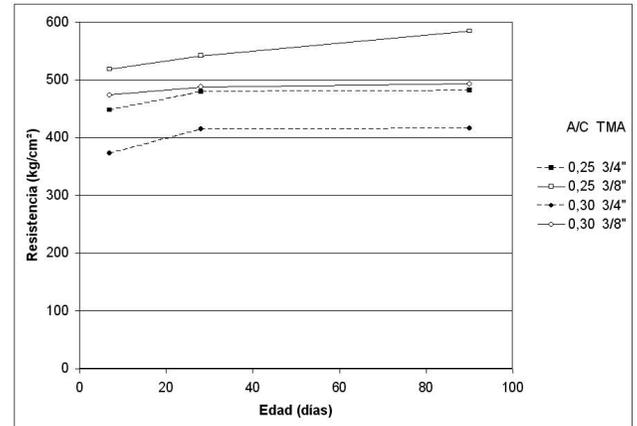


Figura 3. Resistencias promedio a 7, 28 y 90 días obtenidas para A/C de 0,25 y 0,30, utilizando agregados de 3/8" y 3/4" de TMA

Las porosidades promedio medidas fueron: para concretos con A/C de 0,25, 15,99% y  $\sigma$  de 1,02%; y para A/C de 0,30, 17,54% y  $\sigma$  de 1,07%. El lote de concreto que tuvo la menor porosidad, 15,06% (A/C de 0,25 y TMA de 3/8") tuvo la mayor resistencia.

## DISCUSIÓN

Los mayores valores de resistencia promedio que se encontraron publicados para concreto fabricados con los mismos materiales (agregados y tipo de cemento) fueron de 447 kg/cm<sup>2</sup> a la edad de 28 días y de 483 kg/cm<sup>2</sup> a los 90 días (Chuc, 2005); las más altas resistencias medidas en el presente estudio fueron aproximadamente 20% superiores a las anteriormente publicadas.

Con respecto a la relación entre la A/C y la resistencia, para los mismos materiales se publicó anteriormente (Solís *et al.* 2008a) las resistencias alcanzadas (28 días) para relaciones A/C entre 0,40 y 0,70, para una muestra grande (96 lotes de concreto). La Figura 4 compara las resistencias promedios y sus bandas confianza (95%) obtenidas tanto en el presente estudio, como en el que se publicó en 2008. Se observa que los resultados en ambos estudios son consistentes y se complementan permitiendo abarcar un amplio rango de A/C. Las diferencias en la amplitud de las bandas de confianza entre ambos estudios se pueden explicar, principalmente, por la diferencia en el tamaño de las muestras entre los estudios y por la utilización en el trabajo que se reporta de agregados gruesos con dos TMA diferentes.

Los datos del presente estudio podrían servir como valores de inicio para la dosificación de concretos con resistencias promedio relativamente altas (A/C bajas); caso para el que no se han documentado muchas experiencias utilizando el tipo de agregados con características especiales a que se refiere este reporte.

**Tabla 6.** Comparación de los promedios de las porosidades a 28 días medidas en este estudio con los reportados en estudio previo con los mismos materiales

| Relación a/c        | Esta investigación |       | Solís y Moreno (2006) |       |       |       |
|---------------------|--------------------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
|                     | 0,25               | 0,30  | 0,40                  | 0,50  | 0,60  | 0,70  |
| Media               | 15,99              | 17,54 | 19,05                 | 19,53 | 20,28 | 20,83 |
| Desviación estándar | 1,02               | 1,07  | 1,24                  | 1,63  | 1,27  | 1,26  |

A partir de un estudio de regresión se propone un modelo logarítmico que relaciona la resistencia promedio ( $f'_{cr}$ ) con la A/C, para los materiales bajo estudio, abarcando un rango de A/C de 0,20 a 0,70. (Ec. 1). El modelo fue significativo (probabilidad menor a 0,001, valor del estadístico F de 350,48) y presentó una alta correlación entre las variables (coeficiente de determinación de 0,98).

$$f'_{cr} = 134,051 - 251,720Ln(A/C) \quad (1)$$

De lo anterior se podría esperar poder fabricar concreto con los agregados estudiados con una resistencia de diseño ( $f'_c$ ) máxima comprendida en un rango aproximado de 470 a 495 kg/cm<sup>2</sup>, de acuerdo a las fórmulas publicadas por el ACI 318 (2002) para relacionar las resistencias de diseño y promedio; para calcular los valores anteriores, se consideraron desviaciones estándar de 40 a 25 kg/cm<sup>2</sup>, tal como propone el ACI 214 (2002) para niveles de control en la fabricación del concreto en obra que van de aceptable a muy bueno.

El hecho de que no se haya observado incrementos significativos en la resistencia al aumentar la cantidad de cemento más allá de 850 kg/m<sup>3</sup> (haciendo variar la A/C de 0,30 a 0,20) pudiera significar que la roca caliza, altamente porosa, haya llegado a su límite de resistencia, por lo que no se obtendrían incrementos en la resistencia del material compuesto (pasta de cemento y piedra) por el hecho de hacer más rica la pasta de cemento; o bien, que no es posible hidratar una mayor cantidad de cemento durante 28 días, aun en condiciones de saturación de la probeta. Los resultados parecen mostrar el límite de resistencia que es posible obtener en concretos preparados con los agregados bajo estudio, sin la adición de algún cementante puzolánico.

Para aquellas A/C con las cuales se fabricaron concretos con los dos TMA de agregado grueso (3/8" y 3/4"), se encontró que el agregado de menor tamaño produjo la mayor resistencia; lo anterior concuerda con estudios en los cuales se ha observado que el rango de TMA recomendado para obtener los mejores resultados en concretos de alta resistencia es de 3/8" a 5/8" (ACI 363R 2010), estando el agregado grueso de 3/4" fuera de este rango.

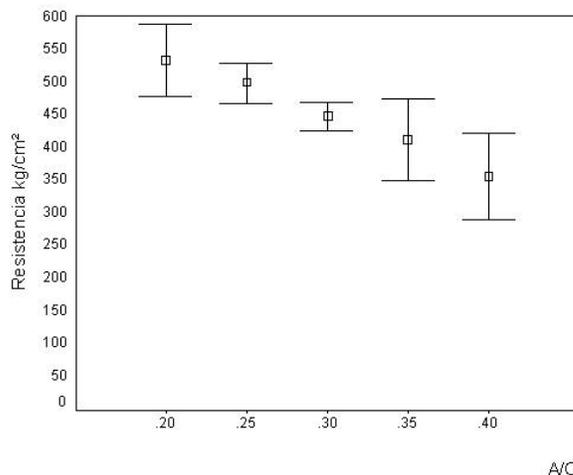
Con respecto a la relación entre la A/C y la porosidad de concretos fabricados con los mismos materiales, Solís & Moreno (2006) publicaron las porosidades promedio que midieron para diferentes relaciones A/C. La Tabla 6 presenta las porosidades promedio y desviaciones estándar del presente estudio y las de la publicación mencionada. Se observa que los resultados en ambos estudios son consistentes y se complementan dentro de un rango de A/C comprendido de 0,25 a 0,70.

Por medio de un estudio de regresión se propone un modelo que relaciona la porosidad promedio con la A/C, para los materiales bajo estudio (Ec. 2). El modelo fue significativo (probabilidad menor a 0,001, valor del estadístico F de 106,49), y presentó una alta correlación entre las variables (coeficiente de determinación de 0,96).

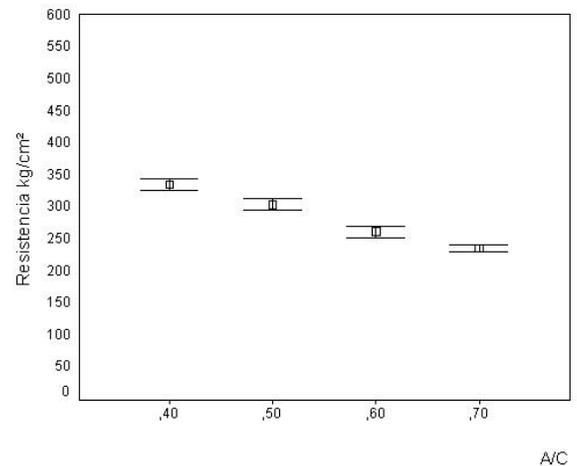
$$Porosidad = 22,619 + 4,4393Ln(A/C) \quad (2)$$

De acuerdo al criterio de valoración de la durabilidad del concreto basado en su porosidad, se ha publicado que valores de esta propiedad superiores a 15% producen concreto muy permeable e inadecuado para proteger el acero de refuerzo (Andrade, 1988). Según este criterio todos los concretos producidos con los agregados bajo estudio serían inadecuados para ambientes agresivos, aun cuando tengan una baja A/C.

El hecho es que la Península de Yucatán –ubicación Geográfica en donde se realizó el estudio– es una zona que está situada en un ambiente altamente agresivo por su gran extensión de costa y el nivel de la concentración de sales contenidas en el mar de esa región (Solís et al. 2008b). Además existen evidencias de estructuras con concreto fabricado con los agregados estudiados en este trabajo, que han durado más de medio siglo. De ahí que se puede suponer que el criterio para pronosticar la durabilidad del concreto –entendido como un material compuesto– sobre la base de su porosidad no resulta concluyente cuando los agregados son muy absorbentes; ya que en este caso la



a.- Esta investigación



b.- Publicado por Solís *et al.* (2008b).

**Figura 4.** Comparación de los promedios de las resistencias a 28 días medidas en este estudio con los reportados en estudio previo con los mismos materiales (95% de confianza)

porosidad medida en el concreto es poco sensible al cambio de la porosidad en la pasta de cemento (al variar la A/C), la cual es la que principalmente determina los procesos de difusión de los compuestos químicos en el concreto, y por tanto su durabilidad.

Una forma de probar lo anterior es por medio de la evaluación de la carbonatación del concreto, que es uno de los fenómenos ocasionado por la penetración y difusión de compuestos químicos. La Red Durar (Trocónis de Rincón et al. 1998) publicó un criterio que considera que los concretos con un coeficiente de carbonatación menor a 3 mm/año<sup>1/2</sup> tienen poco riesgo de carbonatación. Con los mismos materiales de este estudio y concretos con porosidades similares a las medidas en él, Solís et al. (2007) publicaron coeficientes de carbonatación de 3,19 mm/año<sup>1/2</sup> para A/C de 0,50 y de 1,12 mm/año<sup>1/2</sup> para A/C de 0,40 medidos a una edad de 4 años en un ambiente natural con una concentración promedio de 0,04% de dióxido de carbono. De ahí que se esperarían coeficientes de carbonatación menores a 3 mm/año<sup>1/2</sup> en los concretos fabricados con las bajas A/C del presente estudio, lo que permitiría un buen pronóstico de durabilidad, a pesar de la porosidad obtenida.

## CONCLUSIONES

Sobre la base de las resistencias promedio medidas utilizando agregados calizos de alta absorción, se concluye que la máxima  $f'_c$  que se puede utilizar para el diseño de estructuras de concreto, sin considerar adiciones puzolánicas, es aproximadamente de 500 kg/cm<sup>2</sup>; con la cual se podría obtener a largo plazo una resistencia de aproximadamente 600 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia del concreto no aumentó por incrementar la cantidad unitaria de cemento

por arriba de 850 kg/cm<sup>2</sup>.

Tanto a edad temprana como mediana se obtuvieron mayores resistencias utilizando agregados de 3/8", cuyo tamaño es menor que el que usualmente se usa para la mayoría de las estructuras hechas con concreto normal.

La porosidad de todos los concretos probados fue superior a 15%, lo cual corresponde a concretos no durables según criterios establecidos; sin embargo, cuando los agregados son muy absorbentes este criterio no puede considerarse concluyente.

## REFERENCIAS

- ACI 211 (2001). Proporcionamiento de mezclas de concreto normal, pesado y masivo. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, U.S.A.
- ACI 214-02 (2002). Evaluation of Strength Test Result of Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, U.S.A.
- ACI 318-02 (2002). Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, U.S.A.
- ACI 363R-10 (2010). Report on High-strength Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, U.S.A.
- ALONZO L. & ESPINOSA L. (2003). Estudio de las propiedades de la roca caliza de Yucatán. Ingeniería Revista Académica, Facultad de Ingeniería Universidad

- ANDRADE, C. (1988). Manual–Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras, Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 122 p.
- ASTM (2008). ASTM Volume 04.02 Concrete and Aggregates. Edition 2006, American Society for Testing and Materials.
- CERÓN, M., DUARTE, F., CASTILLO, W. (1996). Propiedades físicas de los agregados pétreos de la Ciudad de Mérida. Boletín Académico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, (31); pp. 27-40.
- CHUC, N. (2005). Estudio de un aditivo reductor de agua aplicado al concreto en clima cálido subhúmedo con agregados calizos de la Península de Yucatán. Tesis de Maestría no publicada, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México.
- HERNÁNDEZ, S. (2008). Diseño sustentable de materiales de construcción; caso del concreto de matriz de cemento Portland. Ciencia Ergo Sum, Universidad Autónoma del Estado de México, 15 (3); pp. 306-310.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. (2002). Design and control of concrete mixtures. (14th edition), Skokie, Portlan Cement Association, 372 p.
- MAYA, M. (2003). Zonas potenciales para agregados naturales en los alrededores de Medellín, Colombia. Terceras Jornadas Argentinas de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de San Juan.
- NEVILLE, A. (1996). Properties of concrete. (4th edition), New York, John Wiley and Sons, 844 p.
- NEVILLE, A. & BROOK, J. (1998). Tecnología del Concreto. México, Editorial Trillas, 329 p.
- ONNCCE (1999). NMX-C-414-ONNCCE-1999 Industria de la construcción – Cementos hidráulicos – Especificaciones y métodos de prueba.
- O'REILLY, V. (1997). Métodos para dosificar mezclas de hormigón. La Paz, Tecnocret.
- ORTIZ, P., GUERRERO, M., GALÁN, E. (1995). Caracterización petrográfica y geoquímica de las calizas de la Sierra Estepa (Sevilla) y evaluación de la calidad técnica como materiales de construcción. Estudios Geológicos, Vol. 51, Núm. 5.
- PACHECO, J. & ALONZO, L. (2003). Caracterización del material calizo de la Formación Carrillo Puerto en Yucatán. Ingeniería Revista Académica, Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán, 7 (1); pp. 7-19.
- POPOVICS, S. (1992). Concrete Materials: properties, specifications, and testing. (Second Edition), New Jersey, Noyes Publications.
- SOLÍS, R. & MORENO, E. (2006). Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo. Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, 21 (3); pp. 57-68.
- SOLÍS, R. & MORENO, E. (2008). Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. Construction and Building Materials, 22 (6); pp. 1225-1231.
- SOLÍS, R., MORENO, E., ESTRELLA, C. (2007). Carbonatación natural del concreto con agregado calizo. Memorias del XI Congreso de Control de Calidad en la Construcción, Quito, Ecuador.
- SOLÍS R., MORENO, E., ARCUDIA, C. (2008a). Estudio de la resistencia del concreto por el efecto combinado de la relación agua-cemento, la relación grava-arena y el origen de los agregados. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, 31 (3); pp. 213-224.
- SOLÍS, R., MORENO, E., JIMÉNEZ F., ROSAS, V. (2008b). Evaluación de daños por agresión ambiental en viviendas de concreto reforzado. Ingeniería Revista de la Universidad de Costa Rica, 18 (1/2); pp. 45-55.
- TROCÓNIS DE RINCÓN, O., ROMERO DE CARRUYO, A., ANDRADE, C, HELENE, P., DÍAZ, I. (1998). Manual de inspección, evaluación diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Red Temática Durar, Maracaibo, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 208 p.