



12-14 de Noviembre del 2012
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa

RESISTENCIA A TENSIÓN DEL CONCRETO ELABORADO CON AGREGADO CALIZO TRITURADO DE ALTA ABSORCIÓN

E. Moreno¹, R.G. Solís-Carcaño¹, J.L. Varela-Rivera¹, M.A. Gómez-López¹

¹ Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Avenida Industrias no contaminantes por Periférico Norte sin número, Mérida, Yucatán, México.

RESUMEN

Bajo diversas circunstancias, esfuerzos de tensión actúan en el concreto, aunque no haya sido diseñado para tales efectos. Asimismo, se diseñan elementos sometidos a esfuerzos de tensión o que por sus condiciones de desempeño no se deben agrietar, por lo que se requiere una predicción precisa de dicho valor. El estudio tiene por objeto proponer ecuaciones de predicción de resistencia a tensión por flexión y compresión a partir del conocimiento de la resistencia a compresión axial del concreto; en el que se emplean agregados calizos triturados de alta absorción. Se emplearon tres relaciones agua/cemento, entre las que se encuentran comprendidas la mayoría de las resistencias del concreto fabricado en obra. Las ecuaciones obtenidas se compararon con los modelos propuestos en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto) y el reglamento de construcciones de concreto del ACI.

Palabras clave: agregados de alta absorción, compresión axial, concreto, tensión por flexión, tensión por compresión.

ABSTRACT

Under some conditions, tensile forces interact in concrete, even though it is not designed for that effect. Likewise, elements are designed to support tensile forces or to not allowing cracking as a performing condition, thus a precise prediction of this value is required. The study has the aim to propose equations to predict flexural strength and splitting tensile strength based on the knowledge of the concrete compressive strength, cast with high-absorption crushed limestone aggregate. Three water-to-cement ratios were used, consistent with those employed on the field. Obtained equations were compared with the models proposed in the Mexico City's Construction Code (complementary technical codes for design and construction of concrete structures) and the ACI construction code for concrete.

Keywords: Compressive strength, Concrete, Flexural strength, High absorption aggregate, Splitting tensile strength

INTRODUCCIÓN

La resistencia a tensión del concreto es una propiedad importante ya que bajo diversas circunstancias actúan esfuerzos de tensión en él, aunque no haya sido diseñado para tales efectos. De igual manera, se diseñan elementos sometidos a esfuerzos de tensión o que por sus condiciones de desempeño no se deben agrietar, por lo que se requiere una predicción precisa de dicho valor. Sin embargo, los diversos reglamentos no contemplan el uso de agregado calizo triturado de alta absorción, típico de la Península de Yucatán. El estudio tiene por objeto, proponer ecuaciones de predicción de resistencia a tensión por flexión y a tensión por compresión a partir del conocimiento de la resistencia a compresión axial del concreto; en el que se emplean para su fabricación agregados calizos triturados de alta absorción.

METODOLOGÍA

En esta investigación se probaron a compresión axial, a tensión por flexión y a tensión por compresión concretos que fueron realizados con agregados de tres diferentes trituradoras de la región, las cuales fueron elegidas al azar y se identificaron como trituradoras: A, B y C. Se adquirieron los agregados en dos muestras por cada trituradora con una diferencia de 3 semanas en la obtención, constando de agregado grueso y agregado fino. Los agregados se caracterizaron siguiendo las normas ASTM. Del agregado grueso se obtuvieron: Peso Volumétrico Seco Compacto (PVSC), Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS), se realizó la granulometría, se obtuvo el tamaño máximo de agregado, el porcentaje de absorción y el peso específico relativo del material en estado saturado. Del agregado fino se obtuvieron: Peso Volumétrico Seco Suelto, se realizó la granulometría, se halló el modulo de finura (MF), el porcentaje de absorción y el peso específico relativo del material en estado saturado. Tales agregados presentan un alto porcentaje de absorción como característica particular.

El diseño de las mezclas de concreto se realizó siguiendo las especificaciones del Método de Volúmenes Absolutos del Instituto Americano del Concreto (ACI). Sin embargo, en el ajuste de agua de mezclado del diseño, se consideró como absorción efectiva del agregado el 80% de la absorción obtenida en la caracterización. Se utilizaron agua potable y cemento portland compuesto 30-R (CPC30R) que son los que comúnmente se emplean en la elaboración de morteros y concretos en la ciudad de Mérida. Se realizaron mezclas de prueba, para ajustar la cantidad de agua necesaria para obtener revenimientos de 10 cm, ya que la propuesta por el método resultó insuficiente.

Se eligió tres relaciones agua/cemento (a/c) que fueron de 0.4, 0.6 y 0.8, debido al rango de resistencias que se esperaba por diseño ($420 < f_c < 150 \text{ kg/cm}^2$) ya que en dicho rango se encuentra la mayoría de las resistencias de los concretos que se utilizan comúnmente en las construcciones. Se fabricaron mezclas de concreto por relación a/c y trituradora calculadas para 140 L, cantidad suficiente para la fabricación de 12 probetas cilíndricas, 3 vigas y para las pruebas de revenimiento, contenido de aire y peso volumétrico al concreto en estado fresco. Las probetas fueron sometidas a un proceso de curado por inmersión para su posterior ensaye a la edad de 28 días.

Así mismo, fueron seleccionadas de manera aleatoria para las pruebas de compresión axial y tensión por compresión distribuidas en 4 para la primera prueba y 8 para la segunda. Las 3 vigas fueron probadas a tensión por flexión.

Se consideró como resistencia a compresión axial, el promedio de la resistencia de las probetas y se relacionó con los resultados de las pruebas a tensión por flexión y tensión por compresión. Se

realizó una regresión por mínimos cuadrados para proponer ecuaciones de predicción de tipo exponencial y se efectuó una regresión lineal por mínimos cuadrados para relacionar las resistencias a tensión por flexión y a tensión por compresión con la resistencia a compresión axial. Así como también se hizo el análisis de significancia al 95% de los datos y el modelo utilizando Microsoft Excel®.

Se efectuó un comparativo entre las ecuaciones propuestas en este trabajo con los valores esperados producto de las fórmulas propuestas por el Reglamento del ACI 318M-08,¹ el RCDF en sus NTCC (2004)² y otras ecuaciones encontradas en la literatura.³⁻⁶

RESULTADOS

Las características físicas del agregado grueso se presentan en las tablas 1 a 3 para las trituradoras A, B, y C, respectivamente. Los valores varían entre 2.24 y 2.32 para la densidad, y entre 6.00 y 9.38 para la absorción.

Tabla 1. Características físicas del agregado grueso de la trituradora A.

<i>Núm. de Muestra</i>	<i>PVSS (kg/m³)</i>	<i>PVSC (kg/m³)</i>	<i>Densidad</i>	<i>Porcentaje de Absorción</i>	<i>TMA (mm)</i>
1	1161	1282	2.26	8.99	19
2	1109	1297	2.32	7.90	19

Tabla 2. Características físicas del agregado grueso de la trituradora B.

<i>Núm. de Muestra</i>	<i>PVSS (kg/m³)</i>	<i>PVSC (kg/m³)</i>	<i>Densidad</i>	<i>Porcentaje de Absorción</i>	<i>TMA (mm)</i>
1	1173	1279	2.32	6.23	19
2	1126	1224	2.28	6.00	19

Tabla 3. Características físicas del agregado grueso de la trituradora C.

<i>Núm. de Muestra</i>	<i>PVSS (kg/m³)</i>	<i>PVSC (kg/m³)</i>	<i>Densidad</i>	<i>Porcentaje de Absorción</i>	<i>TMA (mm)</i>
1	1059	1210	2.25	7.72	19
2	1005	1170	2.24	9.38	19

Las características físicas del agregado fino se presentan en las tablas 4 a 6 para las trituradoras A, B, y C, respectivamente. Los valores varían entre 2.38 y 2.46 para la densidad, y entre 3.60 y 6.04 para la absorción.

Los resultados de las pruebas al concreto fresco se presentan en las tablas 7 a 9 para las trituradoras A, B, y C, respectivamente. El revenimiento varió entre 6 y 16 cm, el contenido de aire varió entre 2.5 y 3 cm, y el peso volumétrico del concreto varió entre 2078 y 2218 kg/m³.

Tabla 4. Características físicas del agregado fino de la trituradora A.

<i>Núm. de Muestra</i>	<i>PVSS (kg/m³)</i>	<i>Densidad</i>	<i>Porcentaje de Absorción</i>	<i>Modulo de Finura</i>
1	1437	2.38	5.13	2.85
2	1275	2.45	6.04	3.32

Tabla 5. Características físicas del agregado fino de la trituradora B.

<i>Núm. de Muestra</i>	<i>PVSS (kg/m³)</i>	<i>Densidad</i>	<i>Porcentaje de Absorción</i>	<i>Modulo de Finura</i>
1	1252	2.46	3.60	2.78
2	1243	2.45	3.90	2.98

Tabla 6. Características físicas del agregado fino de la trituradora C.

<i>Núm. de Muestra</i>	<i>PVSS (kg/m³)</i>	<i>Densidad</i>	<i>Porcentaje de Absorción</i>	<i>Modulo de Finura</i>
1	1208	2.38	5.00	2.73
2	1129	2.38	5.80	3.35

Tabla 7. Resultados de las pruebas al concreto fresco (agregados de la trituradora A).

<i>Relación a/c</i>	<i>Revenimiento (cm)</i>	<i>Contenido de aire (%)</i>	<i>Peso Volumétrico (kg/m³)</i>
0.4	6	3	2147
0.6	14	2.5	2104
0.8	16	2.7	2106

Tabla 8. Resultados de las pruebas al concreto fresco (agregados de la trituradora B).

<i>Relación a/c</i>	<i>Revenimiento (cm)</i>	<i>Contenido de aire (%)</i>	<i>Peso Volumétrico (kg/m³)</i>
0.4	11.5	2.5	2178
0.6	9.5	2.5	2135
0.8	15	2.5	2130

Tabla 9. Resultados de las pruebas al concreto fresco (agregados de la trituradora C).

<i>Relación a/c</i>	<i>Revenimiento (cm)</i>	<i>Contenido de aire (%)</i>	<i>Peso Volumétrico (kg/m³)</i>
0.4	6	3	2105
0.6	9	2.5	2218
0.8	13	3	2078

Los resultados de la resistencia a la compresión y a la tensión se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados promedio de las pruebas a las probetas a los 28 días.

<i>Trituradora</i>	<i>Relación a/c</i>	<i>f_c promedio (kg/cm²)</i>	<i>f_{ct} promedio (kg/cm²)</i>	<i>f_r promedio (kg/cm²)</i>
A	0.4	401.45	31.33	38.68
	0.6	228.24	28.99	39.57
	0.8	170.66	22.74	32.41
B	0.4	407.24	37.1	50.78
	0.6	295.7	32.85	46.09
	0.8	207.96	28.43	36.45
C	0.4	297.5	33.40	45.29
	0.6	245.9	31.68	39.81
	0.8	143.44	20.59	27.11

De los datos de la Tabla 10 se calculó el rango de variación de la resistencia a tensión por flexión del concreto (f_r) que estuvo entre 9.6 y 21.7 % del valor de la resistencia a compresión axial. Del mismo modo se calculó el rango de variación de la resistencia a tensión por compresión del concreto (f_{ct}) y estuvo entre 7.8 y 14.3 % de la resistencia a compresión axial del mismo.

Los datos obtenidos de manera experimental se compararon con las ecuaciones propuestas por las NTCC² y el ACI 318M-08,¹ observándose una diferencia entre las resistencias y las predicciones hechas por las fórmulas, tanto para el caso de resistencia a tensión por flexión (Figura 1) como para la resistencia a tensión por compresión (Figura 2). Sin embargo, los datos experimentales presentaron un comportamiento similar a las expresiones de los reglamentos y en general, presentaron una resistencia mayor a los resultados de las fórmulas.

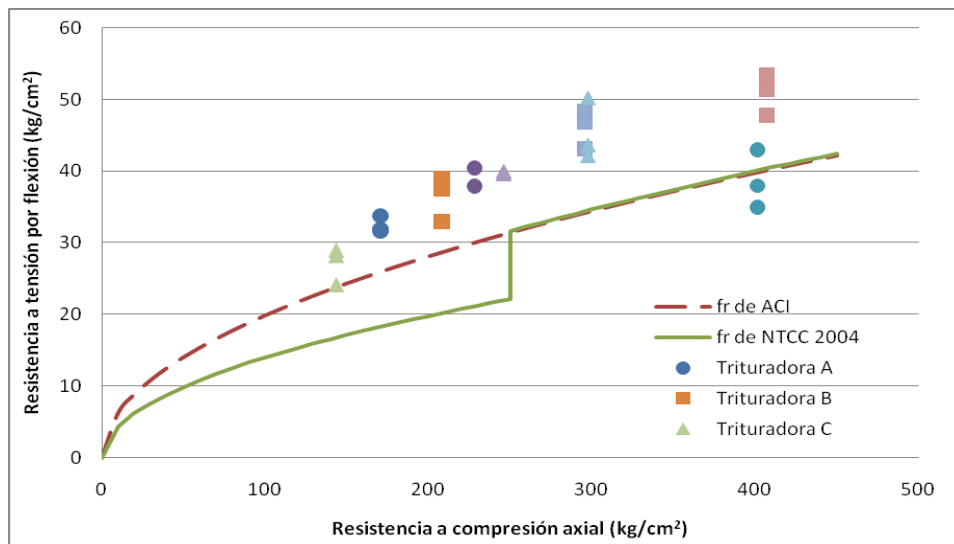


Figura 1. Datos experimentales y propuestas de reglamentos de f_r .

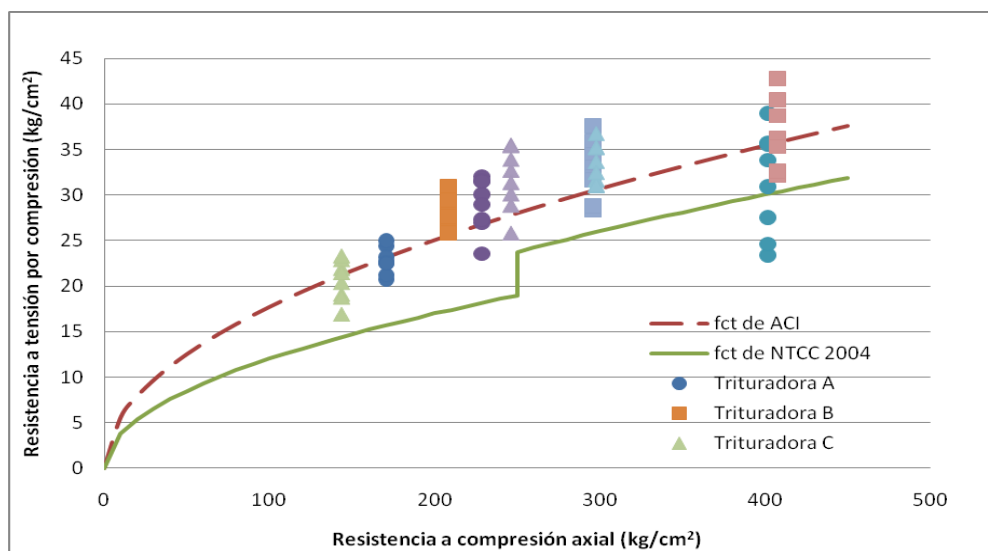


Figura 2. Datos experimentales y propuestas de reglamentos de f_{ct} .

La tendencia que siguen los valores medios de la resistencia a tensión por flexión corresponde a la ecuación $f_r = 3.1555 (f'_c)^{0.4542}$. Por su parte, la tendencia que siguen los valores medios de la resistencia a tensión por compresión corresponde a la ecuación $f_{ct} = 2.1265 (f'_c)^{0.4731}$. Sin embargo se realizó también un ajuste por el método de mínimos cuadrados para proponer fórmulas del tipo $f_r = A \sqrt{f_c}$ y $f_{ct} = B \sqrt{f_c}$, donde “A” y “B” son constantes y f_c es la resistencia a compresión axial obtenida por medio de probetas.

Así, la fórmula obtenida es $f_r = 2.374 \sqrt{f_c}$ (kg/cm²), si aceptamos que el término independiente es igual a cero, ya que su intersección con los ejes coordenados debe ser en el origen (0,0), es decir, que cuando la resistencia a compresión axial es cero la resistencia a tensión por flexión es también cero. El análisis de significancia arrojó un valor de $F = 240.8441$ y un valor crítico de $F = 2.77E-15$ para un 95% de confianza. Como F es mayor que el valor crítico, entonces el modelo es significativo, teniendo un coeficiente de correlación (R^2) de 0.895.

La fórmula que se obtiene de este modo es $f_{ct} = 1.795 \sqrt{f_c}$ (kg/cm²), si aceptamos que el término independiente es igual a cero, de igual manera que como se justificó con la resistencia a tensión por flexión. El análisis de significancia realizado para f_{ct} , arrojó un valor de $F = 574.9643$ y un valor crítico de $F = 9.83E-38$ con un 95% de confianza. Como F es mayor que el valor crítico, entonces el modelo es significativo teniendo un coeficiente de correlación (R^2) de 0.88.

DISCUSIÓN

El agregado grueso utilizado presentó un porcentaje de absorción considerablemente mayor al límite propuesto en este trabajo para considerarla como alta (mayor a 3.5%), sus valores oscilaron entre 6 y 9.38%. También se observó una densidad del agregado relativamente baja comparado con las densidades especificadas para concreto clase 1 por las NTCC,² característica presente en todas las muestras.

El porcentaje de absorción del agregado fino presentó valores superiores a 3.5%, estando entre 5 y 6%; excepto por el agregado fino de la trituradora **B**, en cuyo caso su porcentaje de absorción estuvo ligeramente por encima del valor límite (3.5%), variando entre 3.6 y 3.9%.

Los valores del módulo de finura del agregado fino fueron altos, por lo que se tiene mayor cantidad de material grueso y puede considerarse como una arena gruesa.

De las características de los agregados, podemos inferir que se trata de un agregado relativamente ligero y con una alta absorción, tal como se esperaba.

El valor de revenimiento por diseño fue de 10 cm, sin embargo varió debido a que se aumentó deliberadamente la cantidad de agua de mezclado para intentar obtener el revenimiento propuesto. El contenido de aire de las mezclas osciló entre 2.5 y 3%, lo cual son valores muy cercanos al 2% que se estableció por diseño. Los valores del peso volumétrico de las mezclas realizadas presentó valores entre 2100 y 2200 kg/m³; la densidad del agregado grueso influyó para que se obtuvieran valores similares, ya que mostró valores de densidad relativamente bajos en la mayoría de los casos.

La resistencia a tensión por flexión del concreto estuvo entre un 10% y un 20%. Se realizó una comparación entre todas las ecuaciones empíricas encontradas en la literatura, tal como se presenta en la Figura 3, que muestra las tendencias propuestas por los reglamentos en cuestión y diversos

autores.³⁻⁶ El modelo propuesto en este trabajo es muy similar a las ecuaciones de Wight-McGregor³ y el límite superior de Cañas⁴ a tensión por flexión.

La resistencia a tensión por compresión del concreto varió entre un 8% y un 15% de la resistencia a compresión axial. También se realizó un comparativo con las ecuaciones encontradas en la literatura Figura 4, observándose que la ecuación del ACI 318M-08 se comporta de manera muy similar a la propuesta en esta investigación.

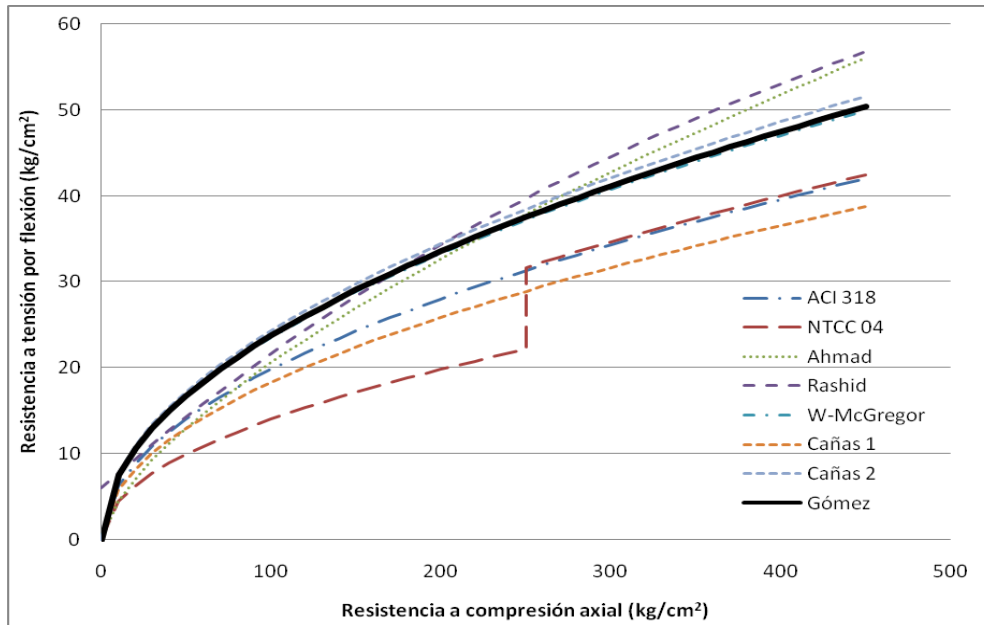


Figura 3. Comparativa de propuestas para la obtención de f_r .

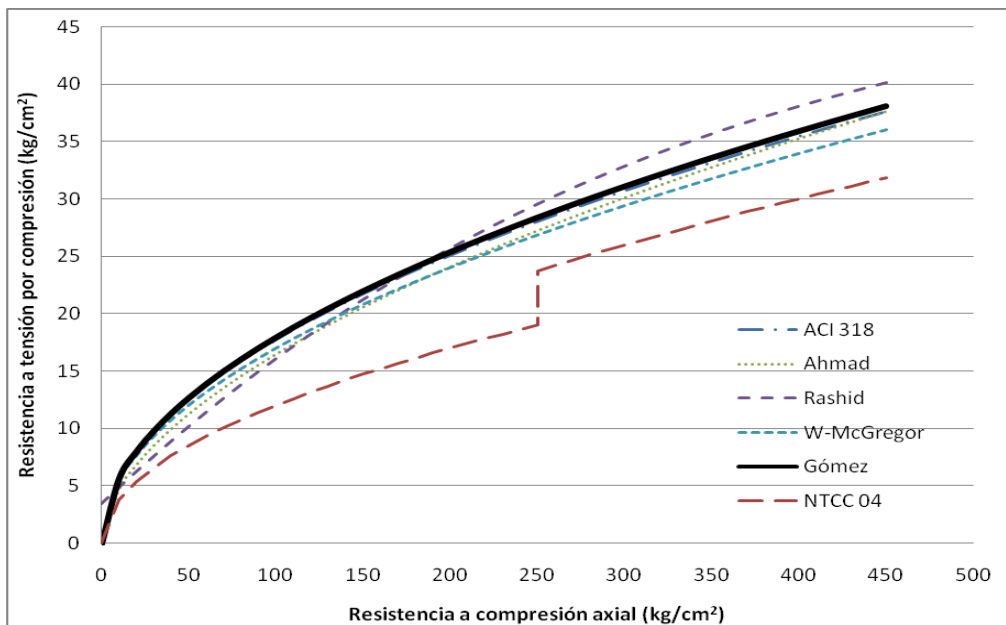


Figura 4. Comparativa de propuestas para la obtención de f_{ct} .

CONCLUSIONES

Los datos de las probetas de concreto simple con agregado calizo triturado de alto porcentaje de absorción presentaron consistencia con los datos de otros autores al obtener las resistencias a compresión axial, tensión por flexión y tensión por compresión.

Las fórmulas propuestas en este trabajo fueron desarrolladas a partir de la tendencia de datos experimentales, y son: tensión por flexión (f_r) = $2.374 \sqrt{f_c}$ o $f_r = 3.1555 (f_c)^{0.4542}$, y tensión por compresión (f_{ct}) = $1.795 \sqrt{f_c}$ o $f_{ct} = 2.1265 (f_c)^{0.4731}$ (todas en kg/cm^2). Sin embargo, las ecuaciones de tipo exponencial propuestas tienen un coeficiente de correlación de 0.648 y de 0.609 para tensión por flexión y tensión por compresión, respectivamente; mientras que las otras ecuaciones propuestas tienen un coeficiente de correlación de 0.895 y 0.880 para tensión por flexión y tensión por compresión, respectivamente.

De manera comparativa entre los reglamentos tomados como referencia (NTCC y ACI 318M-08), el que se comporta de manera más próxima a las ecuaciones presentadas en este trabajo de resistencia a tensión por flexión y a tensión por compresión, utilizando agregados calizos triturados, es el ACI 318M-08.

Si se incluyen todas las fórmulas encontradas en la bibliografía se distingue que las mejores alternativas a las ecuaciones presentadas en este trabajo son: las propuestas por Wight-McGregor junto con la del límite superior de Cañas para el caso de tensión por flexión, y la expresión del ACI 318M-08 para el caso de tensión por compresión.

REFERENCIAS

1. Building Code Requirements for structural concrete and Commentary (ACI 318M-08). Cap. 8. p. 107.
2. Reglamento de construcciones para el Distrito Federal. Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto. 2004. Pp. 103-104. Gaceta oficial del Distrito Federal.
3. J. K. Wight, J. G. McGregor "Reinforced Concrete. Mechanics and Design". Fifth Edition. 2009. Prentice Hall. Pp. 56-59.
4. M. A. Cañas Lazo, M. E. Retana Martínez, "Establecimiento de una relación entre el módulo de ruptura (f_r) y la resistencia a la compresión (f_c) para mezclas de concreto hidráulico en el Salvador". 1999. Disponible en: http://www.minas.upm.es/relext/Red-Cyted-XIII/web-rimin/rimin1/jornadas/01ibermac_pdf/07_Hormigon/Canas.pdf. Recuperado el 12 Mayo de 2008.
5. M. A. Rashid, M. A. Mansur, P. Paramasivam. "Correlations Between Mechanical Properties of High-Strength Concrete". Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE. Volume 14, Number 3. May/June 2002. Pp. 230-238.
6. S. H. Ahmad, S. P. Shah. "Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete". PCI Journal. Volume 30, Number 4-6. 1985. Pp. 92-119.