

CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL HORMIGÓN A PARTIR DE LOS VALORES DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

Ing. Carlos Rodríguez García¹

1. Universidad de Matanzas, Vía Blanca, km 3 ½, Matanzas, Cuba.

Resumen.

Conocer el valor de resistencia a tracción del hormigón es de suma importancia para los profesionales, esta tensión define varios parámetros importantes como la fisuración. La obtención de estos valores con exactitud es muy difícil, proponiendo varias normativas ecuaciones para obtener este valor a partir de la resistencia característica a compresión. El presente trabajo presenta una comparación entre varias propuestas.

***Palabras claves:** resistencia a tracción; resistencia característica; hormigón.*

Introducción

El hormigón es un material de construcción altamente utilizado por el hombre moderno, por lo tanto conocerlo es de suma importancia para quien lo trabaja, para quien lo produce, para quien construye con él y para quien proyecta bajo sus principios.

Son altamente conocidas las buenas prestaciones del hormigón, como material pétreo, trabajando bajo esfuerzos de compresión, pero en algunas situaciones se hace necesario conocer también su resistencia a tracción, esta juega un papel fundamental en ciertos fenómenos, tales como la fisuración, el esfuerzo cortante, la adherencia de las armaduras, etc. Por otra parte en ciertos elementos de hormigón, como en el caso de pavimentos, puede ser más interesante el conocimiento de la resistencia a tracción que la de compresión, por reflejar mejor ciertas cualidades, como la calidad y limpieza de los áridos (Jiménez, *et al.*, 2001).

La evaluación de la resistencia a tracción directa resulta siempre compleja en cualquier laboratorio, por lo tanto se hace necesario conocer un valor de esta a partir del ensayo más generalizado, el de resistencia a compresión.

Desarrollo

Existen 3 formas de obtener en el laboratorio el valor de resistencia a tracción del hormigón, estos son el ensayo por flexión (flexotracción), por hendimiento (ensayo de tracción indirecta, o ensayo brasileño) y por el ensayo de tracción axial.

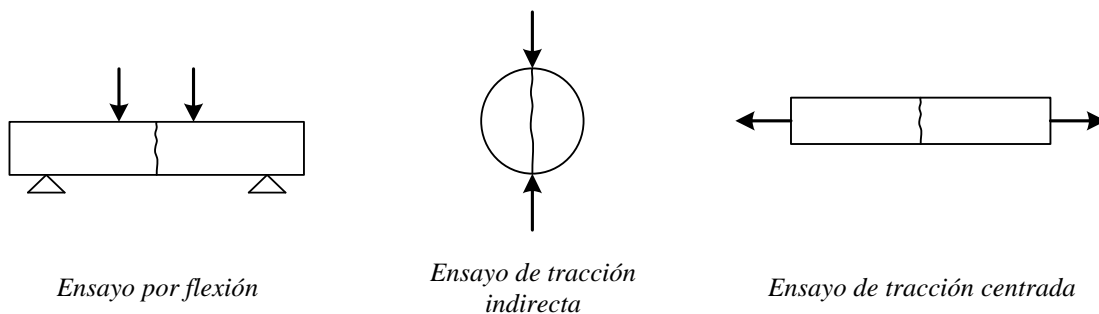


Figura 1. Resistencias del hormigón a tracción

Fuente: Jiménez, *et al.*, 2001.

El último método no es práctico, dada las dificultades que entraña su realización (al sujetar la probeta entre las mordazas de la prensa se debilita a sección de agarre y la probeta rompe junto a la mordaza, lo que falsea el ensayo), por lo que se emplean normalmente los otros dos. (Jiménez, *et al.*, 2001)

A partir del ensayo por flexión podemos obtener valores de resistencia a tracción del hormigón, calculando en esfuerzo de tracción por flexión a partir de la carga de fractura de

una viga de prueba en hormigón simple. Debido a que este esfuerzo nominal se calcula bajo la suposición de que el concreto es un material elástico, y dado que este esfuerzo de flexión está localizado en la superficie exterior, éste tiende a ser mayor que la resistencia del concreto en tensión axial uniforme. Este esfuerzo es entonces una medida de la resistencia a la tensión axial real pero no es idéntica a ella. (Nilson, *et al.*, 2004)

El ensayo de tracción indirecta es otra vía, más reciente, para obtener el valor de la resistencia a tracción del hormigón, en este tipo de ensayo según Nilson (2004) se coloca un cilindro de hormigón, igual al utilizado para los ensayos de compresión, se introduce en una máquina para ensayos de compresión en posición horizontal, de manera que la compresión se aplique uniformemente a lo largo de dos líneas generadoras opuestas. Entre las platinas de compresión de la máquina y el cilindro se insertan cojinetes con el fin de uniformar y distribuir la presión. Puede demostrarse que para un cilindro elástico sometido a carga de esta manera, se genera un esfuerzo de tracción aproximadamente uniforme en dirección perpendicular al plano de aplicación de la carga. Correspondientemente, los cilindros sometidos a este ensayo se parten en dos mitades a lo largo de este plano para un esfuerzo determinado. Debido a las condiciones locales de esfuerzo en las líneas de carga y a la presencia de esfuerzos perpendiculares a los esfuerzos de tracción antes mencionados, los resultados de los ensayos de tensión indirecta no son idénticos a la resistencia a la tracción axial real, pero se cree que son una buena medida de ella.

Los resultados de todos los tipos de ensayos para determinar la resistencia a la tracción muestran una dispersión considerablemente mayor que la de los ensayos a compresión (Nilson, *et al.*, 2004).

Consecuentemente con lo expresado anteriormente varios autores ofrecen ecuaciones para obtener estos valores a partir de la resistencia característica a compresión del hormigón, por supuesto, en dependencia de la región y las normativas. Estos son los casos de los textos, Design of concrete structures. Thirteenth edition (2004), Hormigón Armado 14a Edición (2001), y las normativas Instrucción de Hormigón Estructural (2008), Norma cubana 207 del 2003 (NC 207 2003).

El caso de la norma ACI 318 establece que cuando los criterios de diseño de indiquen el empleo de un valor de resistencia a la tracción del hormigón, deben realizarse ensayos de laboratorio para establecer un valor de la resistencia característica del hormigón a tracción en correspondencia a la resistencia característica del hormigón a compresión (ACI 318:2005).

Design of concrete structures. Thirteenth edition. (2004)

La resistencia a la tracción determinada con cualquiera de los ensayos anteriores no presenta una buena correlación con la resistencia a la compresión f'_c . Según Nilson (2004) la resistencia a la tracción para hormigones de arena y grava depende principalmente de la resistencia de la unión entre la pasta de cemento endurecida y el agregado, mientras que para hormigones livianos depende principalmente de la resistencia a la tracción de los

agregados porosos. Por otro lado, la resistencia a la compresión depende menos de estas características particulares.

Por lo tanto las resistencias a la tracción y a la compresión no son de ningún modo proporcionales y que cualquier incremento en la resistencia a la compresión, tal como el que se logra bajando la relación agua-cemento, está acompañado por un incremento porcentual mucho menor en la resistencia a la tracción (Nilson, *et al.*, 2004); recomendando entonces para el cálculo los valores obtenidos según la tabla 1.

Tabla 1. Rangos aproximados de resistencia a tracción del hormigón.

Fuente: Nilson, *et al.*, 2004.

	Concreto de peso normal (lb/pulg ²)	Concreto de peso liviano (lb/pulg ²)
Resistencia a la tracción directa f'_t	3 a $5\sqrt{f'_c}$	2 a $3\sqrt{f'_c}$
Resistencia a la tracción indirecta f'_{ct}	6 a $8\sqrt{f'_c}$	4 a $6\sqrt{f'_c}$
Módulo de rotura f_r	8 a $12\sqrt{f'_c}$	6 a $8\sqrt{f'_c}$

Instrucción de Hormigón Estructural. EHE. (2008)

Esta normativa permite, al igual que otras, a falta de resultados de ensayos a tracción, estimar la resistencia media del hormigón a tracción ($f_{ct,m}$) a partir de la resistencia característica a compresión (f_{ck}), para esto utiliza las siguientes fórmulas:

$$f_{ct,m} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{para } f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2 \quad (1)$$

$$f_{ct,m} = 0,58 \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{para } f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

Si no se dispone de resultados de ensayos podrá estimarse también la resistencia característica inferior a tracción ($f_{ct,k}$) en función de la resistencia a tracción media, representando un 70% de esta. (EHE, 2008). Quedando entonces definitivamente la ecuación de la resistencia característica a tracción en función de la resistencia característica a compresión de la siguiente forma:

$$f_{ct,k} = 0.21 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (1)$$

Norma Cubana NC 207:2003.

La normativa cubana, del año 2003 norma la obtención de la resistencia a la tracción directa del hormigón (R_b) a partir de ensayos del mismo nombre con probetas normadas, según norma ISO 1920-76. Propone que igualmente, la resistencia directa del hormigón puede ser deducida mediante el ensayo brasileño, consistente en el hendimiento de probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, al ser sometidas a presión lineal diametral a los 28 días de edad. (ONN, 2003)

Como se comentó anteriormente el valor de resistencia característica a tracción (R_{bk}) del hormigón en ocasiones es de difícil obtención, para esto la norma cubana propone que la resistencia característica a la compresión (R'_{bk}) según la siguiente fórmula:

$$R_{bk} = 0.21 \sqrt[3]{(R'_{bk})^2} \quad (3)$$

Coincidiendo con la normativa española EHE-08.

Hormigón Armado 14a Edición (2001)

Este texto propone que de no disponer de ensayos comparativos, para la resistencia a tracción axial puede tomarse el 90 % de la resistencia por hendimiento, y el 50 %, aproximadamente de la resistencia a flexotracción.

Los valores obtenidos en los ensayos para la resistencia a tracción son bastante dispersos y su variación puede extenderse de muchas variables (entre ellas la naturaleza y limpieza de los áridos).

Este texto coincide con la EHE en las fórmulas $f_{ct,m} = 0.30 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \text{ (MPa)}$ y $f_{ct,k} = 0.21 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \text{ (MPa)}$ para la obtención de los valores de resistencia característica y media a tracción a partir de la resistencia característica a compresión. Recomienda además para el cálculo del momento de fisuración en piezas flexadas un factor de 0,37, que corresponde a la resistencia a tracción por flexión. Se define igualmente que la elección del valor de resistencia a tracción debe tomarse en dependencia del tipo de problema, para el estado límite de formación de fisuras debe tomarse el valor característico y para el estudio de deformaciones, el medio. (Jiménez, *et al.*, 2001)

Tendencias

Según lo analizado existen dos tendencias para el cálculo de la resistencia característica a tracción del hormigón (f_c) a partir del valor de la resistencia característica a

compresión (f'_c), una a partir de la curva que describe la raíz cuadrada (señalada como 1/2 en la figura 2) de este valor y otra a partir de la raíz cúbica del cuadrado de la misma (señalada como 2/3 en la figura 2). En la siguiente figura se pueden observar ambas tendencias.

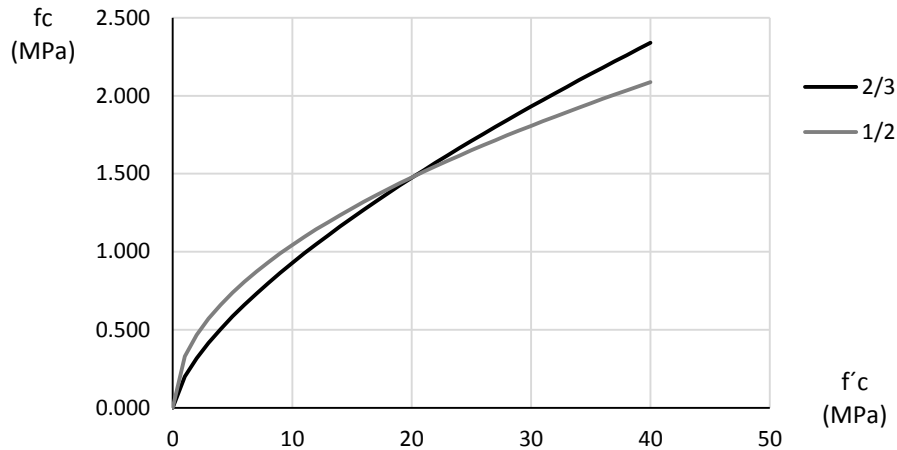


Figura 2. Resistencia a la tracción del hormigón.

Se puede observar como a pesar de no diferir grandemente para los las resistencias de hormigones frecuentemente utilizados, solo coinciden para valores cercanos a los 20 MPa.

Análisis de la obtención directa de la resistencia a tracción.

Conjuntamente con estas fórmulas para obtener el valor de la resistencia característica a tracción del hormigón (f_c) se utiliza otra para obtener de forma rápida este valor dependiendo de igual forma de la resistencia característica a compresión (f'_c):

$$f_c = 0.10 \cdot f'_c \quad (4)$$

Este estimador se ha considerado tradicionalmente para cálculos de limitado rigor (Hernández y Hernández, 2011), otros autores, como Leonhardt (1967) proponen de igual forma este valor como un aproximado directo.

Utilizando esta ecuación se puede obtener de forma rápida el valor de la resistencia a tracción, pero estos valores difieren considerablemente para hormigones mayores a 15 MPa (Figura 2), siendo realmente esos hormigones los más utilizados.

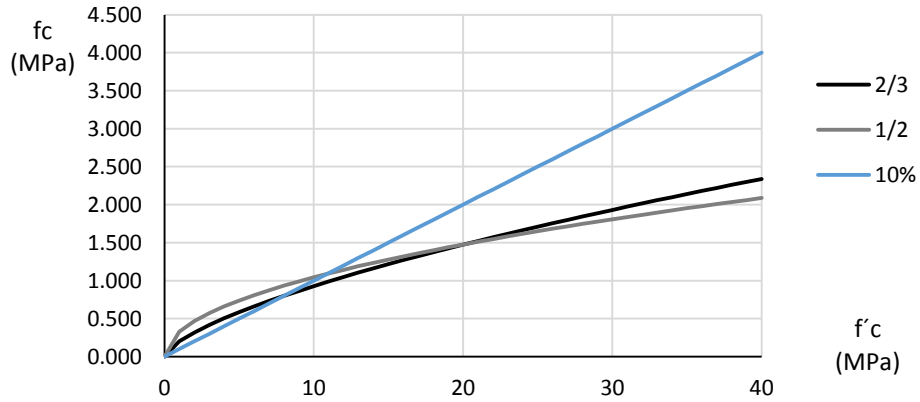


Figura 3. Resistencia a la tracción del hormigón. Aproximación 10 %.

Por lo tanto, este valor no responde a la necesidad de obtener con rapidez una aproximación al valor de resistencia a tracción de hormigón, puesto que el valor brindado, si bien puede ser calculado rápidamente, solo dividir por 10, no propone un valor certero, que por ejemplo, para 30 MPa difiere en más de un 65 % y 55 % para 1/2 y 2/3 respectivamente.

Es propuesto entonces para la obtención de un valor con cierto valor de aproximación y de forma rápida la utilización del coeficiente 0.06 (ecuación 5).

$$f_c = 0.06 \cdot f'_c \quad (5)$$

En el siguiente gráfico (figura 4) se puede observar como este coeficiente puede cumplir con la encomienda de brindar una aproximación inicial de forma rápida del valor de resistencia a tracción, nótese como estos valores se aproximan para valores de hormigones ente los 30 y los 35 MPa, resistencias de hormigones utilizadas comúnmente

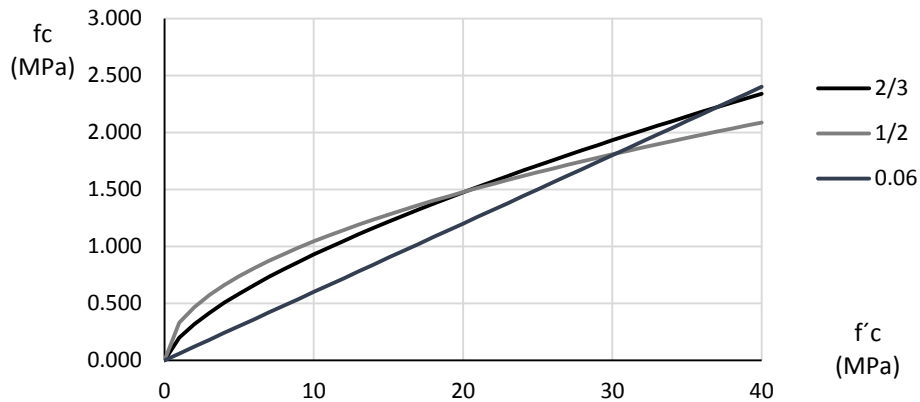


Figura 3. Resistencia a la tracción del hormigón. Aproximación 6 %.

Conclusiones

Es de suma importancia obtener el valor de la resistencia característica a tracción del hormigón. Dada las dificultades de los ensayos normalizados con este fin, varios autores y normativas brindan ecuaciones para obtener estos resultados a partir de la resistencia característica a compresión del mismo, recomendando algunos autores la utilización de un coeficiente de un 10 % con este fin. En este trabajo se ha demostrado como este coeficiente, utilizado durante años, si bien brinda un valor muy fácil de calcular, difiere para los hormigones frecuentemente utilizados, quedando como propuesta la utilización de otro de un 6 % de la resistencia característica a compresión del hormigón para calcular su homóloga a tracción.

Bibliografía.

American Concrete Institute, 2005. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete. ACI 318 2005*. MICHIGAN: American concrete Institute (USA).

EHE-08. 2008. *Instrucción de Hormigón Estructural*. España.

Hernández, J. J.; Hernández, J. A., 2010. *Hormigón Estructural. Diseño por estados límites. (Parte 1)*, (Cuba).

Jiménez Montoya, P.; García Meseguer, A.; Morán Cabré, F. 2001. *Hormigón Armado 14a Edición*. Gustavo Gili. ISBN: 84-252-1825-X. Barcelona (España).

Leonhardt, F., 1967. *Hormigón Pretensado*, Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento (España)

Nilson, A.; Darwin, D.; Dolan, C. 2004. *Design of concrete structures. Thirteenth edition*. McGraw-Hill.

Oficina Nacional de Normalización, 2003. *NC 207:2003. Requisitos generales para el diseño y construcción de estructuras de hormigón*. ONN (Cuba)