

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA ESTIMAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO DEL CONCRETO

María Fernanda Serrano-Guzmán¹; Diego Darío Pérez-Ruiz²

RESUMEN

En el análisis y diseño de estructuras de concreto reforzado es utilizado el módulo de elasticidad (Módulo de Young) del concreto E_c , parámetro relacionado con la resistencia a compresión del mismo. En Colombia, el módulo de elasticidad usado en el diseño estructural está basado en los valores recomendados en la “Norma Sismo Resistente de 1998 (NSR-98)”. Para el caso colombiano se tiene un valor medio a utilizar sin considerar el origen del agregado, el cual está definido en el NSR-98 por la ecuación $E_c = 12,500\sqrt{f'_c}$ (en kg/cm²). Sin embargo, son varias las ecuaciones que se han planteado en diferentes países para estimar E_c .

En el presente estudio se analizaron resultados de 611 especímenes de concreto preparados en plantas concretoras del área metropolitana de Bucaramanga (Colombia), respetando que la muestra seleccionada correspondiera a una resistencia de 210 kg/cm². Los datos obtenidos se utilizaron para evaluar las ecuaciones propuestas para estimar el E_c del concreto muestreado, obteniendo así ecuaciones ajustadas para la región. Se propone utilizar la ecuación $E_c = 6,250\sqrt{f'_c}$ (en Kg/cm²) en lugar de la fórmula sugerida por el NSR-98. Por otro lado, evaluando la fórmula propuesta por el ACI, se recomienda utilizar esta ecuación cuando se tenga conocimiento del peso unitario W del concreto y trabajar la ecuación ajustada a $E_c = 0.054W^{1.5}\sqrt{f'_c}$ en Kg/cm². Se observó que para concretos con $W = 2,375$ Kg/m³ y $f'_c = 210$ kg/cm², la ecuación propuesta por el NSR-98 sobrestima los valores de E_c en un 50%, entre tanto que la ecuaciones propuestas por el ACI y el CEC sobrestiman el E_c en un 24% y 46.2% respectivamente.

Palabras claves: Concreto, módulo de elasticidad, resistencia, asentamiento.

ABSTRACT

During analysis and design of reinforced concrete structures is required the elasticity or Young Modulus of Concrete, E_c , which is related to the compressive strength. At the present the modulus of elasticity that is used in structural design in Colombia is based in the values recommended by the 1998 “Norma Sismo Resistente (NSR-98)”, $E_c = 12,500\sqrt{f'_c}$ (kg/cm²), which does not account for locally available aggregates.

A whole of 611 concrete specimens were cured, each one with a compressive strength of 210 kg/cm². The results analysis shown that the equation proposed by NSR-98 must be adjusted to be applied locally, recommending $E_c = 6,250\sqrt{f'_c}$ (Kg/cm²). In addition, it is recommended to use the equation proposed by ACI when it is known the unit weight of the concrete. The modified ACI equation proposed is given by $E_c = 0,054W^{1.5}\sqrt{f'_c}$ (Kg/cm²). Furthermore, for concretes with $W = 2,375$ Kg/m³ and $f'_c = 210$ kg/cm² the NSR-98 equation overestimate the E_c in 50% Meanwhile, the ACI and the European Standard Equation overestimate the E_c in 24% and 46.2% respectively.

Key words: Concrete, elasticity modulus, strength, slump.

RESUMO

Na análise e no desenho das estruturas de concreto reforçado utiliza-se o módulo de elasticidade ou de Young do concreto E_c , parâmetro que está relacionado com a resistência e a compressão do mesmo. Na Colômbia, o módulo de elasticidade que se usa no desenho estrutural está baseado nos valores recomendados pela Norma Sismo Resistente de 1998 (NSR-98). Para o caso colombiano temos um valor médio a utilizar sem considerar a origem do agregado, o qual está definido pelo NSR-98 pela equação $E_c = 12,500\sqrt{f'_c}$ (em kg/cm²). No entanto, são várias as equações que se tem planejado em diferentes países para estimar E_c .

¹ PhD. Ingeniería Civil, Directora General de Investigaciones, Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga.

² PhD. Ingeniería Civil, Profesor Asociado, Pontificia Universidad Javeriana, Cali.

No presente estudio foram analisados os resultados de 611 espécies de concreto que foram preparados em plantas de concreto da Área Metropolitana de Bucaramanga (Colômbia), respeitando que a mostra selecionada correspondesse a uma resistência de 210 kg/cm². Os dados obtidos foram utilizados para avaliar as equações propostas para estimar o E_c do concreto mostrado, obtendo desta forma umas equações ajustadas para a região. Propomos então, utilizar a equação $E_c = 6,250\sqrt{f'_c}$ (em Kg/cm²) em lugar da fórmula sugerida pelo NSR-98. Por outro lado, avaliando a fórmula proposta pelo ACI, recomenda-se utilizar esta equação quando tenha conhecimento do peso unitário W do concreto e trabalhar a equação ajustada a $E_c = 0.054W^{1.5}\sqrt{f'_c}$ em Kg/cm². Observou-se que para concretos com $W = 2,375$ Kg/m³ e $f'_c = 210$ kg/cm², a equação proposta pelo NSR-98 superestima os valores de E_c em 50%, enquanto que as equações propostas pelo ACI e o CEC superestimam o E_c em 24% e 46.2% respectivamente.

Palavras chaves: concreto, módulo de elasticidade, resistência, assentamento.

INTRODUCCIÓN

El concreto es definido en la terminología de ASTM (C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates) como un material compuesto que consiste en un medio de enlace dentro del cual se embeben partículas o fragmentos de agregado (Carino, 1994). Para ello se utiliza un cemento hidráulico, agua, triturado y arena (ASTM, 1994). Con respecto a los agregados finos se ha encontrado que la forma y la textura de las partículas de la arena podrían mejorar la resistencia del concreto ya que se logra una mejor interconexión entre partículas (Cortes *et. al.*, 2008). Con respecto al agregado grueso, ha quedado reportado que concretos preparados con agregados de tamaño promedio 5 mm, presentan resistencias más altas que los agregados de tamaño promedio 10 mm, para una misma relación agua/cemento (Cadoni *et. al.*, 2001). Cabe decir que factores como la forma del agregado pueden llegar a afectar la manejabilidad y viscosidad de las mezclas (Serrano *et. al.*, 2009; Erdogan *et. al.*, 2008; Westerholm *et. al.*, 2008; Al-Rousan *et. al.*, 2007; Giaccio G. y R. Zerbino, 1998). Por tal razón, para la producción de concretos livianos o concretos de alto desempeño se debe evaluar el efecto en el módulo de elasticidad de factores como: agregados a utilizar, la relación agua/cemento (A/C), la manejabilidad de las mezclas y la durabilidad de las mismas.

La resistencia del concreto depende de sus propiedades mecánicas, las cuales son necesarias para inferir las posibles deformaciones que podrían experimentar los miembros estructurales ante la acción de cargas. El módulo de elasticidad del concreto es un propiedad mecánica que refleja la habilidad que tiene el concreto para deformarse elásticamente, el cual puede ser obtenido aplicando cargas conocidas sobre un espécimen para evaluar la deformación del material (Pauw, 1960). Este artículo presenta el análisis de sensibilidad para la selección de la ecuación más adecuada con la cual se puede determinar el módulo de elasticidad estático, basado en los resultados de ensayos realizados a concretos y agregados de la Bucaramanga (Colombia).

MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO (E_c)

El Módulo de elasticidad estático del concreto se determina a través de la prueba estándar de compresión definida en la “Norma ASTM C469”, preparando especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, los cuales son sometidos a una carga axial incrementada gradualmente hasta que el cilindro del concreto falla. Las deformaciones transversales y longitudinales son medidas continuamente durante la aplicación de la carga incremental (Balendran, 1995; Malaikah *et.al.*, 2004; Topcu y Ugurlo, 2007). Este módulo describe la rigidez relativa de un material. Es medido en laboratorio y determinado con la pendiente de la región elástica de la curva esfuerzo/deformación (Helvatjoglu-Antoniades *et. al.*, 2006).

En un medio isotrópico sometido a carga axial, el Módulo de Young o Elasticidad estática puede ser calculada dividiendo el esfuerzo por la elongación unitaria (Duboeuf *et al.*, 2007) así:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\frac{F}{A_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{FL_0}{A_0\Delta L}$$

En donde E es el módulo de elasticidad o Módulo de Young.
 F es la fuerza axial aplicada.

A_0 es el área de la sección transversal original.

ΔL es la variación de dimensión longitudinal del objeto.

L_0 es la altura original.

La resistencia y comportamiento dentro de un elemento de concreto bajo cargas depende de la compatibilidad del mortero y agregados en términos del módulo de elasticidad del mortero y del agregado grueso (Mesbah *et. al.*, 2002; Serrano *et. al.*, 2009). Cabe decir que la forma, textura, densidad, y porosidad de los agregados –son propiedades específicas de los materiales– representan un efecto significativo en la calidad del concreto (Al-Rousan *et. al.*, 2007).

El módulo de elasticidad del concreto (E_c) ha sido considerado como un factor importante en el diseño de estructuras de concreto (Ruiz *et. al.*, 2007; Hernández, 2005; Chen *et. al.*, 2001; Huo *et. al.*, 2001). Para su determinación se plantean diferentes procedimientos experimentales para mezclas en estado fresco donde se mide la deformación durante el tiempo de fraguado (Chen *et. al.*, 2001), así como en estado endurecido en donde se utiliza un extensómetro con el cual se miden deformaciones (Hernández, 2005).

Estudios realizados en la Universidad de Minnesota mostraron que los valores del módulo de elasticidad utilizando las ecuaciones del ACI 318 (1989) y ACI 318 (2004) sobreestimaban las medidas experimentales del E_c del concreto preparado con áridos de la región. Sin embargo, estudios en la Universidad de Texas en Austin, demostraron que las mismas ecuaciones subestimaban la gran mayoría de los módulos de elasticidad que se midieron experimentalmente (Huo *et. al.*, 2001).

Por otro lado, estudios realizados sobre un total de 1,300 muestras analizadas en Bogotá demostraron que las ecuaciones del código colombiano NSR-98, sobreestima el valor de los concretos de la capital (Ruiz *et. al.*, 2007). Entre tanto, determinaciones del E_c para la ciudad de Bucaramanga en un total de 70 muestras en tres concretas arrojaron valores sobreestimados de E_c para materiales metamórficos y subestimados para materiales sedimentarios (Hernández, 2005). Este estudio preliminar recomendaba incrementar el número de muestras analizadas.

El presente estudio plantea aumentar el número de muestras y establecer una relación entre las propiedades de los agregados y el E_c . Se sugiere evaluar las diferentes ecuaciones que permiten determinar el valor del módulo de elasticidad partiendo del peso unitario W y de la resistencia del concreto σ (Topcu y Ugurlu, 2007).

Método del Turkish Institution of Standards: $E_c = 14,000 + 3,250 f'_c \frac{1}{2}$

Método del Comité Europeo del Concreto (CEC): $E_c = 9,500 (f'_c + 8)^{\frac{1}{3}}$

Método del American Concrete Institute (ACI): $E_c = 0.043 W^{\frac{3}{2}} f'_c \frac{1}{2}$

FACTORES QUE AFECTAN EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO

La microestructura del concreto presenta una estructura heterogénea que exhibe diferentes comportamientos durante el proceso de carga debido a las diversas fases de los agregados, la matriz de pasta y a la interfase de agregado de pasta (Shah *et. al.*, 1994; Topcu y Ugurlu, 2007). De esta manera, un cambio en la calidad de cualquiera de los componentes fundamentales representa un cambio en la respuesta del módulo y en general en el comportamiento del concreto (Fig. 1).

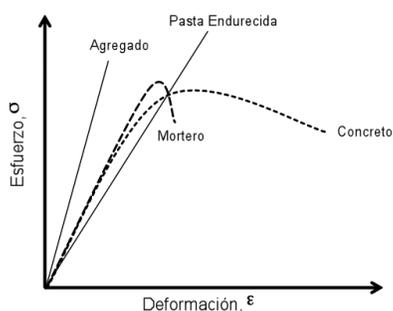


Fig. 1. Relación esfuerzo-elongación en agregado, pasta, mortero y concreto (Adaptada: Topcu y Ugurlu, 2007).

Según Topcu y Ugurlu (2007) la resistencia a compresión de los agregados y de la pasta endurecida es mucho mayor que la resistencia del concreto o del mortero. Sin embargo, el concreto exhibe mayor comportamiento dúctil que cada uno de los componentes considerado en forma individual. En otras palabras, el comportamiento inelástico del concreto es más alto que las otras fases y los otros componentes de la mezcla. Son varios los factores que afectan el módulo de elasticidad de un concreto, unos tendrán relación con los materiales y otros con las reacciones que se dan en estado plástico y endurecido (Ver Tabla 1).

La porosidad y el módulo de elasticidad de los agregados también son elementos importantes en la determinación de la rigidez. Es así como Módulos de Elasticidad de materiales no porosos con alta densidad producen módulos de elasticidad extremadamente altos. La relación agua/cemento influye también en el módulo de elasticidad tanto de la pasta como del concreto. Morteros con relaciones A/C bajas ocasionan un incremento en el módulo de elasticidad del concreto.

Tabla 1. Factores que afectan el módulo de elasticidad de un concreto.

Concreto Fresco		Concreto Endurecido
Pasta	Agregado	Experimentales
<ul style="list-style-type: none"> Módulo de elasticidad de la matriz de pasta. Porosidad de la mezcla. Condiciones de la matriz de pasta. 	<ul style="list-style-type: none"> Módulo de elasticidad de los agregados. Porosidad. Fracción volumétrica de los agregados. 	<ul style="list-style-type: none"> Aplicación de la carga. Contenido de humedad de los especímenes.

(Adaptado de Topcu y Ugurlu, 2007).

El conocimiento del valor del módulo de elasticidad del concreto es esencial en la determinación de la deflexión del concreto reforzado y pre-esforzado utilizado en las estructuras. La estimación del E_c está basada normalmente en el valor de la resistencia a compresión lo cual no es una práctica que debiera generalizarse porque es sabido que la resistencia del concreto se ve afectada por factores relacionados con la calidad de los agregados y con la relación agua/cemento, entre otros. El problema se torna complicado cuando se sustituyen los agregados naturales por agregados artificiales o preparados. Esto puede llegar a afectar los valores del módulo de elasticidad (Balendran, 1995).

METODOLOGÍA

Serrano *et. al.* (2009) y Torrado y Porras (2009), aplicaron la metodología que se resume a continuación para determinar módulo estático (Fig. 2). En cuanto al tamaño de la muestra, ésta se determinó siguiendo las recomendaciones referentes al número de muestras a tomar por cada 40 m³ de concreto producido (ACIS, 1998). Para efectos del trabajo de campo, se adoptaron las muestras detalladas en la Tabla 2, lo cual arrojó un total de 611 especímenes de concreto a ser preparados.

Los agregados tomaron sus características según el material disponible y almacenado en cada una de las plantas. Se tomaron muestras de agregado para las fundidas semanales en las plantas. Los ensayos seguidos fueron los descritos en Serrano *et. al.* (2009) y Torrado y Porras (2009). Se incluyeron granulometrías, información sobre densidad y absorción, masas unitarias suelta y compacta, y sanidad de los agregados por ataque con sulfatos, los cuales se realizaron atendiendo a las Normas Técnicas Colombianas (NTC) correspondientes.

Una vez preparadas las muestras de concreto, al material en estado fresco se les determinó asentamiento de la mezcla, masa unitaria y rendimiento volumétrico del concreto. En cuanto a las mezclas en estado endurecido, el tratamiento de las mismas comienza con el curado en piletas de inmersión, y posteriormente, con la determinación del peso específico endurecido, resistencia a la compresión de concreto y módulo de elasticidad estático.

El módulo de elasticidad estático E_c se determinó siguiendo el método descrito por la “Norma Técnica Colombiana NTC 4025”, la cual adapta los estándares de la ASTM C 469. Según esta Norma, se procedió a determinar los esfuerzos axiales σ_1 y σ_2 , así como la deformación ε_2 cargando el espécimen de prueba hasta el 40% de su máxima resistencia. La determinación de E_c se hizo utilizando:

$$E_c = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{(\varepsilon_2 - 0.000050)}$$

En donde σ_1 es el esfuerzo correspondiente a la 50 millonésima de deformación unitaria.

σ_2 es el esfuerzo correspondiente al 40% de la máxima resistencia.

ε_2 es la deformación que ocurre en ese punto.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los ensayos realizados siguieron las normas de calidad establecidas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas, cuyos estándares siguen la normalización de la ASTM. Respecto a los materiales pétreos se observó que los materiales analizados cumplen con las normas técnicas de calidad establecidas en Colombia (NTC-174), que define las características de gradación y contenido de materia orgánica que deben cumplir los agregados para concreto. Las propiedades obtenidas en los agregados son las que se resumen en la Tabla 3 y en la Tabla 4, y corresponden a trabajo de campo de Torrado y Porras (2009) bajo la dirección de M.F. Serrano.

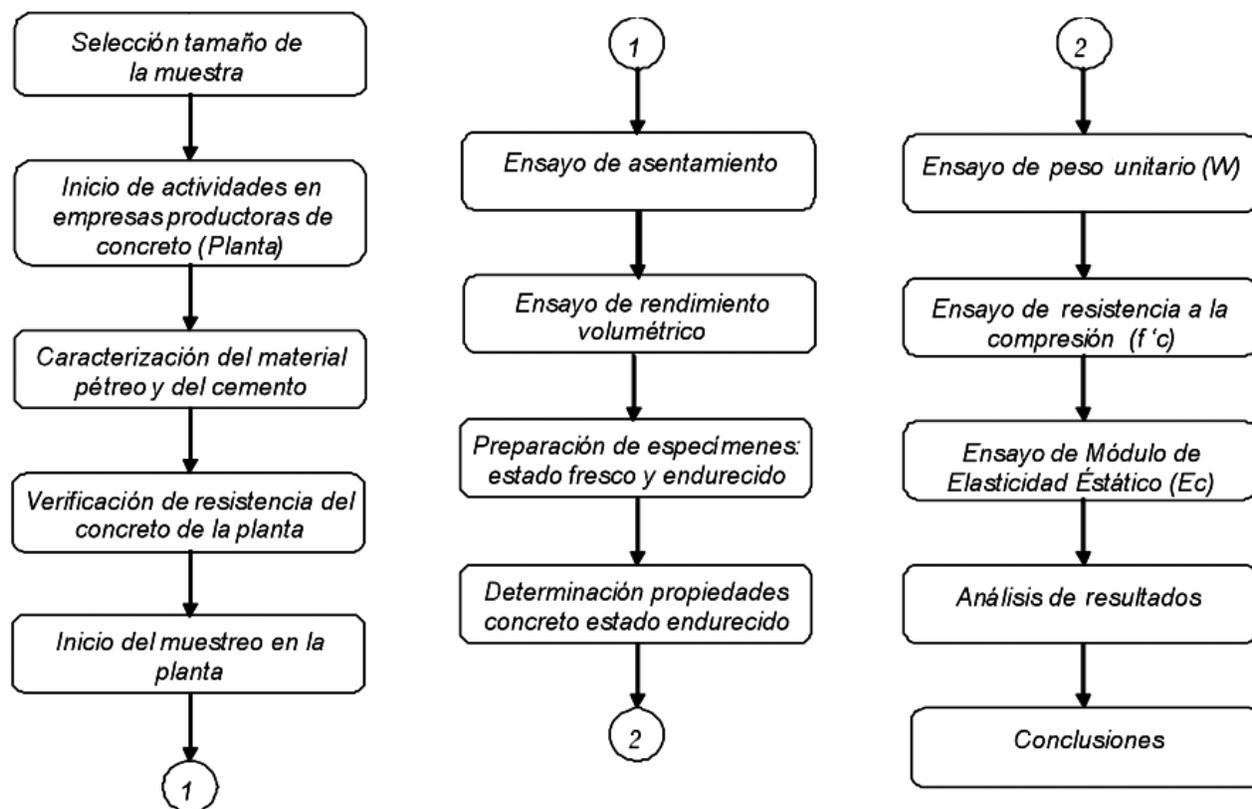


Fig. 2. Metodología seguida para el estudio.

Tabla 2. Definición del tamaño de las muestras.

Planta	Volumen producido (m ³ /mes)	Número de muestras Tomadas en planta
1	3250	122
2	5500	207
3	7500	282
Total		611

Tabla 3. Caracterización del agregado grueso.

Propiedades agregado grueso	Planta		
	1	2	3
Tamaño Máximo Nominal (TMN, en pulgadas).	1	1	1
Masa Unitaria Seca y Suelta (MUSS, g/cm³).	1.381	1.391	1.366
Masa Unitaria Seca y Compacta (MUSC, g/cm³).	1.507	1.510	1.487
Peso Específico (PE, g/cm³).	2.911	2.724	2.787
Porcentaje de absorción.	5.60	0.70	0.40
Resistencia sulfatos (%).	2.74	4.41	8.98
Desgaste Máquina de los Ángeles (%).	23	19	32

Tabla 4. Caracterización del agregado fino.

Propiedades del agregado fino	Planta		
	1	2	3
Módulo de Finura (MF).	3.25	2.79	2.75
Masa Unitaria Seca y Suelta (MUSS, g/cm³).	1.676	1.659	1.663
Masa Unitaria Seca y Compacta (MUSC, g/cm³).	1.836	1.822	1.787
Peso Específico (PE, g/cm³).	2.610	2.610	2.619
Porcentaje de absorción.	0.60	1.38	0.99
Resistencia sulfatos (%).	11.3	8.7	9.4

Respecto al cemento se obtuvieron los valores del peso específico PE del cemento utilizado en las distintas concretas, encontrándose que utilizan diferentes tipos de cemento. Cada planta concretera utiliza criterios de diseño que son particulares y adaptados a su equipo. Debido a esto, pueden obtenerse valores diferentes en resistencia del concreto, como más adelante se demuestra. Así, la planta concretera 1 utiliza cemento con un promedio PE de 3,077 g/cm³; la planta concretera 2, cemento con promedio PE de 3,061 g/cm³, mientras que la planta concretera 3 un cemento con promedio PE de 2,991 g/cm³.

Respecto a las propiedades del concreto en estado fresco se obtuvieron muestras de concreto con asentamientos de 3.5" pulgadas en las plantas 1 y 2, y de 4, 5, 5.5 y 6 pulgadas en las plantas 1, 2 y 3. Se observó además que en todas las plantas se presentan valores menores y mayores al 100% en el rendimiento volumétrico, lo cual pudiera ser indicador de errores en el pesaje de los materiales. La apariencia del concreto en todas las plantas conreteras cualitativamente podría describirse de buena, salvo la mezcla con asentamiento de 3.5", la cual resultó ser una mezcla muy rígida y de difícil manejabilidad. Este asentamiento se obtuvo en las mezclas de la planta conretera 1 y 2.

Respecto a la resistencia del concreto en estado endurecido se pudo apreciar que existe gran variabilidad en los resultados de las distintas plantas conreteras. Para la planta conretera 1 se observó que un 2.04% y 5.26% de los especímenes analizados de mezclas con asentamiento 4" y 5" presentaron resistencia menor a 210 Kg/cm², mientras que aquellos de asentamiento 5.5" presentaron resistencias mayores a 210 Kg/cm² en todos los ensayos realizados (Fig. 3; Fig. 4; Fig. 5).

Los resultados de resistencia mecánica a compresión para la planta conretera 2 arrojaron que la totalidad de especímenes tomados de mezclas con asentamiento 4" y 5" presentaron resistencias mayores a 210 Kg/cm², mientras que las mezclas con 5.5" de asentamiento arrojaron un 5.71% de los especímenes con resistencias menores a 210 Kg/cm² (Fig. 3; Fig. 4 y Fig. 5).

Para el caso de la planta conretera 3, las mezclas con asentamiento 5" presentaron respuestas a compresión superiores a 210 Kg/cm² en todos los especímenes probados, mientras que en mezclas provenientes de asentamientos de 4" y 5.5" arrojaron un 7.4% y 4.76%, respectivamente, de los datos con valores de resistencia menores a 210 Kg/cm². (Fig. 3; Fig. 4; Fig. 5).

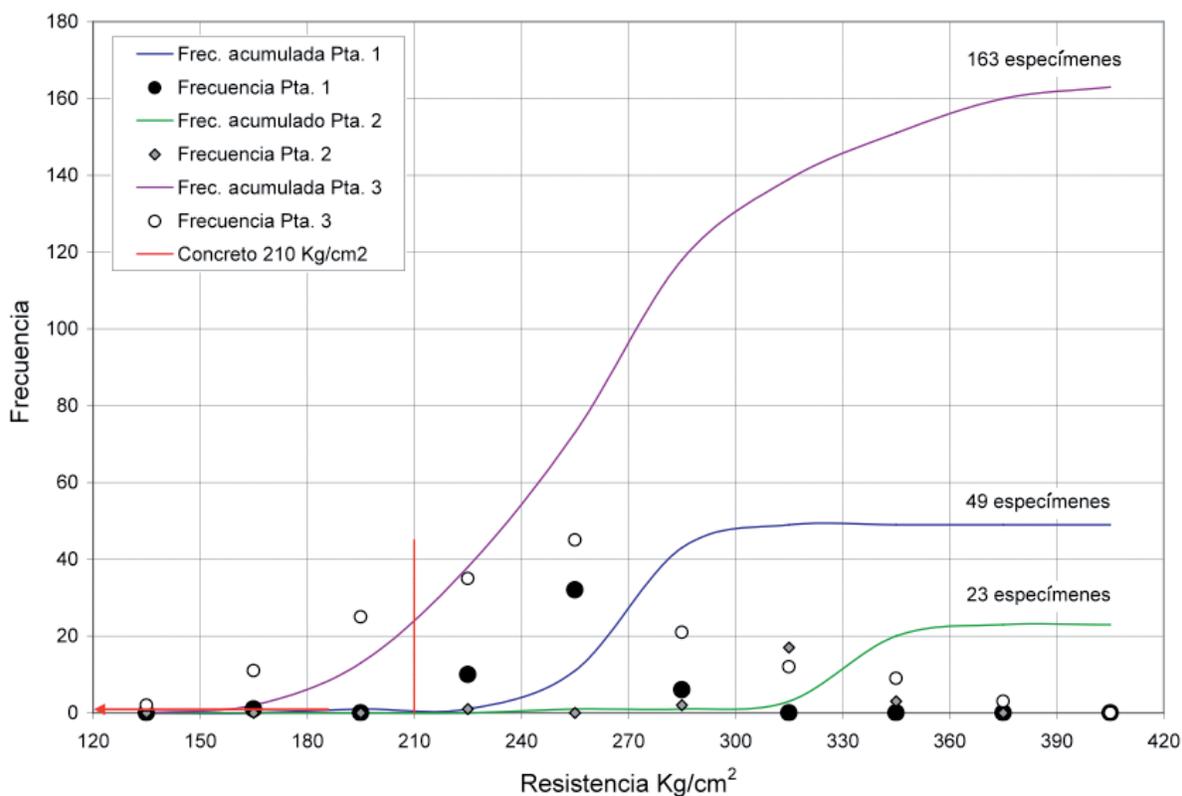


Fig. 3. Resistencia del concreto a los 28 días, muestras con asentamiento de 4 pulgadas.

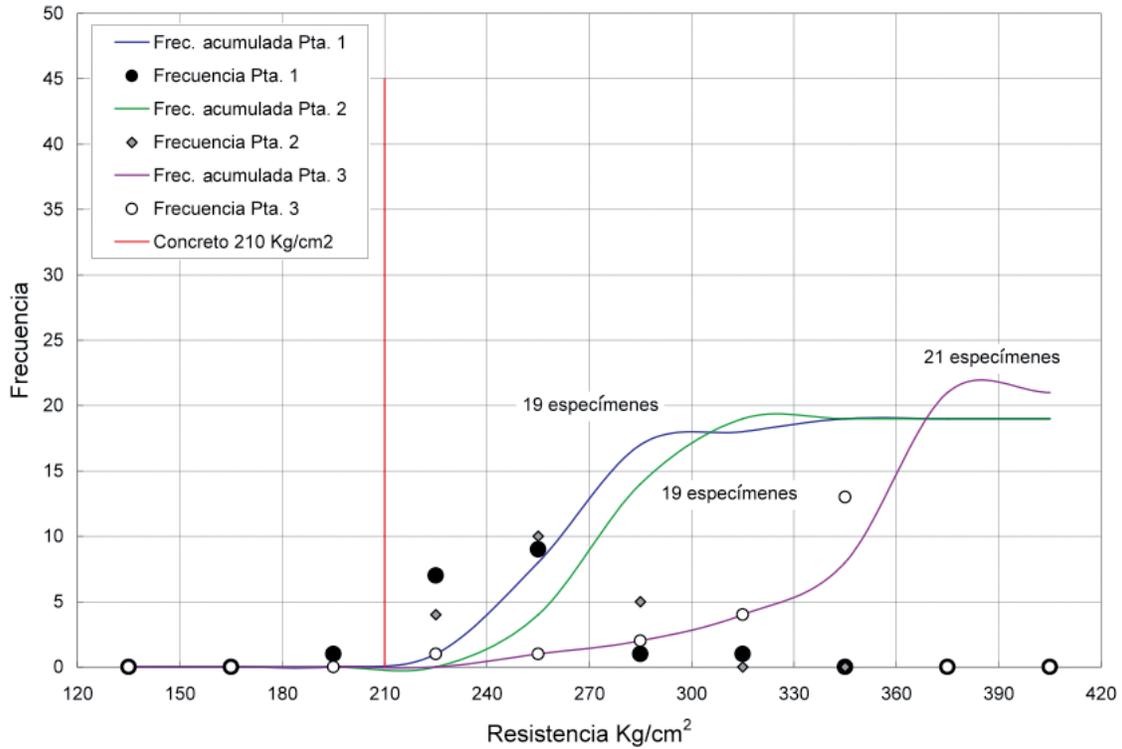


Fig. 4. Resistencia del concreto a los 28 días, muestras con asentamiento de 5 pulgadas.

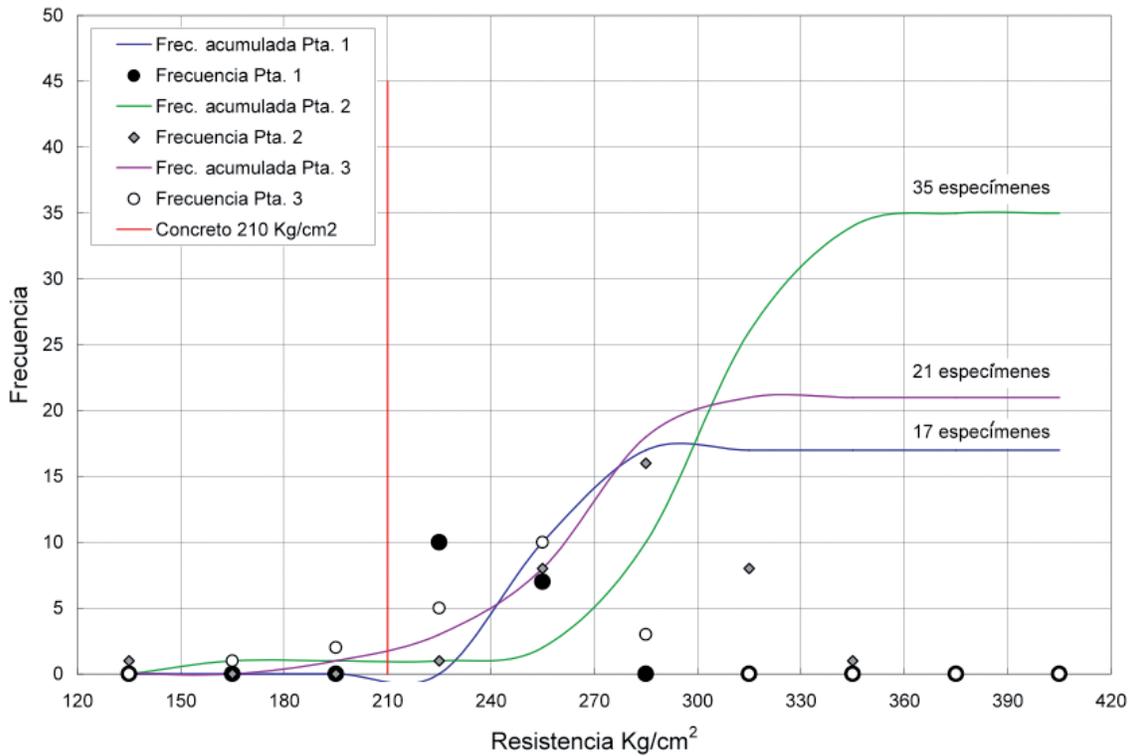


Fig. 5. Resistencia del concreto a los 28 días, muestras con asentamiento de 5 pulgadas.

Respecto a la determinación del módulo de elasticidad de los concretos producidos en la región de Bucaramanga y su área metropolitana, se estimó el valor del E_c utilizando las ecuaciones del código NSR-98, del ACI y del CEC (Fig. 6). Se enfatiza que las ecuaciones aquí sugeridas corresponden a aquellas que permiten la estimación del módulo de elasticidad sin tener en cuenta el origen del agregado y que fueron obtenidas utilizando muestras de concreto de 210 kg/cm^2 .

Se observa que el valor del E_c estimado con el NSR-98, el cual no tiene en cuenta el tipo de agregado ($E_c = 12,500 * \sqrt{f'_c}$ en Kg/cm^2), está por encima de los valores experimentales, mientras que las ecuaciones del ACI y del CEC están por debajo de los valores experimentales. Se procede a hacer un análisis de sensibilidad de los exponentes de la ecuación del NSR-98 y ajustar una ecuación que se ajuste a la resistencia de los concretos que se analizaron (Fig. 7). De lo anterior, se propone utilizar la ecuación $E_c = 6,250 * \sqrt{f'_c}$ en Kg/cm^2 para determinar el módulo de elasticidad en concretos producidos en Bucaramanga y su área metropolitana.

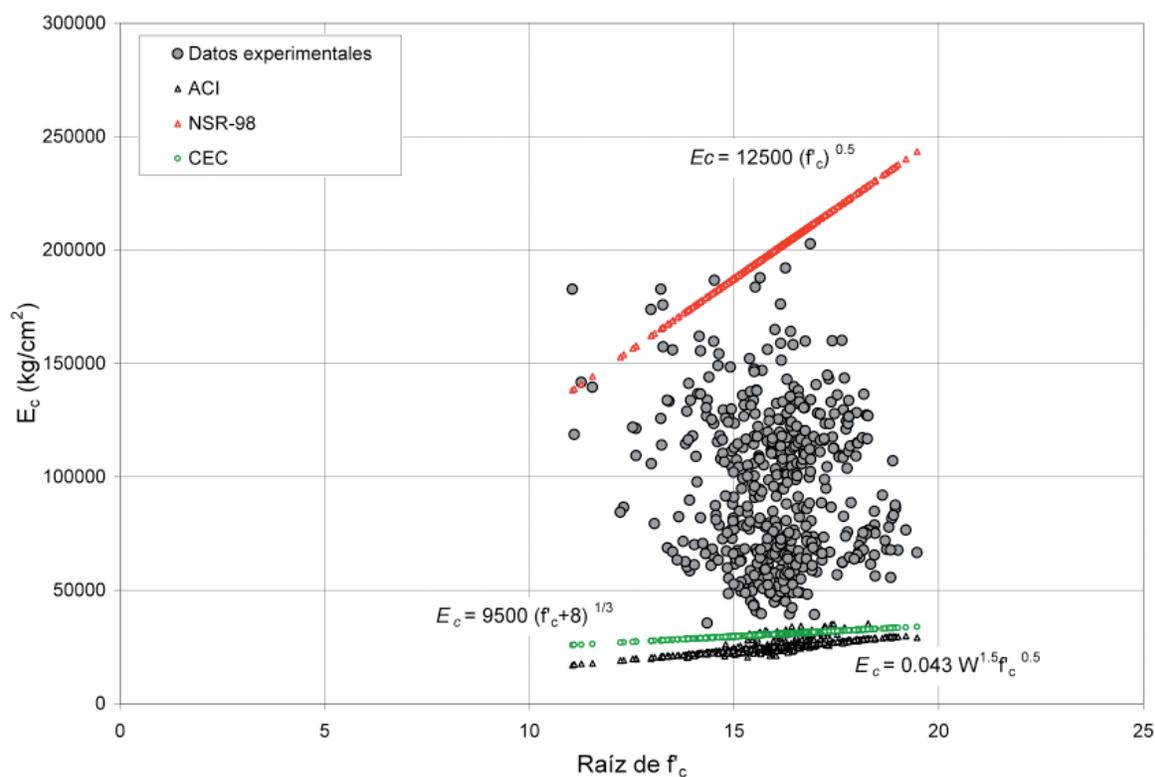


Fig. 6. Comparación del Módulo de Elasticidad Experimental con los valores resultantes al aplicar las ecuaciones propuestas por el ACI, NSR-98 y CEC.

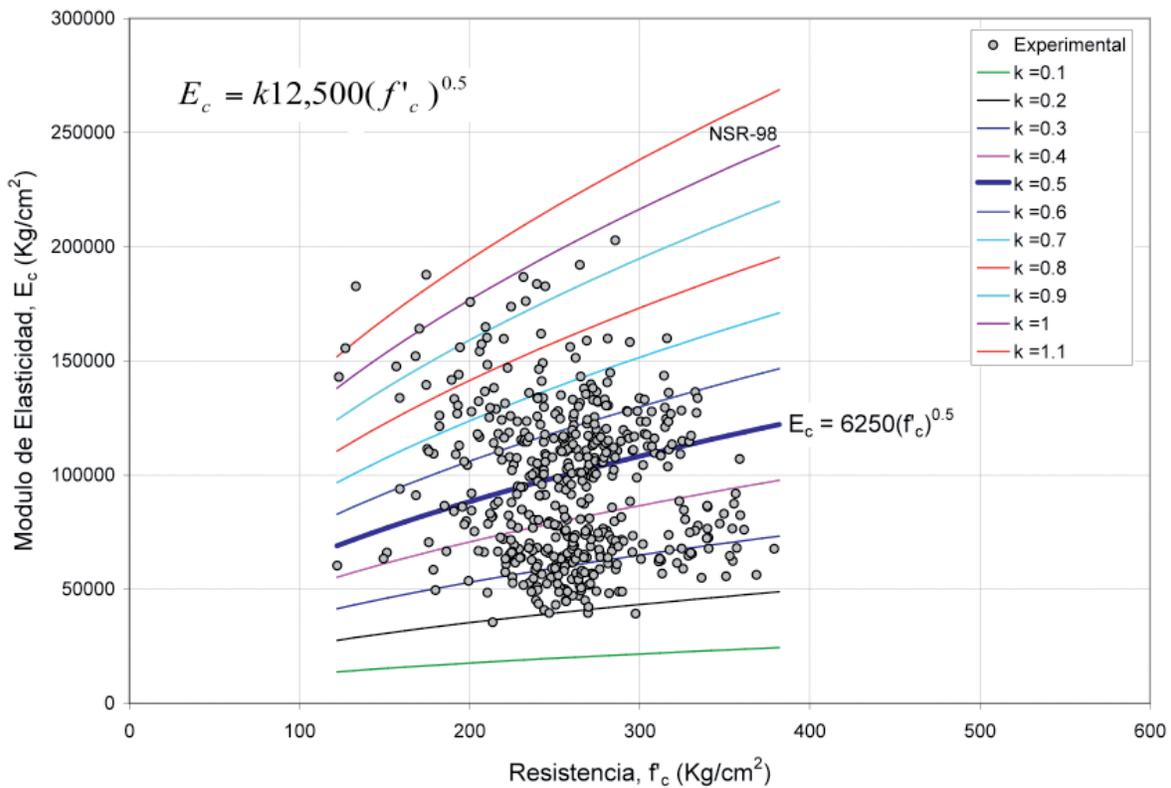


Fig. 7. Análisis de sensibilidad del parámetro k en la ecuación propuesta por el NSR-98.

Se hizo un análisis de la conveniencia en utilizar la ecuación del ACI. Para ello se evaluó el comportamiento del Peso Unitario W del concreto frente a la resistencia del concreto, con el fin de tomar un valor típico de las muestras preparadas. Para los especímenes analizados se encontró que los concretos producidos presentaron un valor de W alrededor de 2,375 Kg/m³ (Fig. 8). Utilizando este valor, como típico en los concretos, se analizaron los exponentes m y n de la fórmula del ACI ($E_c = k * m * f'_c^n$) y se ajustó el valor de K. Se encontró que para Bucaramanga, esta expresión sería $E_c = 0.054 * W^{1.5} * f'_c^{0.5}$ en Kg/cm² (Fig. 9); es decir, el análisis de sensibilidad demostró que m se ajusta a 1.5, n se ajusta a 0.5; pero k se ajusta a 0.054, y por lo tanto k difiere (K=0.043) del valor contemplado en el ACI.

En cuanto al comportamiento del Comité Europeo del Concreto, el análisis de sensibilidad reportó que para el caso de los concretos producidos en Bucaramanga y su área metropolitana se calcularía con la expresión $E_c = 0.12 * W^{3/2} * (f'_c + 8)^{1/3}$; es decir, que para un valor de W=2,375 kg/m³, $E_c = 13,889 * (f'_c + 8)^{1/3}$, contra la expresión del CEC $E_c = 9,500 * (f'_c + 8)^{1/3}$ (Fig. 10), el valor de E_c estaría sobre estimado en un 46%

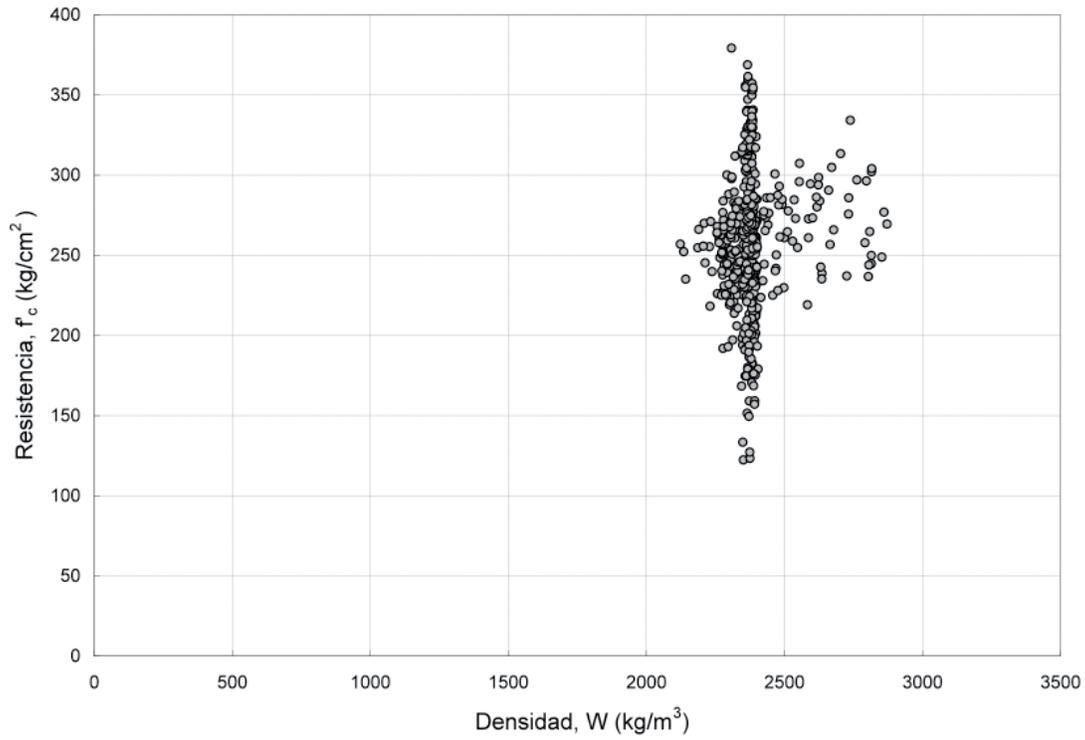


Fig. 8. Variación de la resistencia con la variación del peso unitario del concreto.

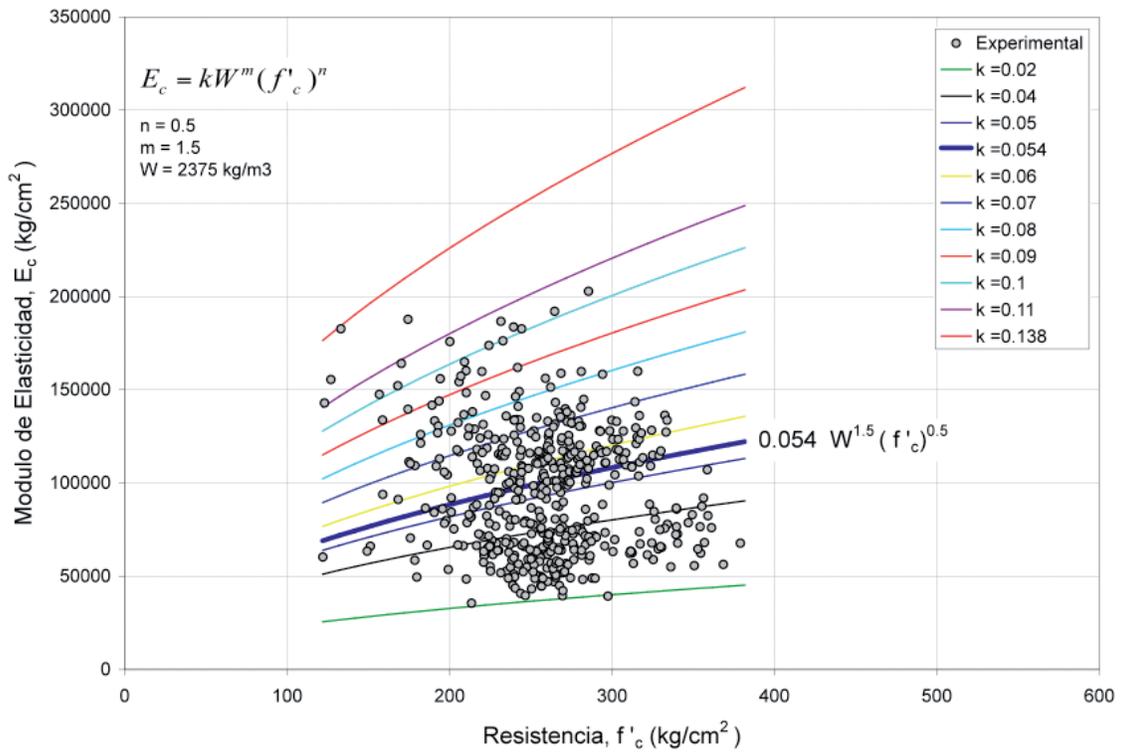


Fig. 9. Análisis de sensibilidad del parámetro k en la ecuación propuesta por el ACI.

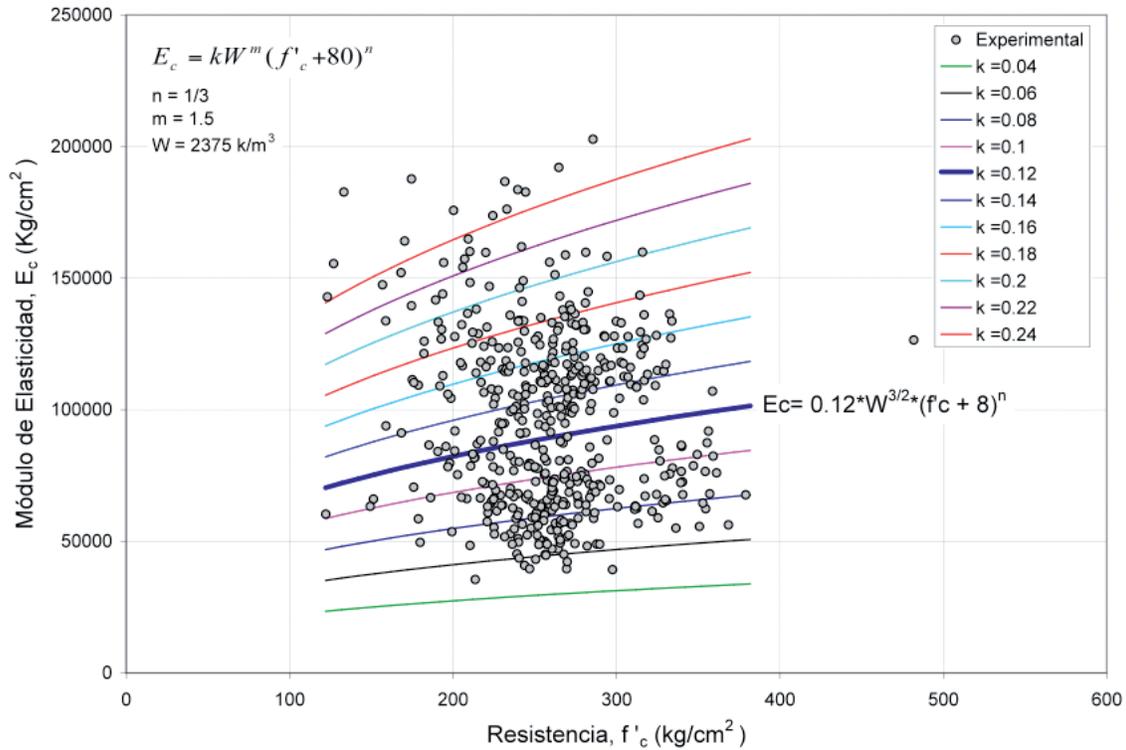


Fig. 10. Análisis de sensibilidad del parámetro k en la ecuación propuesta por la CEC.

CONCLUSIONES

Las plantas concreteras están utilizando cementos de diferente marca, aunque todos son Tipo I, clasificados según el Instituto Colombiano de Normas Técnica, quien sigue estándares adaptados de la normalización ASTM. Sin embargo, es relevante destacar que las muestras de concreto seleccionadas correspondieron a concretos con resistencia de 210 kg/cm² (21 MPa), preparados con agregados pétreos de la misma procedencia, los cuales cumplen con la normatividad colombiana establecida para agregados pétreos, salvo en sanidad donde presentan valores superiores a los recomendados. Así, con base a los análisis efectuados se proponen las siguientes ecuaciones para la determinación del módulo de elasticidad del concreto para Bucaramanga y su área metropolitana:

$E_c = 6,250 * \sqrt{f'_c}$ en Kg/cm², vs., la fórmula sugerida por el NSR-98. Esta ecuación produce valores de E_c un 50% por debajo de lo sugerido por el NSR-98.

$E_c = 0.054 * W^{1.5} * \sqrt{f'_c}$ en Kg/cm² vs., la fórmula sugerida por el ACI. Si se estima el valor de la E_c utilizando $W=2,375$ Kg/m³ y f'_c de 210 kg/cm², la ecuación produce valores de E_c sobre estimado en 24%

$E_c = 1,2 * W^{1.5} * (f'_c + 8)^{1/3}$ en 210 kg/cm² vs., la fórmula sugerida por el CEC, la ecuación produce valores de E_c sobreestimado en 46.20%

Se resalta que la ecuación del NSR-98 ($E_c = 12,500 * \sqrt{f'_c}$ en Kg/cm²) está por encima del comportamiento de las muestras ensayadas, tal y como se comprobó en estudios de Ruíz et. al. (2007) y Torrado y Porras (2009), razón por lo cual se propone utilizar la ecuación sugerida en este estudio. Sin embargo, se observa una fuerte incidencia de la calidad de los agregados en el valor del Módulo de Elasticidad del concreto producido en Bucaramanga (Colombia). Por lo tanto, se deben continuar los estudios de manera que se pueda mejorar la aproximación del cálculo del E_c utilizando información de los agregados. Hay que destacar que los resultados de este estudio pueden servir de apoyo técnico para proponer una norma local de construcción a ser aplicada en la región.

REFERENCIAS

- ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89) and Commentary (318R-89)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 353 p., 1989.
- ACI Committee 318, *Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S-05) y Comentario*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 492 p., 2004.
- Al-Rousan T.; E. Masad; E. Tutumluer; T. Pan, "Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics", en *Construction and Building Materials*, vol.21, pp. 978-990, 2007.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (ACIS), *Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente, NSR-98*, Colombia, 1998.
- ASTM, *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*, Editores Klieger P.; J. F. Lamond, pp. 630, 1990.
- ASTM C469, "Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression", pp. 630. DOI: 10.1520/C0469-02E01, 1994, (www.astm.org).
- Balendran R.V., "Estimating the elastic modulus of concrete made with artificially manufactured lightweight aggregates", en *Structural Survey*, 13, 2, MCB University Press, 0263-080X pp. 16-20, 1995.
- Cadoni E.; K. Labibes; M. Berra; M. Giangrasso; C. Albertini, "Influence of aggregate size on strain-rate tensile behavior of concrete", en *ACI Materials Journal, Technical Paper*, may-june, pp. 220-223, 2001.
- Carino N.J.; *Nondestructive testing of concrete: History and challenges*, American Concrete Institute, ACI SP-144, Detroit, MI, pp. 623-678, 1994.
- Catalán R.; D. Hernández, *Algunas consideraciones sobre el módulo de Poisson, Ministerio de Obras Públicas, Transporte y de vivienda y desarrollo urbano*, San Salvador, 2006.
- Chen H.; T. Yen; K. Chen, "Evaluating elastic modulus of lightweight aggregate", en *ACI Materials Journal, Technical Paper*, pp. 108-113, marzo-abril, 2003.
- Cortes D.D.; H.K. Kim; A. M. Palomino; J. C. Santamarina, Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sand", en *Cement and Concrete Research*, doi:10.1016/j.cemconres.2008.03.020.
- Duboeuf F.; H. Liebgott; A. Basarab; E. Brusseau; P. Delachartre; D.Vray, "Static mechanical assessment of Elastic Young's Modulus of tissue mimicking materials used for medical imaging", Proceedings of the 29th Annual International, Conference of the IEEE EMBS, Cité Internationale, Lyon, France, pp.3450-3453, agosto 23-26, 2007.
- Erdogan S.T.; N. S. Martys; C.F. Ferraris; D.W. Fowler, "Influence of the shape and roughness of inclusions on the rheological properties of a cementitious suspension, en *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, pp. 393-402, 2008.
- Giaccio G.; R. Zerbino, "Failure mechanism of concrete: combined effects of coarse aggregates and strength level", en *Elsevier Science Ltda.*, vol. 7, pp. 41-48, 1998.
- Helvatjoglu-Antoniades M.; Y. Papadogiannisa; R.S. Lakesb; P. Dionysopoulou, D.; Papadogiannisa, *Dynamic and static elastic moduli of packable and flowable composite resins and their development after initial photo curing*, 22, 450-459, 2006.
- Hernández A., "Determinación de los módulos de elasticidad del concreto producido con los diferentes materiales existentes en Bucaramanga y su área metropolitana", Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, 2005.
- Huo X. S.; N. Al-Omaishi; M. K. Tadros, "Creep, shrinkage, and modulus of elasticity of high-performance concrete", en *ACI Materials Journal, Technical Paper*, pp. 440-449, noviembre-diciembre, 2001.
- Malaikah A.; K. Al-Saif; R. Al-Zaid, "Prediction of the dynamic modulus of elasticity of concrete under different loading conditions", en *International Conference on Concrete Engineering and Technology*, University of Malaya, pp. 6, 2004.
- Mesbah H.; M. Lachemi; P. Aitcin, "Determination of elastic properties of high-performance concrete at early ages", en *ACI Materials Journal, Technical Paper*, pp. 37-41, enero-febrero, 2002.
- Pauw A., "Static modulus of elasticity of concrete as affected by density", en *ACI Journal, Proceedings*, 57, 6, pp. 679-687, diciembre, 1960.
- Ruiz D.; H. Vacca; María Neira, "Propuesta de modificación de la ecuación para la estimación del módulo de elasticidad del concreto en función de la resistencia a la compresión para Bogotá", en *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, núm. 67, pp. 7-15, 2007.

Shah S.P.; Lange A.D.; Li Z.; Mitsui, K., "Relationship between microstructure and mechanical properties of the paste-aggregate interface", en *ACI Journal*, 91, 1, pp 30- 39, 1994.

Serrano M.F.; L.M. Torrado; N. Porras, "Propuesta de ecuación para la estimación del Módulo de Elasticidad del Concreto preparado con material reciclado", texto presentado en el II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, septiembre, 2009.

Solís R.; J. B. Peyra, "The influence of the physical properties of aggregates on the ultrasound pulse technique in predicting the compressive strength of concrete", en *Revista Técnica Ingeniería*, Universidad Zulia, Vol. 26, núm. 1, Maracaibo, abril, 2003.

Topcu B.; A. Ugurlo, "Elasticity theory of concrete and prediction of Static E-modulus for dam Concrete using composite models", en *Digest*, Diciembre, pp. 1115-1127, 2007.

Torrado L.M.; N. Porras, "Determinación de los módulos de elasticidad del concreto producido con los diferentes materiales existentes en Bucaramanga y su área metropolitana", Tesis de grado de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional, Bucaramanga, 2009.

Westerholm M.; Bjorn Lagerblad; J. Silfwerbrand; E. Forssberg, "Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars", en *Cement Concrete and Composites*, Vol. 30, pp. 274-282, 2008.