



Determinación del módulo de elasticidad de dos concretos autocompactantes de alta resistencia (70 MPa)

Determination of the elasticity module of two high-resistance self-compacting concrets (70 MPa)

Ing. Manfred Ramírez

Especialista en control de calidad
Productos de Concreto, Alajuela, Costa Rica
manfred.ramirez@pc.cr

Ing. Minor Murillo

Docente facultad de Ingeniería Civil
Universidad Fidélitas, San José, Costa Rica
minor.murillo@ufide.ac.cr

Fecha de recepción: 19 setiembre 2019 / Fecha de aprobación: 28 febrero 2020

Índices y Bases de Datos:

latindex

UCRIndex

REDIB

Dialnet

DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

PERIÓDICA

biblat
Bibliografía Latinoamericana

ERIH PLUS
EUROPEAN REFERENCE INDEX FOR THE
HUMANITIES AND SOCIAL SCIENCES

Políticas de Uso:



Revista Métodos y Materiales por LanammeUCR se distribuye bajo: Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. ISSN electrónico: 2215-4558

Determinación del módulo de elasticidad de dos concretos autocompactantes de alta resistencia (70 MPa)

Determination of the elasticity module of two high-resistance self-compacting concrets (70 MPa)

Ing. Manfred Ramírez

Especialista en control de calidad
Productos de Concreto, Alajuela, Costa Rica
manfred.ramirez@pc.cr

Ing. Minor Murillo

Docente facultad de Ingeniería Civil
Universidad Fidélitas, San José, Costa Rica
minor.murillo@ufide.ac.cr

Fecha de recepción: 19 setiembre 2019 / **Fecha de aprobación:** 28 febrero 2020

RESUMEN

El módulo de elasticidad es una propiedad de gran importancia en el cálculo estructural, que permite entender la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación del material evaluado, de tal manera que, una correcta predicción del módulo de elasticidad del concreto permite al Ingeniero Estructural diseñar elementos o estructuras que desempeñen el propósito para el cual fueron concebidas.

Esta investigación permitió determinar una ecuación para calcular el módulo de elasticidad de dos mezclas de concreto autocompactante (SCC por sus siglas en inglés) con resistencia nominal de 70 MPa a la edad de veintiocho días, siendo la única variable el tipo de cemento hidráulico: cemento modificado con caliza de alta resistencia inicial y cemento modificado con puzolana. Para el concreto en estado fresco se analizó comparativamente la temperatura (ASTM C1064), peso unitario (ASTM C138), contenido de aire (ASTM C231) y flujo sin restricción (ASTM C1611). Para el concreto endurecido se estudió su afectación en la resistencia a la compresión (ASTM C39), módulo de elasticidad, relación de Poisson y módulo de cortante (ASTM C469).

PALABRAS CLAVE: Módulo de elasticidad; Concreto Autocompactante, Concreto de alta resistencia, SCC.

ABSTRACT

The modulus of elasticity is a property of great importance in the structural calculation, which allows understanding the relationship between the stress and the deformation of an evaluated material, in this matter, a correct prediction of the modulus of elasticity of concrete allows the Structural Engineer design elements or structures that perform as it were conceived.

In this investigation an equation to calculate the modulus of elasticity determine were determined for two mixtures of self-compacting concrete (SCC) with nominal strength of 70 MPa at the age of twenty-eight days. The only variable analyzed in this study was the type of hydraulic cement: cement modified with initial high strength limestone and modified cement with pozzolana. For fresh concrete the following test were analyzed comparatively: temperature (ASTM C1064), unit weight (ASTM C138), air content (ASTM C231) and unrestricted flow (ASTM C1611). For hardened concrete, the compressive strength (ASTM C39), elastic modulus, Poisson ratio and shear modulus (ASTM C469) were studied.

KEYWORDS: Modulus of elasticity; Self-compacting Concrete, High Strength Concrete, SCC.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, es cada vez más utilizado el concreto autocompactante en la industria mundial del concreto debido a su eficiencia en rendimientos de colocación, mejoras en el acabado e incluso ergonomía. Los concretos autocompactantes (SCC) son concretos de alto desempeño que han sido desarrollados con características técnicas especiales para determinados propósitos. P.-C. Aïtcin (2008) indica que, “desde el punto de vista del diseño, es muy importante conocer el módulo de elasticidad del concreto a la hora de calcular las deformaciones de los diferentes elementos estructurales que componen la estructura” (p.469). Sería equivocado pensar solo en obtener un valor alto de resistencia a la compresión ya que las propiedades reológicas de dicho concreto se ven sumamente influenciadas por el tipo y cantidad de cemento, las propiedades físico-mecánicas del agregado, así como su porcentaje de utilización en el diseño de mezcla, el tipo de aditivo y dosis a emplear.

Hay una gran necesidad de evaluar en forma experimental las propiedades mecánicas del concreto autocompactante (SCC) para los distintos usos o necesidades que puedan existir no solo a nivel local, si no en la industria mundial, que puedan complementar los códigos existentes e incluso pensar en una estandarización con particularidad regional debido a la gran influencia que tiene por ejemplo el agregado en el E_c , ya que según lo menciona Baalbaki (como se citó en P.-C. Aïtcin, 2008) “... la naturaleza del agregado usado para hacer concreto influye fuertemente en la forma de la curva esfuerzo-deformación del concreto.” (p482).

Actualmente, los diseñadores no cuentan con el valor real de módulo de elasticidad del SCC fabricado con cementos modificados con caliza y puzolana, por lo que se hace imperativo conocer su valor, dado el volumen que representa especialmente para una planta de elementos prefabricados.

La importancia de conocer el módulo de elasticidad (E_c), se fundamenta en las siguientes razones:

1. Influye en las deflexiones, derivas y rigidez de una estructura.
2. El módulo de elasticidad del concreto está determinado por una estrecha relación que existe entre el esfuerzo que experimenta un material y la correspondiente deformación unitaria. Es un valor muy importante para el análisis estructural.
3. Tener un buen conocimiento del módulo de elasticidad del concreto bajo condiciones de carga lenta podría

emplearse en futuras investigaciones acerca del módulo de elasticidad dinámico de concreto; es decir, bajo cargas rápidas. Lo anterior sería importante para conocer el comportamiento real del concreto bajo la acción de un sismo.

4. El valor del módulo de elasticidad permite conocer el acortamiento por carga axial de un elemento estructural.
5. El módulo de elasticidad es parte del producto EI (rigidez en flexión), lo cual es importante en la distribución de fuerzas en estructuras hiperestáticas.
6. El módulo de elasticidad está relacionado con las características de esbeltez, ya que a mayor rigidez de una estructura menor debe ser la deflexión y viceversa.
7. Un aspecto importante del análisis y diseño de estructuras se relaciona con las deformaciones que causan las cargas aplicadas a la estructura. Por lo tanto, es importante evitar las deformaciones grandes que puedan impedir que la estructura cumpla con el propósito para el cual se concibió, pero el análisis de deformaciones puede ayudar también para el cálculo de los esfuerzos.

El objetivo principal de esta investigación es el de obtener de forma experimental el módulo de elasticidad de dos concretos autocompactantes (SCC) de una resistencia nominal a la compresión de 70 MPa, utilizando agregados extraídos del río Corinto en la zona Atlántica de Costa Rica y dos tipos de cemento modificados, denominados como MC/A-AR y MP/A-28.

Para ello se procede a caracterizar los concretos con el fin de establecer la relación entre la resistencia a la compresión simple (f'_c) y el módulo de elasticidad (E_c) a la edad de 28 días. Con los datos obtenidos de módulo de elasticidad y módulo de Poisson se calcula el módulo de cortante.

También se hace el ejercicio de comparar estos resultados con las relaciones elásticas obtenidas en por medio de las fórmulas del ACI 318S-14, ACI 363R-10 y el obtenido en la investigación de Aragón (2004) para un concreto de alto desempeño con la misma resistencia nominal.

2. MATERIALES

Según lo indica el ACI 237R-07 “el concreto autocompactante (SCC) es un concreto altamente fluido y sin segregación que puede extenderse en su lugar, llenar el encofrado y encapsular el refuerzo sin ninguna consolidación mecánica.” Esto se logra con la escogencia de materias primas debidamente caracterizadas y analizadas.

Para el caso del SCC el tamaño máximo nominal del agregado grueso debe cambiarse con respecto a la obtención de una habilidad de pasar del concreto. El tamaño y volumen del agregado grueso influyen en la obtención de la habilidad de pasar del concreto. Por lo tanto, el tamaño máximo nominal del agregado grueso puede ser un tamaño más pequeño que el sugerido en el ACI 301 para mejorar la habilidad de pasar. (p.237R-16). En esta investigación se utilizaron dos agregados finos (arena natural y arena manufacturada) y un agregado grueso de 16 mm, todos de una misma fuente que se ubica en la zona Atlántica de Costa Rica.

Los cementos que fueron la variable en este estudio están normados por el Reglamento Técnico de Costa Rica (RTCR 479:2015) y se describen a continuación:

- MC/A-AR que corresponde a un cemento hidráulico modificado con caliza (6% a 20%) de alta resistencia inicial. Por especificación, debe desarrollar una resistencia mínima a la compresión de 14 MPa a 24 horas, 24 MPa a 3 días y 38 MPa a 28 días.
- MP/A-28 es un cemento hidráulico modificado con puzolana (21% a 35%) con una resistencia mínima a la compresión de 13 MPa a 3 días, 20 MPa a 20 días y 28 MPa a 28 días.

También se utilizó un aditivo reductor de agua de alto rango (HRWR) de la última generación a base de policarboxilatos, formulado específicamente para aumentar el tiempo de trabajabilidad en mezclas de concreto y obtener altas resistencias iniciales para concretos en sistemas prefabricados. Cumple con la norma ASTM C494 Tipo A, como reductor de agua y Tipo F como reductor de agua de alto rango y la AASHTO M194.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para cada prueba, el volumen de la batida se mantiene constante al igual que la relación a/mc real (0,332). La medida del flujo sin restricción (ASTM C1611) determina la extensibilidad alcanzada por el concreto en diferentes tiempos, a decir, cero minutos, quince minutos y treinta minutos. Se evalúan dos diseños de mezcla y para cada diseño de mezcla se realizan doce especímenes que serán utilizados para determinar la resistencia a la compresión a un día, siete días y veintiocho días, relación de Poisson y módulo elástico del concreto.

Se estableció los mismos parámetros de control para el concreto fresco utilizados en la planta de prefabricado pesado para la medición de algunas variables del concreto, entre ellas la temperatura ($< 35^{\circ}\text{C}$), el contenido de aire ($< 3,0\%$) y el flujo inicial con un valor superior a 75 mm sin segregación. La resistencia mínima a la compresión especificada es de 68,6 MPa.

Con el objeto de probar la confiabilidad y representatividad de los resultados se realiza el análisis de normalidad utilizando la metodología de Anderson Darling para la resistencia a la compresión y los datos de módulo de elasticidad donde el valor crítico (V_c) es 1,029 para el cálculo de normalidad. En esta investigación se determinó que A^2 es menor que V_c , por lo cual se deduce que los datos de resistencia a la compresión y E_c obtenidos a la edad de veintiocho días son normales.

Temperatura

La máxima temperatura registrada fue de $27,5^{\circ}\text{C}$ la cual se mantiene 22,5% por debajo de la temperatura máxima especificada en el ACI 305.1M-14 (35°C), lo cual significa que el tipo de cemento bajo condiciones controladas no afecta la temperatura del concreto recién mezclado. En la Figura 1 se observa el comportamiento de los valores de temperatura.

Día de prueba	Cemento MC/A-AR	Cemento MP/A-28
1	25,0	24,0
2	25,0	24,0
3	27,5	25,0
4	23,5	22,5
5	22,5	24,0
6	22,0	22,0
7	22,5	24,0
8	25,0	25,5
9	19,0	20,0
10	23,0	24,5
Promedio	23,5	23,6
Dest estándar	2,2	1,5
Máximo	27,5	25,5
Mínimo	19,0	20,0
Moda	25,0	24,0
CV	9,3%	6,5%
Rango	8,5	5,5

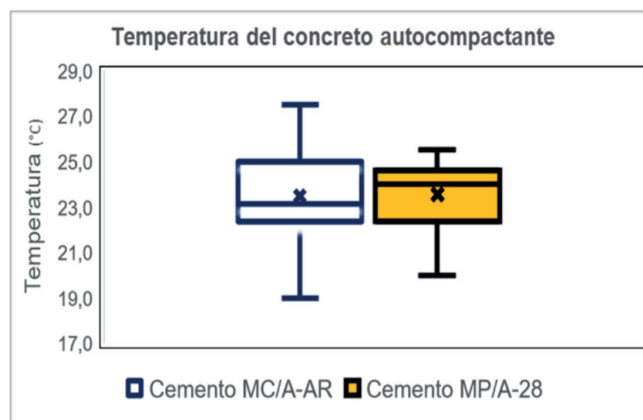


Figura 1. Comportamiento de la temperatura del concreto fresco

Se observó también que, durante los primeros cuatro días la temperatura del concreto fue superior usando cemento MC/A-AR, exceptuando el día 6 donde ambas mezclas alcanzaron la misma temperatura. En los días restantes el comportamiento fue inverso. De lo anterior se puede deducir que los datos presentan un comportamiento estocástico.

La mezcla que utilizó cemento MC/A-AR tiene un mayor coeficiente de variación debido a que el rango es superior respecto al cemento que tiene adición de puzolana (MP/A-28).

Peso unitario

Es interesante apreciar que ambas mezclas tienen el mismo rango, sin embargo, la mezcla con cemento MC/A-AR presenta una menor dispersión y al graficar estos datos en la figura 4.7 se observa que se obtiene un concreto 1,3% más denso al utilizar el cemento MC/A-AR.

Lo anterior es un indicador de que el tipo de cemento a utilizar en el concreto tiene poca inferencia en el resultado de la prueba del peso unitario del concreto.

Contenido de aire

Debido a los coeficientes de variación tan altos en los resultados del concreto con cemento MC/A-AR (39,3 %) y para la mezcla con cemento MP/A-28 de (55,8 %), se procedió a realizar una investigación de dos proyectos de estructuras prefabricadas que fueron elaboradas con concreto autocompactante similar al de este estudio y se compararon

los resultados de ambos proyectos con los resultados aquí mostrados, llegando a determinar que la magnitud de la escala es una de las causas de dicha dispersión, esto significa que al ser los datos valores pequeños se convierten en valores grandes cuando se traducen a porcentaje. Además, es posible que el coeficiente de variación se vea afectado por la cantidad de datos del presente análisis respecto a la cantidad de datos de los proyectos revisados.

Se debe considerar también, que este tipo de concreto no está diseñado con un aditivo inclusor de aire y el aditivo HRWR utilizado es el mismo de las mezclas desarrolladas para esta investigación y el de las mezclas de los dos proyectos de estructuras prefabricadas. Esto significa que el contenido de aire alcanzado depende del tiempo y equipo de mezclado (el equipo de la planta es más eficiente que el del laboratorio).

Siguiendo la misma línea del análisis, otra posible razón de la dispersión de datos se puede justificar con el hecho de que hubo mezclas que presentaron exudación mínima, lo cual por el tipo de equipo utilizado pudiera ser que se estuviera midiendo el contenido de aire de la pasta y no el del concreto. Cuando se mide el contenido de aire de la pasta es esperable que el mismo presente valores por debajo de 1%, y entonces para un mismo día de prueba se pueden dar valores de contenido de aire con diferencias superiores a 0,8%, lo cual corresponde al valor máximo permitido en el apartado de precisión y sesgo de la norma ASTM C231.

Es importante señalar que todos los datos de contenido de aire mostrados en la figura 3 cumplen con el parámetro de control para el contenido máximo de aire (< 3 %).

Nuevas variables estadísticas del peso unitario del concreto (kg/m³)		
Promedio	2423	2391
Dest estándar	17	25
Máximo	2448	2408
Mínimo	2394	2354
Moda	2419	2405
CV	0,7%	1,1%
Rango	54	54

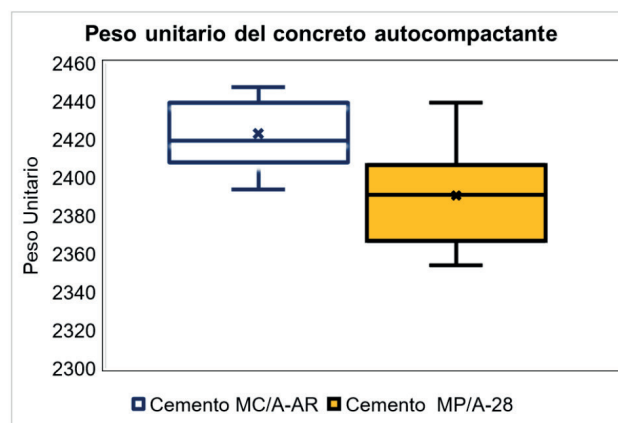


Figura 2. Comportamiento del peso unitario del concreto fresco

Comparación del contenido de aire del concreto (%)

Día de prueba	Cemento MC/A-AR	Cemento MP/A-28
1	1,7	1,7
2	2,4	2,5
3	1,7	0,5
4	0,5	0,8
5	1,2	1,6
6	1,5	3,0
7	1,0	1,2
8	0,5	0,6
9	1,3	0,9
10	2,0	1,3
Promedio	1,5	1,4
Dest estándar	0,6	0,8
Máximo	2,4	3,0
Mínimo	0,5	0,5

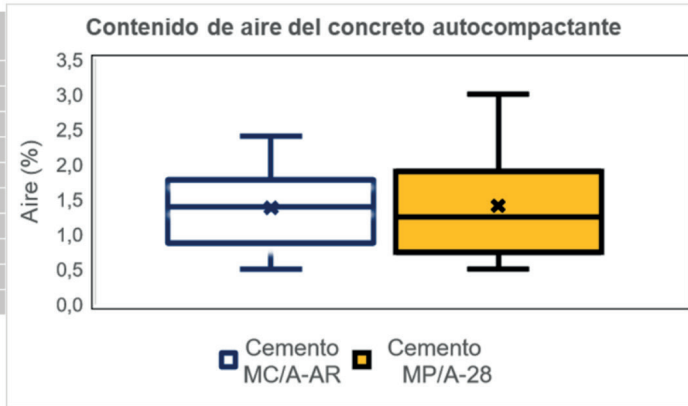


Figura 3. Comportamiento del contenido de aire del concreto fresco

Trabajabilidad medida en flujo de asentamiento sin restricción

Dado que se había establecido un flujo de asentamiento inicial entre 650 mm a 800 mm y que el proceso de colocación y compactación del SCC en la planta de prefabricado es tan rápido, no se requiere mantener la trabajabilidad de la mezcla por más de 30 minutos. Es debido a que el tiempo transcurrido desde que el concreto sale del centro de mezclado y llega al molde es usualmente de 15 minutos, y la descarga del SCC en el molde no tarda más de 10 minutos; los autores determinan que los tiempos críticos para la medición del flujo es a los 0, 15 y 30 min.

En general ambas mezclas de concreto cumplen con el flujo inicial, pero se distingue que el concreto con cemento MP/A-28 mantiene el flujo sin restricción por un tiempo mayor.

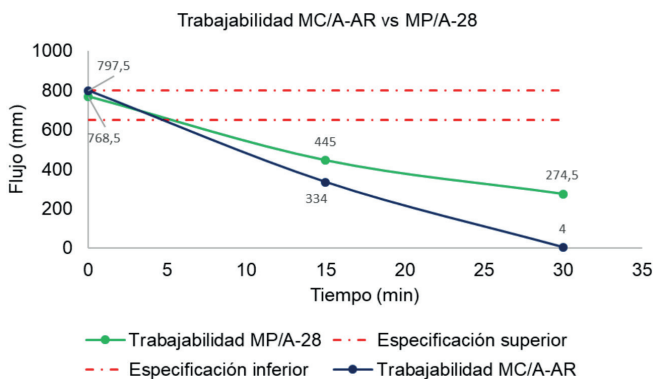


Figura 4. Curva comparativa de pérdida de trabajabilidad

Resistencia a la compresión

En la figura 5 se visualiza que la mezcla de cemento MC/A-AR desarrolla mayor resistencia a la edad de 7 y 28 días. Esto es lo esperado debido a que este tipo de cemento contiene un mayor porcentaje de clinker y con presencia de caliza que mejora la trabajabilidad del SCC. Por otro lado, el cemento MP/A-28 tiene un menor contenido de clinker respecto al cemento MC/A-AR y un mayor contenido de puzolana que contribuye a la durabilidad del SCC.

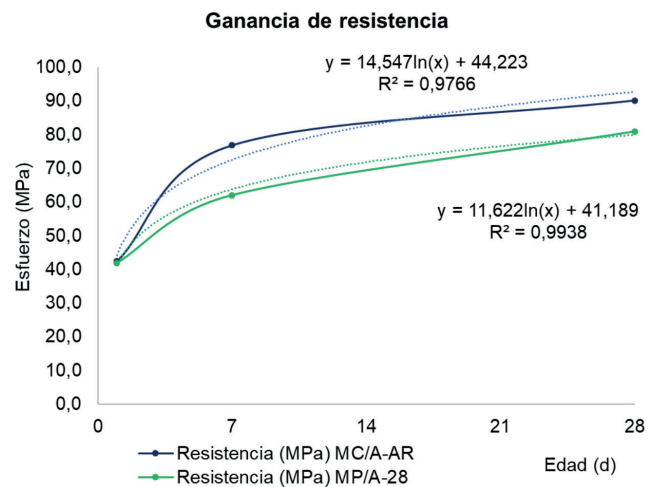


Figura 5. Curva de desarrollo de resistencia a la compresión

Se observa que la mezcla con cemento MC/A-AR tiene un mayor desarrollo de (nominal especificada de 68,6 MPa) la cual alcanza a los 6 días, mientras que la mezcla que contiene cemento MP/A-28, esta resistencia se logra a la edad de 11 días.

Los factores de proyección se muestran a continuación:

Tabla 1. Factores de proyección

Edad	Factor MC/A-AR	Factor MP/A-28
16 h	43 %	45 %
18 h	44 %	47 %
1 d	47 %	52 %
7 d	85 %	77 %
28 d	100 %	100 %

Relación de Poisson

En la figura 6 se observa que el módulo de Poisson promedio es de 0,22 para el concreto con cemento MC/A-AR y 0,21 para el concreto con cemento MP/A-28.

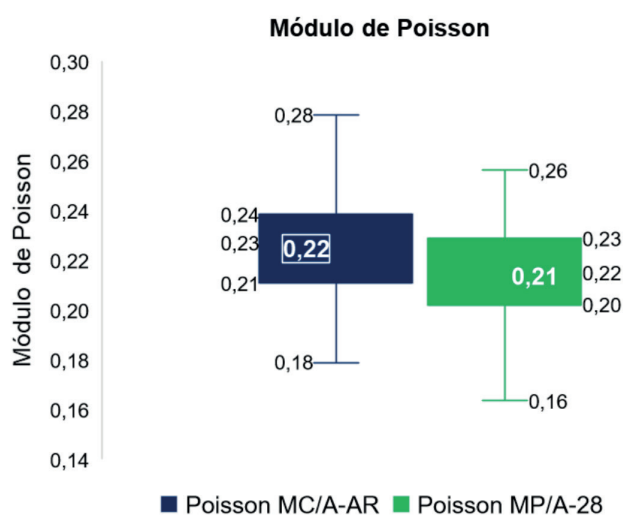


Figura 6. Módulo de Poisson para las mezclas de SCC

Ambos concretos tienen una distribución muy similar, ya que, presentan el mismo rango (0,10) y mismo rango intercuartilico (0,03). Por otra parte, como la única variable es el cemento, se deduce que el mismo no tiene gran aporte en el valor del módulo de Poisson y sin problema se puede utilizar un valor promedio de 0,215 para el SCC estudiado en este proyecto.

Módulo de elasticidad

Los resultados del módulo de elasticidad (E_c) obtenidos para ambas mezclas se comparan mediante las siguientes ecuaciones:

- ACI 318S-14 ecuación simplificada:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

- ACI 318S-14 que utiliza el peso unitario:

$$E_c = W_c^{1,5} * 0,043 \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

- ACI 363R-10: $E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \text{ (MPa)}$ (3)

- Fórmula de Aragón (2004)⁽¹⁾:

$$E_c = 3430 \sqrt{f'_c} + 3500 \text{ (MPa)} \quad (4)$$

En la figura 7 se muestran los datos de distribución del E_c para la mezcla SCC con cemento MC/A-AR y para la mezcla SCC con cemento MP/A-28, donde se nota que los datos de E_c con cemento MC/A-AR presentan una menor dispersión debido a la amplitud de la curva. Además, el grado de confianza con el que se predice el E_c del SCC que contiene cemento MC/A-AR es mayor al SCC que utiliza cemento MP/A-28.

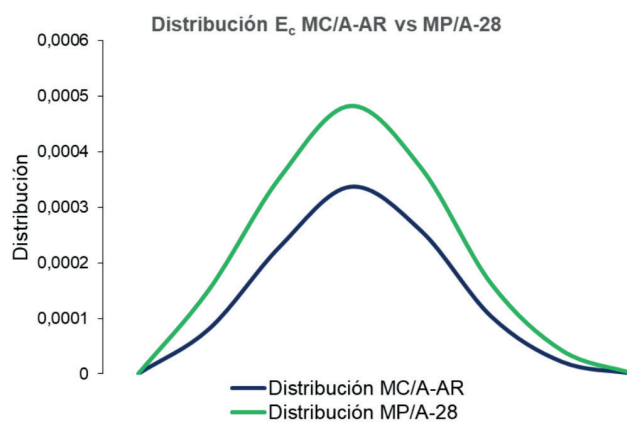


Figura 7. Distribución Gaussiana de E_c

La figura 8 muestra la relación lineal que existe entre E_c y $\sqrt{f'_c}$. En esta se advierte, como la curva experimental tiene gran similitud con la curva ACI 363R-10, tanto en pendiente como en magnitud, siendo la diferencia promedio entre ambas de 0,96 %.

Además, cuando se hacen las diferencias porcentuales entre las curvas, se obtiene que la experimental es superior que la de Aragón en un 5,5 % y es menor en 17,1 % respecto a la curva generada con la ecuación simplificada del ACI 318S-14.

⁽¹⁾ La ecuación propuesta por Aragón corresponde a su investigación sobre concretos de alto desempeño fabricados en misma planta de prefabricado pesado.

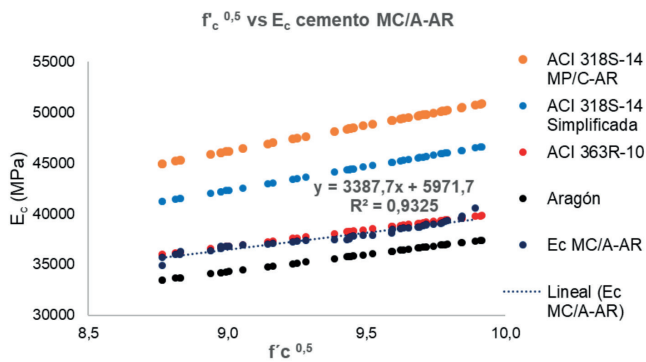


Figura 8. Curvas de E_c para el SCC con MC/A-AR

Al comparar la curva experimental respecto a la ecuación del ACI 318S-14 que utiliza el peso unitario se obtiene que esta última es superior en 27,8 %.

También, se muestra la ecuación generada con la curva de mejor ajuste para la curva experimental, donde se observa un valor de R^2 igual a 0,9325, lo cual, indica que existe una muy buena relación lineal, intuyendo que no se alcanza un mejor resultado de R^2 debido a la variación que proviene de los datos de la resistencia a la compresión del concreto.

La figura 9 muestra que la curva experimental tiene una pendiente diferente a todas las mostradas empezando con el dato mínimo cercano a la curva de Aragón, intersectando la curva generada con la ecuación del ACI 363R-10 y finalizando con el dato máximo cercano a la curva generada con la ecuación simplificada del ACI 318S-14. Esto se justifica con la dispersión en el E_c mostrado en la figura 8.

Ahora bien, la diferencia en magnitud, entre la curva experimental y la de Aragón es de 8,1 %. Cuando se compara la curva experimental con la curva generada de la ecuación simplificada del ACI 318S-14, se obtiene, una diferencia del 13,3 %, siendo esta última superior.

Al hacer la misma comparación descrita en el párrafo anterior entre la curva experimental y la curva generada con la ecuación ACI 318S-14 que utiliza el peso unitario se obtiene que esta última es superior en 21,2 %.

Por último, la diferencia entre la curva experimental y la curva generada con la ecuación ACI 363R-10 es de un 1,4 %.

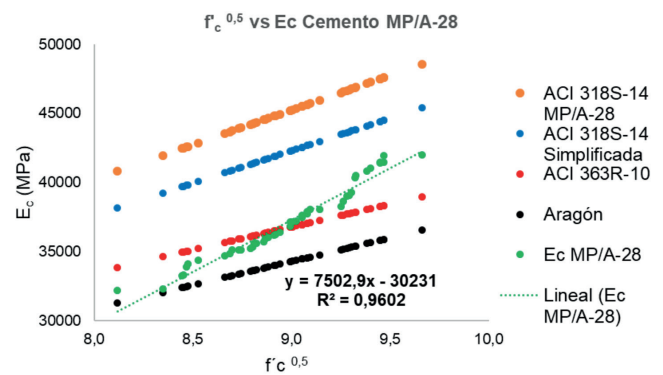


Figura 9. Curvas de E_c para el SCC con MP/A-28

Aunque la pendiente mostrada para la curva experimental en la figura 9 no se ajusta al patrón de las otras curvas, se observa que la ecuación de mejor ajuste tiene un R^2 de 0,9602 lo cual da un muy buen resultado para pensar en la propuesta de una ecuación para este tipo de concreto.

Al hacer una comparación de la diferencia en magnitud de E_c entre la mezcla SCC con cemento MC/A-AR y la que SCC con cemento MP/A-28 (Tabla 2), se observa que no hay mayor afectación en la magnitud del E_c cuando usa cemento MC/A-AR o cemento MP/A-28.

Tabla 2. Datos comparativos entre E_c y $\sqrt{f'_c}$				
	Datos MC/A-AR		Datos MP/A-28	
	$\sqrt{f'_c}$	E_c	$\sqrt{f'_c}$	E_c
Promedio	9,4	37825,4	9,0	37228,5
Desviación estándar	0,3	1179,0	0,3	2749,3
Máximo	10,0	40602,4	9,7	42689,7
Mínimo	8,8	34875,3	8,1	32178,5
Coficiente de variación	3,7%	3,1%	3,9%	7,4%
n	48,0	48,0	46,0	46,0
Diferencia MC/A - AR vs MP/A-28				
	$\sqrt{f'_c}$		4,9%	
	E_c		1,6%	

Al no existir mayor diferencia en la magnitud de los resultados de E_c en ambas mezclas de SCC, en la figura 10 se presenta la curva experimental para la totalidad de los datos, de la cual se obtiene la ecuación $E_c = 5195,6\sqrt{f'_c} - 10178$. Sin embargo, debido a que la mayoría de los diseñadores utilizan la ecuación simplificada del ACI 318S-14, los autores proponen una ecuación acorde con el desempeño del SCC con cementos MC/A-AR y MP/A-28, la cual posee un formato simplificado al igual que la del ACI 318S-14.

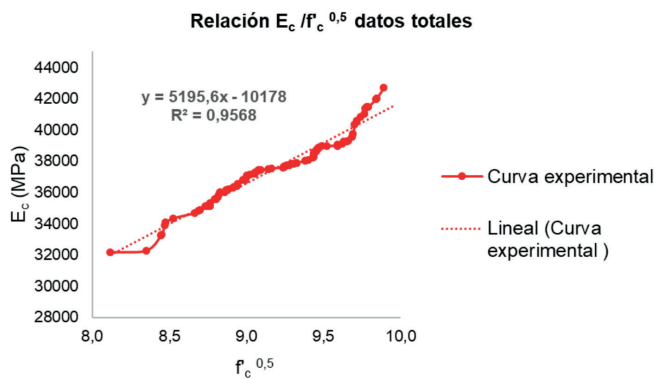


Figura 10. Curva experimental de mejor ajuste

Sabiendo que los datos son normales y que son confiables, se procede a promediar los datos experimentales de E_c y $\sqrt{f'_c}$ de las mezclas estudiadas y se obtiene un E_c promedio de 37527,0 MPa y un promedio de 9,2 MPa para $\sqrt{f'_c}$ de tal manera que;

$$Factor = \frac{37527,0}{9,2} = 4079 \approx 4080 \quad (5)$$

Entonces la ecuación propuesta es:

$$E_c = 4080\sqrt{f'_c} \quad (6)$$

Al graficar nuevamente, los datos tal y como se hizo en las figuras 8 y 9, se obtiene la figura 11 donde se observa que no hay mayor diferencia cuando se calcula el E_c con la ecuación del ACI 363R-10 o cuando se calcula con la ecuación propuesta (ec.6)

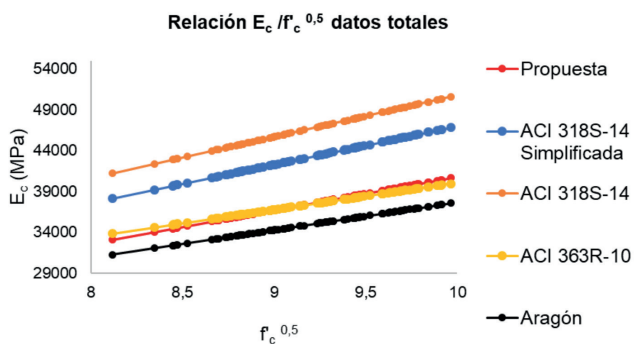


Figura 11. Comparación de datos con ecuación propuesta

Al comparar el E_c calculado con la ecuación propuesta respecto a la ecuación ACI 363R-10 se encuentra una diferencia de 0,3%. Al revisar el E_c de la ecuación propuesta con la ecuación simplificada del ACI 318S-14 se obtiene que excede el valor en un 15,2%.

Cuando el E_c es calculado con la ecuación del ACI 318S-14 que utiliza el peso unitario del concreto también supera en un 8,0% el valor de E_c calculado con la ecuación propuesta y al realizar el mismo ejercicio con la ecuación propuesta por Aragón se obtiene un valor 6,9% inferior que la ecuación propuesta.

Módulo de cortante

Se obtiene el resultado de módulo de cortante utilizando los datos experimentales de E_c y relación de Poisson obtenidos en el presente trabajo con la siguiente ecuación:

$$G_c = \frac{E_c}{2(1+\mu)} \quad (7)$$

Donde:

G_c = Módulo de cortante

E_c = Módulo de elasticidad

μ = Coeficiente de Poisson

De la ecuación anterior se deduce que cuando el coeficiente de Poisson es 0, el módulo de cortante es la mitad del módulo de elasticidad, y cuando es 0,5 (valor máximo que físicamente podría alcanzar), el módulo de cortante es una tercera parte del módulo de elasticidad.

Por lo tanto, debido a que el E_c promedio de los datos totales presentado anteriormente es 37527.0 MPa y el coeficiente de Poisson es de 0,215 se tiene que:

$$G_c = \frac{37527,0}{2(1+0,215)} = 15443,2 \text{ MPa} \approx 15443 \text{ MPa} \quad (8)$$

El resultado anterior indica que el módulo de cortante para el SCC es aproximadamente, un 41% del módulo de elasticidad.

4. CONCLUSIONES

- Existe un mejor coeficiente de variación en el E_c cuando se utiliza el cemento MC/A-AR en el SCC, observándose que los tipos de cemento utilizados no influyen de manera significativa en el valor de módulo de elasticidad en el presente estudio.
- Cuando se utiliza el cemento MP/A-28 en el SCC, existe una mayor trabajabilidad y el rango de temperatura es menor en 35%, respecto al rango del SCC con cemento MC/A-AR. Sin embargo, también presenta mayor dispersión en los resultados de peso unitario y contenido de aire al utilizar en el SCC con cemento MP/A-28.
- El SCC con cemento MC/A-AR presenta menor coeficiente de variación para sus variables en estado endurecido, adicionalmente excede la resistencia promedio a la del SCC con MP/A-28 a las edades de 1,7 y 28 días en 1,2%, 19,3% y 10,2% respectivamente, alcanzando la resistencia especificada a la edad de 6 días, mientras que el SCC con cemento MP/A-28 la alcanza a los 11 días. Además, cuando se utiliza cemento MP/A-28 en el SCC es esperable datos promedio de E_c y μ menores en 1,6% y 4,9% respecto al obtenido en el SCC cuando se usa cemento MC/A-AR.

- Se establece la ecuación $E_c = 4080\sqrt{f'_c}$ que relaciona f'_c y E_c obteniendo un valor de R^2 de 0,9568 con la totalidad de los datos.
- Se determinó mediante la metodología de Anderson-Darling que los resultados obtenidos en esta investigación para f'_c y E_c a la edad de 28 días tienen una confiabilidad del 99%.
- Al calcular E_c con las ecuaciones consideradas respecto a la propuesta (ec.6), se obtiene que las del ACI 318-14 (ec.1 y ec.2) sobrestiman en 15,2% y 8% respectivamente, mientras que la ecuación propuesta por Aragón (ec.4) subestima en 6,9% y la del ACI 363-10 (ec.3) es casi igual ya que es levemente menor en 0,3% en el valor de módulo de elasticidad.
- Con los valores obtenidos de E_c y μ se concluye que G_c es un 41% de E_c para el SCC confirmando que G_c usualmente estará entre 0,33 y 0,5 de E_c .

5. REFERENCIAS

- ACI committee. 237.237R-07 Self-Consolidating Concrete. Impreso en U.S.A. Preparado por el Comité ACI 237.
- ACI committee 305. ACI 305.1-14 Specification for Hot Weather Concreting. Impreso en USA. Preparado por el comité ACI 305.
- ACI committee 318. ACI 318S-14 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural e ACI 318RS-14 Comentario de Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. Impreso en U.S.A. Preparado por el comité ACI 318.
- ACI committee 363. ACI 363R-10 Report on High-Strength Concrete. Impreso en U.S.A. Preparado por el comité ACI 363.
- Aragón Másis Sergio. Determinación del módulo de elasticidad de concretos normales y de alto desempeño en Costa Rica. Informe de Trabajo de Graduación para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica, 2004.
- Aitcin, P.C. (2008). Concreto de alto desempeño. 1ed, Costa Rica: Editorial Jiménez&Tanzi.
- American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM C31 / C31M-18b, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM C29 / C29M-17a, Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM C39 / C39M-18, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM C127-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM C128-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2014). ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM C138 / C138M-17a, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2016). ASTM C192 / C192M-16a, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM C231 / C231M-17a, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2014). ASTM C469 / C469M-14, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM C470 / C470M-15, Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2013). ASTM C566-13, Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2003). ASTM C1064 / C1064M-03, Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Portland Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.

- American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM C1611 / C1611M-18, Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM C1758 / C1758M-15, Standard Practice for Fabricating Test Specimens with Self-Consolidating Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Comité de Certificación de programas del ACI.CP-1S (15) (2015). Técnico para pruebas al concreto en la obra-Grado I. Farmington Hills, Michigan: Instituto Americano del concreto.
- McCormac; J.C; Brown, R.H. (2011). Diseño de concreto reforzado. México: Alfaomega Grupo Editor,S.A.de C.V.
- Kosmatka, S.H.; Kerkhoff, B.; Panarese, W. C.; y Tanesi, J. (2004) Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Skokie, Illinois, EE.UU: Portland Cement Association.
- Nilson, A. H. (2001). Diseño de estructuras de concreto. Santafé de Bogotá Colombia: Mc Graw Hill Interamericana S.A.
- Popov, E. (2000). Mecánica de sólidos, México: Editorial Pearson, Educación.