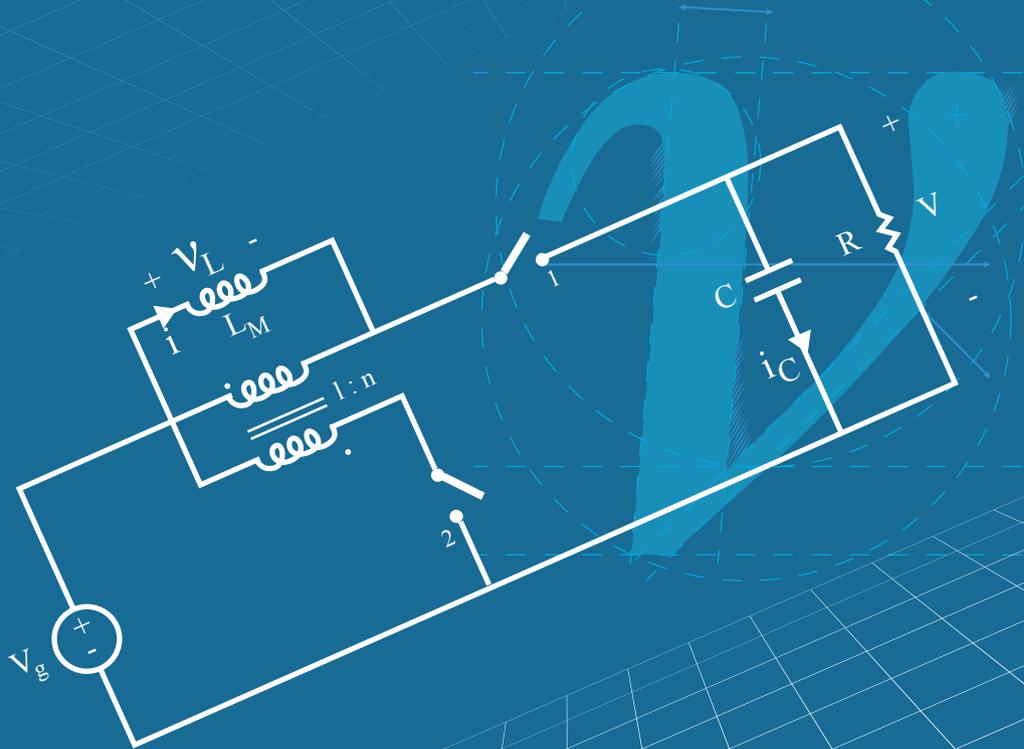


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
AGOSTO/DICIEMBRE 2012 - VOLUMEN 22 Número (2)



Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica
Volumen 22 – Agosto/Diciembre 2012 –Número 2

DIRECTOR

Ing. Juan Carlos Chaves De Oña, Ph. D.
Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad de Costa Rica

EDITOR

Ing. Manuel Montoya Maroto.
Escuela de Ingeniería Industrial
Universidad de Costa Rica

CONSEJO EDITORIAL

Ing. Edwin Solórzano Campos, M. Sc. Decano de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica
Ing. Georges Govaere Vicarioli, Ph. D. Director del Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica
Ing. Ronald Argüello Venegas, Ph. D. Profesor pensionado de la Universidad de Costa Rica
Ing. Juan Gabriel Monge Gapper, M. Sc., Profesor de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica
Ing. Guillermo Santana Barboza, Ph. D. Profesor de la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica
Ing. Juan Araque Skinner, M.Sc. Director de la Escuela de Ingeniería Topográfica, Universidad de Costa Rica
Ing. Manuel Molina Córdoba. Profesor de la Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica
Ing. José Miguel Mena Marín, MBA, GIP LTDA
Ing. Luis Diego Marín Naranjo, M. Sc., Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica
Ing. Rodolfo Herrera Jiménez, Ph. D. Profesor emérito de la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica

CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Editorial de la Universidad de Costa Rica
Apartado Postal 11501-2060
Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

CANJES

Universidad de Costa Rica
Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información
Unidad de Selección y Adquisiciones-CANJE
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes
Costa Rica

SUSCRIPCIÓN ANUAL:

Costa Rica: ₡ 4000,00
Otros países: US\$ 20,00

NÚMERO SUELTO:

Costa Rica: ₡ 2000,00
Otros países: \$ 20,00

Esta revista se encuentra indizada en Latindex,
Engineering Index y Compendex



Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica
Volumen 22 – Agosto/Diciembre 2012 –Número 2

Edición aprobada por la comisión de la Universidad de Costa Rica
© 2010 EDITORIAL UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Todos los derechos reservados conforme a la ley
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes
San José, Costa Rica

Supervisión:

Ing. Juan Carlos Chaves De Oña, Ph.D.

Ing. Manuel Montoya Maroto, E.I.

D.I. Marcela Quirós Garita, M.Sc.

Colaboración:

Srta. Ingrid Vargas Romero, asistente de filología, estudiante de la Escuela de Filología de la Universidad de Costa Rica.

Srta. Ana Elizabeth González López, estudiante de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Costa Rica.

Diagramación:

Luis Arias Mesén.

Katherine Canales Montoya, estudiante de Artes Plásticas con énfasis en Diseño Gráfico de la Univesidad de Costa Rica.

Diseño de portada:

Luis Arias Mesén.

MÓDULO DE ELASTICIDAD EN CONCRETOS DE ALTO DESEMPEÑO

*Ing. Christian Guerrero Vargas
Ing. Alejandro Navas Carro. MSc*

Resumen

En el diseño de estructuras de concreto es importante conocer con la mayor exactitud posible las propiedades del concreto, entre ellas su módulo de elasticidad. Como los concretos de alta resistencia tienen diferencias con los concretos de resistencia normal, se hace necesario investigar sus propiedades con los materiales que lo componen, con el fin de obtener ecuaciones que relacionen directa e indirectamente la resistencia del concreto con el módulo de elasticidad.

Este artículo presenta los resultados de investigaciones realizadas para obtener ecuaciones que relacionan el módulo de elasticidad en concretos normales y de alto desempeño (CAD) con su resistencia, utilizando materiales de origen nacional. Se evaluaron cuatro resistencias de concreto: 30 MPa, 50 MPa, 70 MPa y 90 MPa.

Las ecuaciones resultantes fueron comparadas con las descritas en códigos como el ACI 318S-08 y ACI 363R-10, así como con investigaciones similares realizadas en Costa Rica. Como resultado final, se obtuvieron una serie de ecuaciones para predecir el módulo de elasticidad que pueden ser usadas en el diseño de estructuras de concreto de mediana a alta resistencia producidos en Costa Rica.

Palabras claves: Diseño de concreto, módulo de elasticidad; concreto de alta resistencia.

Abstract

For the design of concrete structures, it is highly important to know the properties of the concrete; one of them is the modulus of elasticity. Since high strength concrete has differences with normal strength concrete, it is necessary to investigate and evaluate its properties, to obtain equations that relate, directly and indirectly, concrete strength and the modulus of elasticity.

This article presents the results of an investigation made to obtain equations of the modulus of elasticity on normal concretes and high performance concrete (HPC). Four concrete strengths were evaluated: 30 MPa, 50 MPa, 70 MPa and 90 MPa.

The resulting equations were compared with the ones provided by the code ACI 318S-08 and ACI 363R-10, along with similar studies conducted in Costa Rica. As a result, a series of equations were obtained and can be used to predict modulus of elasticity and can be applied in the design of normal and high strength concrete elements produced in a plant in Costa Rica.

Keywords: Concrete design, elastic modulus, high strength concrete.

Recibido: 23 de agosto del 2012 · **Aprobado:** 22 de febrero del 2013

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo

Determinar el módulo de elasticidad de concretos de producción industrial en Costa Rica por medios experimentales, con resistencias entre 30 y 90 MPa.

1.2 Alcance

Por medio de esta investigación se determinan los módulos de elasticidad en concretos de fabricación nacional con resistencias de 30 MPa, 50 MPa, 70 MPa y 90 MPa. Los especímenes de prueba se elaboraron en plantas de prefabricado y se ensayan en laboratorio de acuerdo a la normativa ASTM C-469. Los cilindros de concreto utilizados para las pruebas son de 6 pulgadas x 12 pulgadas (152 mm x 305 mm).

Este estudio pretende determinar una relación directa entre el esfuerzo último del concreto y el módulo de elasticidad en concretos de producción industrial elaborados con agregados y cementos de origen nacional.

1.3 Metodología

El muestreo se realizó según ASTM C-172-06, el curado según ASTM C-192, la medición de esfuerzo último a la compresión según ASTM C-39 y la medición del módulo estático de elasticidad según ASTM C-469.

1.4 Generalidades

En los últimos años, debido al desarrollo tecnológico, se han llegado a implementar avances en la elaboración de concretos de alto desempeño (CAD) por medio de la técnica y la investigación. Estos han ayudado al desarrollo de infraestructura en obras de grandes dimensiones y, con su mejor manejo, se han logrado beneficios económicos por medio de un diseño eficiente que aprovecha de mejor forma cada uno de los componentes del concreto. Estos concretos poseen como características

principales el desarrollo de resistencias entre 50 MPa y 100 MPa (500 kg/cm² y 1000 kg/cm²), así como mejoras en la trabajabilidad, menor permeabilidad, mayor desarrollo de resistencia a edades tempranas, y mayor durabilidad ante la abrasión y ante la agresividad química; todo esto mediante la inclusión de aditivos minerales. Sin embargo, uno de los factores importantes para lograr una mayor eficacia en el uso de los materiales que componen el concreto es conocer las características físicas propias de cada uno, el comportamiento y características del concreto, y los fenómenos asociados a su elaboración, uso y cura en las obras.

En cuanto al diseño, es importante conocer de manera precisa los parámetros a utilizar en toda la serie de cálculos propios del diseño de concreto. Entre éstos se puede mencionar el módulo de elasticidad que es uno de los parámetros más importantes en dicho proceso de diseño.

A nivel nacional, Aragón (2004) realizó una investigación en la cual logró determinar de manera experimental ecuaciones para el módulo de elasticidad en concretos elaborados en laboratorio con resistencias entre 21 MPa y 70 MPa. Aun así, es necesario ampliar los estudios a otras condiciones diferentes a las de un laboratorio, por lo que se desarrolló otro proyecto de investigación, Guerrero (2011), incluyendo otras resistencias y concretos. Por ejemplo, modificar las condiciones a las encontradas en campo o en plantas productoras de concreto y evaluar otras resistencias.

Como se señaló anteriormente, con el paso de los años se desarrollan concretos con resistencias mayores debido al mejoramiento de la técnica y avances en tecnología; se usan fuentes nuevas de materiales o las características de los mismos cambian, los aditivos van cambiando o se utilizan nuevos, entre otros. Es por esto que se vuelve necesario generar nuevas ecuaciones para la determinación del módulo de elasticidad en concretos utilizados en Costa Rica.

2. DESCRIPCIÓN DE MATERIALES

Para la mezcla de concreto se utilizaron agregados, cemento y aditivos. El agregado grueso era grava proveniente de Guápiles con las siguientes características:

Cuadro 1. Características del agregado grueso

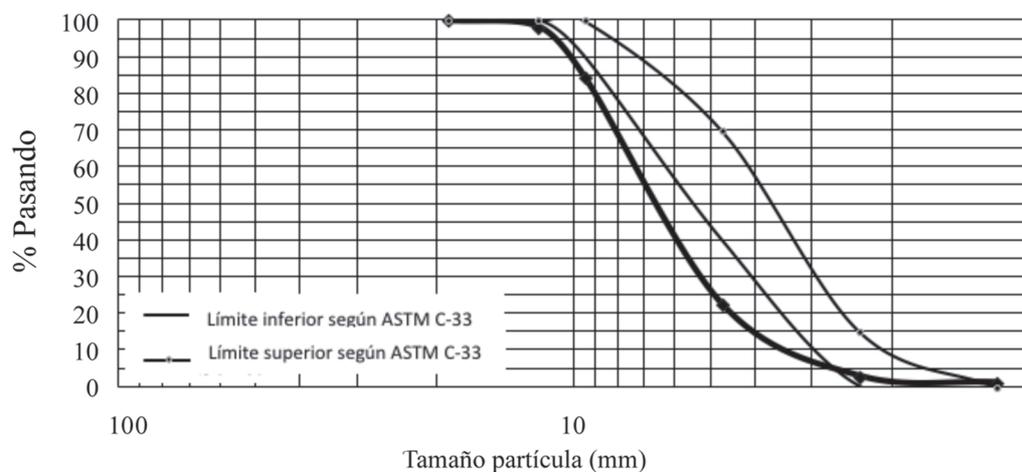
		Método de ensayo
Tamaño máximo	12,5mm	ASTM C136-06
Gravedad específica bruta	2,69	ASTM C127-07
Porcentaje de absorción	2,58%	ASTM C127-07
Peso unitario suelto	1340 kg/m ³	ASTM C29-09
Peso unitario en varillado	1440 kg/m ³	ASTM C29-09

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Cuadro 2. Análisis granulométrico del agregado grueso

Malla #	Tamaño de malla	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasado	Límites
3/4"	19	0	0,0	0,0	100	100-100
1/2"	12	37,4	1,7	1,7	98	100-100
3/8"	9,5	298,0	13,8	15,5	84	90-100
Nº4	4,75	1335,0	61,8	77,4	23	40-70
Nº8	2,36	425,0	19,7	97,1	3	0-15

Fuente: Elaboración propia, 2012.



El análisis granulométrico (ASTM C136-06) se muestra en el Cuadro 2.

El agregado fino utilizado, provino de la misma fuente, uno es arena de río Guápiles y la otra es

arena industrial Guápiles. La arena de río presentó las características que se detallan en el Cuadro 3.

El análisis granulométrico (ASTM C136-06) se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 3. Características de la arena de río

		Método de ensayo
Gravedad específica bruta	2,53	ASTM C128-07
Porcentaje de absorción	3,69%	ASTM C128-07
Peso unitario suelto	1598 kg/m ³	ASTM C29-09
Peso unitario en varillado	1720 kg/m ³	ASTM C29-09

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Cuadro 4. Análisis granulométrico de la arena de río

Malla #	Tamaño de malla	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasado	Límites
3/8"	9,5	0	0,0	0,0	100	100-100
Nº4	4,75	21,18	5,2	5,2	95	95-100
Nº8	2,36	64,9	16,0	21,3	79	80-100
Nº16	1,18	102,01	25,2	46,5	54	50-85
Nº30	0,60	88,13	21,8	68,3	32	25-60
Nº50	0,30	69,33	17,1	85,4	15	10-30
Nº100	0,15	35,73	8,8	94,3	6	2-10
Nº200	0,075	12,05	3,0	97,2	3	0-2

Fuente: Elaboración propia, 2012.

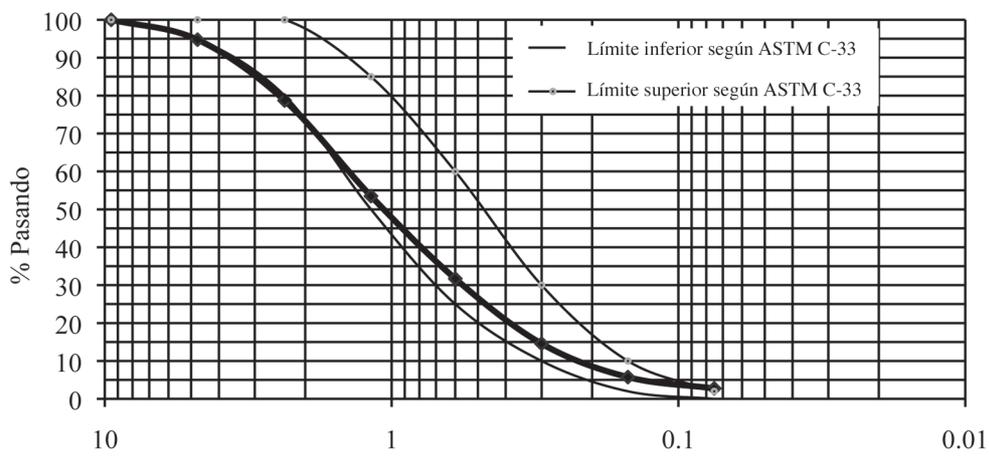


Figura 2. Curva granulométrica de la arena de río.
Fuente: Elaboración propia, 2012.

Para la arena industrial Guápiles se obtuvieron las características que se observan en el Cuadro 5.

El análisis granulométrico (ASTM C136-06) se muestra en el Cuadro 6.

El cemento utilizado para las mezclas de concreto es el denominado UG-AR (de acuerdo al Reglamento Técnico RTCR 383:2004 Cementos

Hidráulicos, Sección 3.9.2), que es similar a un cemento portland tipo III, el cual ayuda a obtener resistencias altas a edades tempranas.

También se utilizó un aditivo superplastificante de alto rango, el cual permitió una mayor trabajabilidad de la mezcla sin comprometer la resistencia, al permitir utilizar bajas relaciones de agua/cemento.

Cuadro 5. Características de la arena industrial

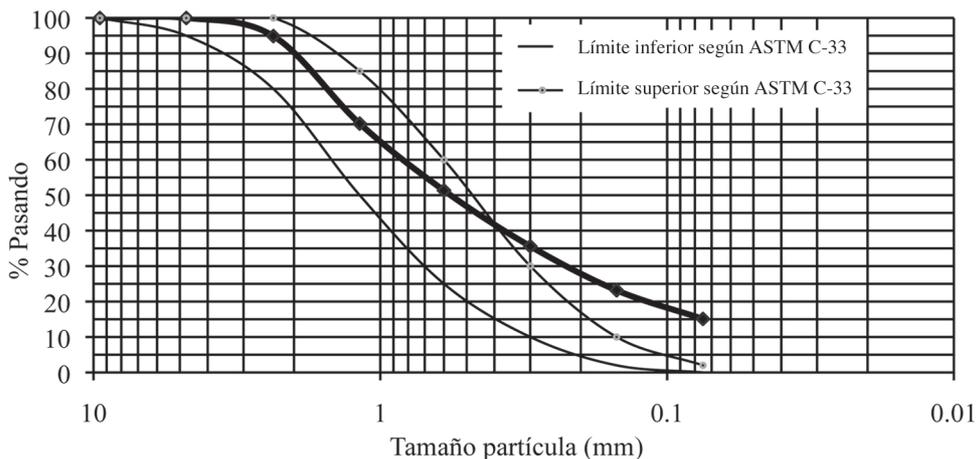
		Método de ensayo
Gravedad específica bruta	2,55	ASTM C128-07
Porcentaje de absorción	3,45%	ASTM C128-07
Peso unitario suelto	1604 kg/m ³	ASTM C29-09
Peso unitario en varillado	1787 kg/m ³	ASTM C29-09

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Cuadro 6. Análisis granulométrico de la arena industrial

Malla #	Tamaño de malla	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasado	Límites
3/8"	9,5	0	0,0	0,0	100	100-100
Nº4	4,75	0	0,0	0,0	100	95-100
Nº8	2,36	35,6	5,1	5,1	95	80-100
Nº16	1,18	172	24,7	29,8	70	50-85
Nº30	0,60	132	18,9	48,7	51	25-60
Nº50	0,30	110	15,7	64,4	36	10-30
Nº100	0,15	86,7	12,4	76,8	23	2-10
Nº200	0,075	56,3	8,1	84,9	15	0-2

Fuente: Elaboración propia, 2012.

**Figura 3.** Curva granulométrica de la arena industrial.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Agregados

Para la elaboración de las mezclas de concreto se utilizaron agregados provenientes de Guápiles de los cuales se describen sus características en la Sección 2. Los análisis granulométricos se realizaron según la norma ASTM C136-06 y se

obtuvieron las características de cada agregado según las normas ASTM C29-09, ASTM C127-07 y ASTM C128-07.

3.2 Mezclas de concreto

El muestreo y moldeo de la mezcla de concreto se realizó en planta mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM C31-10.

Las mezclas de concreto se obtuvieron de la planta de prefabricado pesado (PPP) del Centro Industrial HOLCIM Norte (CIH Norte) y del Centro Industrial HOLCIM Sur (CIH Sur), ubicados en San Rafael de Alajuela. La mezcla de mayor resistencia fue especialmente desarrollada para esta investigación en planta. Las resistencias a la compresión teóricas de las mezclas fueron de 30 MPa, 50 MPa, 70 MPa y 90 MPa.

3.3 Muestreo, preparación y ensayo de especímenes

Para cada uno de los pasos de muestreo, preparación y ensayo de las muestras se siguió la norma ASTM C192-07. El mezclado del concreto se realizó en la mezcladora de la planta, la cual por medios electrónicos realizó las dosificaciones de las diferentes mezclas que fueron utilizadas para cada uno de los elementos elaborados en la planta.

El concreto fue descargado a los moldes, donde se realizó el muestreo. Cerca de los moldes de los elementos se colocaron los moldes de los cilindros

que fueron impregnados con un agente desmoldante. Los cilindros fueron moldeados según la norma ASTM C31.

Los moldes con el concreto se dejaron no menos de 18 horas junto a los elementos para brindar condiciones similares del curado inicial. Al finalizar este tiempo, se procedió a extraerlos de los moldes y a colocarlos en las pilas de curado, donde quedaron completamente sumergidos en agua, (ver Figura 4) hasta la fecha del ensayo en compresión.

Se fallaron más de 60 cilindros para cada resistencia a evaluar (30 MPa, 50 MPa, 70 MPa y 90 MPa) de 152 mm x 305 mm (6 pulgadas x 12 pulgadas). De los cilindros moldeados se utilizaron unos para el ensayo de compresión simple y otros para el ensayo con medición de esfuerzo-deformación.

Antes del ensayo de medición de deformación y la prueba de falla en compresión, se realizó un pulido en las caras de los cilindros, con el fin de brindar una superficie plana y nivelada que no afectara el desarrollo de los esfuerzos en la probeta a ensayar. Luego de este proceso, los cilindros se colocaron nuevamente en las pilas de curado o se llevaron a la cámara húmeda donde se mantuvieron hasta el día del ensayo en compresión.



Figura 4. Proceso de cura de cilindros.
Fuente: Elaboración propia, 2012.



Figura 5. Cilindro instrumentado en máquina.
Fuente: Elaboración propia, 2012.

La determinación de la deformación en los especímenes de concreto y el ensayo de compresión se realizó según la norma ASTM C469-10 mediante la instalación de un deformímetro electrónico con una precisión de 0,001 mm, fijado al concreto mediante anillos y tornillos, como se puede observar en la Figura 5.

Por medio de la falla de los cilindros, se obtuvieron los datos necesarios de deformación de acuerdo con la carga aplicada para graficar las curvas de esfuerzo vs deformación utilizadas en la determinación de las ecuaciones del módulo de elasticidad para concretos de alta resistencia.

4. METODOLOGÍAS DE CÁLCULO

El concreto, tal como otros materiales que se utilizan para elementos estructurales, no presenta un comportamiento perfectamente elástico al momento de deformarse. Este hecho se nota gráficamente como una ligera curva en el diagrama de esfuerzo-deformación en el cual el concreto se comporta de manera elástica no lineal hasta un 40% de $f'c$ aproximadamente y luego su comportamiento cambia a ser visco elástico.

Debido a esto, se han formulado distintas metodologías para la determinación del módulo

de elasticidad, entre las cuales se puede citar el denominado “*módulo cuerda*”, el cual se especifica en la norma ASTM C469-10, que consiste en una línea que se traza desde dos puntos de la curva de esfuerzo-deformación dentro del rango elástico. Una variante para esta metodología, sobre determinar el valor del módulo de elasticidad, es tomar una serie de valores ubicados entre 2 puntos de la curva, donde el comportamiento del material es elástico. Los valores de deformación se ubican en función del esfuerzo y se genera una línea de mejor ajuste, cuya pendiente sea el valor del módulo estático de elasticidad.

4.1 Límite elástico

En cuanto al límite elástico, ACI318S-08 lo especifica como $0,45 f'c$, mientras que la norma ASTM C469-10 lo determina con el valor de $0,40 f'c$. Este valor permite definir el rango de valores en los que se deben tratar de definir los valores del módulo de elasticidad. Con el fin de determinarlos, siempre se deben realizar ensayos previos en muestras no instrumentadas, para definir en primera instancia los valores de $f'c$ y después definir el rango de cargas en las cuales se realizarán las mediciones del módulo de elasticidad.

4.2 Análisis estadísticos

En cuanto a la determinación de la cantidad de muestras, se tomó una cantidad mínima de 30 muestras para cada una de las mezclas a ensayar, ya que de acuerdo con el Teorema del Límite Central, si una muestra es lo bastante grande ($n > 30$), independientemente de la distribución de la variable aleatoria de interés, la distribución de la muestra de interés es aproximadamente normal. Por otro lado, la desviación estándar de, depende de si la población de la cual se obtuvieron las muestras es infinita o no, en este caso no lo es, por lo que la expresión a utilizar es:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{N-n}{N-1}} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad (1)$$

Para un cálculo de la desviación estándar de la muestra, la teoría estadística recomienda un número de elementos (mediciones) “n” no inferior a 7, por lo que, en este caso específico, se cumple presentando un mínimo de 60 muestras por mezcla.

5. RESULTADOS

5.1 Concreto 30 MPa (M-1)

A continuación, se muestra la tabla con los resultados de la resistencia en compresión de los cilindros y la distribución de los ensayos realizados en compresión y medición de deformación.

En el Cuadro 1 se puede observar que las resistencias promedio poseen valores cercanos al valor teórico de 30 MPa donde, en la mayoría de los casos, el valor promedio se encuentra por arriba del valor teórico. Además, se contabilizaron un mínimo de nueve especímenes por mezcla y un mínimo de siete probetas para la determinación del módulo estático de elasticidad. Inicialmente, se contaba con la premisa de que todos los muestreos fueran de doce cilindros, de los cuales tres se utilizaron para determinar la resistencia a la compresión simple (valor con el cual se determinó el rango de valores donde se midieron los esfuerzos y deformaciones en las restantes nueve probetas). Este rango se definió hasta un 60% de la resistencia última, con un mínimo de 6 mediciones de deformación.

Cuadro 7. Resumen de muestreos y resistencias

Muestreo	Edad	Compresión simple	Medición deformación	Total	Resistencia prom. (MPa)	Desv. Est.
1	28 días	2	8	10	31,2	2,70
2	28 días	3	9	12	30,6	2,83
3	28 días	3	9	12	28,4	2,49
4	28 días	2	8	10	34,1	1,31
5	28 días	2	8	12(*)	30,8	2,75
6	28 días	3	9	12	31,5	3,32
7	28 días	3	9	12	29,6	1,95
8	28 días	3	9	12	30,6	2,95
9	28 días	2	7	9	30,3	2,15
	Total	23	76	101		

* En la mezcla 5 no se ensayaron 2 probetas por falla de fluido eléctrico

Fuente: Elaboración propia, 2012.



Figura 6. Fallas típicas de los cilindros ensayados.
Fuente: Elaboración propia, 2012.

En total se moldearon 101 cilindros de concreto, de los cuales 23 se utilizaron para el ensayo de compresión simple y 76 para el ensayo con medición de esfuerzo-deformación.

Para cada uno de los cilindros ensayados, se tabularon los datos de carga en un rango hasta el 60% del esfuerzo estimado, registrando los datos de deformación correspondientes y calculando la deformación unitaria de

acuerdo con la norma ASTM C469-10. Esta información se tabuló en un gráfico de esfuerzo contra deformación unitaria y por medio de una línea de mejor ajuste se obtuvo la ecuación de la recta que presenta como su pendiente el módulo de elasticidad.

Los valores de módulo de elasticidad obtenidos de estas mezclas se tabularon y se obtuvo el gráfico que se muestra en la Figura 7.

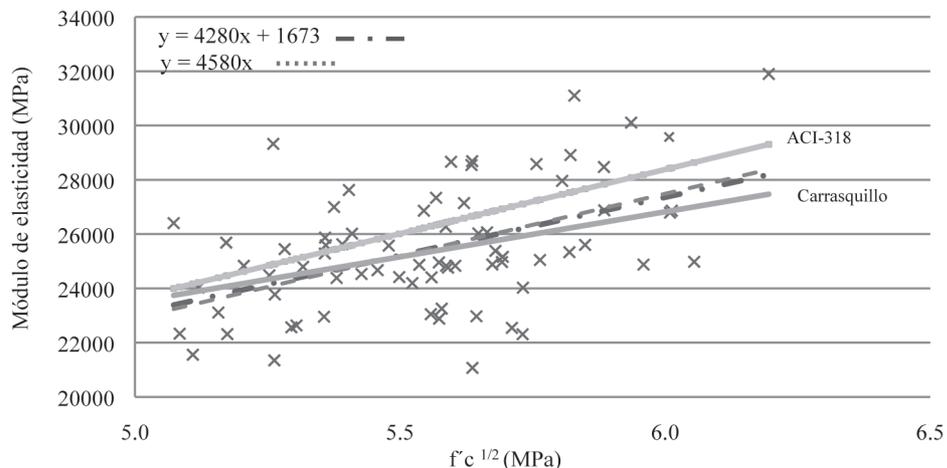


Figura 7. Gráfica de resultados del concreto de 30 MPa con curva de mejor ajuste y ecuaciones de ACI.
Fuente: Elaboración propia, 2012.

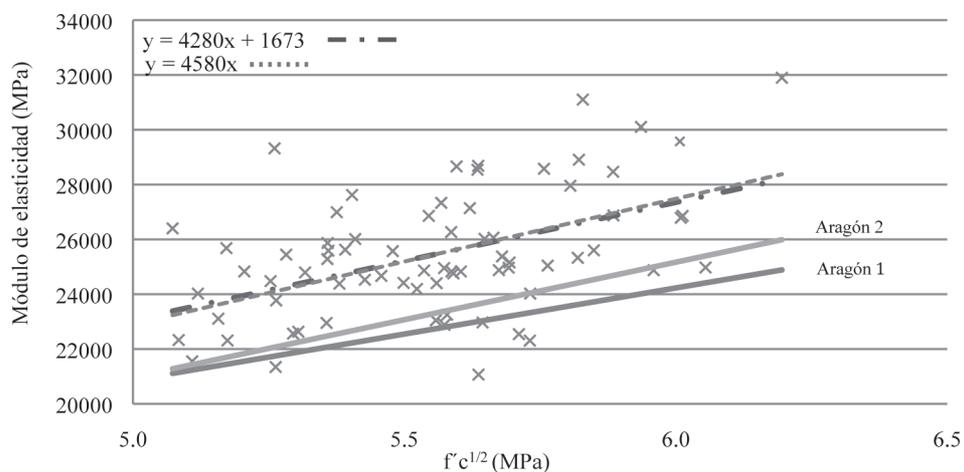


Figura 8. Gráfica de resultados del concreto de 30 MPa con curva de mejor ajuste y ecuaciones de Aragón (2004).
Fuente: Elaboración propia, 2012.

De igual manera se realizó un análisis comparativo con las ecuaciones, correspondientes al estudio de Aragón (2004).

5.2 Concreto 50 MPa (M-2)

A continuación, se muestra la tabla con los resultados de la resistencia a compresión de los cilindros y la distribución de los ensayos realizados a compresión y de medición de deformación.

Los promedios de la resistencia a la compresión (Cuadro 8) presentan valores muy cercanos al estimado teórico del diseño de la mezcla, excepto en la mezcla 2, en la cual la resistencia es aproximadamente 20% menor al valor de diseño.

Para cada uno de los cilindros ensayados, se tabularon los datos de carga en un rango hasta el 60% del esfuerzo estimado, registrando los datos de deformación correspondientes y calculando la deformación unitaria de acuerdo a

Cuadro 8. Resumen de muestreos y resistencias

Muestreo	Edad	Compresión simple	Medición deformación	Total	Resistencia prom. (MPa)	Desv. Est.
1	28 días	3	9	12	52,8	6,71
2	28 días	3	9	12	40,7	6,84
3	28 días	3	9	12	52,7	7,11
4	28 días	3	9	12	52,2	7,16
5	28 días	3	9	12	51,2	2,53
	Total	15	45	60		

Fuente: Elaboración propia, 2012.

ASTM C469-10. Esta información se tabuló en un gráfico de esfuerzo contra deformación unitaria y, por medio de una línea de mejor ajuste, se obtuvo el valor del módulo de elasticidad (la pendiente de la recta en la ecuación de mejor ajuste indicada).

De los resultados obtenidos en los ensayos se desarrollan los siguientes gráficos:

De igual manera se realizó un análisis comparativo con las ecuaciones, correspondientes al estudio de Aragón (2004).

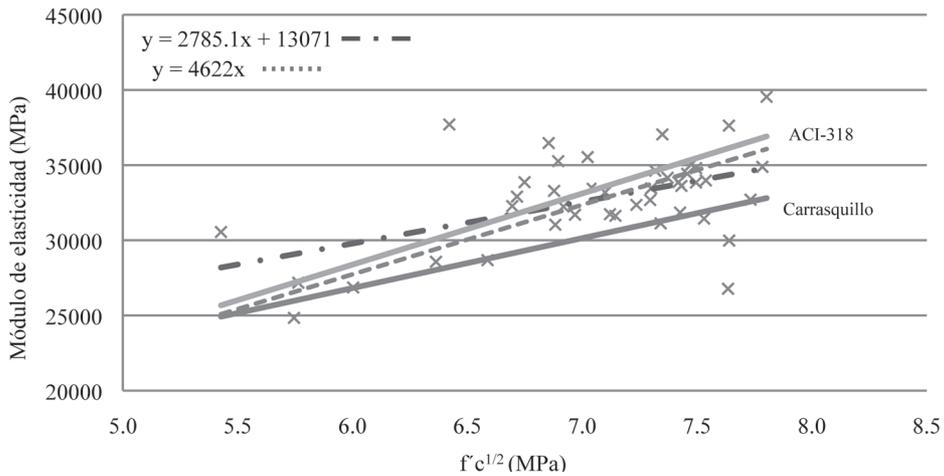


Figura 9. Gráfica de resultados del concreto de 50 MPa con curva de mejor ajuste y ecuaciones de ACI. Fuente: Elaboración propia, 2012.

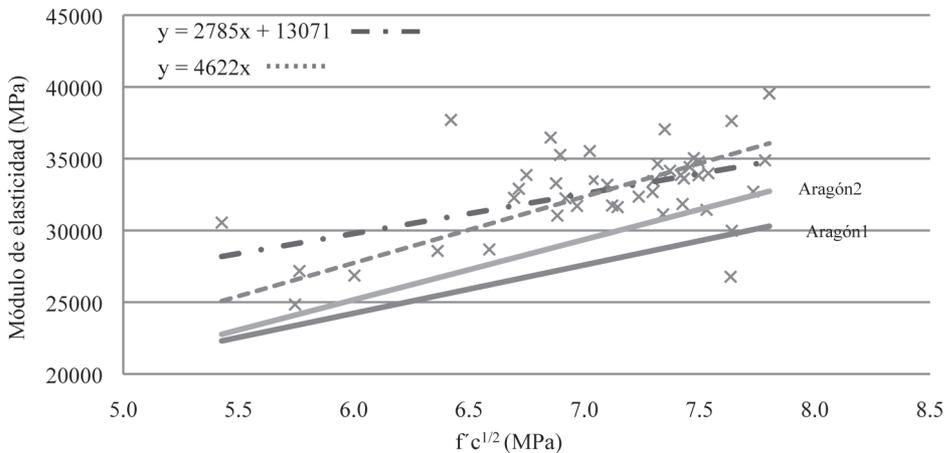


Figura 10. Gráfica de resultados del concreto de 30 MPa con curva de mejor ajuste y ecuaciones de Aragón (2004). Fuente: Elaboración propia, 2012.

5.3 Concreto 70 MPa (M-3)

A continuación, se presenta la tabla de distribución de cilindros por mezcla y cantidad de cilindros ensayados para el concreto con resistencia

a la compresión de 70 MPa. En esta tabla se presentan los valores promedio de la resistencia y su correspondiente desviación estándar.

Para esta mezcla los promedios presentaron valores muy cercanos al valor de diseño de 70

Cuadro 9. Resumen de muestreos y resistencias

Muestreo	Edad	Compresión simple	Medición deformación	Total	Resistencia prom. (MPa)	Desv. Est.
1	28 días	2	5	7	69,7	1,93
2	28 días	2	8	10	73,1	3,68
3	28 días	4	8	12	71,0	5,72
4	28 días	3	9	12	69,6	6,64
5	28 días	3	9	12	61,6	5,59
6	28 días	3	6	9	67,2	5,03
7	28 días	3	9	12	68,5	5,36
8	28 días	3	9	12	73,5	4,96
9	28 días	3	6	9	68,6	10,79
10	28 días	2	5	7	69,5	6,24
Total		28	74	102		

Fuente: Elaboración propia, 2012.

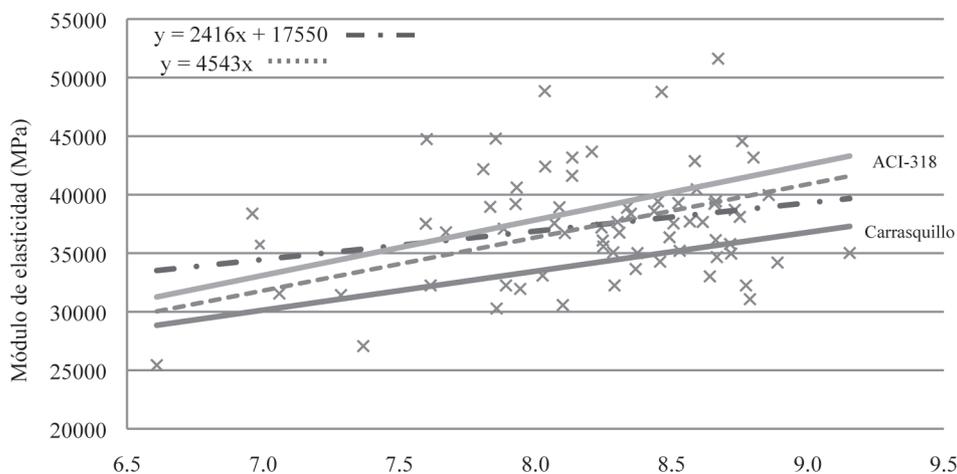


Figura 11. Gráfica de resultados del concreto de 70 MPa con curva de mejor ajuste y ecuaciones de ACI.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

MPa, dándose la excepción en el muestreo 5, donde el promedio está muy por debajo del valor teórico y de los otros muestreos.

La gráfica que muestra los resultados de las determinaciones de módulo estático de elasticidad

contra el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión se muestra en la Figura 11.

Al realizar la comparación de las curvas experimentales con las propuestas por Aragón (2004) se obtuvo la gráfica de la Figura 12.

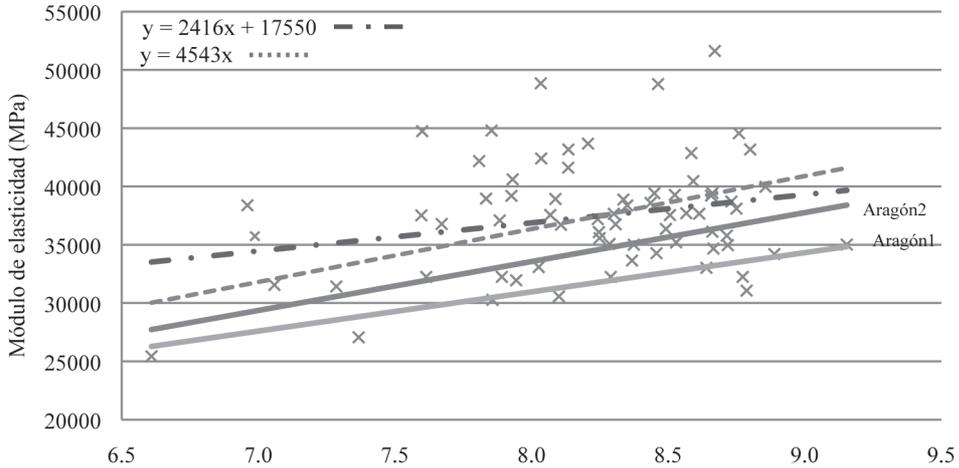


Figura 12. Gráfica de resultados del concreto de 70 MPa con curva de mejor ajuste y ecuaciones de Aragón. Fuente: Elaboración propia, 2012.

Cuadro 10. Resumen de muestreos y resistencias

Muestreo	Edad	Compresión simple	Medición deformación	Total	Resistencia prom. (MPa)	Desv. Est.
1	28 días	2	7	10(*)	83,6	4,86
2	28 días	2	10	12	68,0	5,90
3	28 días	2	10	12	67,1	6,73
4	28 días	2	10	12	82,4	11,9
5	28 días	2	9	12(*)	80,0	5,87
6	28 días	2	10	12	85,9	3,06
7	28 días	2	10	12	81,0	11,5
8	28 días	2	10	12	82,9	3,10
9	28 días	2	9	11	84,4	2,77
Total		18	85	105		

* En la mezclas 1 y 5 no se realizó medición de esfuerzo-deformación, ya que en la etapa de precarga presentaron deformaciones excesivas y las resistencias fueron muy bajas en comparación de otros especímenes de la misma muestra.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

5.4 Concreto 90 MPa (M-4)

El Cuadro 10 presenta la distribución de los cilindro por mezcla y por muestreo realizado, además del número de especímenes destinada a cada uno de los ensayos realizados, promedio de los valores de resistencia a la compresión y su respectiva desviación estándar.

La gráfica que muestra los resultados de las determinaciones de módulo estático de elasticidad contra el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión se muestra en la Figura 13.

Realizando una comparación con las curvas desarrolladas por Aragón (2004) se obtuvo la siguiente gráfica de la Figura 14.

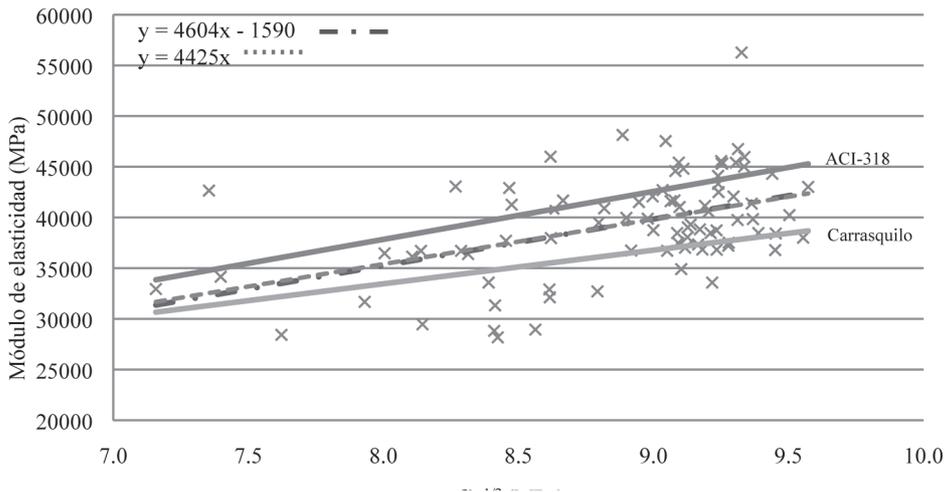


Figura 13. Gráfica de resultados del concreto de 90 MPa con curva de mejor ajuste y ecuaciones de ACI. Fuente: Elaboración propia, 2012.

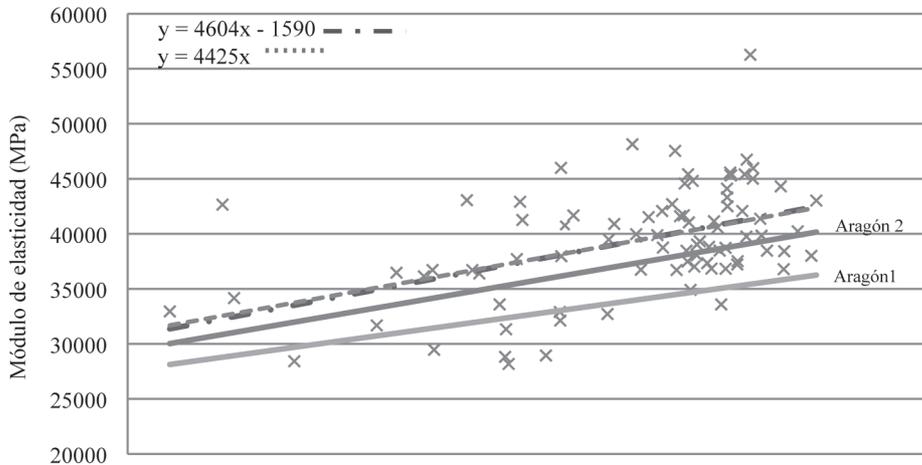


Figura 14. Gráfica de resultados del concreto de 90 MPa con curva de mejor ajuste y ecuaciones de Aragón. Fuente: Elaboración propia, 2012.

Cuadro 11. Resumen ecuaciones para cada mezcla

	Mezcla 1 (30 MPa)	Mezcla 2 (50 MPa)	Mezcla 3 (70 MPa)	Mezcla 4 (90 MPa)
$y = Ax$	$4581 f_c^{1/2}$	$4622 f_c^{1/2}$	$4543 f_c^{1/2}$	$4426 f_c^{1/2}$
$y = Ax + B$	$4281 f_c^{1/2} + 1673$	$2785 f_c^{1/2} + 13071$	$2416 f_c^{1/2} + 17550$	$4604 f_c^{1/2} + 1590$

Fuente: Elaboración propia, 2012.

El Cuadro 11 es un cuadro resumen con las ecuaciones de mejor ajuste para cada una de las mezclas y de las formas para una ecuación lineal.

6. ANÁLISIS GENERAL

Al reunir los datos obtenidos en el presente trabajo (medición de deformación de las mezclas M-2, M-3 y M-4), se obtuvieron un total de 176 cilindros a los cuales se les realizó el ensayo de esfuerzo-deformación; la gráfica resultante se presenta en la figura 15.

6.1 Ampliación de estudio

Incluyendo los datos de Aragón (2004), se pudo analizar la totalidad de los datos experimentales, de manera que sumando el total de ensayos de cada uno de los estudio se obtuvieron un total de 229 datos con valores de resistencia superiores a los 50 MPa, los cuales permitieron generar la gráfica que se muestra en la Figura 16.

Se puede notar que con la inclusión de los datos del estudio de Aragón (2004), los valores del coeficiente de correlación mejoraron, llegando a $R^2=0,46$.

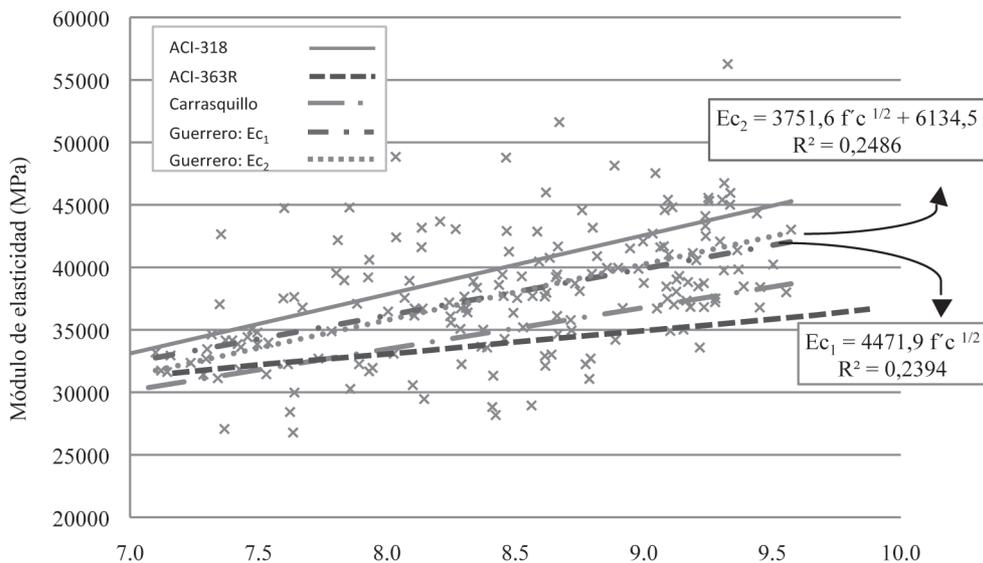


Figura 15. Curvas de mejor ajuste y curvas ACI.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

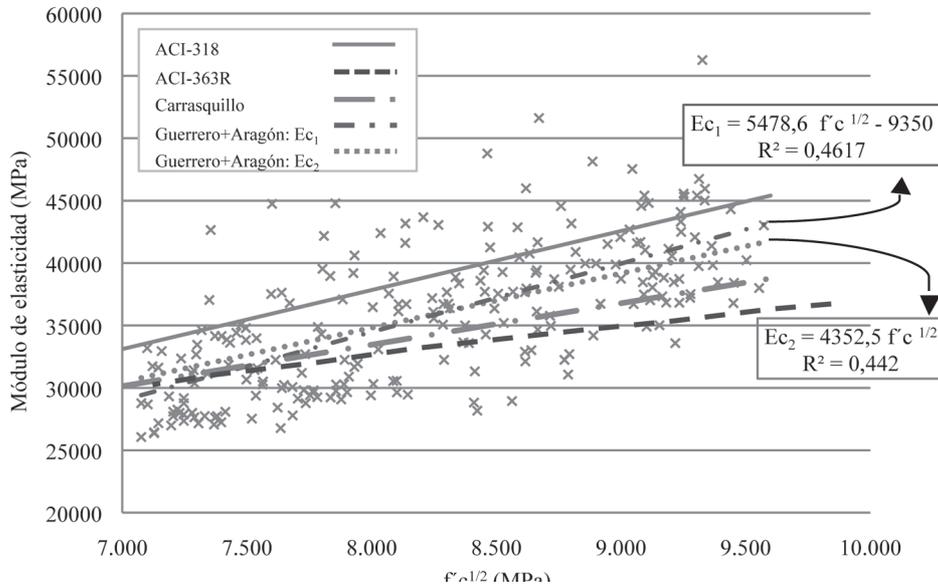


Figura 16. Datos experimentales con datos de Aragón (2004) y curvas ACI.
Fuente: Elaboración propia, 2012.

7. CONCLUSIONES

Las ecuaciones obtenidas para la determinación del módulo de elasticidad de concretos de producción industrial en Costa Rica, según Guerrero (2011), para un rango entre 50 MPa y 90 MPa son:

$$E_c = 4470\sqrt{f'_c} \quad , \quad E_c = 3750\sqrt{f'_c} + 6130$$

Si se incluyen además los datos de Aragón (2004), las ecuaciones propuestas para un rango de resistencias a compresión del concreto entre 50 MPa y 90 MPa serían:

$$E_c = 4350\sqrt{f'_c} \quad , \quad E_c = 5480\sqrt{f'_c} - 9350$$

Se encontró una buena correlación ($R^2=0,46$) entre la raíz cuadrada de la resistencia última del concreto con el módulo estático de elasticidad en concretos de producción nacional, con cemento y agregados nacionales.

Se comprobó que con el uso de materiales nacionales se sobrestima, o de Carrasquillo o

del ACI 363R-10 se subestiman, los valores del módulo de elasticidad, como se muestra en la Figura 17. Por esta razón es importante desarrollar estas ecuaciones que describen el comportamiento del concreto fabricado en Costa Rica en lugar de utilizar otras desarrolladas en y para otros países.

En el análisis de las mezclas individuales, las variaciones de las pendientes (A) en las ecuaciones de la forma $y = Ax$, fueron menores que las presentadas en las ecuaciones de la forma $y = Ax + b$, en donde la variación de los coeficientes fue más significativa.

- En las dos primeras ecuaciones recomendadas se presentan valores de coeficiente de correlación prácticamente iguales. El valor del coeficiente de correlación para estas ecuaciones es de 0,24.
- Con el uso de los datos disponibles de Aragón (2004) y Guerrero (2011), para la ampliación del presente estudio, se logra desarrollar una ecuación que toma en cuenta los escenarios de ambos estudios y que mejora notablemente el valor del coeficiente de correlación, el cual sube de 0,24 a 0,46.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI (American Concrete Institute). (2008). *Reglamento para concreto estructural ACI 318S-08*. Detroit, MI: American Concrete Institute.
- ACI (American Concrete Institute). (2010). *Concreto de alta Resistencia ACI 363R-10*. Detroit, MI: American Concrete Institute.
- Aitcin, P. (2008). *Concreto de alto desempeño*. San José: Talleres de Jiménez & Tanzi S.A.
- Aragón, S. (2004). *Determinación del módulo de elasticidad de concretos normales y de alto desempeño en Costa Rica*. (Informe Final de Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2009). *Standard test method for bulk density and voids in aggregate*. ASTM C29-09 Philadelphia: ASTM International.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2010). *Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field*. ASTM C31-10 Philadelphia: ASTM International.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2011). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM C39-11 Philadelphia: ASTM International.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2007). *Standard test method for density, relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate*. ASTM C127-07 Philadelphia: ASTM International.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2007). *Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate*. ASTM C128-07 Philadelphia: ASTM International.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2006). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. ASTM C136-06 Philadelphia: ASTM International.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2007). *Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory*. ASTM C192-07 Philadelphia: ASTM International.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2010). *Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression*. ASTM C469-10. Philadelphia: ASTM International.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2009). *Standard specification for molds for forming concrete test cylinders vertically*. ASTM C470-09. Philadelphia: ASTM International.
- Guerrero, C. (2011). *Determinación de ecuaciones para modulo de elasticidad en concretos elaborados en planta con resistencias mayores a 50 MPa en Costa Rica*. (Informe Final de Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

SOBRE LOS AUTORES

Alejandro Navas Carro, M. Sc. Ingeniería Civil Profesor de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica y Director del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructuras (LANAMME) Apartado Postal 2060, UCR, San José, Costa Rica Teléfono: 2511-4186, Facsímil: 2511-4440 Correo electrónico: anavas@lanamme.ucr.ac.cr

Christian Guerrero Vargas, Lic. Ingeniería Civil Ingeniero de Campo y Proyectos Especiales en la empresa Metrología ADATEC S.A. Celular: 8329-2395 Correo electrónico: xtnguerrero8@gmail.com