



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL– ESTRUCTURAS

PARÁMETROS QUE DEFINEN LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN
COMPRESIÓN UNI-AXIAL DE CONCRETOS PRODUCIDOS EN MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
RAMÓN EDUARDO RODELO LÓPEZ

TUTOR:
MARIO E. RODRÍGUEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CO-TUTOR:
JOSÉ I. RESTREPO, DEPARTMENT OF STRUCTURAL ENGINEERING,
UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO.

MÉXICO, D.F. JULIO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. ROBERTO MELI PIRALLA

Secretario: M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

Vocal: DR. MARÍO E. RODRÍGUEZ

1^{er.} Suplente: DR. CARLOS MÁXIMO AIRE UNTIVEROS

2^{d o.} Suplente: DR. JOSÉ I. RESTREPO

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. MARIO E. RODRÍGUEZ

FIRMA

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Alcances	4
2. Descripción del Problema y Mención del Estado del Arte	5
2.1. Descripción general	5
2.2. Recomendaciones existentes y requisitos de reglamentos de diseño	7
2.3. Procedimiento seguido en esta investigación	11
3. Descripción de los Cilindros de Concreto Empleados en esta Investigación y Descripción de Ensayes Realizados	12
3.1. Introducción	12
3.2. Características de los materiales	13
3.3. Procedimientos de muestreo y traslado	14
3.4. Descripción de cilindros ensayados	15
3.5. Instrumentación de los especímenes	18
4. Evaluación de Resultados Obtenidos	19
4.1. Generalidades	19
4.2. Criterios de aceptación de ensayos realizados en esta in- vestigación	27
4.3. Comparaciones de resultados con literatura	31
5. Propuestas para el Cómputo del Módulo Elástico	34
5.1. Introducción	34

5.2. Propuesta utilizando el peso volumétrico del concreto . . .	34
5.3. Propuesta utilizando un factor de densidades	37
6. Propuestas para Definición de la Relación E_c/E_{sec} y ε'_c	41
6.1. Introducción	41
6.2. Resultados de los valores medidos y calculados de la Re- lación E_c/E_{sec}	42
6.3. Resultados de los valores medidos y calculados de ε'_c . . .	44
7. Implicaciones para el Diseño de Acuerdo con los Resultados Obtenidos en este Estudio	48
7.1. Comparativa de reglamentos con ensayos mexicanos . . .	48
7.1.1. Módulo Elástico	48
7.1.2. Relación E_c/E_{sec}	52
7.2. Comparativa de reglamentos con ensayos internacionales .	52
7.2.1. Módulo Elástico	52
7.2.2. Relación E_c/E_{sec}	62
8. Conclusiones	65

Índice de figuras

1.1. Curva adimensional esfuerzo-deformación del concreto sin confinar	2
2.1. Relación esfuerzo deformación de pasta cementante, agregado y concreto	6
3.1. Zonificación de muestreos	13
3.2. Densidades de los agregados de acuerdo con regiones . . .	14
3.3. Cuidados durante el traslado al laboratorio	15
3.4. Cuarto de curado, Instituto de Ingenieria UNAM	16
3.5. Cilindro maltratado durante el traslado al laboratorio del ii .	16
3.6. Inspección y medición de cilindros de concreto	17
3.7. Anillos para Módulo de Elasticidad	18
3.8. Anillos en muestras de concreto	18
4.1. Ejemplo de variación en espécimen de concreto	20
4.2. Módulo elástico vs resistencia de concreto, E_c - f'_c	21
4.3. Deformación máxima vs resistencia de concreto, ϵ'_c - f'_c . . .	21
4.4. Deformación ultima vs resistencia de concreto, ϵ_{cu} - f'_c . . .	22
4.5. Velocidades durante estimación del modulo de elasticidad .	27
4.6. Histograma de velocidades durante la estimación de E_c . .	28
4.7. Histograma de velocidades durante la estimación de ϵ'_c . .	29
4.8. Velocidades durante la estimación de ϵ'_c	29
4.9. Velocidades durante $0.70 f'_c - f'_c$	30
4.10. Histograma de velocidades durante $0.70 f'_c - f'_c$	30
4.11. Comparaciones de E_c mexicano vs distintos reglamentos .	31
4.12. Comparaciones de ϵ'_c medido vs propuesta por Chen et. al.	32

4.13. Histograma de comparaciones ε'_c medido vs ε'_c de Chen et. al.	33
5.1. Dispersión módulo elástico	35
5.2. Comparaciones de E_c medido vs propuesta 1	36
5.3. Histograma de comparación de E_c propuesta 1	36
5.4. Comportamiento del módulo elástico afectado por el factor de densidades	38
5.5. Comparación E_c medido vs Propuesta 2	39
5.6. Histograma de comparación de E_c propuesta 2	40
6.1. Definición del modulo secante del concreto E_{sec}	41
6.2. Parámetro n vs f'_c	42
6.3. Comparación n medida vs n propuesta	43
6.4. Histograma n medida vs n propuesta	44
6.5. Deformación asociada a máxima resistencia, ε'_c vs máxima resistencia, f'_c	45
6.6. Comparación ε'_c medida vs propuesta por Chen	45
6.7. Histograma comparación ε'_c medida vs propuesta por Chen	46
6.8. Histograma comparación ε'_c medida vs propuesta	47
6.9. Histograma comparación ε'_c medida vs propuesta	47
7.1. Comparación E_c experimental vs E_c estimado de acuerdo a RCDF	49
7.2. Histograma comparación E_c experimental vs RCDF	49
7.3. Comparación E_c experimental vs E_c estimado de acuerdo a ACI-318	50
7.4. Histograma comparación E_c experimental vs ACI-318	51
7.5. Comparación internacional de Módulos Elásticos vs propuestas de estimación	54
7.6. Comparación E_c medido vs propuesta AASHTO <100 MPa	55
7.7. Comparación E_c medido vs propuesta AASHTO >100 MPa	55
7.8. Comparación E_c medido vs propuesta ACI 363 <100 MPa	56
7.9. Comparación E_c medido vs propuesta ACI 363 >100 MPa	56
7.10. Comparación E_c medido vs propuesta ACI 318 <100 MPa	57
7.11. Comparación E_c medido vs propuesta ACI 318 >100 MPa	57

7.12. Comparación E_c medido vs propuesta NTC 2004 <100 MPa	58
7.13. Comparación E_c medido vs propuesta NTC 2004 >100 MPa	58
7.14. Comparación E_c medido vs propuesta 1 <100 MPa	59
7.15. Comparación E_c medido vs propuesta 1 >100 MPa	59
7.16. Líneas de tendencia y dispersión $E_{cmedido}/E_{ccalculado}$	61
7.17. Comparación relación E_c/E_{sec}	62
7.18. Comparación relación E_c/E_{sec} vs Propuesta	63
7.19. Histograma relación E_c/E_{sec} vs Propuesta	64

Índice de tablas

4.1. Resultados promedio para todas las resistencias	22
4.1. Resultados promedio para todas las resistencias	23
4.1. Resultados promedio para todas las resistencias	24
4.2. Coeficientes de variación para cada uno de los parámetros de interés	25
4.2. Coeficientes de variación para cada uno de los parámetros de interés	26
4.2. Coeficientes de variación para cada uno de los parámetros de interés	27
7.1. Peso Volumétrico de las muestras de concreto utilizadas	60

Agradecimientos

A Angélica y Ramón, mis padres, porque día con día me demuestran lo que es amor sin pedir nada a cambio lo cual me ha servido como base para lograr los objetivos que me propongo.

A Gerardo y Yulissa, mis hermanos, quienes me motivan a seguir adelante para demostrar que todo se puede cumplir con empeño y dedicación.

A los doctores Mario Rodríguez y José Restrepo, porque gracias a sus excelentes consejos y a su espléndida asesoría permitieron la culminación exitosa de este trabajo.

A mis sinodales: Dr. Roberto Meli, M.I. Carlos Mendoza y Dr. Carlos Aire; cuyas revisiones y comentarios colaboraron con la calidad de esta investigación.

A mis amigos, quienes se convirtieron en mi segunda familia durante el transcurso de mis estudios de maestría, todas nuestras historias y su apoyo siempre que los necesite para realizar las pruebas.

Al CONACYT, por brindarme el apoyo económico durante mi estancia en la UNAM y por fomentar la producción de investigadores en el país.

Gracias a todos.

"Si tienes una pasión, si realmente crees en algo, esfuérzate y podrás hacer posibles las cosas con las que has soñado",
Norman Foster

Resumen

En esta investigación se llevaron a cabo estudios analíticos y experimentales de concretos elaborados en México. Con base en los resultados de esta investigación se dan recomendaciones para estimar parámetros que afectan la curva esfuerzo-deformación del concreto sin confinar.

Para la estimación de algunos de estos parámetros existen recomendaciones por diferentes reglamentos de diseño que pueden estar del lado de la seguridad, ó en el caso del reglamento mexicano del lado de la inseguridad producto de los avances en la tecnología del concreto. Debido a esta evolución, los concretos han cambiado de manera significativa (en cuanto a resistencia), produciéndose concretos en la actualidad de hasta 200 MPa en algunas regiones del mundo.

Las recomendaciones e investigaciones existentes para el estudio de los concretos mexicanos consideran de manera simplificada sólo la máxima resistencia esperada de un concreto para la predicción de su módulo elástico; sin embargo de acuerdo con estudios encontrados en la literatura se ha demostrado que se necesitan tomar en cuenta otro tipo de variables como las características de los agregados utilizados ó peso volumétrico del concreto para llegar a una expresión general y no como lo hacen las normas dividiéndolo en tres tipos de agregados .

Los estudios experimentales de los especímenes de concreto se realizaron en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, aplicando ciclos de pre-carga de acuerdo con las normas correspondientes y tomando como resultado un promedio de las muestras ensayadas.

Además se proponen curvas para aproximar parámetros importantes, a los cuales las normas actuales no consideran. Con base en los resultados de estos ensayos se dan recomendaciones para la estimación de este tipo de parámetros para concretos nacionales e internacionales.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

El comportamiento observado en los elementos estructurales de concreto reforzado cuando responden a la demanda de fuerzas para los que fueron diseñados, indican la necesidad de revisar y mejorar los procedimientos de reglamentos de diseño de elementos de concreto.

Un diseño adecuado para elementos de concreto reforzado, requiere el conocimiento de parámetros que definen la gráfica esfuerzo-deformación del concreto sin confinar, $f_c - \varepsilon_c$. La fig. 1.1 muestra una curva típica esfuerzo deformación del concreto expresada en forma adimensional con la relación f_c/f'_c para los esfuerzos, y $\varepsilon_c/\varepsilon'_c$ para las deformaciones, donde f_c y ε_c son el esfuerzo y deformación del concreto en cualquier punto de la curva, f'_c es la resistencia en compresión especificada del concreto y ε'_c es la deformación del concreto correspondiente a la resistencia en compresión f'_c .

Uno de los parámetros más importantes que permite definir la curva $f_c - \varepsilon_c$ es el módulo de elasticidad (E_c). Para el cálculo de este parámetro se tienen expresiones en el Reglamento de Construcción del Distrito Federal (RCDF), sin embargo, esto solo es válido para los concretos del D.F., mientras para el resto de las regiones en México las expresiones establecidas en el RCDF no son aplicables. Además, los estudios que respaldan estas expresiones datan de los años 80's, donde concretos a partir de 400 kg/cm^2 se consideraban de alta resistencia. En la actualidad se uti-

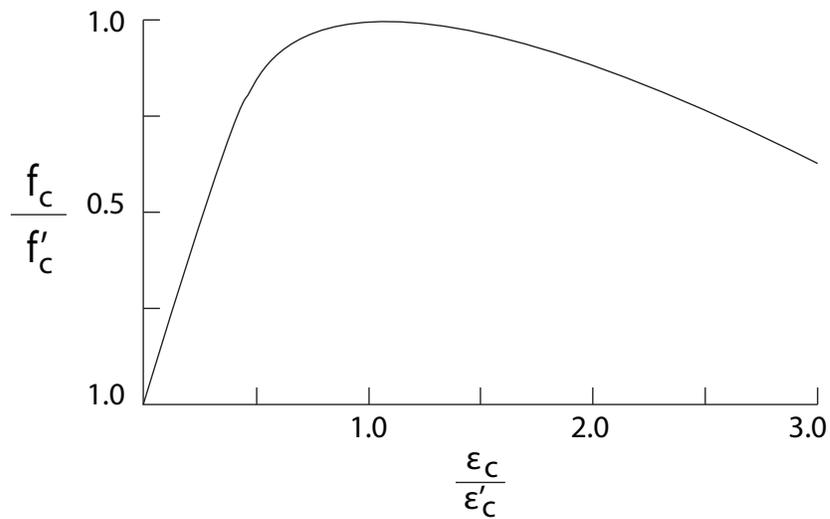


Figura 1.1: Curva adimensional esfuerzo-deformación del concreto sin confinar

lizan en numerosos casos concretos de hasta 1200 kg/cm^2 en algunas edificaciones del país. Esto indica que es de carácter urgente el buscar una expresión para el cálculo del módulo de elasticidad para los concretos que se producen en México.

Del mismo modo que ocurre con el módulo de elasticidad, se desconocen otros parámetros importantes de la gráfica $f_c - \varepsilon_c$, como son la deformación unitaria asociada al esfuerzo máximo (ε'_c), deformación última del concreto (ε_{cu}), entre otros.

En la literatura (Chang y Mander¹) se ha propuesto la siguiente expresión para la curva $f_c - \varepsilon_c$ del concreto:

$$y = \frac{nx}{(1 + (n - (\frac{r}{r-1}))x + (\frac{x^r}{r-1}))} \quad (1.1)$$

donde:

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \quad (1.2)$$

$$y = \frac{f_c}{f'_c} \quad (1.3)$$

En la ec (1.1) el parámetro n se define como:

$$n = \frac{E_c \varepsilon'_c}{f'_c} \quad (1.4)$$

El parámetro n se puede interpretar también como la relación:

$$n = \frac{E'_c}{E_{sec}} \quad (1.5)$$

donde:

$$E_{sec} = \frac{f'_c}{\varepsilon'_c} \quad (1.6)$$

El parámetro “ r ” define la parte descendente de la curva $f_c - \varepsilon_c$, para el cual, de acuerdo con los agregados y cementos de Estados Unidos, en la literatura se ha propuesto el valor:

$$r = \frac{f'_{cc}}{5.2} - 1.9 \quad (MPa) \quad (1.7)$$

En la presente investigación se pretende encontrar expresiones que consideren las propiedades de los concretos del país. Estos parámetros no se conocen en México, por lo que no solo los diseños de estructuras que emplean el módulo elástico (E_c) están limitados, si no también los estudios que se desarrollan en México con expresiones para la curva $f_c - \varepsilon_c$ del concreto.

1.2. Objetivos

El objetivo de esta investigación es proponer expresiones, a partir de estudios analíticos y experimentales, para estimar propiedades de la curva $f_c - \varepsilon_c$ del concreto sin confinar, considerando propiedades típicas de agregados que sean representativas de las regiones más importantes del país.

1.3. Alcances

Esta investigación tiene como alcances estudiar analítica y experimentalmente los concretos fabricados con los diferentes tipos de agregados que se tienen a lo largo de la Republica Mexicana. Las muestras se tomaron utilizando una zonificación de regiones considerando solo los agregados con los que se pueden fabricar concretos para uso estructural (Clase I) y los ensayos realizados en el laboratorio siguieron lo especificado en las normas ASTM-469² y NMX-128.³

Capítulo 2

Descripción del Problema y Mención del Estado del Arte

2.1. Descripción general

Para comprender un problema tan complejo como lo es el comportamiento del concreto, se deben emplear conceptos básicos de material elástico y material viscoso. Se dice que un material es perfectamente elástico si la deformación aparece y desaparece inmediatamente al aplicar y remover un esfuerzo sobre el. Por otra parte, un material viscoso es aquel que presenta oposición a los esfuerzos tangenciales que se le aplican, esto gracias a la fuerzas de cohesión molecular que presentan todos los materiales.

El concreto es un material compuesto empleado en la edificación, formado esencialmente por un aglomerante: cemento, al que se añade partículas o fragmentos de un agregado pétreo, agua y aditivos con diferentes propósitos. Si se divide el concreto en dos componentes: pasta cementante (mezcla de cemento y agua) y agregado, se puede definir como un material visco-elástico; ya que, la pasta cementante se comporta como un material viscoso y el agregado, fino y grueso, tiene un comportamiento elástico.

La fig. 2.1 muestra que los dos componentes del concreto, pasta cementante y agregado, cuando son sujetos a cargas por separado muestran una sensible relación lineal esfuerzo-deformación, concluyendo que el

comportamiento del concreto se encuentra entre un material elástico y un material viscoso.

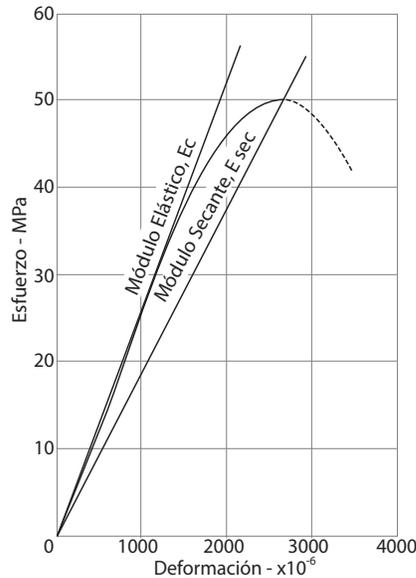


Figura 2.1: Relación esfuerzo deformación de pasta cementante, agregado y concreto

La parte descendente de la gráfica $f_c - \varepsilon_c$ del concreto no es una propiedad del material, pero esta afectado por las condiciones de la prueba. Por esto, esta investigación se enfocará solo a estudiar la predicción de el E_c y de la ε'_c , las cuales se toman como las propiedades principales para describir el comportamiento del concreto. De acuerdo con estudios previos el E_c y la ε'_c se incrementan con la resistencia del concreto; sin embargo, este incremento es progresivamente más bajo que el aumento en la resistencia a la compresión. Para estimar estos dos parámetros, el factor clave del que éstos dependerán será f'_c . Además, no es posible estimar estos parámetros con un ecuación lineal y obtener una buena aproximación.

Sin embargo, factores como el tipo de agregado y la manera de fabricar los especímenes, indican que éstos tienen la misma importancia que la resistencia máxima esperada del concreto. Por lo tanto, las mejores propuestas para la predicción de estos parámetros deberían incluir una combinación de todos los factores.

2.2. Recomendaciones existentes y requisitos de reglamentos de diseño

Durante años investigaciones alrededor del mundo se han enfocado en encontrar la mejor expresión para estimar el módulo elástico. Autores como Hirsch⁴ han demostrado que el módulo de elasticidad del concreto esta en función de los módulos elásticos de su matriz de pasta cementante y de sus componentes agregados. Además, el grado en el que las propiedades de los ingredientes afectan el módulo elástico, está en función de la cantidad presente de estos en la mezcla y propone la siguiente expresión, la cual está en función de una constante empírica:

$$E_c = \frac{V_c}{\left(\frac{V_a}{E_a}\right)K_1 + \left(\frac{V_m}{E_m}\right)K_2} \quad (2.1)$$

En la ec. (2.1) los parámetros K_1 y K_2 son constantes que indican la proporción de pasta cementante y agregado que posee la mezcla, se definen como:

$$K_1 = 1 - \frac{2Z}{\pi} \left[1 - \frac{1}{\frac{E_m}{E_a} \left(1 - \frac{V_a}{V_c} \right) + \frac{V_a}{V_c}} \right] \quad (2.2)$$

$$K_2 = 1 - \frac{2Z}{\pi} \left[1 - \frac{1}{\left(1 - \frac{V_a}{V_c} \right) + \frac{V_a}{V_c} \frac{E_m}{E_a}} \right] \quad (2.3)$$

donde, Z es una constante empírica. E_c , E_a y E_m son el módulo de elasticidad del concreto, agregado y pasta de cemento, respectivamente, y V_c , V_a y V_m son el volumen del concreto, agregado y pasta de cemento, respectivamente. Por lo tanto, E_a y $E_m > 0$.

Mendoza,⁵ realizó una de las primeras investigaciones relacionadas con las propiedades mecánicas de los concretos de México. Este autor propuso expresiones, en función de la raíz cuadrada de la resistencia del concreto, basándose en la combinación de los tipos de agregados de los concretos, obteniendo las siguientes tres expresiones para los concretos del D.F.

Para concretos con grava y arena andesítica:

$$\begin{aligned} E_c &= 2,500\sqrt{f'_c}, & \text{en MPa} \\ (E_c &= 8,000\sqrt{f'_c}, & \text{en kg/cm}^2) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Para grava basáltica vesicular y arena andesítica:

$$\begin{aligned} E_c &= 3,500\sqrt{f'_c}, & \text{en MPa} \\ (E_c &= 11,000\sqrt{f'_c}, & \text{en kg/cm}^2) \end{aligned} \quad (2.5)$$

y para grava ligera de arcilla expandida y arena andesítica:

$$\begin{aligned} E_c &= 2,075\sqrt{f'_c}, & \text{en MPa} \\ (E_c &= 6,500\sqrt{f'_c}, & \text{en kg/cm}^2) \end{aligned} \quad (2.6)$$

El Comité ACI-363 del Instituto Americano del Concreto (ACI-363, 1992),⁶ propuso una aproximación para la estimación del módulo elástico de concretos en Estados Unidos, afectando la raíz cuadrada del f'_c más un factor de ajuste por el peso específico de los agregados de la muestra de concreto, obteniendo como resultado la ecuación:

$$\begin{aligned} E_c &= (3,320\sqrt{f'_c} + 6,900), & f'_c \text{ en MPa} \\ (E_c &= 1,040\sqrt{f'_c} + 69,000, & f'_c \text{ en kg/cm}^2) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Niccolo y Pozzo,⁷ estudiaron el comportamiento de los concretos enfocándose en el estudio de la deformación asociada al máximo esfuerzo en el concreto (ϵ'_c). Propusieron la ec. (2.8), donde f'_c es la resistencia del concreto en MPa y V el volumen de los especímenes de ensaye en m^3 , basándose en los tamaños de éstos, características de la prensa universal, la manera de medir la deformación unitaria y las propiedades del concreto como lo son: la resistencia, relación agua/cemento, propiedades mecánicas, etc.

$$\epsilon'_c = 1.753f_c^{0.27756} V^{-0.09314}, \quad f'_c \text{ en MPa y } V \text{ en } m^3 \quad (2.8)$$

En 2003, Seguirant y Gallt⁸ elaboraron un reporte donde hacen comparaciones entre las ecuaciones propuestas por el ACI 318-14, ACI 363-92 y resultados de ensayos experimentales de cuatro estados de Estados

Unidos, observando que la tendencia tanto de la ecuación propuesta del ACI 318 como la del ACI 363 se encuentran con cierta incertidumbre, y proponen una expresión, ec. (2.9), en la cual se toman en cuenta parámetros K_1 y K_2 , donde K_1 representa la diferencia entre el promedio de la media local y nacional y K_2 un factor de corrección basado en el percentil 90 y 10 de los resultados de ensayos en la base de datos.

$$E_c = 33,000 K_1 K_2 \left(0.14 + \frac{f'_c}{1000}\right)^{1.5} \sqrt{f'_c}, \quad \text{en MPa} \quad (2.9)$$

Las normas técnicas complementarias del Distrito Federal, en su edición del 2004 (NTC-2004)⁹, establecen ecuaciones para el cálculo del módulo de elasticidad de los concretos en México, dividiéndolos en concretos clase I y clase II, adoptando la siguiente ecuación para los concretos estructurales o de clase I:

$$E_c = 4,400\sqrt{f'_c} \quad (2.10)$$

$$(E_c = 14,000\sqrt{f'_c}),$$

en MPa (kg/cm^2) para concretos de baja resistencia ($< 40MPa$).

$$E_c = 2,700\sqrt{f'_c} + 11,000 \quad (2.11)$$

$$(E_c = 8,500\sqrt{f'_c} + 110,000),$$

en MPa (kg/cm^2) para concretos de alta resistencia ($> 40MPa$).

Y para los concretos de clase II establece:

$$E_c = 2,500\sqrt{f'_c}, \quad \text{en MPa} \quad (2.12)$$

$$(E_c = 8,000\sqrt{f'_c}, \quad \text{en } kg/cm^2)$$

Recientes estudios de la estimación de ε'_c fueron efectuados por Chen¹⁰ (2013). En este estudio se propone una ecuación recopilando información de ensayos de cilindros de concreto encontrados en la literatura y realizando pruebas de laboratorio para complementarlo. Esta aproximación

(ec. 2.13) para la deformación asociada a f'_c ha sido utilizada en los últimos años debido a su similitud con los resultados obtenidos de ensayos en laboratorio, con un error de $\pm 10\%$.

$$\varepsilon'_c = 1.74 \times 10^{-7} f'_c + 2.41 \times 10^{-3}, \quad \text{en MPa} \quad (2.13)$$

El Comité ACI 318 del Instituto Americano del Concreto (ACI-318, 2014)¹¹ establece desde hace años una expresión para la estimación del módulo de elasticidad del concreto a 28 días de edad, afectando la raíz cuadrada del f'_c del concreto por un factor de ajuste donde se incluyen las propiedades del agregado a partir de la densidad del concreto, como se observa en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} E_c &= 33 w^{1.5} \sqrt{f'_c}, \quad f'_c \text{ en MPa y } w \text{ en lb/ft}^3 \\ (E_c &= 0.14 w^{1.5} \sqrt{f'_c}, \quad f'_c \text{ en kg/cm}^2 \text{ y } w \text{ en kg/m}^3) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Lydon y Balendran,¹² propusieron que el exponente para el peso volumétrico del concreto en la ecuación propuesta por el ACI debería modificarse de 1.5 a 0.5, en su estudio, dicen que utilizando este exponente, la dispersión en las comparaciones de modulo elástico medido vs estimado, se reducen.

De la revisión de los estudios efectuados se entiende la complejidad que existe al estimar el módulo de elasticidad del concreto. Además, los estudios que avalan las ecuaciones utilizadas en la actualidad para los concretos mexicanos tienen mas de 30 años de antigüedad, utilizando aproximaciones para concretos no fabricados en México, que no consideran los tipos de agregados existentes en nuestro país. Por lo tanto, es relevante realizar una investigación con fines de encontrar una estimación para los concretos mexicanos.

2.3. Procedimiento seguido en esta investigación

En el laboratorio de Estructuras del Instituto de Ingeniería de la UNAM se ensayaron cilindros de concreto con resistencias especificadas f_c iguales a, en MPa :

- 25
- 30
- 40
- 50
- 60
- 70

Para cada resistencia se contó con seis cilindros de concreto, lo que da un conjunto de 36 cilindros por región del país. El país se dividió en 8 regiones. Lo anterior daría un total de 36 cilindros x 8 regiones= 288 cilindros de concreto de todo el país. El estudio final se avaló con alrededor de 200 cilindros, ya que no todas las regiones fabricaban el total de las resistencias requeridas.

Ensayados los cilindros se dibujó su gráfica $f_c - \varepsilon_c$ y observando el comportamiento de éstas, se realizaron las propuestas de estimación, tanto para E_c como para ε'_c .

Capítulo 3

Descripción de los Cilindros de Concreto Empleados en esta Investigación y Descripción de Ensayes Realizados

3.1. Introducción

Debido a la gran extensión territorial de México, estudios anteriores, como los realizados por Mendoza,⁵ han comprobado que los concretos tienen diferencias de acuerdo con la región donde han sido fabricados, por ésto fue necesario realizar una zonificación de muestreo para cubrir las variantes existentes en los concretos del país de acuerdo con el tipo de agregado y modo de fabricación (norma NMX-C-160¹³), ver fig. 3.1.

Las muestras con las que se realizó este estudio fueron de acuerdo con la norma NMX-C-159,² con cilindros de 15cm x 30cm para todas las resistencias, provenientes de las ciudades de: Tijuana, Chihuahua, Culiacán, Monterrey, Guadalajara, Distrito Federal y Tuxtla Gutiérrez. Con esta zonificación se consideró que se cubrían una buena parte de las diferentes características de los concretos en México. A partir de ésto, 4 de las empresas fabricantes de concreto mas importantes del país apoyaron la investigación, realizando donaciones de cilindros con las resistencias más comunes de las regiones donde se contara con planta de concreto y enviando estas mismas al laboratorio del Instituto de Ingeniería para realizar su ensaye correspondiente a 28 días.

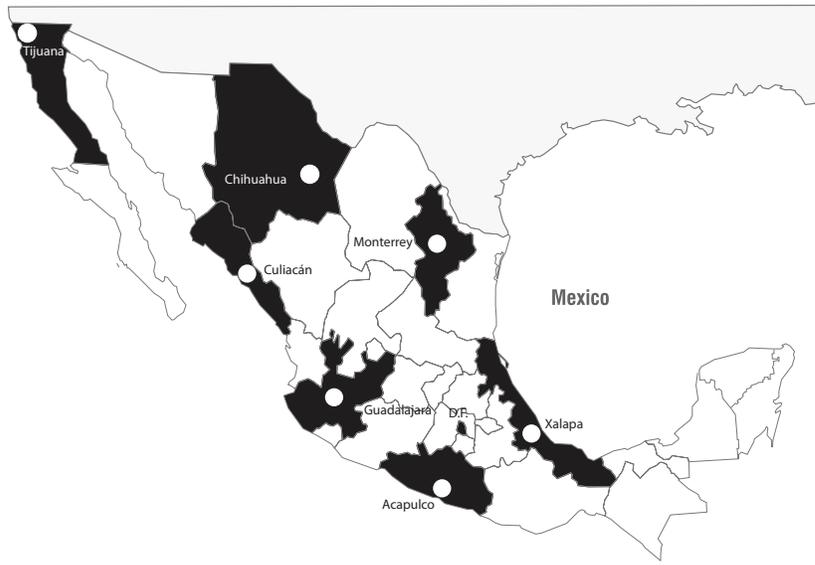


Figura 3.1: Zonificación de muestreos

3.2. Características de los materiales

Los concretos del estudio fueron realizados de la manera ordinaria, con Cemento Portland Ordinario (CPO), variando solo en el tipo de agregados utilizados y el diseño de mezclas que utiliza cada planta. Puesto que el país cuenta con una diversidad de tipos de terrenos, las diferentes regiones de estudio contienen distintos tipos de agregados para la fabricación del concreto. En algunas regiones la grava es obtenida de ríos, en otras regiones se obtiene el agregado mediante la trituración de bancos de materiales, ya sea provenientes de valles, montañas con basaltos o de zonas con calizas.

Para las ciudades de Culiacán y Guadalajara se fabricaron concretos con agregado de "canto rodado" o bien grava de río, mientras que para las ciudades de Acapulco, Tijuana, Chihuahua y Monterrey el agregado grueso se obtuvo de la trituración de basaltos. Para el Distrito Federal el agregado fue de piedra caliza y para Xalapa fue de andesita.

La fig. 3.2 muestra densidades de los agregados, las cuales variaron desde 23.54 hasta 26.38 kN/m^3 (2,400-2,690 kg/m^3), para la grava, y desde 22.36 hasta 26.48 kN/m^3 (2,280-2,700 kg/m^3) para la arena, siendo los agregados de Veracruz los mas bajos y Chihuahua los mas altos.

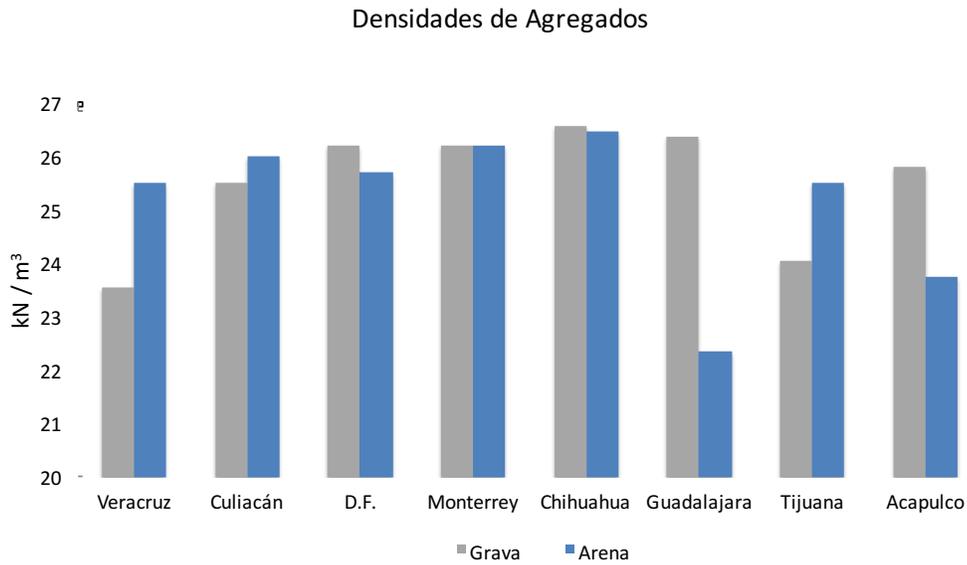


Figura 3.2: Densidades de los agregados de acuerdo con regiones

3.3. Procedimientos de muestreo y traslado

Las muestras se realizaron de acuerdo con las resistencias que fabricaban a la fecha las distintas plantas de concreto que colaboraron en este proyecto, por lo que, no todas las regiones cuentan con el mismo número de ensayos o las mismas resistencias de concretos. El Distrito Federal fue la única región con todas las resistencias deseadas en el estudio, debido a su gran progreso en la industria de la construcción.

Posterior a realizar el muestreo en las plantas, los especímenes se desmoldaron de las cimbras correspondientes, se llevaron a un cuarto de curado y transcurridos los 21 días fueron enviados al laboratorio de Estructuras del Instituto de Ingeniería de la UNAM para programar su ensayo correspondiente a 28 días, cuidando que las muestras no perdieran humedad durante su traslado.

Se utilizaron diversos procedimientos para hacer que las muestras no perdieran humedad y tuvieran un traslado sin golpes que afectaran los resultados, uno de ellos fue el enviarlas envueltas en franelas húmedas y posteriormente aplicando emplaye para garantizar que las franelas conservaran la humedad necesaria y sirvieran como protección en caso de



Figura 3.3: Cuidados durante el traslado al laboratorio

golpes. Otro procedimiento fue el realizar el envío colocando los cilindros de concreto en recipientes de plástico, agregar agua y llenarlos de esferas de unicel (ver fig. 3.3) para mantener la humedad un mayor tiempo y que las muestras estuvieran protegidas contra golpes durante su traslado. Se utilizó también en el envío recipientes de plástico y agua con estopas, siempre buscando la conservación de la humedad y brindando seguridad durante el traslado.

3.4. Descripción de cilindros ensayados

Una vez que las muestras de concreto llegaron al laboratorio del Instituto de Ingeniería se procedió a retirarlos de los empaques y llevarlos al cuarto de curado (ver fig. 3.4) hasta cumplir con la edad de 28 días y realizar los ensayos correspondientes.

Cumplidos los 28 días, los especímenes se retiraron del cuarto de curado, se midieron, pesaron y se inspeccionaron como se aprecia en la fig. 3.6 para detectar irregularidades que pudieran afectar los resultados de los ensayos. Se observó que cilindros maltratados durante el traslado, como el que se muestra en la fig. 3.5, presentaron irregularidades durante su ensaye, por lo tanto, estos resultados no se consideraron. Posterior a esto, se continuo con el cabeceo de los mismos de acuerdo con la nor-



Figura 3.4: Cuarto de curado, Instituto de Ingeniería UNAM



Figura 3.5: Cilindro maltratado durante el traslado al laboratorio del ii



Figura 3.6: Inspección y medición de cilindros de concreto

ma NMX-C-109¹⁴ y esperando el tiempo requerido para continuar con la instrumentación y realización del ensaye.

3.5. Instrumentación de los especímenes

La instrumentación de los cilindros se realizó de acuerdo con lo que establecen las normas ASTM-C-469² y NMX-C-128,³ donde se especifica que uno de los métodos para calcular el módulo de elasticidad es utilizando dos anillos y un micrómetro, como se muestra en las figs. 3.7 y 3.8 donde un anillo se fija rígidamente al espécimen y el otro se fija en dos puntos diametralmente opuestos, de manera que tenga libertad de oscilar en dichos puntos, aplicando dos ciclos de pre-carga de al rededor de 20 % de su resistencia y posteriormente llevarlo a la falla.

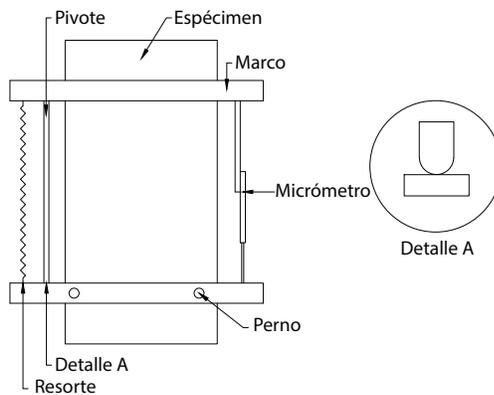


Figura 3.7: Anillos para Módulo de Elasticidad



Figura 3.8: Anillos en muestras de concreto

Capítulo 4

Evaluación de Resultados Obtenidos

4.1. Generalidades

Como se esperaba los ensayos mostraron dispersión en sus resultados, obteniendo gráficas $f_c - \varepsilon_c$ fácil de interpretar y observando cierta variación de una muestra a otra en cuanto a resistencia (f'_c), módulo elástico (E_c), deformación a la máxima resistencia (ε'_c) y principalmente en la deformación última, la cual se asocia con el 85 % de f'_c (ε_{cu}) (ver fig. 4.1); a pesar de que los concretos habían sido fabricados el mismo día, en la misma región y provenientes del mismo diseño de mezclas.

De los ensayos se obtuvieron 3 resultados por muestra. En la fig. 4.1 se compara el resultado de tres muestras de una misma región, resistencia y fecha de fabricación. Se observa que en la primera etapa de la gráfica $f_c - \varepsilon_c$ para los 3 especímenes de una muestra, la rama inicial de donde es obtenido el módulo elástico, no presenta variaciones significativas; por esto, se toma como módulo elástico el promedio de tres especímenes para una resistencia. Resistencias en las que los especímenes presentaban un coeficiente de variación mayor a 10 % para su E_c , solo tomaron el promedio de dos especímenes.

Sin embargo, el módulo de elasticidad es un parámetro difícil de estimar, en la fig. 4.2 se aprecia que para una misma resistencia se cuenta con diferentes módulos elásticos y se aprecia que este mismo sigue una ten-

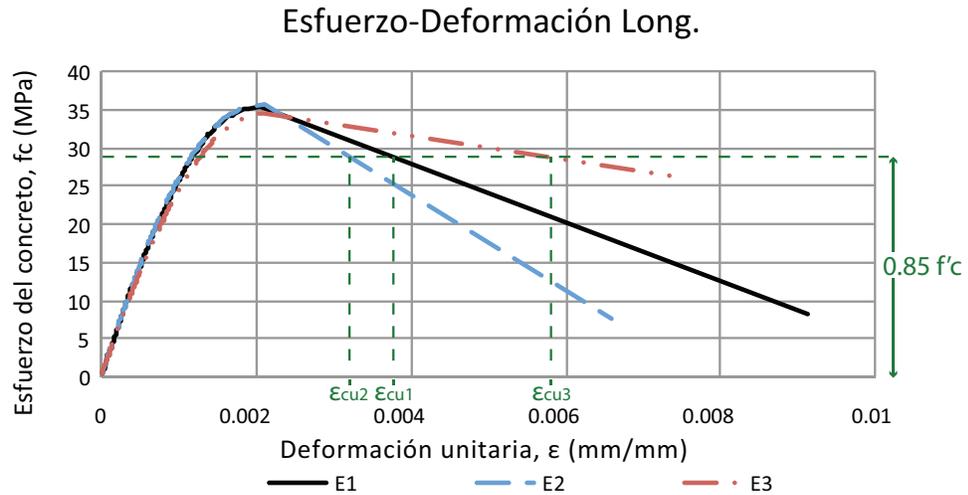


Figura 4.1: Ejemplo de variación en espécimen de concreto

dencia de acuerdo con la zona ó tipo de material con que fue fabricado el concreto en estudio. Los datos provenientes de la región perteneciente a Veracruz no se tomaron en cuenta, ya que, los agregados provenientes de esta región no cumplen los requisitos de agregados utilizados para la fabricación de concretos Clase I.

Debido a la naturaleza del parámetro ϵ'_c , se estableció un coeficiente de variación máxima permisible del 12 %. Estos dos filtros se aplicaron como depuración para la elección de muestras que avalaran el estudio. En la fig. 4.3 se aprecia un comportamiento lineal respecto al valor de f'_c del concreto.

En lo que respecta a la deformación última del concreto (ϵ_{cu}), no se considera en este estudio, ya que se observa que éste es el más difícil de estimar de los tres pues debido a lo observado en estudios previos y resultados de este, la rama descendente de la gráfica $f_c - \epsilon_c$ depende tanto del equipo como el modo de ensayar y sucede tan rápido que se necesita tecnología más avanzada para poder observar el comportamiento de esta parte de manera más precisa. En la fig. 4.4 se observa que el comportamiento tiende a ser lineal, sin embargo, para altas resistencias se observa más dispersión debido a que el dispositivo de captura de datos

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

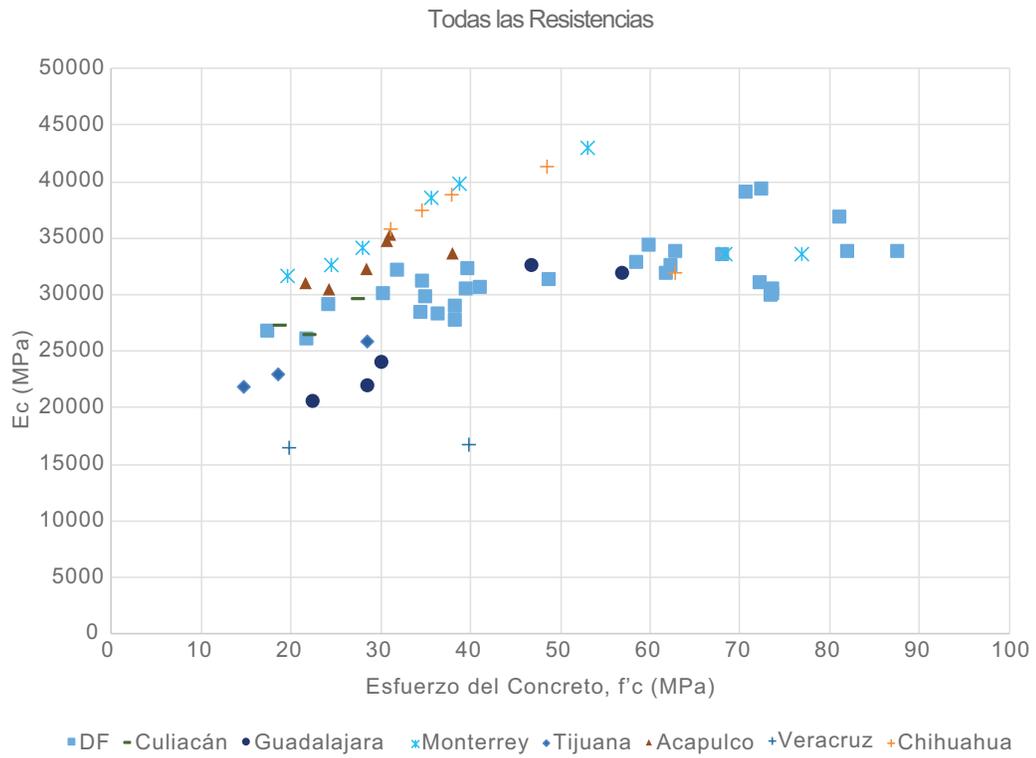


Figura 4.2: Módulo elástico vs resistencia de concreto, $E_c-f'_c$

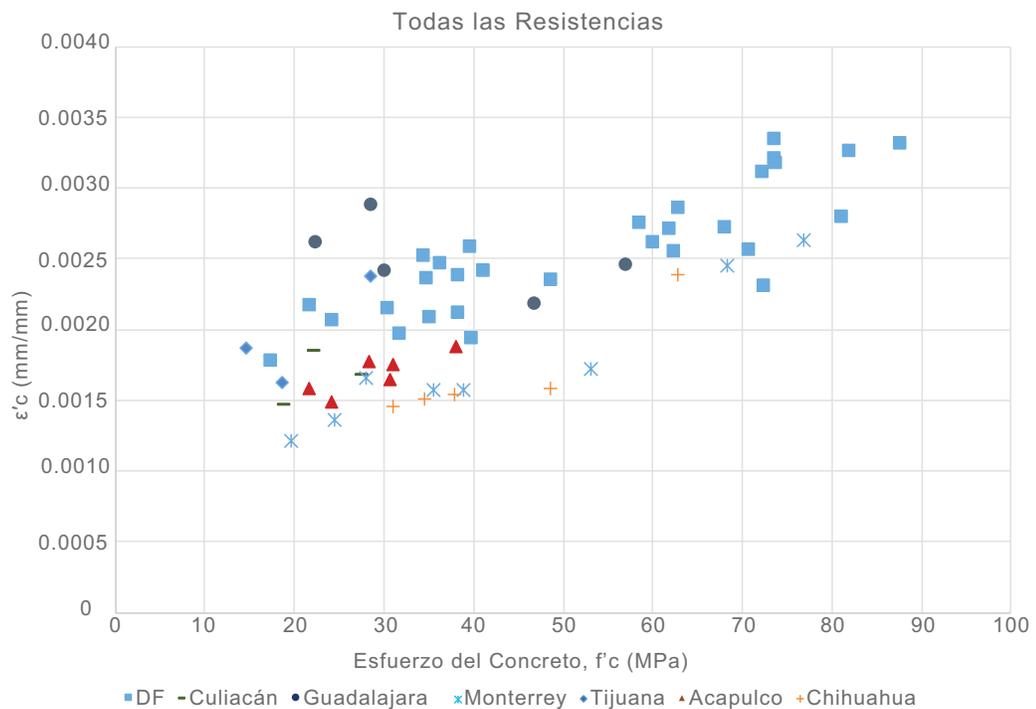


Figura 4.3: Deformación máxima vs resistencia de concreto, $\epsilon'_c-f'_c$

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

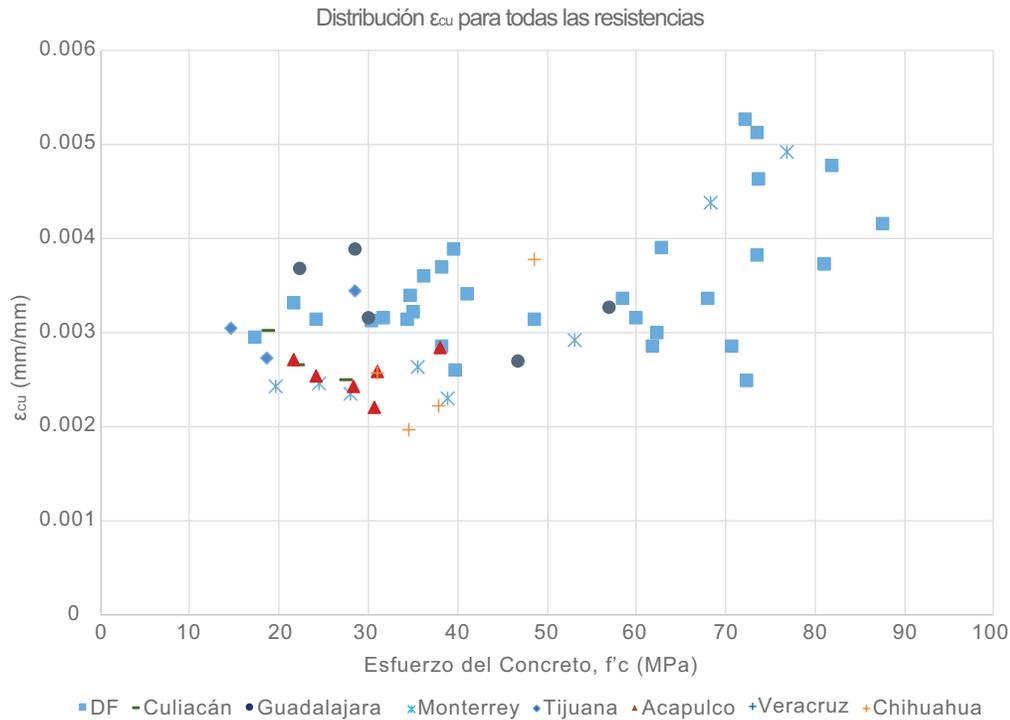


Figura 4.4: Deformación ultima vs resistencia de concreto, ϵ_{cu} - f'_c

con el que se contaba es lento y no permite estimar este parámetro con mayor exactitud.

En la tabla 4.1 se muestra los resultados promedio de los distintos parámetros de interés, mientras que en la tabla 4.2 se muestra las variaciones de los parámetros para cada una de las resistencias. Para E_c el máximo CV fue de 10 %, para ϵ'_c fue de 12 % y para la ϵ_{cu} fue de mas de 50 %, por eso no se tomó en cuenta para este estudio.

Tabla 4.1: Resultados promedio para todas las resistencias

Muestra	f'_c (MPa)	E_c (MPa)	ϵ'_c $\mu\epsilon$	ϵ_{cu} $\mu\epsilon$	P.V. (kN/m ³)	Grava (kN/m ³)	Arena (kN/m ³)
TJ1-150	14.70	21872	1870	3036	22.14	24.03	25.50
DF4-150	17.50	26688	1770	2934	22.75	26.18	25.69
TJ1-200	18.61	22987	1621	2730	22.29	24.03	25.50
CL1-150	18.90	27199	1470	3010	22.68	25.50	26.97

Sigue en la página siguiente...

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 4.1: Resultados promedio para todas las resistencias

Muestra	f'_c (MPa)	E_c (MPa)	ε'_c $\mu\varepsilon$	ε_{cu} $\mu\varepsilon$	P.V. (kN/m ³)	Grava (kN/m ³)	Arena (kN/m ³)
MT1-150	19.63	31705	1210	2430	23.45	26.18	26.18
VE1-250	19.80	16451	2410	2540	22.56	23.54	25.50
AC1-150	21.65	31043	1582	2717	23.11	25.79	23.73
DF2-200	21.85	25966	2164	3292	22.56	26.18	25.69
CL1-200	22.30	26389	1850	2650	22.48	26.18	25.69
GD1-200	22.40	20547	2620	3670	20.46	26.38	22.36
AC2-150	24.24	30425	1493	2539	23.16	25.79	23.73
DF6-200	24.25	28968	2055	3124	22.95	26.18	25.69
MT1-200	24.56	32576	1362	2463	23.37	26.18	26.18
CL1-250	27.70	29608	1680	2480	22.80	25.50	26.97
MT1-250	27.96	34087	1662	2340	23.13	26.18	26.18
AC1-200	28.31	32295	1779	2429	23.43	25.79	23.73
TJ1-250	28.52	25789	2379	3435	22.40	24.03	25.50
GD1-250	28.60	21947	2880	3870	20.51	26.38	26.38
GD2-250	30.10	24020	2410	3140	20.69	26.38	26.38
DF1-250	30.46	29945	2145	3112	22.26	25.89	23.34
AC3-250	30.67	34689	1644	2200	23.48	25.79	23.73
CH1-250	31.04	35831	1458	2560	22.65	26.58	25.50
AC2-250	31.05	35329	1755	2579	23.33	25.79	23.73
DF3-250	31.89	32061	1963	3130	22.65	22.75	22.75
DF9-250	34.50	28387	2520	3122	22.75	26.18	25.69
CH1-300	34.58	37404	1513	1970	23.55	26.58	25.50
DF6-300	34.82	31083	2351	3373	23.14	26.18	25.69
DF1-350	35.18	29657	2082	3200	22.56	25.89	23.34
MT1-350	35.54	38525	1578	2630	23.32	26.18	26.18
DF1-300	36.44	28160	2464	3578	22.16	25.89	23.34
CH1-350	37.94	38839	1546	2210	23.68	26.58	25.50
AC1-250	38.04	33638	1877	2834	23.23	25.79	23.73
DF5-300	38.34	28875	2381	3680	22.95	26.18	25.69
DF1-400	38.37	27703	2118	2840	22.36	25.89	23.34

Sigue en la página siguiente...

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 4.1: Resultados promedio para todas las resistencias

Muestra	f'_c (MPa)	E_c (MPa)	ε'_c $\mu\varepsilon$	ε_{cu} $\mu\varepsilon$	P.V. (kN/m ³)	Grava (kN/m ³)	Arena (kN/m ³)
MT1-300	38.82	39844	1572	2290	23.38	26.18	26.18
DF4-300	39.67	30344	2582	3875	23.05	26.18	25.69
VE1-200	39.73	16757	3676	4795	21.70	25.79	23.73
DF2-300	39.88	32165	1929	2580	22.85	25.69	22.75
DF2-350	41.24	30562	2410	3387	22.36	25.89	23.34
GD1-500	46.80	32483	2180	2690	22.40	26.38	26.38
CH1-400	48.51	41306	1583	3769	24.09	26.58	25.50
DF6-400	48.79	31280	2350	3123	23.14	25.69	22.75
MT1-400	53.09	43016	1718	2910	23.44	26.18	26.18
GD1-600	57.00	31918	2460	3250	22.10	26.38	26.38
DF4-400	58.65	32742	2746	3348	22.95	26.18	25.69
DF3-400	60.06	34329	2613	3130	23.05	26.18	25.69
DF2-500	61.96	31727	2707	2832	22.46	25.89	23.34
DF5-400	62.45	32487	2542	2983	23.34	26.18	25.69
CH1-600	62.83	31927	2392	0	23.47	26.58	24.13
DF2-400	63.04	33728	2858	3880	23.24	26.18	25.69
DF1-500	68.21	33400	2718	3342	22.46	25.89	23.34
MT1-500	68.34	33563	2448	4380	23.31	26.18	26.18
DF1-600	70.75	38933	2559	2830	23.63	26.18	25.69
DF2-600	72.37	30933	3111	5249	22.75	25.89	23.34
DF1-700	72.54	40473	2306	2477	23.73	26.18	25.69
DF3-700	73.63	29821	3203	3800	22.65	25.89	23.34
DF3-600	73.69	30060	3336	5099	22.75	25.89	23.34
DF2-700	73.77	30424	3167	4608	22.85	25.89	23.34
MT1-600	76.86	33548	2626	4920	24.03	26.18	26.18
DF3-500	81.20	36721	2792	3704	23.83	25.60	23.63
DF4-700	82.10	33654	3258	4759	24.22	25.60	23.93
DF4-600	87.66	33687	3313	2480	24.13	26.09	24.22

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 4.2: Coeficientes de variación para cada uno de los parámetros de interés

Muestra	f'_c (MPa)	f'_c (CV)	E_c (CV)	ε'_c (CV)	ε_{cu} (CV)	P.V. (CV)
TJ1-150	14.70	1%	10%	8%	1%	24%
DF4-150	17.50	1%	5%	10%	1%	8%
TJ1-200	18.61	1%	5%	6%	1%	8%
CL1-150	18.93	2%	1%	4%	0%	8%
MT1-150	19.63	1%	8%	6%	4%	7%
VE1-250	19.81	2%	1%	12%	1%	47%
AC1-150	21.65	3%	5%	8%	1%	7%
DF2-200	21.85	3%	3%	3%	1%	20%
GD1-200	22.24	1%	2%	12%	1%	6%
CL1-200	22.30	3%	3%	12%	0%	14%
AC2-150	24.24	3%	10%	8%	0%	2%
DF6-200	24.25	1%	2%	9%	1%	2%
MT1-200	24.56	7%	10%	11%	0%	7%
CL1-250	27.69	0%	3%	2%	0%	11%
MT1-250	27.96	1%	5%	4%	2%	11%
AC1-200	28.37	2%	1%	4%	1%	7%
TJ1-250	28.52	0%	10%	6%	1%	10%
GD1-250	28.60	1%	4%	2%	1%	7%
GD2-250	30.11	2%	1%	3%	2%	18%
DF1-250	30.46	1%	2%	6%	0%	4%
AC3-250	30.67	2%	3%	1%	2%	10%
AC2-250	30.94	1%	4%	5%	1%	17%
CH1-250	31.04	2%	9%	1%	1%	4%
DF3-250	31.89	2%	8%	6%	0%	29%
DF9-250	34.48	3%	2%	3%	1%	4%
CH1-300	34.58	3%	5%	5%	1%	40%
DF6-300	34.82	1%	1%	2%	1%	6%
DF1-350	35.18	2%	9%	1%	1%	33%
MT1-350	35.54	4%	4%	4%	0%	45%

Sigue en la página siguiente...

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 4.2: Coeficientes de variación para cada uno de los parámetros de interés

Muestra	f'_c (MPa)	f'_c (CV)	E_c (CV)	ε'_c (CV)	ε_{cu} (CV)	P.V. (CV)
DF1-300	36.44	1%	4%	12%	0%	21%
CH1-350	37.16	3%	10%	4%	0%	49%
AC1-250	38.04	1%	5%	2%	0%	6%
MT1-500	38.34	2%	10%	6%	1%	17%
DF1-400	38.37	0%	0%	1%	2%	32%
MT1-300	38.82	5%	6%	3%	1%	11%
DF4-300	39.67	1%	7%	9%	1%	9%
VE1-200	39.73	3%	3%	4%	2%	15%
DF2-300	39.88	1%	10%	9%	0%	23%
DF2-350	41.24	1%	4%	9%	1%	26%
GD1-500	46.76	2%	3%	4%	0%	1%
DF6-400	48.51	0%	10%	1%	3%	22%
CH1-400	49.32	3%	6%	4%	1%	10%
CH1-500	53.09	4%	3%	6%	0%	10%
MT1-400	53.09	0%	0%	3%	1%	45%
GD1-600	56.97	2%	4%	3%	1%	9%
DF4-400	58.65	3%	10%	7%	1%	11%
DF3-400	60.06	1%	3%	3%	1%	14%
DF2-500	61.96	3%	4%	2%	1%	2%
DF5-400	62.45	3%	6%	12%	1%	28%
CH1-600	62.83	2%	4%	4%	4%	169%
DF2-400	63.04	1%	4%	5%	1%	42%
DF1-500	68.21	4%	7%	11%	5%	20%
MT1-500	68.34	0%	0%	1%	2%	3%
DF1-600	70.75	10%	10%	9%	4%	11%
DF2-600	72.37	2%	8%	4%	1%	65%
DF1-700	72.54	2%	4%	1%	0%	1%
DF3-700	73.63	1%	2%	2%	1%	34%
DF3-600	73.69	3%	2%	3%	2%	31%

Sigue en la página siguiente...

Tabla 4.2: Coeficientes de variación para cada uno de los parámetros de interés

Muestra	f'_c (MPa)	f'_c (CV)	E_c (CV)	ε'_c (CV)	ε_{cu} (CV)	P.V. (CV)
DF2-700	73.77	1%	4%	4%	0%	27%
DF3-500	81.20	1%	10%	8%	0%	58%
DF4-700	82.10	3%	1%	2%	0%	85%
DF4-600	87.66	3%	1%	6%	1%	26%
MT1-600	88.25	8%	4%	2%	0%	0%

4.2. Criterios de aceptación de ensayos realizados en esta investigación

Las normas, tanto americanas como mexicanas, ASTM-C-469² y NMX-C-128,³ proponen un intervalo de velocidades en las cuales la aplicación de esfuerzo deben permanecer entre $4.02 \pm 0.56 \text{ kPa}/\text{min}$ durante toda la prueba.

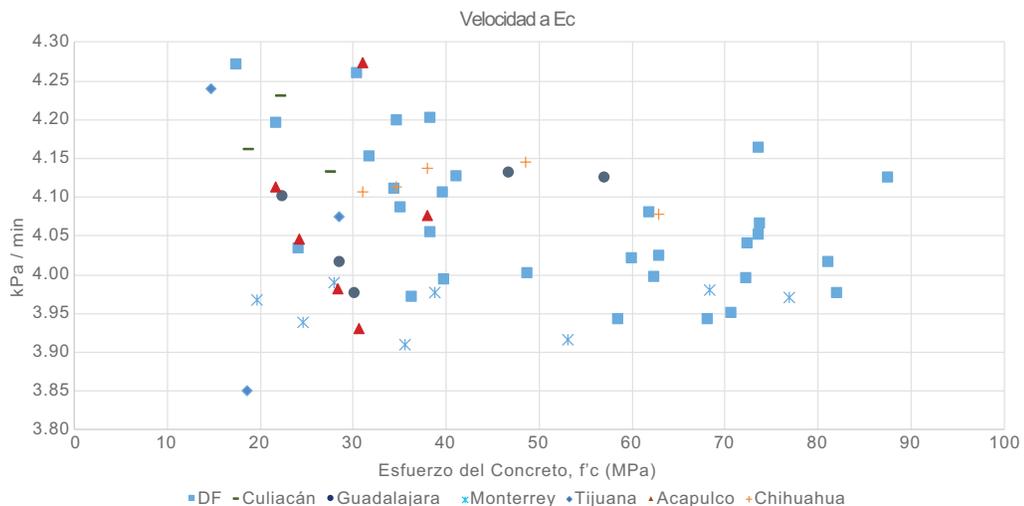


Figura 4.5: Velocidades durante estimación del modulo de elasticidad

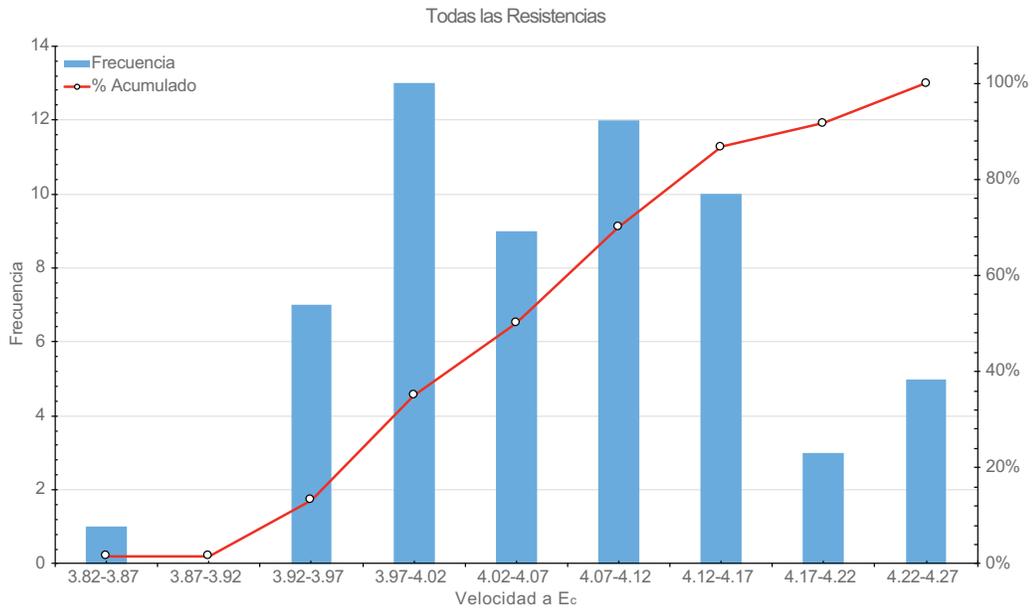


Figura 4.6: Histograma de velocidades durante la estimación de E_c

Para comprobar que la velocidad de carga se mantuvo dentro del rango establecido, se realizó un análisis de velocidades entre etapas claves de la prueba.

La primera consiste en el rango de cargas que se utiliza para calcular el E_c , la segunda fue de cuando se tiene la deformación de 0.00005 hasta llegar a la resistencia máxima, de esta manera se comprueba que la velocidad es adecuada para estimar la ϵ'_c . Por último, de $0.70f'_c - f'_c$ para cerciorarse que la velocidad en cualquier punto durante la prueba es la adecuada.

De las figs. 4.5 y 4.6, se observa que la variación en las velocidades de carga para calcular el módulo elástico (desde la deformación 0.00005 a la deformación asociada a $0.4f'_c$) tiene una Media=4.06 kPa/min y variando muy poco, un CV=2 %.

Para las velocidades a ϵ'_c (desde la deformación 0.00005 a la deformación asociada a f'_c) la media fue de 3.99 kPa/min, con un CV=1 %; con lo que se avalan las pruebas realizadas en los cilindros para la estimación de la máxima deformación, ϵ'_c . Ver figs. 4.7 y el histograma en la figura 4.8.

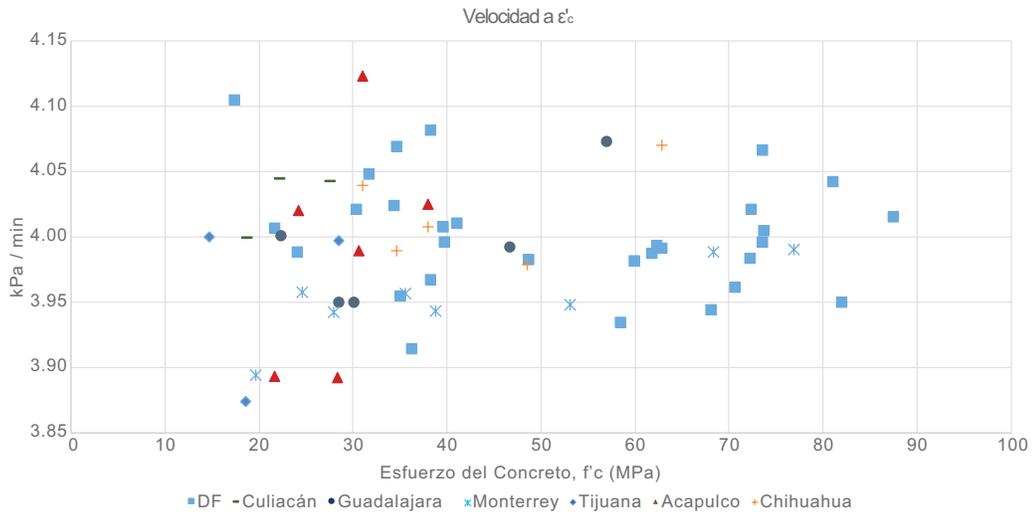


Figura 4.7: Histograma de velocidades durante la estimación de ϵ'_c

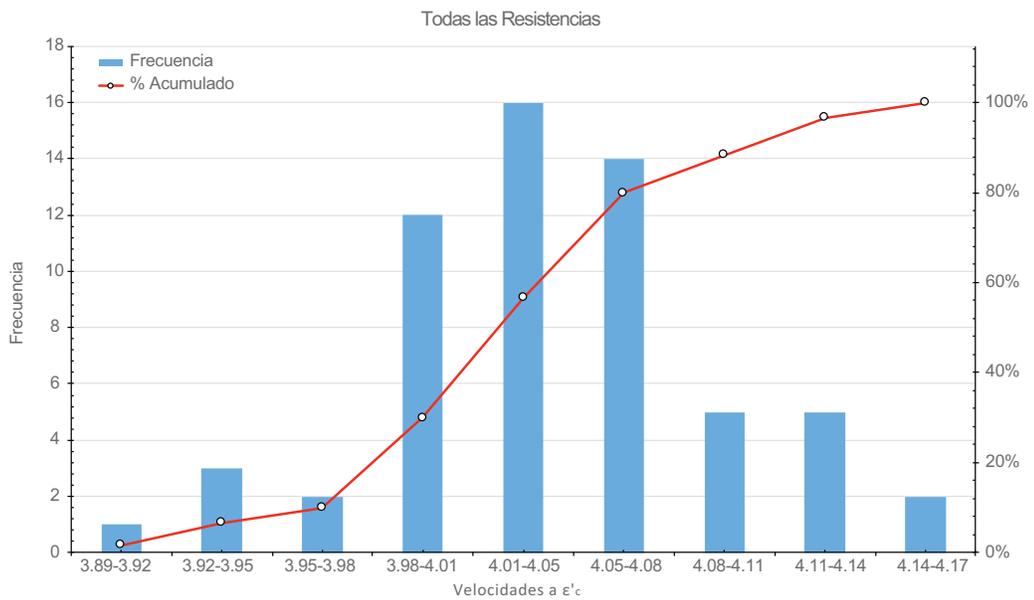


Figura 4.8: Velocidades durante la estimación de ϵ'_c

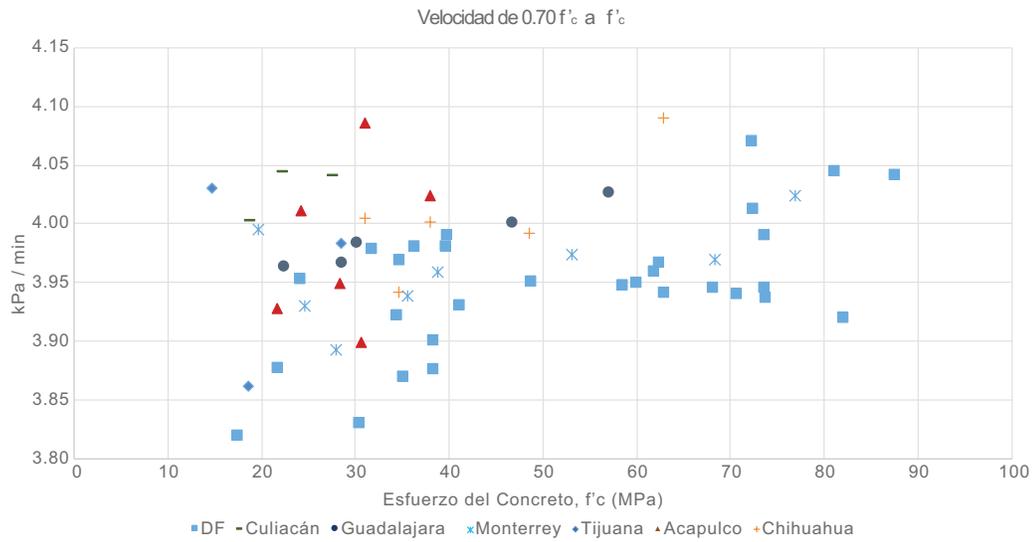


Figura 4.9: Velocidades durante $0.70 f'_c - f'_c$

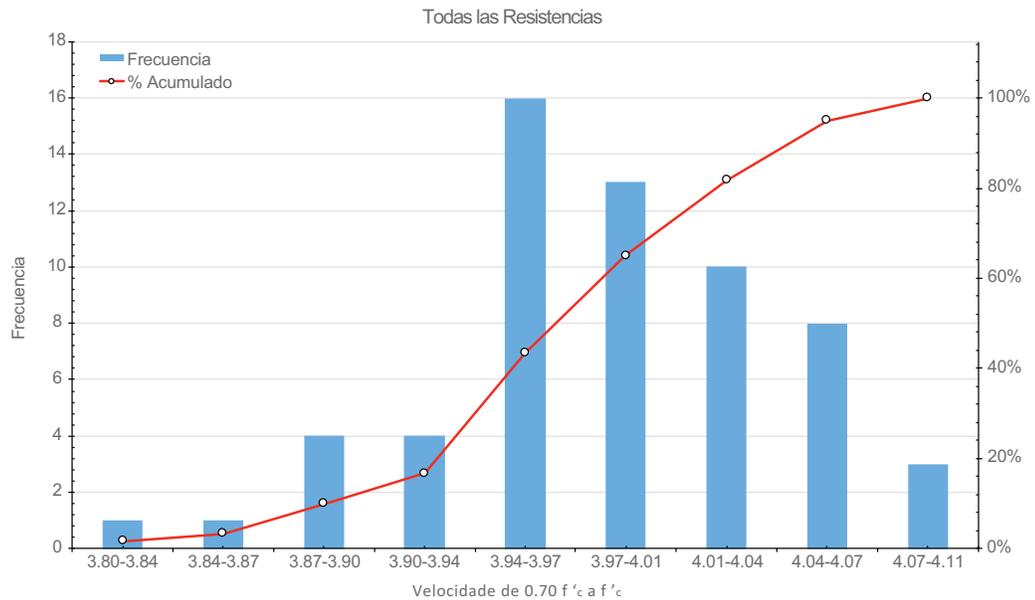


Figura 4.10: Histograma de velocidades durante $0.70 f'_c - f'_c$

Por último con las figs. 4.9 y 4.10 , se analizaron las velocidades al llegar a la resistencia máxima (desde 0.70 f_c a la máxima resistencia, f_c). La media fue de 3.97 kPa/min, con un CV=1 %.

Con lo anterior, se concluye que las velocidad se mantuvieron en cualquier punto de la prueba, aceptando de esta manera las gráficas $f_c - \varepsilon_c$ de todas las muestras de concreto ensayadas en el laboratorio en cuanto a velocidad de aplicación de carga.

4.3. Comparaciones de resultados con literatura

La fig. 4.11 muestra los resultados de las pruebas en el laboratorio y la superposición de algunos reglamentos alrededor del mundo, incluyendo las NTC-2004,⁹ se utilizó un P.V. promedio de 22.95 kN/m^3 (2340 kg/m^3).

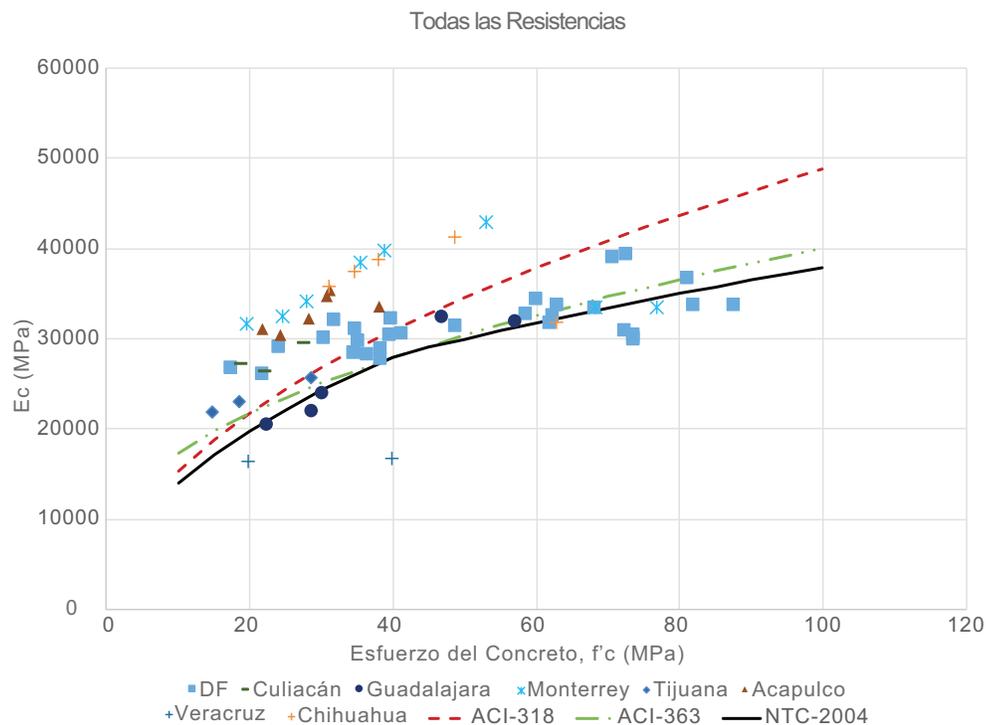


Figura 4.11: Comparaciones de E_c mexicano vs distintos reglamentos

Utilizar el reglamento americano ACI-318,¹¹ ec. (2.14), para estimar el

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

módulo elástico de concretos mexicanos arroja valores muy por encima de los medidos en el laboratorio para altas resistencias y por debajo de las medidas para resistencias normales. Utilizar la estimación del comité americano 363 (ACE-363⁶), ec. (2.7) , implica no utilizar los pesos volumétricos de los concretos, y subestimar los módulos elásticos en más de 20%. Por lo que no es recomendable utilizar estas ecuaciones para la predicción del módulo de elasticidad en concretos mexicanos.

Las normas técnicas complementarias, ecs. (2.10) a (2.12) , como se mencionó en capítulos anteriores, tienen cierta aceptación para los concretos del Distrito Federal. Sin embargo, el error al estimar los concretos del resto de las regiones del país utilizando esta aproximación es aún más grande en comparación con el resto de los reglamentos; por lo tanto, no consideraremos ninguna de éstas como aceptable para los concretos de cualquier región de México.

En el caso de la ε'_c se tiene poca información en la literatura. Una de las estimaciones de mayor aceptación en estos días es la presentada en el 2013 por Chen et. al.¹⁰ en la que se estima la deformación asociada a f'_c a partir de una ecuación lineal, donde solo influye la resistencia máxima del concreto.

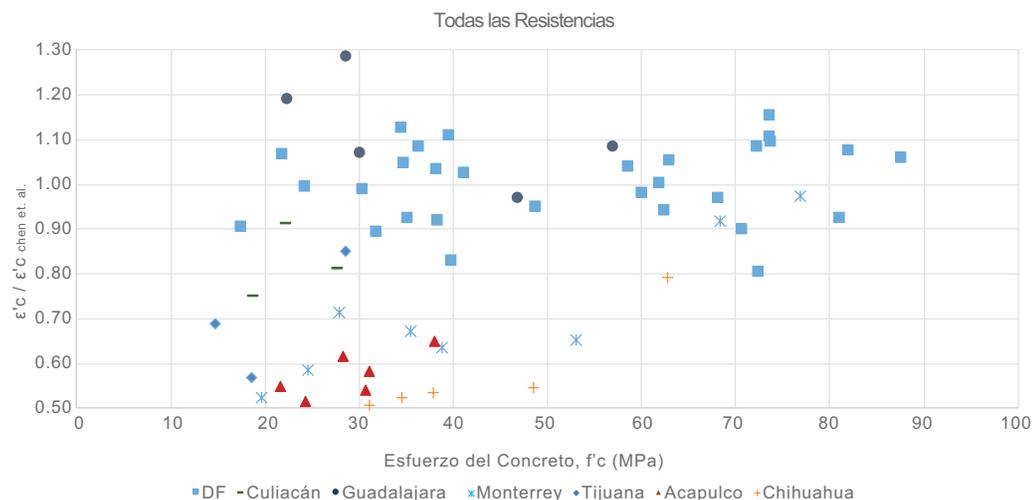


Figura 4.12: Comparaciones de ε'_c medido vs propuesta por Chen et. al.

En la fig. 4.3 se muestran los resultados de las pruebas en el laboratorio del Instituto de Ingeniería y se observa una tendencia lineal como la ec.

(2.13) propuesta por los autores antes mencionados. La fig. 4.12 muestra la comparación entre la ε'_c medida en laboratorio contra la ε'_c estimada con la ec. (2.13).

Con esta expresión se tiene una buena estimación para los concretos del centro del país. Sin embargo, para los concretos de las zonas restantes, principalmente las regiones de Monterrey, Acapulco y Chihuahua; la estimación no es tan buena, variando desde 0.50 hasta 1.30.

Para entender mejor la variación que se tiene, en la fig. 4.13 se muestra un histograma de esta comparación, donde se aprecia que varía desde 0.50 hasta 1.30 con una media de 0.84 y con un CV=24%; lo cual hace que, esta estimación no se pueda tomar como aceptable para los concretos mexicanos.

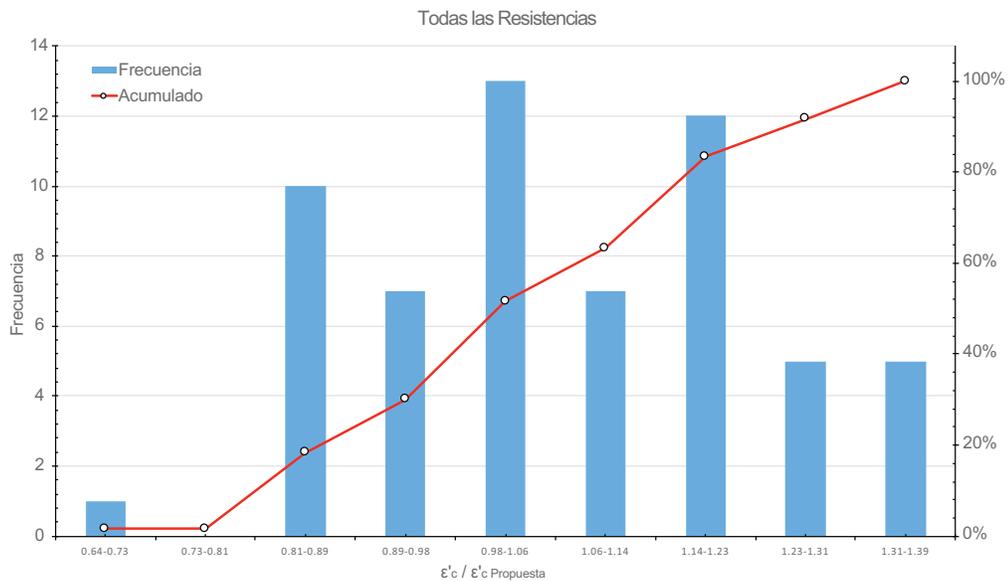


Figura 4.13: Histograma de comparaciones ε'_c medido vs ε'_c de Chen et. al.

Capítulo 5

Propuestas para el Cómputo del Módulo Elástico

5.1. Introducción

En este capítulo se describirán las propuestas para la estimación del módulo elástico. Se plantearon dos, la primera siguiendo lo estudiado por Adrian Pauw,¹⁵ donde se demuestra que el peso volumétrico del concreto tiene gran importancia en la estimación del módulo elástico, adoptando una curva similar a la utilizada por el ACI-318¹¹.

En la segunda propuesta, para la estimación de E_c se utilizó un factor "D" que llamamos "Factor de Densidad". Este factor de densidad está calculado a partir de las razones de las densidades de los agregado, grava y arena, eligiendo la menor probable de estas y adoptándola como "D".

5.2. Propuesta utilizando el peso volumétrico del concreto

La propuesta por el ACI-318, utiliza una ecuación de la forma $E_c = Kw^a(f'_c)^b$, donde se definen que los factores de mayor importancia para la reducción de la dispersión en el módulo de elasticidad son las potencias del peso volumétrico del concreto, a, y la potencia a la que está elevada la máxima resistencia esperada, b.

Realizando iteraciones para estos dos factores se llegó a que la ec. (5.1), para estimar el E_c de los concretos mexicanos, era la que presentaba menor dispersión al estimar los resultados de las pruebas en el laboratorio.

$$E_c = K w^{1.5} (f'_c)^{0.10} \quad (5.1)$$

donde, para obtener un resultado de E_c en MPa, $K=201 \text{ MPa}^{0.9} \text{ m}^{4.5} / \text{kN}^{1.5}$ utilizando la densidad del concreto en kN/m^3 y el f'_c en MPa. Si se desea E_c en kg/cm^2 , $K=1.55 \text{ m}^{4.5} / \text{kg}^{3/5} \text{ cm}^{9/5}$ colocando la densidad del concreto en kg/m^3 y la resistencia del concreto f'_c en kg/cm^2 .

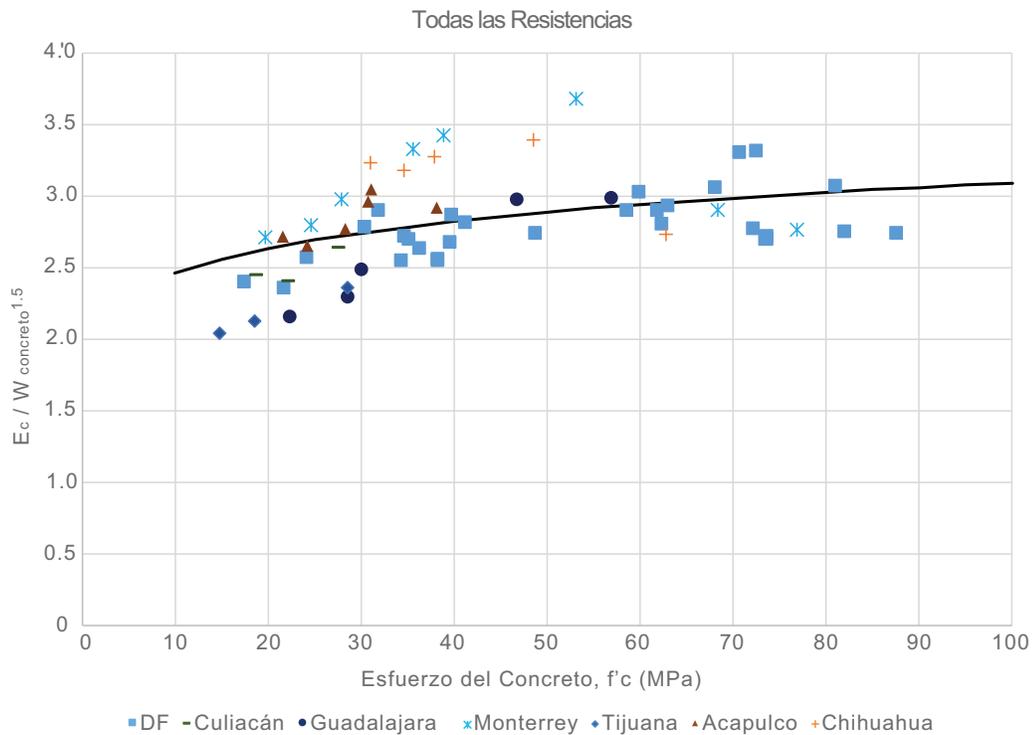


Figura 5.1: Dispersión módulo elástico

La fig. 5.2 muestra una comparación entre el módulo elástico medido de los ensayos de laboratorio vs los resultados de estimarlo utilizando la ec. (5.1), variando de 0.80 a 1.28 en cuanto a aproximación, lo cual resulta muy satisfactorio en la estimación de este parámetro tan complejo.

Observando la fig. 5.3 es posible identificar los valores extremos obtenidos de la aproximación 1, obteniendo una media=1.00 y CoV=10%, por lo que es posible considerarla aceptable. Del mismo modo, este tipo de

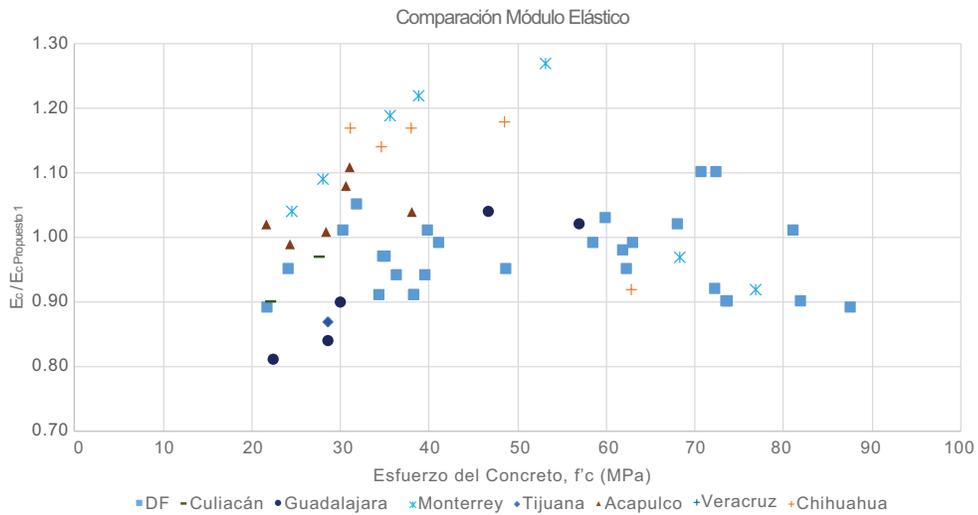


Figura 5.2: Comparaciones de E_c medido vs propuesta 1

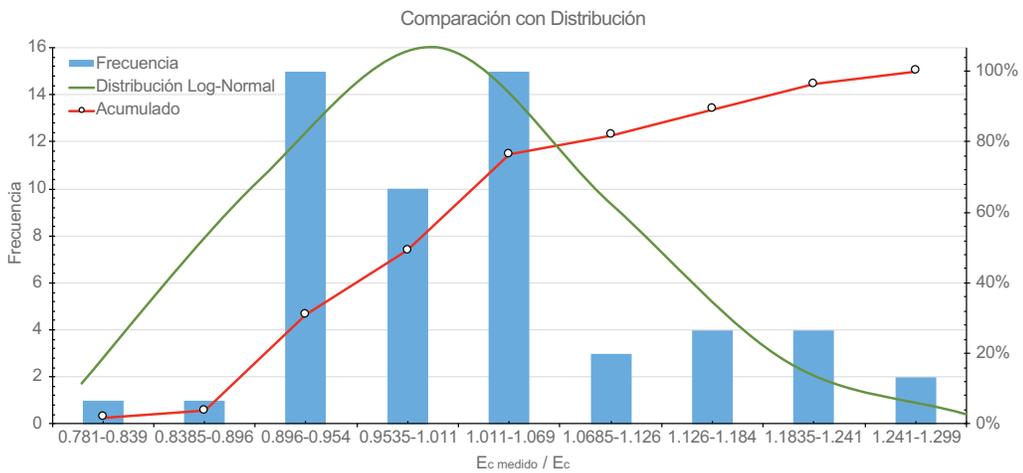


Figura 5.3: Histograma de comparación de E_c propuesta 1

variable se ajusta adecuadamente a una distribución log-normal. Realizando una superposición de la distribución log-normal, se obtuvo una Media=2.732 y un CoV=10%, para este tipo de distribución (distr. log-normal).

El estudiar el comportamiento de este tipo de variables como la resistencia del concreto, permite realizar estudios futuros enfocados hacia otro tipo de investigaciones donde intervengan el concreto y las características de la curva $f_c - \varepsilon_c$.

5.3. Propuesta utilizando un factor de densidades

La predicción de la respuesta de las estructuras de concreto a lo largo de la historia ha avanzado; ha evolucionado conforme avanza el conocimiento para estimar el valor del módulo elástico para el concreto. En los primeros estudios realizados hace ya bastantes años la primera aproximación tomaba el E_c como una variable donde solo se proponía una ecuación lineal, el factor principal era el valor de la resistencia máxima esperada del concreto, f'_c .

Inicialmente, la predicción de esta compleja propiedad del concreto se dijo dependía de la raíz cuadrada de f'_c proponiendo de esta manera una ecuación no lineal, como la ec. (2.10), aproximándose un poco más a la predicción exacta del E_c . Posteriormente, con la llegada de nuevos investigadores, nuevas tecnologías para el ensaye de las muestras de concreto se observa que el módulo elástico no solo se ve afectado por la máxima resistencia esperada, si no que a su vez, el peso volumétrico del concreto también es un factor importante para estimar esta propiedad, tomando de esta manera lo que se tiene hoy en día como aceptable por el ACI-318¹¹ donde la raíz cuadrada del f'_c se mantiene y se agrega un factor del peso volumétrico del concreto elevado a una potencia igual a 1.5, reduciendo la discrepancia con los resultados obtenidos experimentalmente.

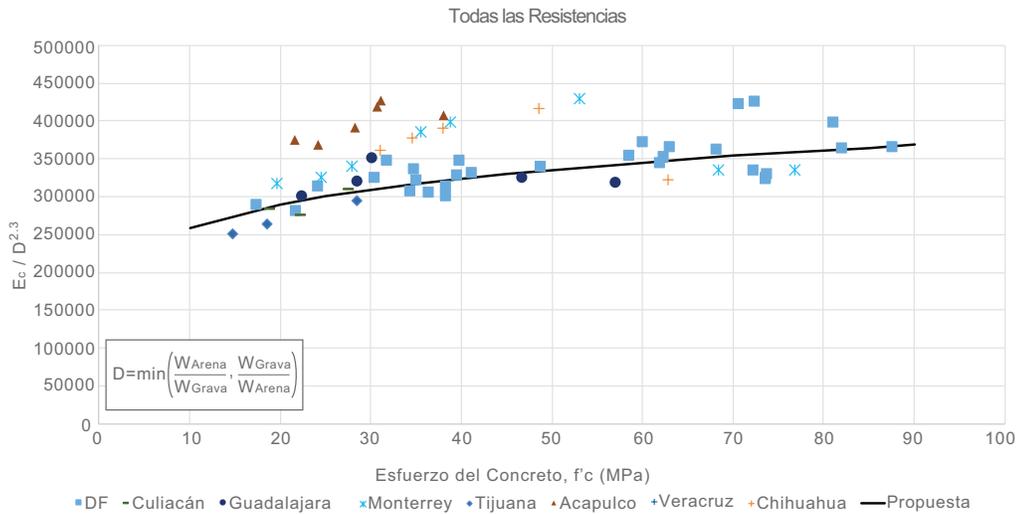


Figura 5.4: Comportamiento del módulo elástico afectado por el factor de densidades

En la actualidad con las nuevas tecnologías es posible observar la gráfica $f_c - \varepsilon_c$ del concreto a mayor detalle, lo cual lleva a muy buenos resultados. Con esta investigación se observó que efectivamente, la densidad del concreto juega un papel de suma importancia en la predicción del E_c ; sin embargo, esta densidad del concreto depende principalmente de las densidades de los agregados que se utilizan al realizar la mezcla. Si se utilizan agregados con densidades altas la densidad final del concreto será alta. Por lo tanto, el módulo elástico para esta mezcla se espera sea elevado.

En la fig. 5.4 se muestra una comparativa donde E_c medido se divide entre el factor de densidades propuesto por la ec. (5.3) lo cual se ve afectado por las densidades de los agregados tomando la menor relación posible de estas. Una vez reducida la dispersión en E_c se realizó una propuesta de ecuación en la cual, esta vez el f'_c no se afecta por la raíz cuadrada. Se observó que la dispersión de los resultados se redujo al utilizar una potencia de 0.16 para f'_c afectado por el factor de densidades llamado "D", por una potencia de 2.3 y un factor K (5.4), como se muestra en la ec. (5.2).

$$E_c = K D^{2.3} (f'_c)^{0.16} \tag{5.2}$$

donde:

$$D = \min \left[\frac{W_{Grava}}{W_{Arena}}, \frac{W_{Arena}}{W_{Grava}} \right] \quad (5.3)$$

$$K = 1.792 \text{ para obtener } E_c \text{ en MPa} \quad (5.4)$$

$$(K = 1.24 \text{ para obtener } E_c \text{ en Kg/cm}^2)$$

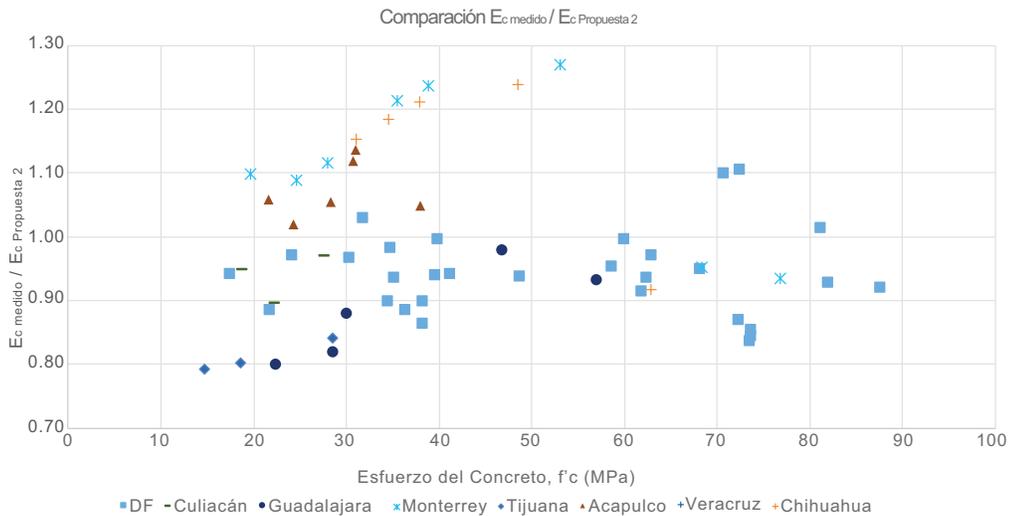


Figura 5.5: Comparación E_c medido vs Propuesta 2

En la fig. 5.5 se muestra una comparativa entre los resultados de E_c obtenidos en el laboratorio contra la propuesta para estimarlo utilizando el factor de densidades. Se observa que oscila entre 0.80 y 1.27, algo muy parecido a lo que se obtuvo de la propuesta 1 en la fig. 5.3 de la sección anterior. Para esta propuesta, observando el histograma de la fig. 5.6 se obtuvo una media de 0.99 y un coeficiente de variación de 12%, comportandose de una manera similar a la propuesta 1, una distribución log-normal.

Los resultados de las dos propuestas antes descritas demuestran que, efectivamente las propiedades de los agregados son las que afectan principalmente el comportamiento final del concreto. Comparando la propuesta 1 con la propuesta 2, se observa una dispersión un poco más alta en la segunda propuesta. Para tomar esta propuesta como adecuada es

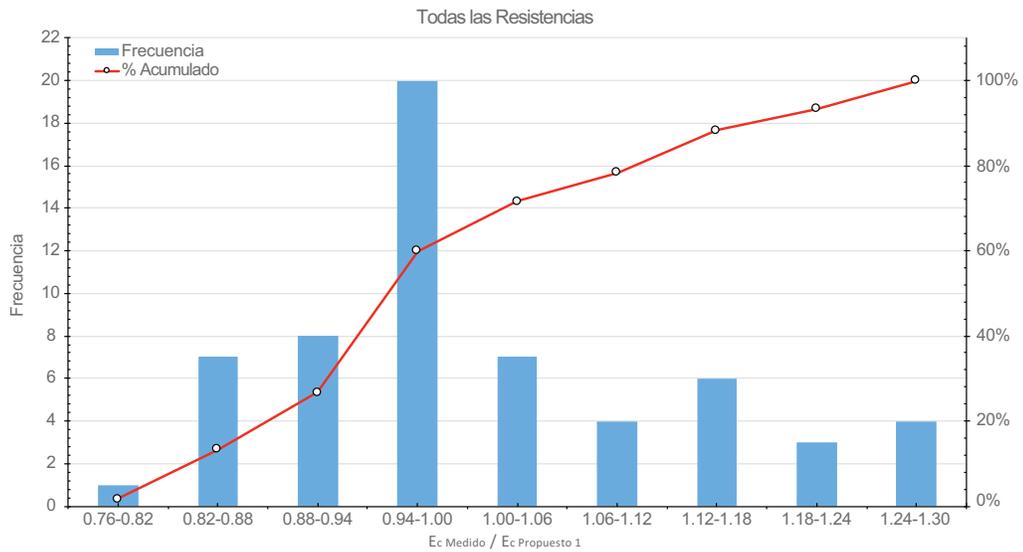


Figura 5.6: Histograma de comparación de E_c propuesta 2

necesario contar con más datos de los concretos que se estarán estudiando ya que dentro de los mismos bancos de materiales se pueden tener variaciones en la densidad de los agregados, lo cual se comprobó en algunos casos de los concretos ensayados en el laboratorio con los que se contaba este dato.

Capítulo 6

Propuestas para Definición de la Relación E_c/E_{sec} y ε'_c

6.1. Introducción

Durante los últimos años, estudios como el realizado por Mander¹ propone nuevas maneras de estimar los parámetros de la gráfica $f_c - \varepsilon_c$ del concreto sin confinar y confinado.

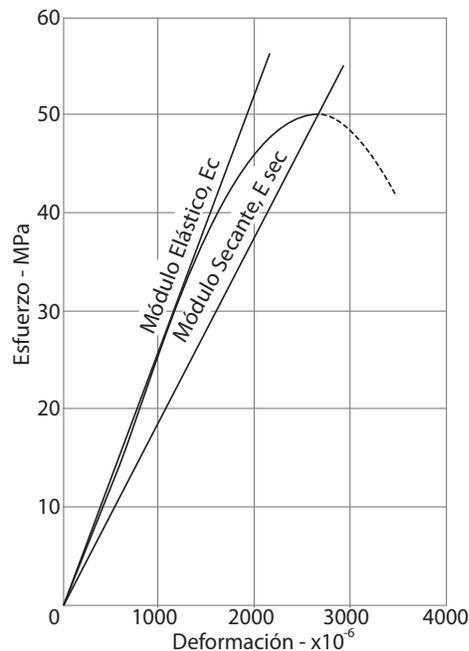


Figura 6.1: Definición del modulo secante del concreto E_{sec}

En su estudio, Mander observó que utilizando el módulo secante del con-

creto (E_{sec}) para la predicción de las propiedades de éste, hacía que la dispersión en los resultados se redujera. Además, que utilizando E_{sec} las expresiones para el cálculo de otros parámetros de la gráfica se vuelven más sencillas de adoptar.

El módulo secante del concreto (E_{sec}) se define como la relación de f'_c con ε'_c , como se muestra en la ec. (1.6), fig. 6.1.

6.2. Resultados de los valores medidos y calculados de la Relación E_c/E_{sec}

La relación E_c/E_{sec} , al igual que Mander en su estudio la llamaremos "n". Dentro de ella van las densidades del concreto y la resistencia máxima esperada, f'_c . Por esto, la predicción para este parámetro no se puede realizar mediante una ecuación lineal.

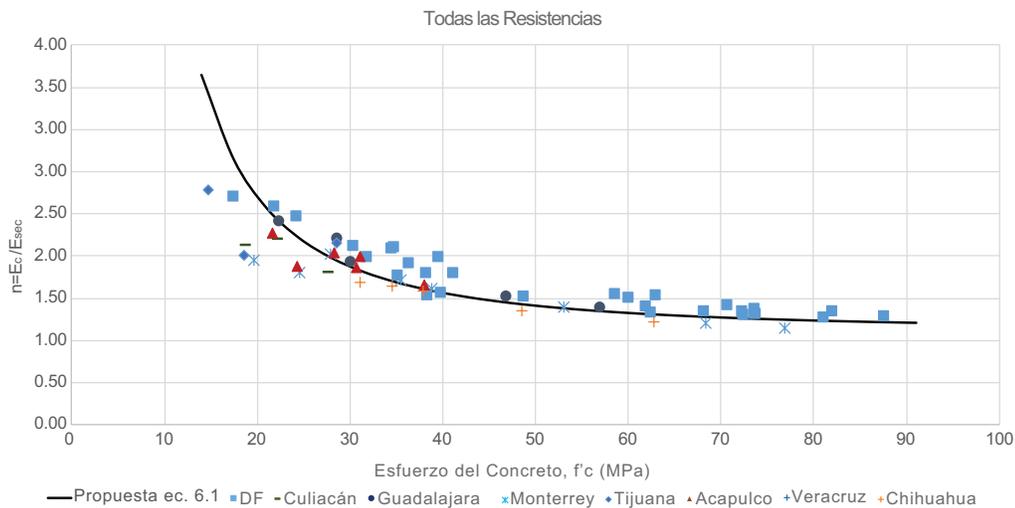


Figura 6.2: Parámetro n vs f'_c

La fig. 6.2 muestra los resultados de los ensayos de este estudio para la relación entre módulos. Se aprecia que la tendencia para este parámetro no toma la forma de una recta, sino, de una hipérbola, donde no es posible que tenga como asíntota a "1.00", ya que esto diría que el módulo elástico y el módulo secante tienen el mismo valor; lo cual no es posible.

La ecuación propuesta en la figura anterior, para la estimación de n , es la siguiente:

$$n = \left(\frac{26}{f'_c} \right)^{1.80} + 1.10, \quad f'_c \text{ en MPa.} \quad (6.1)$$

y en sistema métrico:

$$n = \left(\frac{260}{f'_c} \right)^{1.80} + 1.10, \quad f'_c \text{ en kg/cm}^2. \quad (6.2)$$

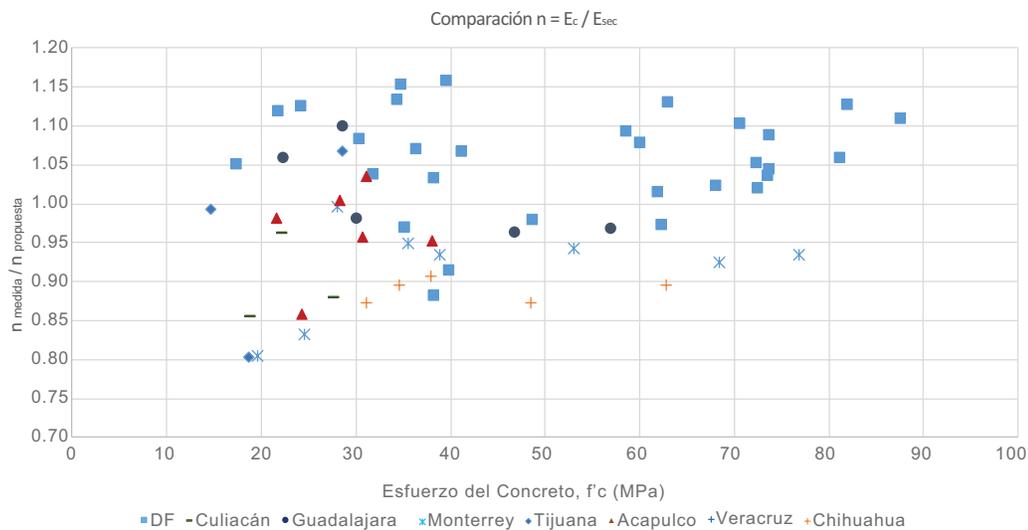


Figura 6.3: Comparación n medida vs n propuesta

Utilizando esta propuesta se realizaron comparativas entre " n " medida contra " n " estimada, los resultados se muestran en la fig. 6.3. Se observa una correlación aceptable donde para los concretos mayores a 20 MPa la aproximación a la unidad es muy cercana, oscilando entre el 0.80 y 1.25, obteniendo una media = 1.01 con un CoV de tan solo 11 %; por lo que, la propuesta se considera aceptable.

En la fig. 6.4 se muestra el histograma de esta comparacion, donde, de manera más simple, se aprecia la media de 1.01 para estos valores.

Una vez propuesta esta expresión para el cálculo de la relación E_c/E_{sec} , es posible estimar la deformación asociada a la máxima resistencia, ϵ'_c ,

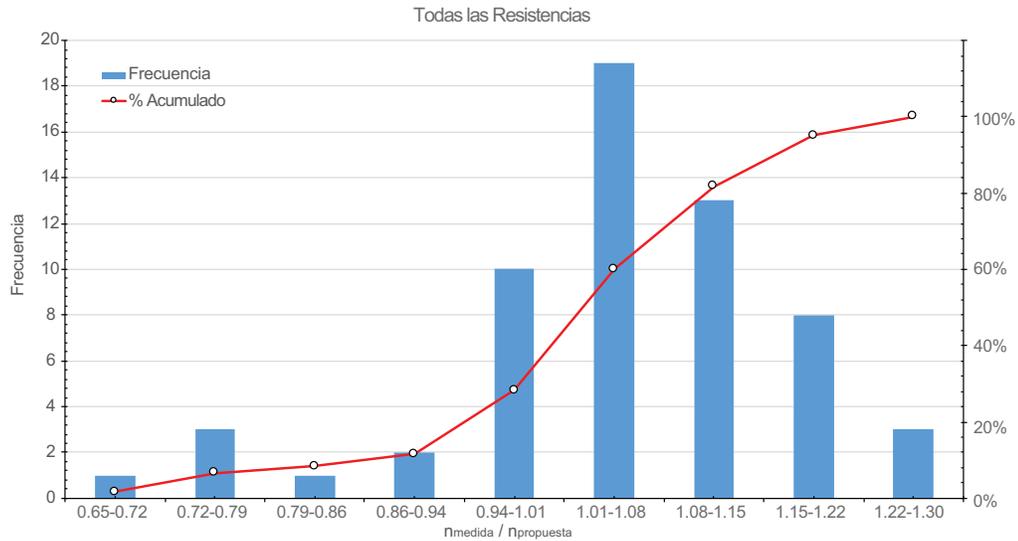


Figura 6.4: Histograma n medida vs n propuesta

utilizando la expresión (1.4) mencionada en los primeros capítulos, lo que lleva a:

$$\varepsilon'_c = \frac{nf'_c}{E_c} \quad (6.3)$$

En lo que sigue se se comentara con mayor detalle.

6.3. Resultados de los valores medidos y calculados de ε'_c

Revisando la literatura, se encontró una expresión lineal propuesta por Chen et. al.¹⁰ para el cálculo de ε'_c . La fig. 6.5 muestra el comportamiento de los resultados para ε'_c obtenidos en el laboratorio de estructuras de la UNAM vs su f'_c . De acuerdo con Chen (2013)¹⁰ ε'_c solo se ve afectada por la máxima resistencia esperada del concreto y propone una ecuación lineal para su predicción. En las figs. 6.6 y 6.7 se muestran las comparativas entre lo medido en el laboratorio contra la estimación propuesta por Chen et Al.

$$\varepsilon'_c = 1.74x10^{-7} f'_c + 2.41x10^{-3}, \quad en MPa \quad (6.4)$$

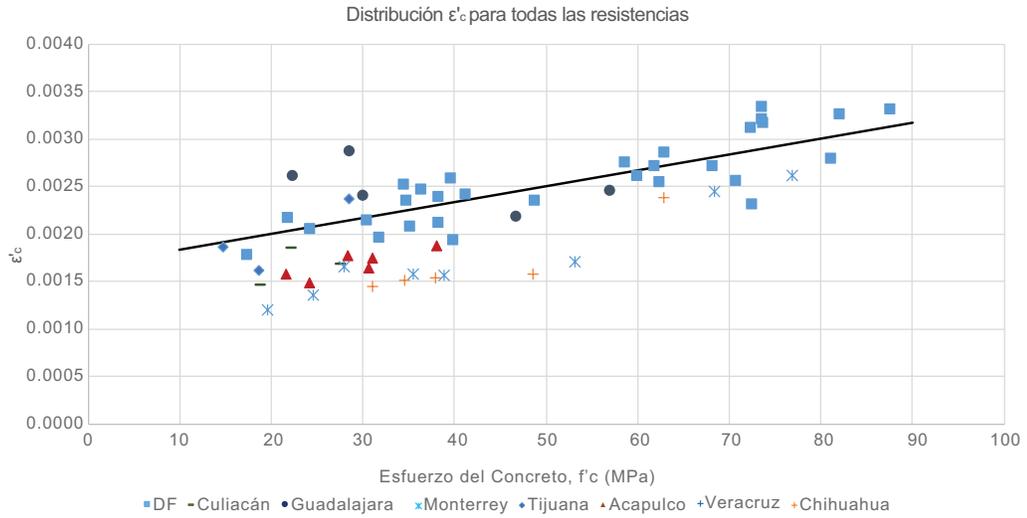


Figura 6.5: Deformación asociada a máxima resistencia, ϵ'_c vs máxima resistencia, f'_c

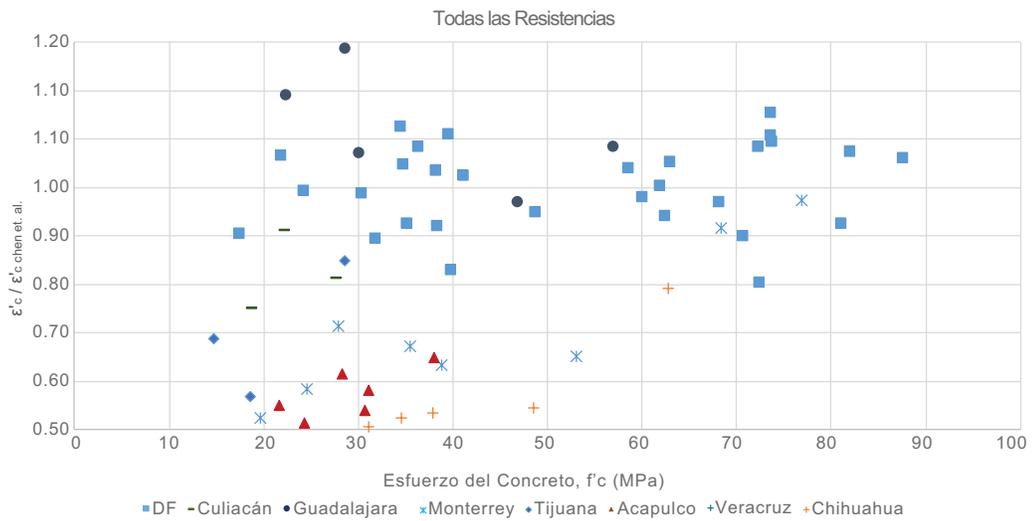


Figura 6.6: Comparación ϵ'_c medida vs propuesta por Chen

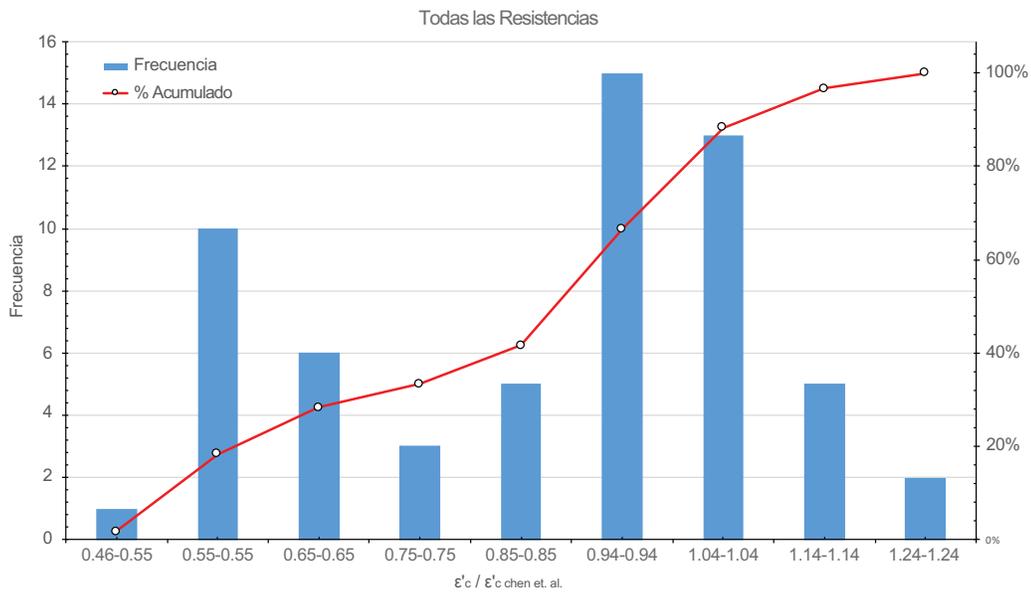


Figura 6.7: Histograma comparación ϵ'_c medida vs propuesta por Chen

Se observa que los valores varían desde 0.50 hasta 1.30, obteniendo una media de 0.87 con un CoV de 24 %, lo cual indica que la propuesta no se puede tomar como aceptable para el país de México. Sin embargo, si observamos la región del Distrito Federal por separado utilizando la expresión de Chen se podría considerar aceptable, pero para los concretos del país en general la expresión no es adecuada.

Una de las razones para no considerar aceptable la expresión se debe a que en ningún momento utiliza la densidad del concreto en ésta y de acuerdo a lo que se ha comentado en los capítulos anteriores es de suma importancia en la estimación de todo lo que tenga que ver con concreto.

La fig. 6.8 muestra la comparativa de la ϵ'_c medida contra la propuesta en este estudio, ec. 6.4 .

En las gráficas 6.8 y 6.9 se muestra que la variación de los resultados medidos contra lo calculado oscila desde 0.70 a 1.30, obteniendo una menor variación en comparación a lo propuesto por Chen, con una media=1.00 y un coeficiente de variación de 15%.

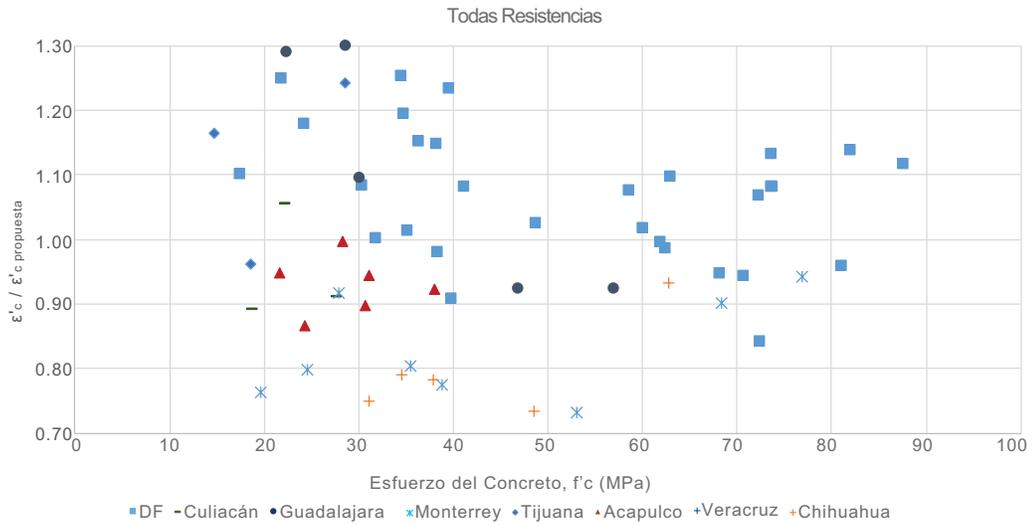


Figura 6.8: Histograma comparación ϵ'_c medida vs propuesta

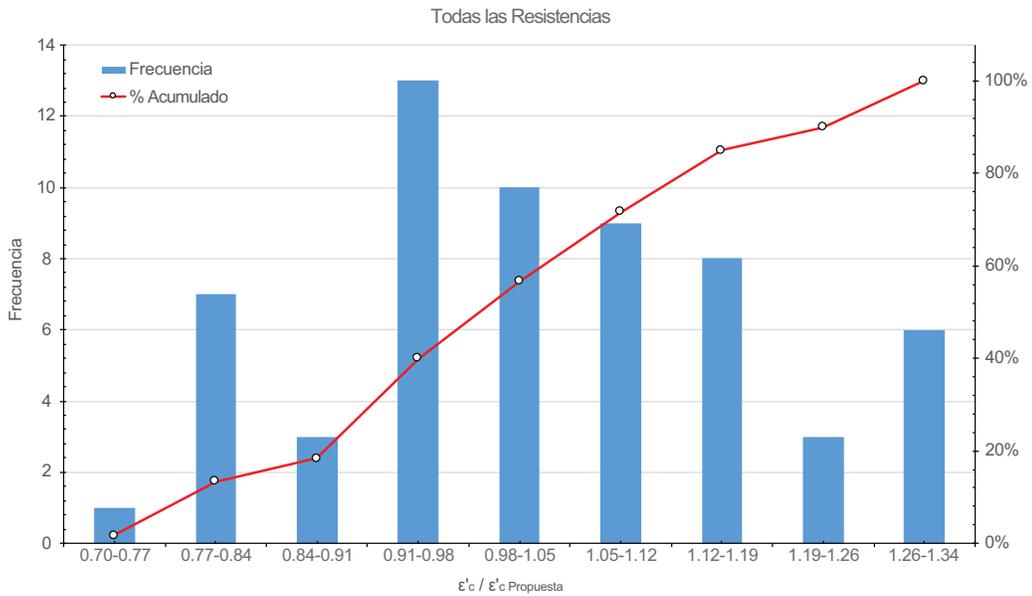


Figura 6.9: Histograma comparación ϵ'_c medida vs propuesta

Capítulo 7

Implicaciones para el Diseño de Acuerdo con los Resultados Obtenidos en este Estudio

7.1. Comparativa de reglamentos con ensayos mexicanos

7.1.1. Módulo Elástico

Este capítulo se enfocará en mostrar las comparaciones entre lo propuesto por las Normas Técnicas Complementarias de Concreto del D.F. (NTC-DF,2004) y los resultados de las propuestas de este estudio. Esta normativa mexicana solo tiene expresiones para estimar el módulo elástico y no considera otros parámetros de la curva $f_c - \varepsilon_c$ como la ε'_c , E_{sec} , etc. Por esto, en lo que sigue solo se podrá comparar las expresiones para E_c .

Comparando las ecuaciones (2.10), propuesta por las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal 2004, y (5.1), la cual se propone basándose en los resultados de este estudio, es posible notar que la propuesta por el reglamento mexicano es una ecuación basada principalmente en la raíz cuadrada de la máxima resistencia esperada, sin mencionar la densidad del concreto ó tomar en cuenta las diferentes características de los agregados a lo largo de la República Mexicana. En cambio, la propuesta 1 realizada en capítulos anteriores muestra una ecuación en

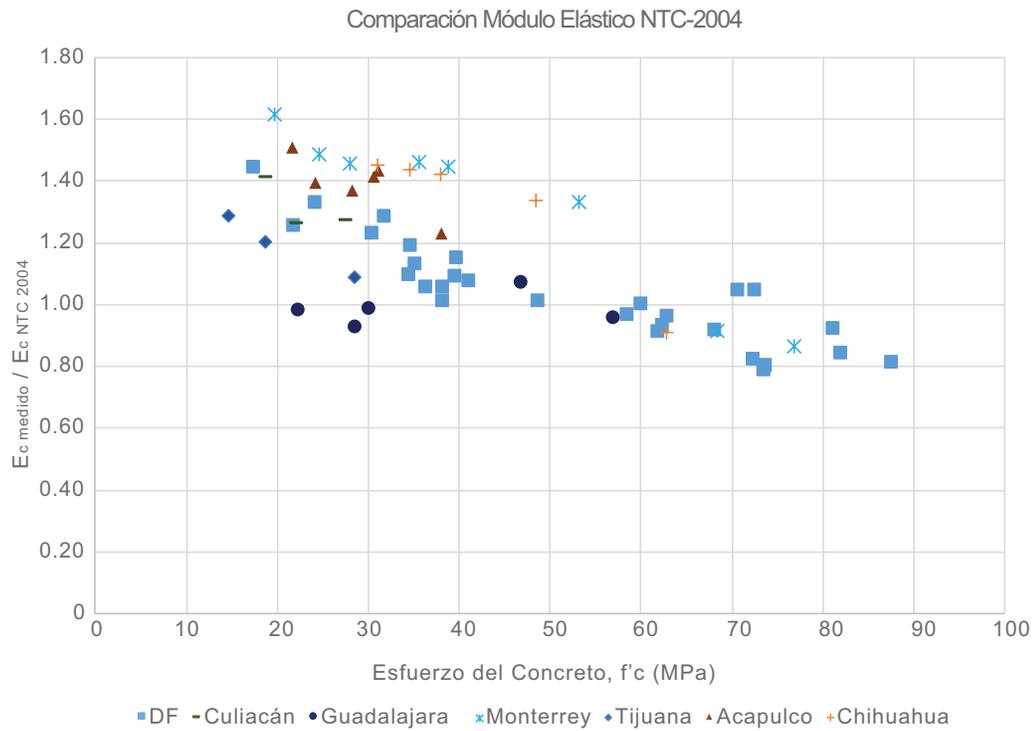


Figura 7.1: Comparación E_c experimental vs E_c estimado de acuerdo a RCDF

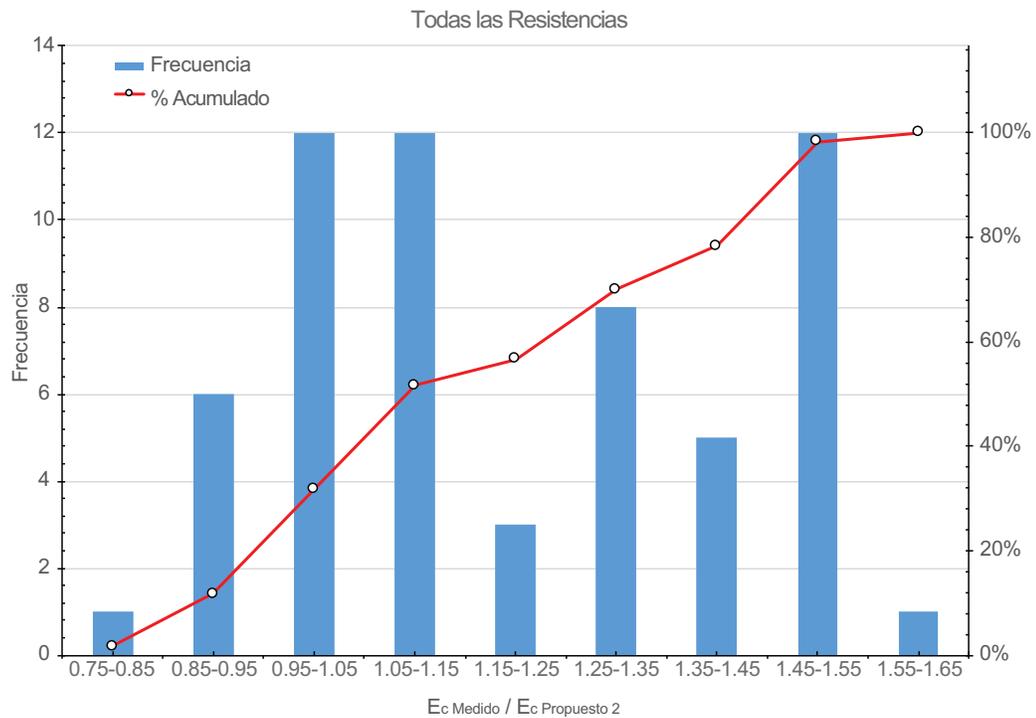


Figura 7.2: Histograma comparación E_c experimental vs RCDF

la que, además de afectar el f'_c por una potencia, también toma en cuenta las características generales del concreto mexicano, lo cual resulta en una mejor aproximación.

En las figs. 7.1 y 7.2 se muestra un análisis estadístico de estimación de los ensayos realizados en este estudio con las propuestas del reglamento mexicano. Se observa que utilizando el reglamento del D.F. se tiene una aproximación desde 0.80 a 1.60, que significa un alto rango de variación, obteniendo una media igual a 1.15 y un coeficiente de variación de 20 %. Por lo tanto, la expresión no es adecuada para utilizarse en la práctica para todo el país.

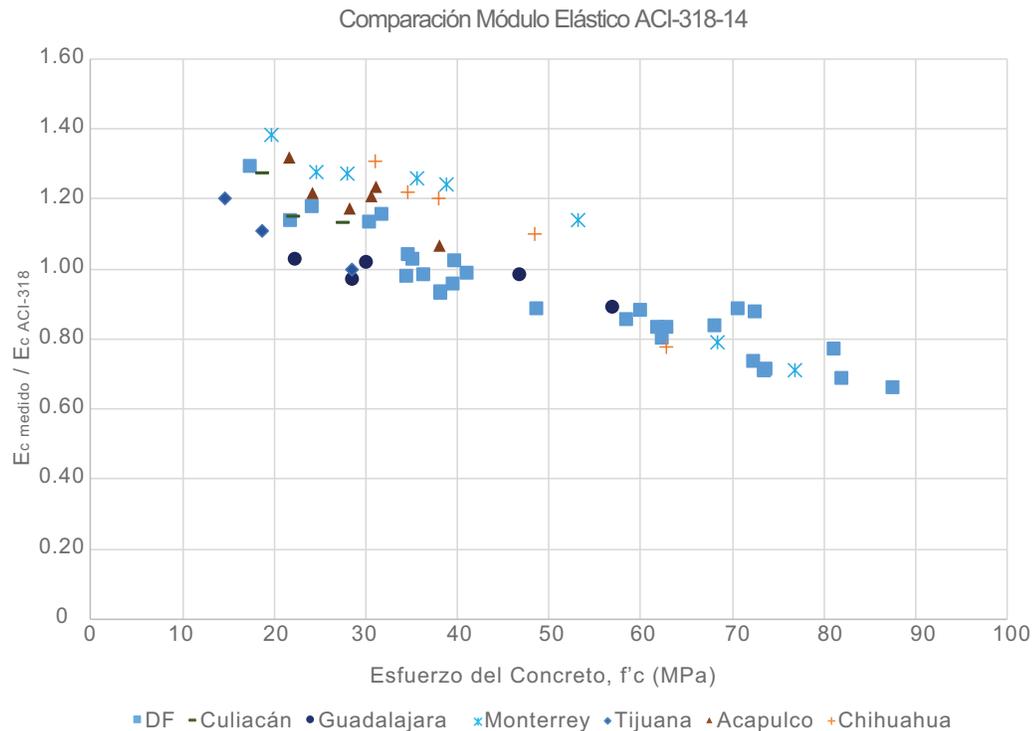


Figura 7.3: Comparación E_c experimental vs E_c estimado de acuerdo a ACI-318

Algunos ingenieros estructuristas en el país se percataron de esta discrepancia y deciden utilizar otros reglamentos para estimar el comportamiento del concreto mexicano. De los reglamentos extranjeros más utilizados en el país, destaca el reglamento de Estados Unidos (ACI-318). A

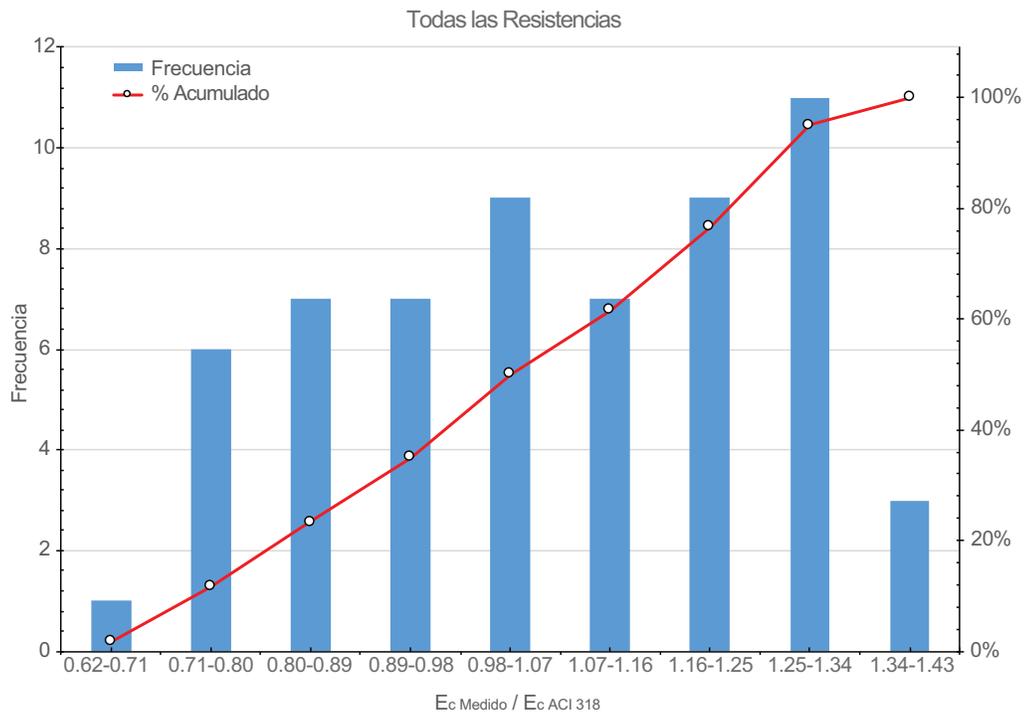


Figura 7.4: Histograma comparación E_c experimental vs ACI-318

continuación se muestra un estudio estadístico utilizando el ACI-318-14 para estimar el módulo elástico de concretos fabricados en México.

Ya que el ACI-318 está respaldado con muestras de concreto estadounidense es de esperarse que la relación al estimar un concreto mexicano no sea tan adecuada. En la fig. 7.3 se observa que las aproximaciones varían desde 0.65 a 1.40. Era de esperarse que la aproximación fuera aun menos adecuada a la propuesta por el RCDF ya que para la calibración de la ecuación del ACI no se utilizaron en ningún momento concretos fabricados con agregado mexicano, a pesar de que la ecuación incluya el peso volumétrico de los concretos.

En la fig. 7.4 se muestra el histograma de la comparación entre lo medido vs ACI, donde la media resultó mejor en general, obteniéndose 1.02, el coeficiente de variación se mantuvo en 19%. Por lo tanto, no es adecuado utilizar la ecuación propuesta por el ACI para la estimación del módulo elástico de concretos fabricados en México.

Observando los resultados de la propuesta realizada en este estudio mostrados en la fig. 5.2, se obtuvo una media de 1.00 y su coeficiente de variación de 10 %. Esto muestra que, la propuesta realizada a partir de este estudio es mejor que lo que se ha estado utilizando en los últimos años en la construcción en México, haciendo extensiva las recomendaciones para los concretos del DF a los de las otras regiones de México..

7.1.2. Relación E_c/E_{sec}

El reglamento construcción del Distrito Federal no posee un apartado donde se tome en cuenta la relación E_c/E_{sec} , sin embargo revisando la literatura internacional se ha observado que el describir el comportamiento del concreto a partir de su módulo secante lleva a buenos resultados. En la fig. 6.2 se observa que la aproximación de la curva propuesta, es más que adecuada para predecir el comportamiento de esta relación en concretos elaborados en México.

7.2. Comparativa de reglamentos con ensayos internacionales

7.2.1. Módulo Elástico

En la sección anterior se estudiaron solamente ensayos realizados en México, comparándolos con propuestas de estimación de parámetros de algunos reglamentos internacionales. En lo que sigue se analizan los resultados de este estudio con resultados de ensayos en el mundo, incluyendo México.

En la fig. 7.5 se muestran los módulos elásticos de concretos ensayados por diversos autores internacionales,^{16 17 18 19} y se muestran las propuestas de estimación que proponen el reglamento del DF (RCDF) como los ACI 318, ACI 363, la propuesta obtenida a partir de esta investigación, entre otras. Es importante mencionar que esta comparación no se puede tomar como completamente aceptable ya que la propuesta por el ACI 318

CAPÍTULO 7. IMPLICACIONES PARA EL DISEÑO DE ACUERDO...

y la ec. (5.1) propuesta en este estudio toman en cuenta el peso específico del concreto, por lo que no es posible compararlas en un mismo gráfico con las propuestas por el ACI 363 y la del RCDF, que solo dependen de la máxima resistencia esperada, f'_c .

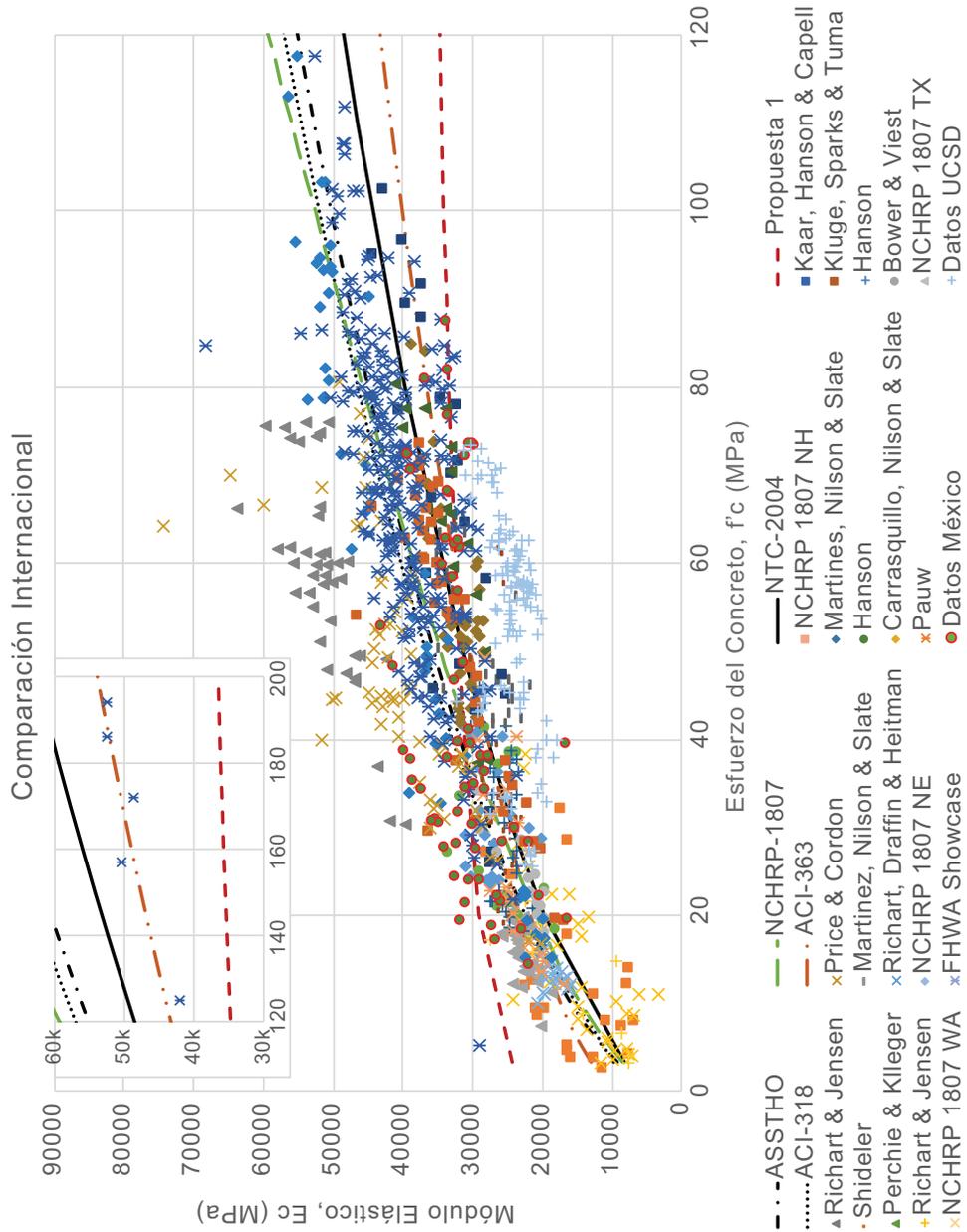


Figura 7.5: Comparación internacional de Módulos Elásticos vs propuestas de estimación

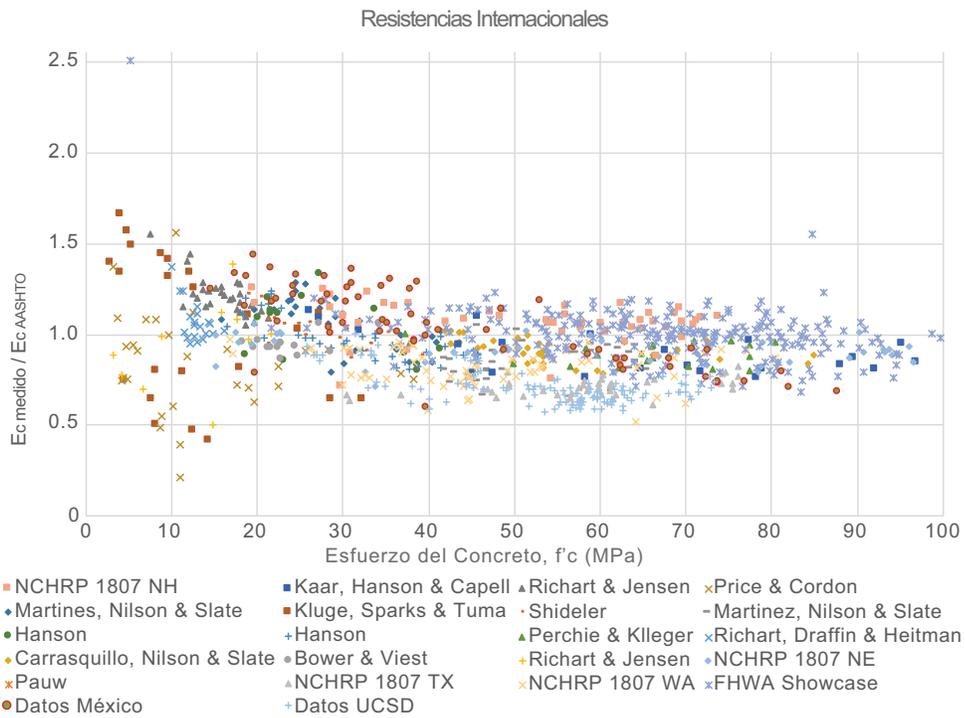


Figura 7.6: Comparación E_c medido vs propuesta AASHTO <100 MPa

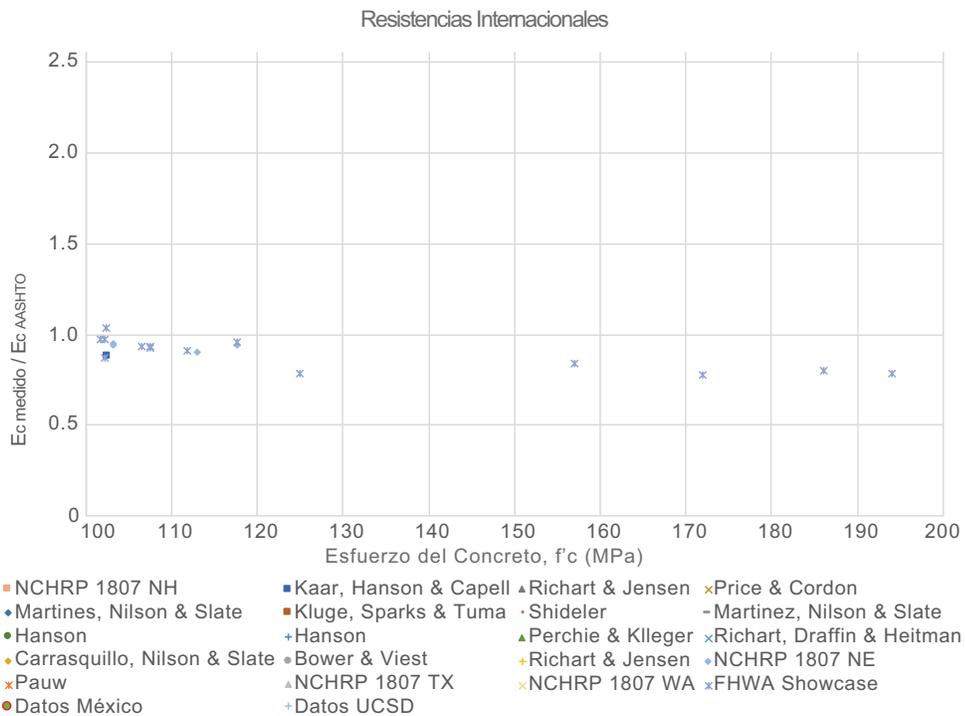


Figura 7.7: Comparación E_c medido vs propuesta AASHTO >100 MPa

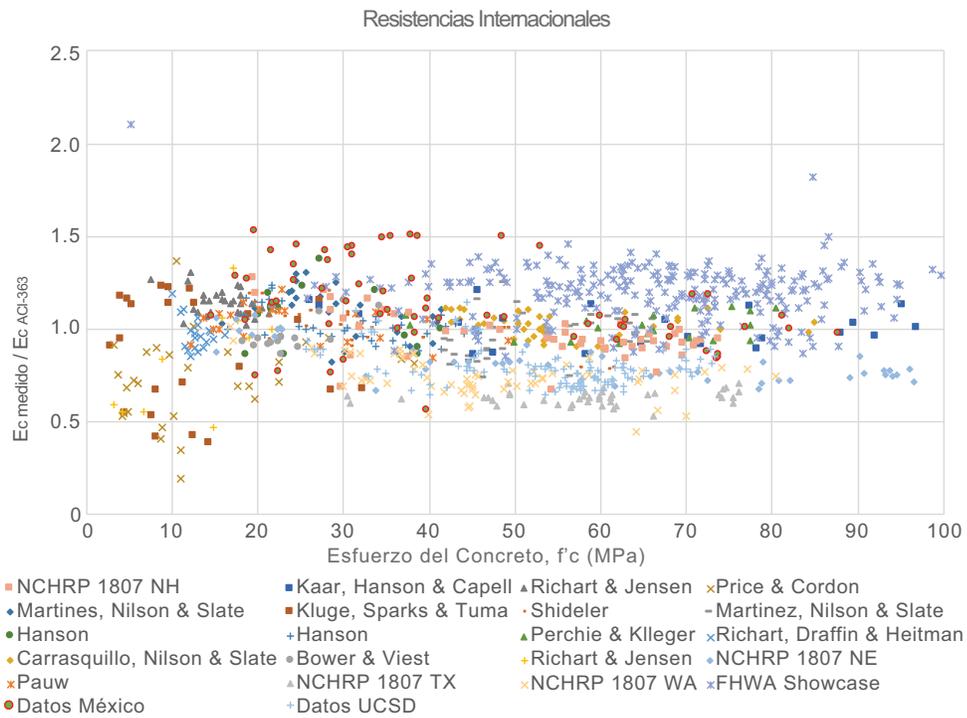


Figura 7.8: Comparación E_c medido vs propuesta ACI 363 <100 MPa

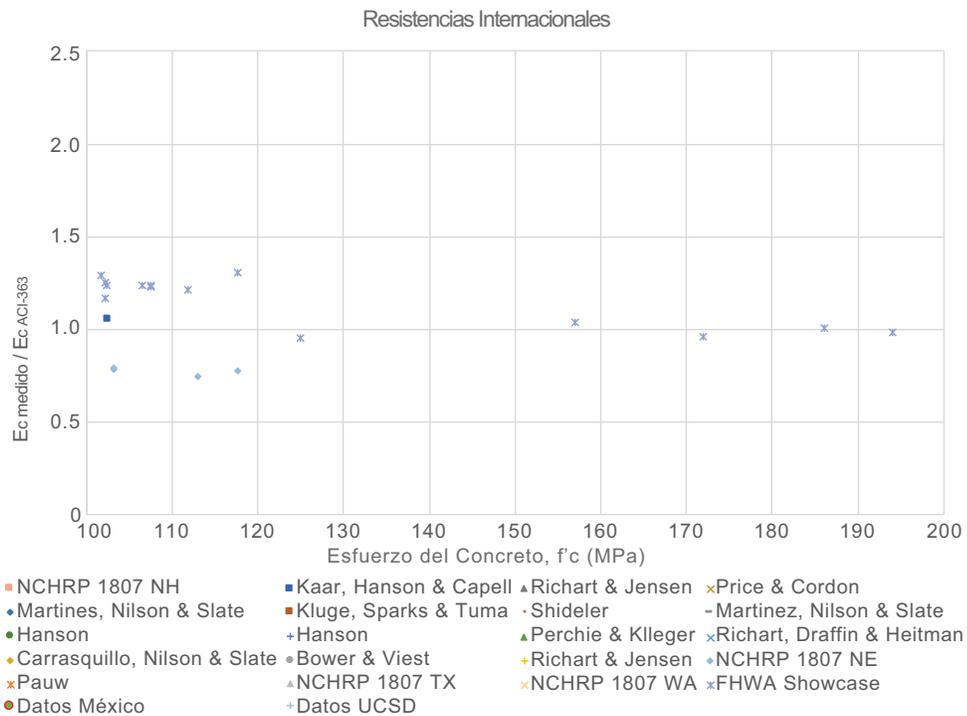


Figura 7.9: Comparación E_c medido vs propuesta ACI 363 >100 MPa

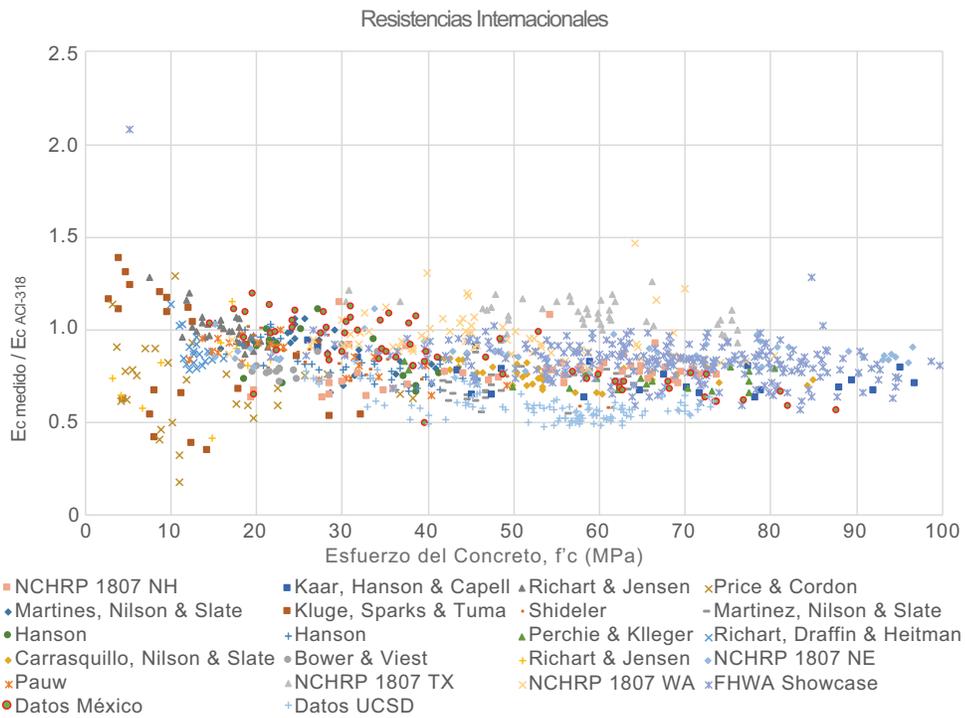


Figura 7.10: Comparación E_c medido vs propuesta ACI 318 <100 MPa

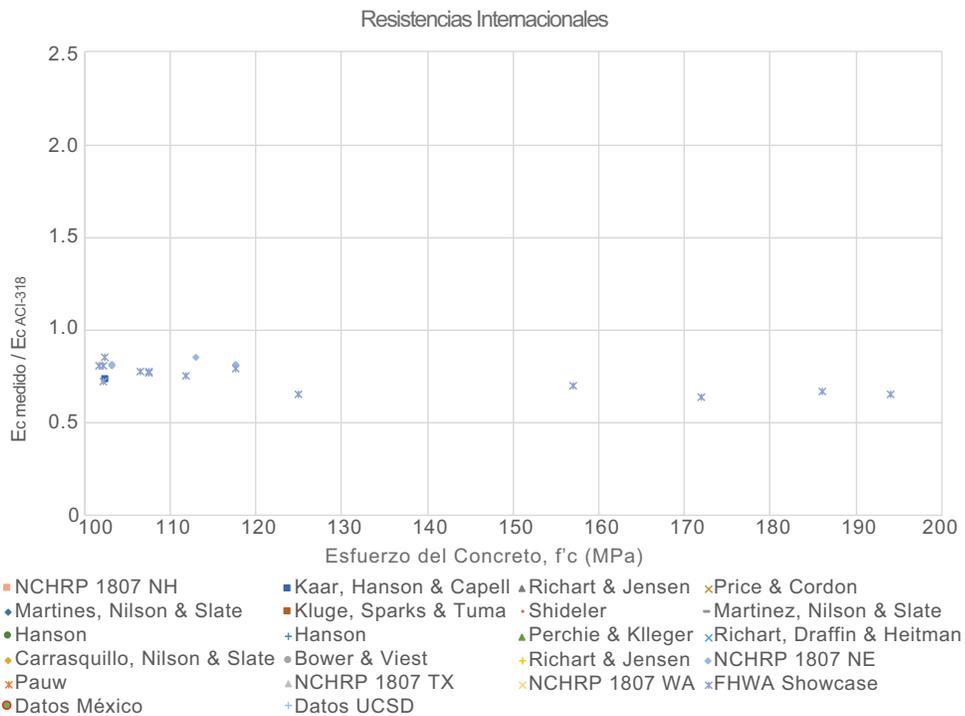


Figura 7.11: Comparación E_c medido vs propuesta ACI 318 >100 MPa

CAPÍTULO 7. IMPLICACIONES PARA EL DISEÑO DE ACUERDO...

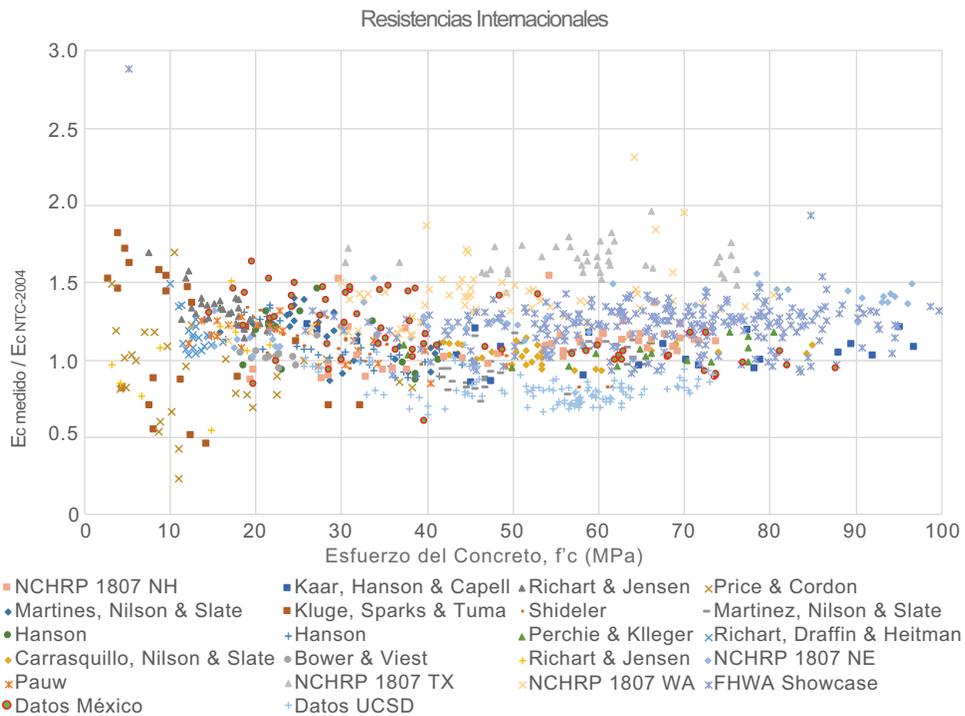


Figura 7.12: Comparación E_c medido vs propuesta NTC 2004 <100 MPa

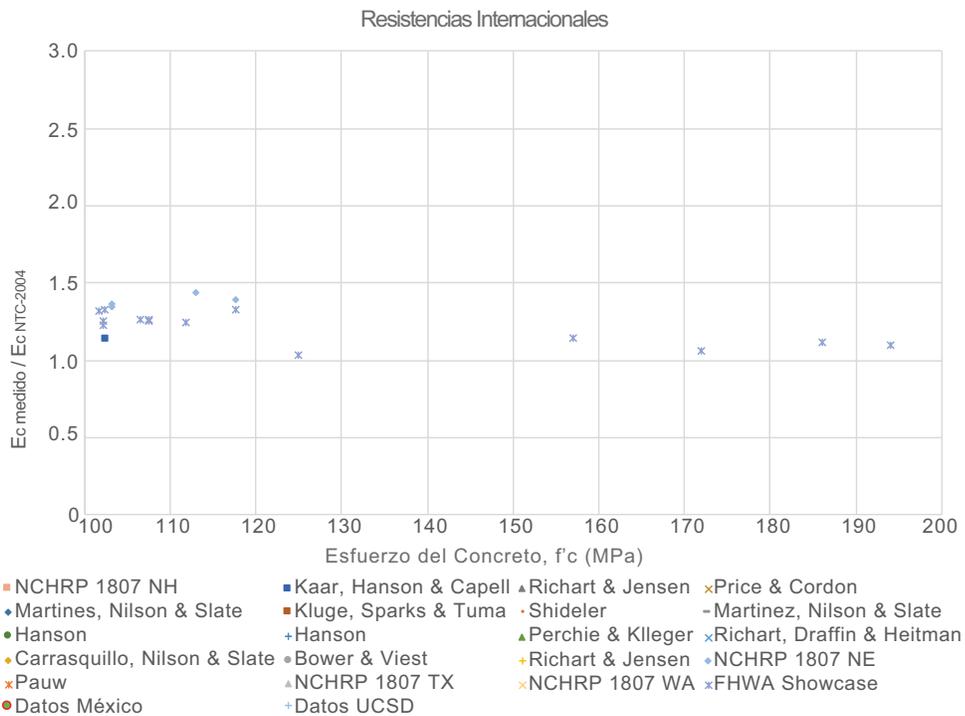


Figura 7.13: Comparación E_c medido vs propuesta NTC 2004 >100 MPa

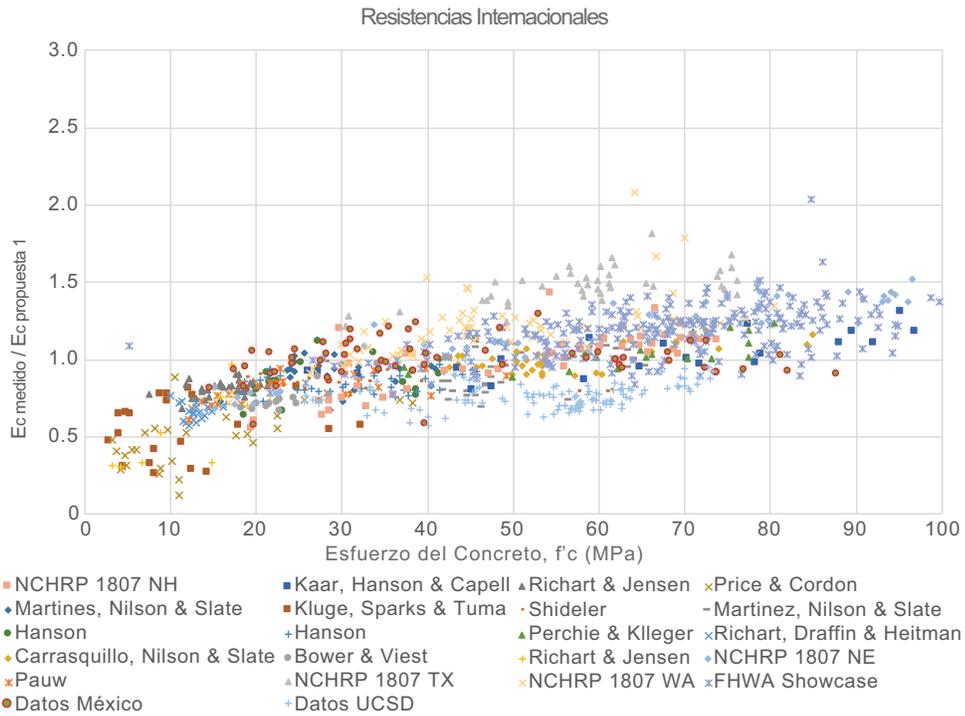


Figura 7.14: Comparación E_c medido vs propuesta 1 <100 MPa

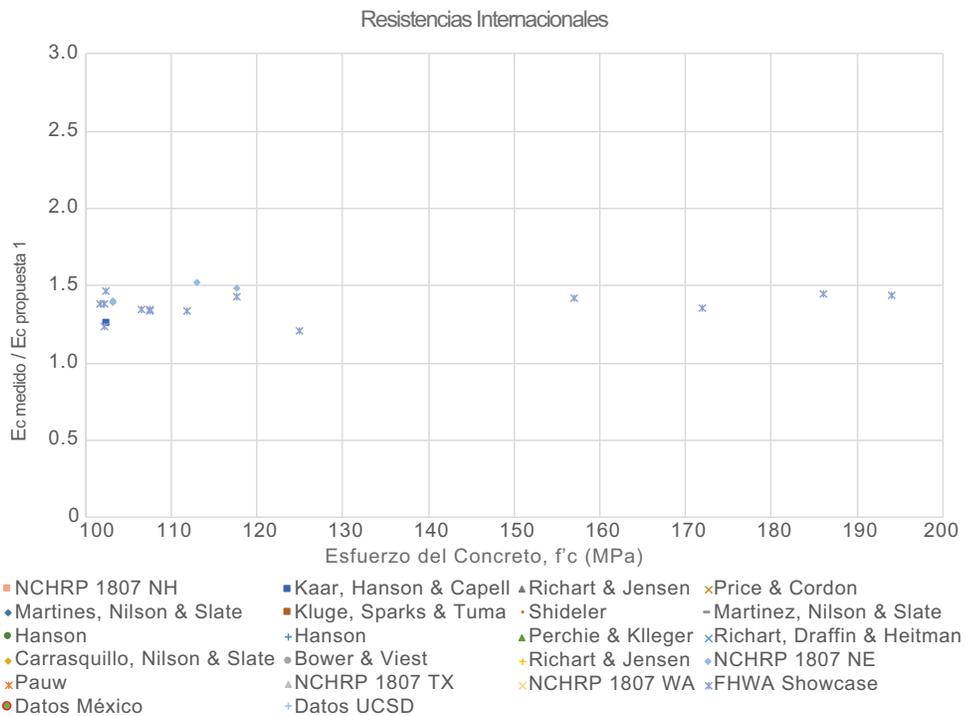


Figura 7.15: Comparación E_c medido vs propuesta 1 >100 MPa

La siguiente tabla (7.1) muestra la distribución de los pesos volumétricos de los concretos mostrados en la fig. 7.5.

Tabla 7.1: Peso Volumétrico de las muestras de concreto utilizadas

Peso Volumétrico	kN/m^3	kg/m^3
Mínimo	20.47	2087
Maximo	24.32	2480
Promedio	23.26	2372
CoV.	3%	3%

Para comparar los resultados con las propuestas, en la figuras anteriores se muestran los resultados de la relación módulo elástico medido entre módulo elástico estimado haciendo posible el comparar los resultados de estimación. Definir una expresión para estimar el módulo elástico de un concreto fabricado en cualquier parte del mundo es complejo, la dispersión en los módulos medidos es significativamente alta y se tiene tendencia de acuerdo con la zona de fabricación ó al tipo de agregado que se utiliza en la fabricación de éstos.

Dentro de las expresiones de reglamentos a comparar se encuentra el AASHTO, el cual adopta la siguiente ecuación:

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad \text{en } kg/m^3 \text{ y } MPa \quad (7.1)$$

Del mismo modo se muestra la comparación con la propuesta del NCHRP 1087, el cual adopta la siguiente expresión:

$$E_c = 0.043 \left(0.140 + \frac{w_c}{1000} \right)^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad \text{en } kg/m^3 \text{ y } MPa \quad (7.2)$$

De las gráficas anteriores los resultados de la FHWA¹⁷ poseen las resistencias mas altas, de aproximadamente 200 MPa, a las cuales la curva (2.7) propuesta por el ACI 363 se ajusta adecuadamente, aún cuando los datos con los que ésta se aproximó solo tuvieron resistencias menores a 83 MPa.

La propuesta obtenida por ésta investigación sub-estima los módulos elásticos medidos en concretos mayores a 100 MPa, sin embargo se

ajusta de manera adecuada para los resultados mexicanos; la fig. 7.5 muestra que la tendencia de los módulos elásticos de otras partes del mundo se incrementa en mayor proporción que los fabricados con agregados mexicanos, a medida que se aumenta f'_c .

Las figs. 7.6 - 7.15 muestran una comparación de los módulos elásticos medidos entre las diferentes aproximaciones establecidas por reglamentos como el AASHTO, ACI 363, ACI 318, NTC 2004 y la propuesta de este estudio. De todos estos análisis la expresión propuesta por el ACI 363 (2.7) tiene un comportamiento mas aceptable en cuanto a ensayos internacionales, sin embargo es preferible el utilizar expresiones que han sido calibradas de acuerdo a muestras obtenidas de la región donde se empleara el concreto.

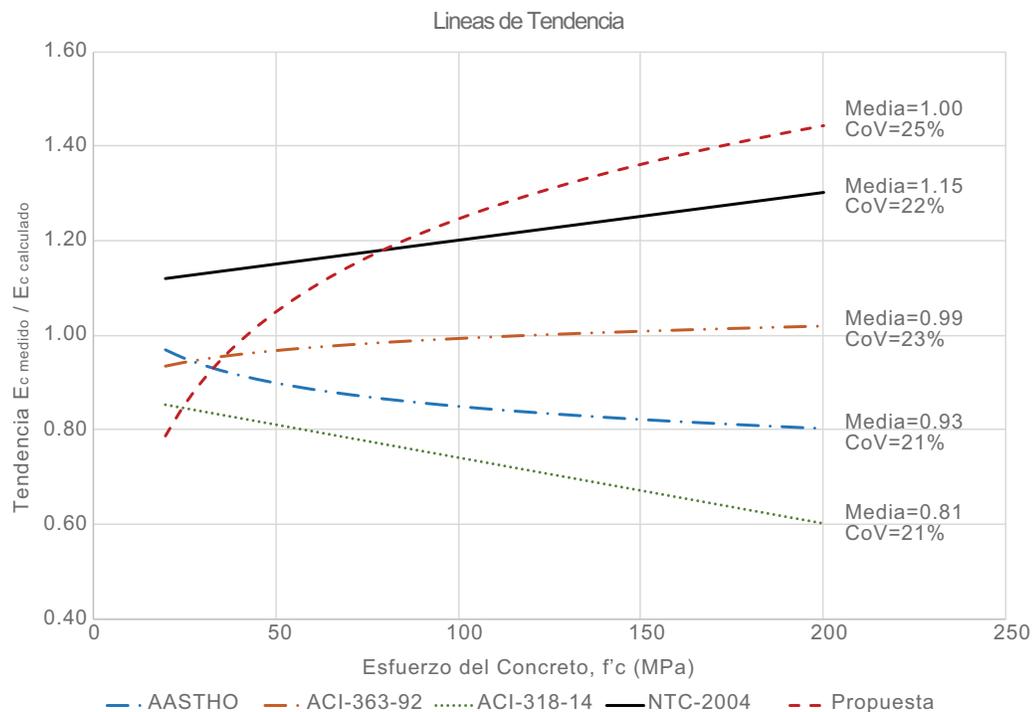


Figura 7.16: Lineas de tendencia y dispersión $E_{cmedido}/E_{ccalculado}$

La fig. 7.16 muestra las tendencias de los datos presentados en las figs. 7.6 - 7.15, e indica la media y coeficiente de variación para cada una de las expresiones propuestas por los diversos reglamentos.

7.2.2. Relación E_c/E_{sec}

En esta sección se mostrará la propuesta de este estudio (ec. 6.2) para predecir la relación E_c/E_{sec} de concretos internacionales encontrados en la literatura. La fig. 7.17 muestra los resultados de los ensayos mexicanos, datos obtenidos de la Universidad de California campus San Diego (UCSD), los realizados por Kaar et. Al. y la FHWA. No fue posible mostrar la misma cantidad de datos que en la sección anterior ya que no todos los estudios poseían los datos suficientes para estimar esta relación.

En la gráfica 7.18 se muestra una comparación entre los resultados medidos con los resultados estimados, obteniendo una media de 1.02 con un coeficiente de variación de 9%. La fig. 7.19 muestra el histograma de esta comparación. De acuerdo con los resultados del estudio estadístico la propuesta se considera aceptable para los concretos internacionales.

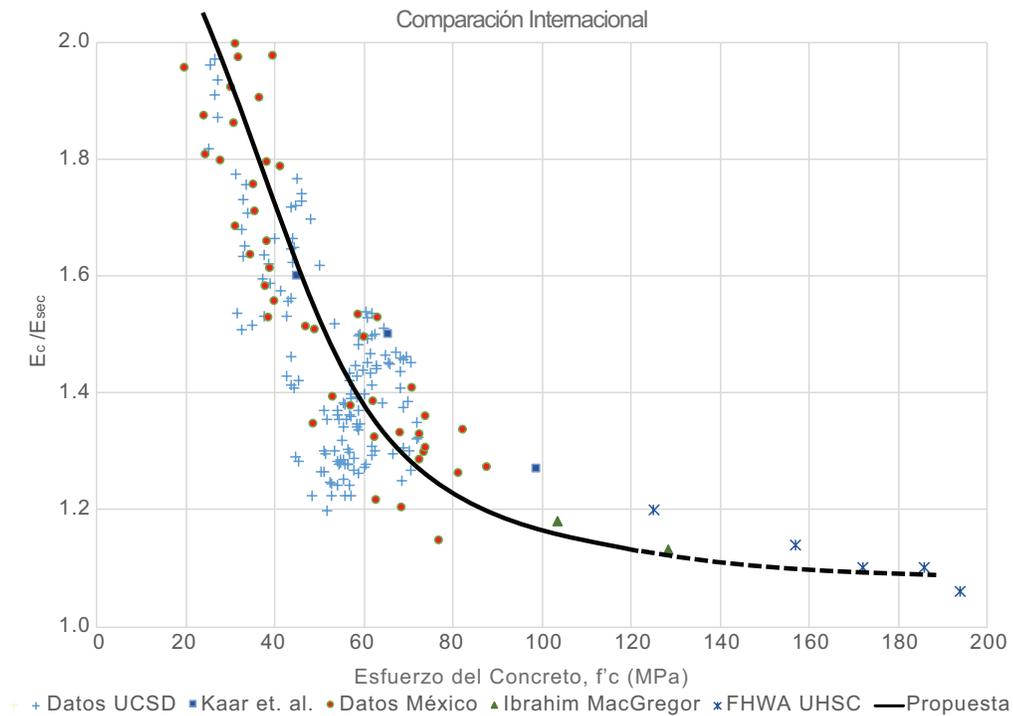


Figura 7.17: Comparación relación E_c/E_{sec}

Como la ecuación propuesta resulta aceptable, la estimación ε'_c será adecuada siempre y cuando se utilice la aproximación correcta para calcular

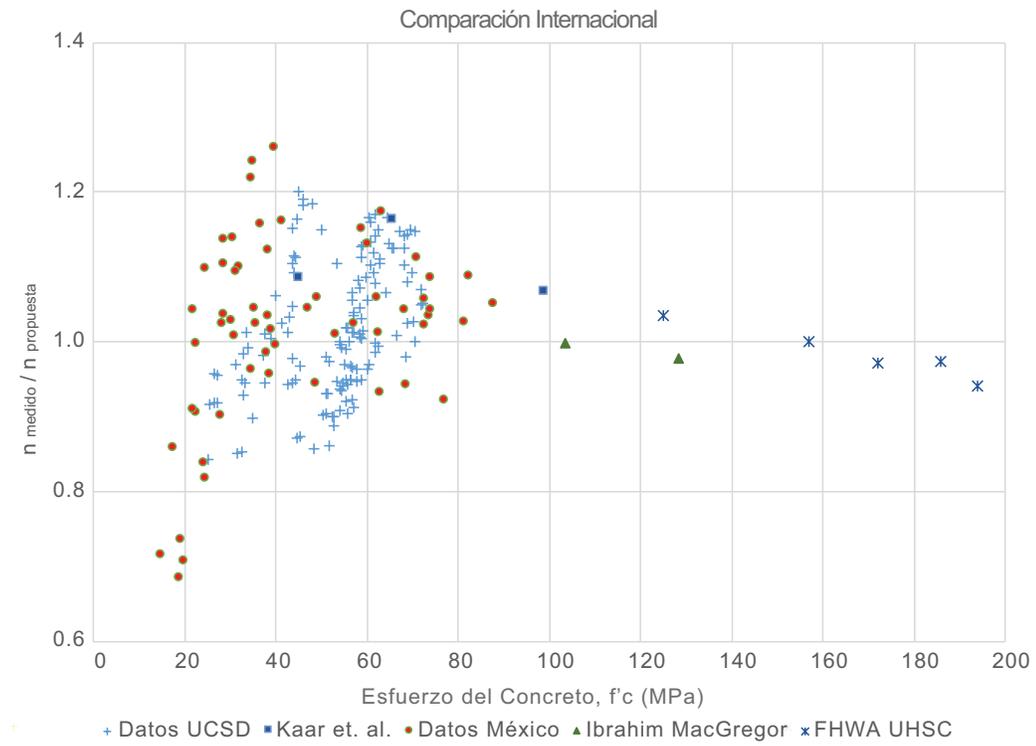


Figura 7.18: Comparación relación E_c/E_{sec} vs Propuesta

el módulo elástico de cualquier región del mundo. Ya que dentro de esta se incluirán las características particulares de los concretos a estudiar.

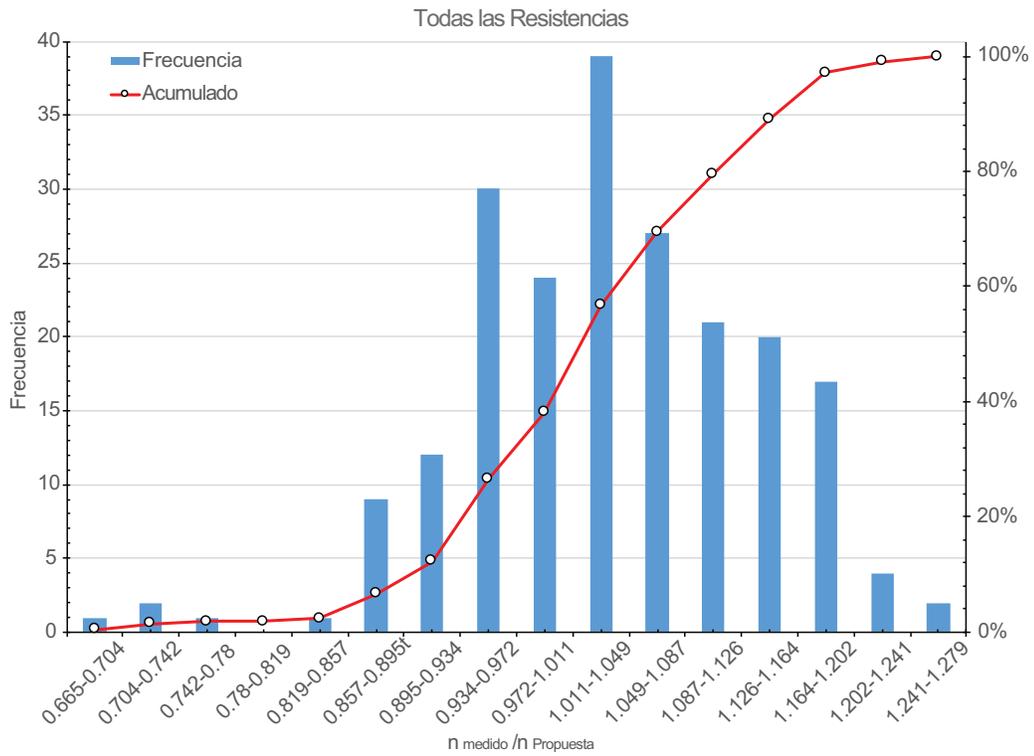


Figura 7.19: Histograma relación E_c/E_{sec} vs Propuesta

Capítulo 8

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, experimentales y analíticos, el comportamiento del módulo elástico de concretos mexicanos es diferente al de los concretos internacionales. Los concretos mexicanos aumentan su módulo elástico en menor proporción que los demás.

La expresión estimada para predecir el módulo de elasticidad tiene un comportamiento aceptable para los concretos fabricados con agregados mexicanos en un intervalo de 20 *MPa*- 100 *MPa*, sin embargo no tiene una buena aproximación para los concretos producidos en exterior del país. Además, el reglamento de construcción del Distrito Federal toma como concretos estructurales a aquellos mayores a 25 *MPa*, pero de acuerdo con los muestreos realizados la utilización de concretos estructurales en el resto del país comienza a partir de 20 *MPa*.

Se observó que cada uno de los concretos en estudio debería de contar con una aproximación para estimar su E_c de acuerdo con las características de los agregados de la región donde fueron fabricados. Expresiones en general para predecir E_c de concretos de cualquier parte del mundo es más complejo. Esto se debe a que los datos que se utilizaron para aproximar la expresión de la AASHTO se ajustan adecuadamente a ella, los datos que se utilizaron para el ACI 318 también se ajustan a ésta y los datos que se utilizaron en esta investigación se ajustan muy bien a la expresión estimada a partir de ellos.

La ecuación propuesta para la relación E_c/E_{sec} tiene una buena aproxi-

mación tanto para concretos mexicanos como para concretos internacionales tanto para concretos de baja resistencia como para las resistencias más altas encontradas en la literatura. La utilización de esta ecuación hace posible estimar ε'_c sin necesidad de una ecuación en particular, es posible deducirla empleando E_{sec} obteniendo una aproximación bastante buena ya que dentro de esto entran las características particulares del concreto en estudio como sus agregados, peso volumétrico del concreto, entre otros parámetros.

La estimación del último parámetro "r" para describir la curva $f_c - \varepsilon_c$ del concreto sin confinar necesita estudios más elaborados, con tecnología de medición en ensayos más avanzada, ya que debido a la tecnología actual no fue posible medir este parámetro en el laboratorio del Instituto de Ingeniería con buena aproximación como para definir una curva que describa su comportamiento. La curva descendente está afectada por el equipo utilizado; la velocidad de carga no se puede controlar en la rama descendente, tendría que controlarse velocidad de deformación.

Referencias

- [1] J. B. Mander, M. J. Priestley, and R. Park. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Fellow, ASCE*, 1988.
- [2] ASTM-469. *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. American Society for Testing Materials, 2002.
- [3] NMX-C-128. *Determinación del Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 1997.
- [4] Teddy J. Hirsch. Modulus of elasticity of concrete affected by elastic modulus of cement paste matrix and aggregate-. *ACI journals*, pages 12–59, September 1962.
- [5] Carlos Javier Mendoza. Propiedades mecánicas de los concretos fabricados en el distrito federal. *Instituto de Ingeniería UNAM*, 1985.
- [6] ACI-363. *Report on High-Strength Concrete*. American Concrete Institute Committee 363, 1992.
- [7] L. Pani B. de Nicolo and E. Pozzo. Strain of concrete at peak compressive stress for a wide range of compressive strengths. *Mater. Struct 27*, pages pp. 206–210, 1994.
- [8] Stephen J. Seguirant and James G. Gallt. Prestress losses in pre-tensioned high-strength concrete bridge girders. *NCHRP-496*, 2003.
- [9] NTC-DF. *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de: Estructuras de Concreto*, volume 1. Gobierno del Distrito Federal, 2004.

- [10] Y Chen, D. J. Visintin, and U. J. Alengaram. Size-dependent stress-strain model for unconfined concrete. *Structural Engineering, ASCE*, 14(5):11, 2013.
- [11] ACI-318. *Building Code Requirement for Reinforced Concrete*. American Concrete Institute Committee, 2014.
- [12] F. D. Lydon and R. V. Balendran. Some observations on elastic properties of plain concrete. *Cement and Concrete Research*, 16(3):314–24, 1986.
- [13] NMX-C-160. *Elaboración y curado de especímenes de concreto*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2004.
- [14] NMX-C-109. *Determinación del cabeceo de especímenes*. Industria de la Construcción-Concreto Hidraulico, 2010.
- [15] Adrian Pauw. Static modulus of elasticity of concrete as affected by density. *ACI Structural Journal*, 57(32), June 1961.
- [16] Floyd O. Slate Ramon L. Carrasquillo, Arthur H. Nilson. Properties of high strength concrete subject to short-term loads. *ACI journals*, 78(14), May-June 1981.
- [17] Federal Highway Administration. Compilation and evaluation of results from high-performance concrete bridges projects. *FHWA*, 1, 2006.
- [18] S. Seguirant Al-Omaishi M. K. Tadros and J. Gallt. *Prestress losses in pretensioned high-strength concrete bridge girders.*, volume Report. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, Dc: Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 2003.
- [19] J. J. Shideler. Lightweight-aggregate concrete for structural use. *Journal of the American Concrete Institute*, V. 29(4):299–328, October 1957.

- [20] Miguel A. Torres Matos, Mario E. Rodriguez, José I. Restrepo, and Emilio Vázquez Díaz. Resistencia a la flexión y capacidad de deformación de columnas para puentes de concreto presforzado en zonas sísmicas. *XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Noviembre 2013.
- [21] José I. Restrepo and Mario E. Rodriguez. On the probable moment strength of reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*, July-August 2013.
- [22] Aydemir Cem and Zorbozan Musfata. Uncertainty analysis of flexural overstrength ratio for rc columns. *Journal of structural engineering, ASCE*, 138:1042–1053, August 2012.
- [23] J. Guadalupe Sanchez Acuña and Manuel Mena Ferrer. Módulo de el elasticidad del concreto con agregados andesíticos del d.f. *Revista IMCYC*, 25(192):9, Mayo 1987.
- [24] Ravi K. Devalapura and Maher K. Tadros. Stress-strain modeling of 270 ksi low-relaxation prestressing strands. *PCI journal*, 1992.