

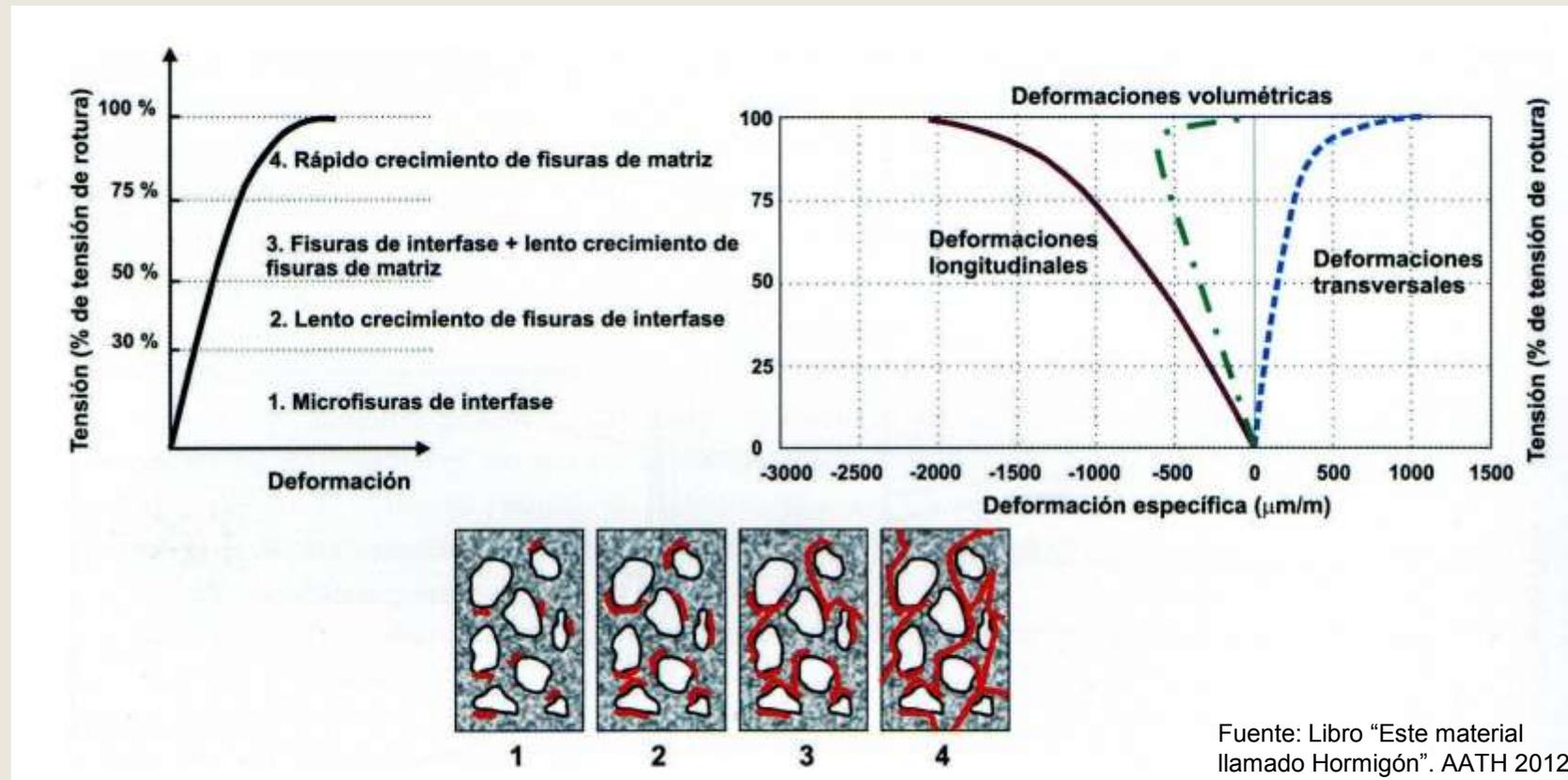
MÓDULO DE DEFORMACIÓN DEL HORMIGÓN

Estudios experimentales y situación
normativa en Uruguay

Dr. Ing. María Noel Pereyra
Departamento de Construcción
IET – Facultad de Ingeniería - UdelaR

Definición

Módulo de deformación (E): relación entre la tensión y la deformación longitudinal unitaria en el rango elástico de la curva tensión-deformación del hormigón.



Definición

Materiales elásticos: $\sigma - \Delta L/L$ es una recta → $E =$ pendiente de la recta

Hormigón: $\sigma - \Delta L/L$ es una curva → $\nexists E$ como pendiente de la recta, se determina convencionalmente



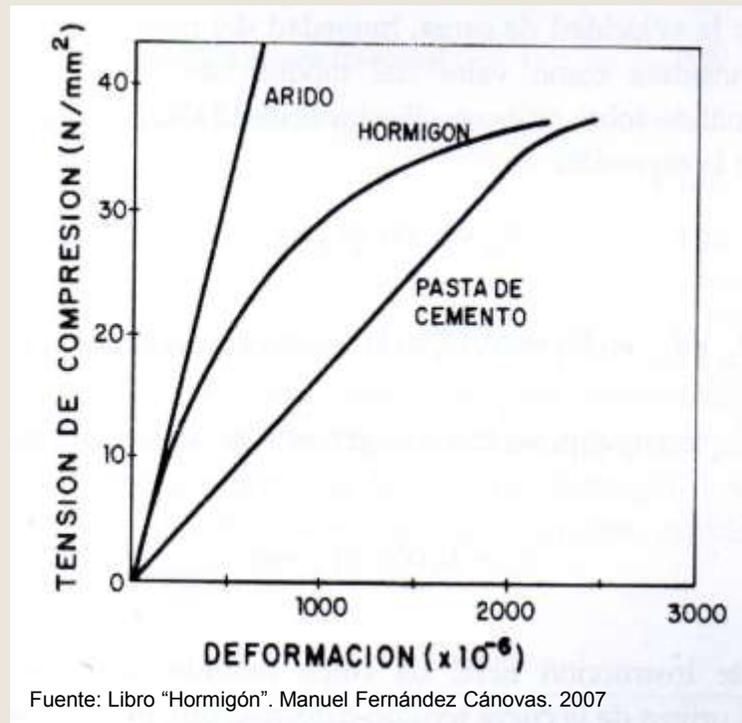
Las normas definen el módulo tangente inicial (dinámico) y el módulo secante, a partir de la pendiente de la cuerda, que abarca un tramo inicial de esfuerzos. (Si el hormigón trabaja dentro de este intervalo se supone elástico)

Factores que afectan al módulo de deformación

- Composición del hormigón
- Tipo de agregados utilizados
- Velocidad de aplicación de la carga
- Edad del hormigón
- Condición de humedad de la probeta
- Longitud de medida de la deformación
- Tamaño del ejemplar de ensayo

Factores que afectan al módulo de deformación

- Composición del hormigón:
 - *Proporciones relativas de sus componentes*

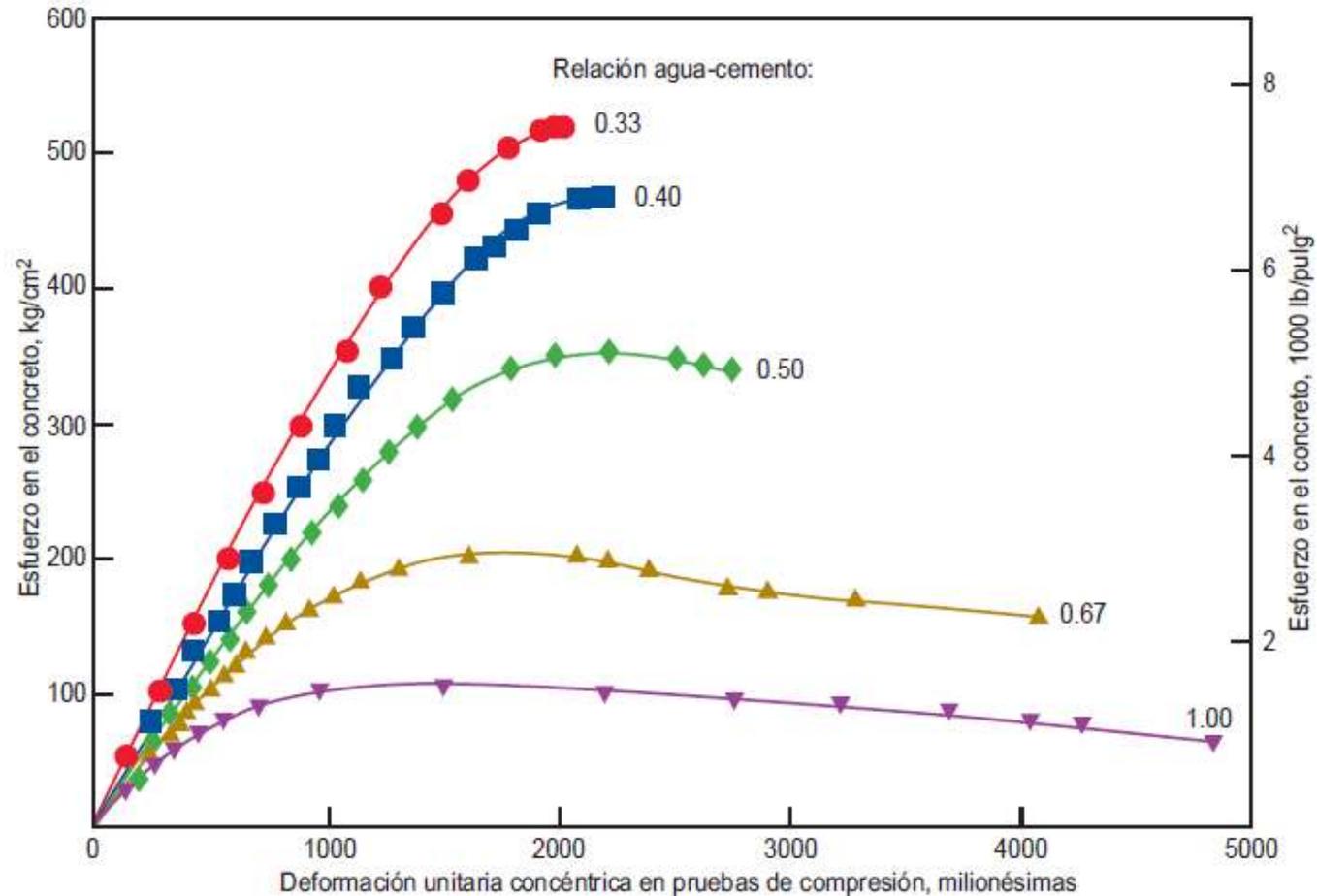


Para igual resistencia a la compresión:

$$E_{H^o} = f(E_m, E_g, V_m)$$

Factores que afectan al módulo de deformación

- Comp
- P_c
- R_c



Fuente: Boletín de ingeniería EB201. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. 2004

Factores que afectan al módulo de deformación

- Composición del hormigón: proporciones relativas de sus componentes
- Tipo de agregados utilizados
 - *Módulo de elasticidad del agregado*

Tipo de roca	Módulo de elasticidad (Gpa)
Granitos	61
Areniscas	31
Calizas	28
Diabasas	86
Gabro	86

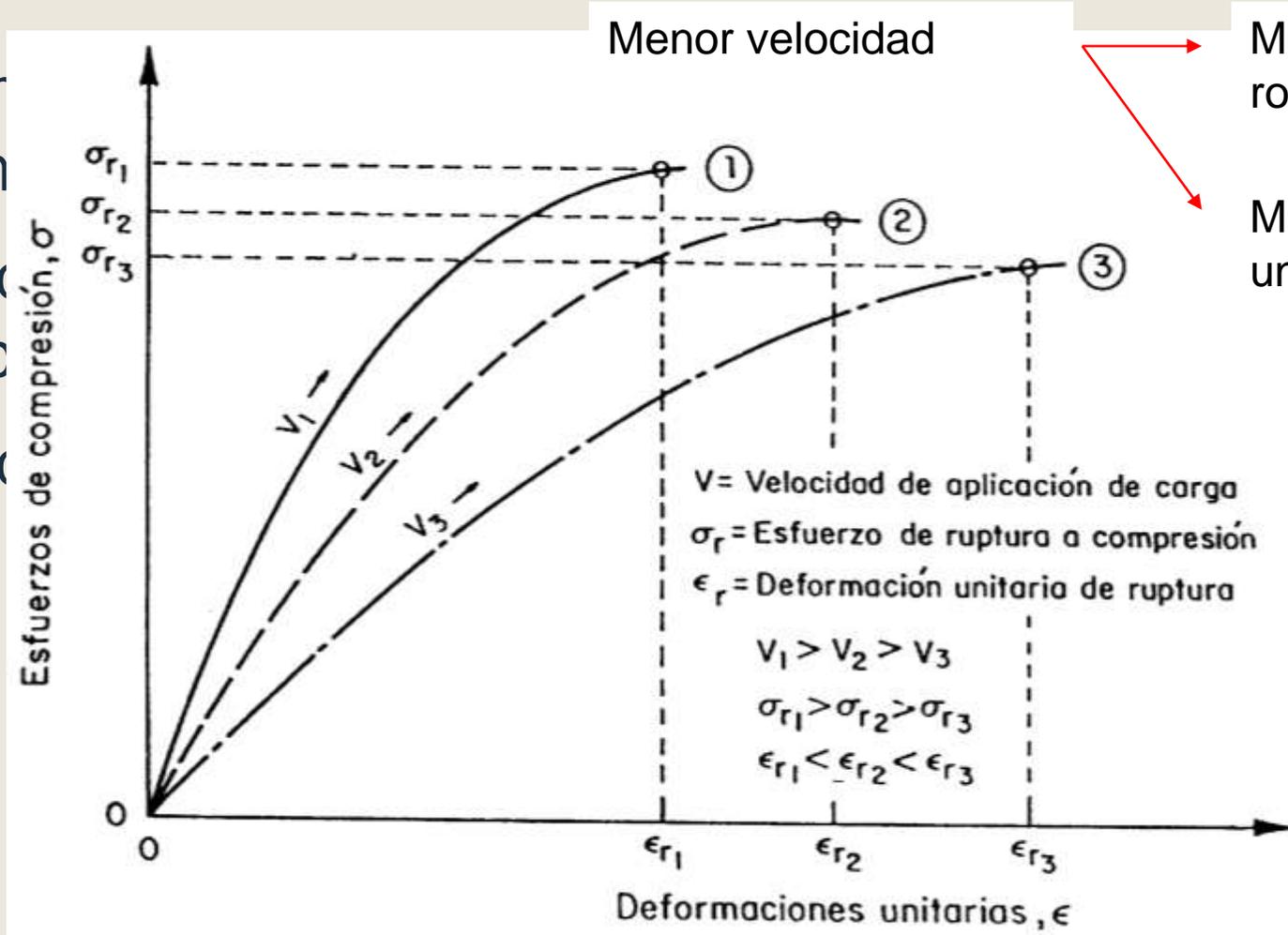
Fuente: Libro "Este material llamado Hormigón". 2012

Factores que afectan al módulo de deformación

- Composición del hormigón: proporciones relativas de sus componentes
- Tipo de agregados utilizados
 - *Módulo de elasticidad del agregado*
 - *Forma del agregado y su característica superficial*

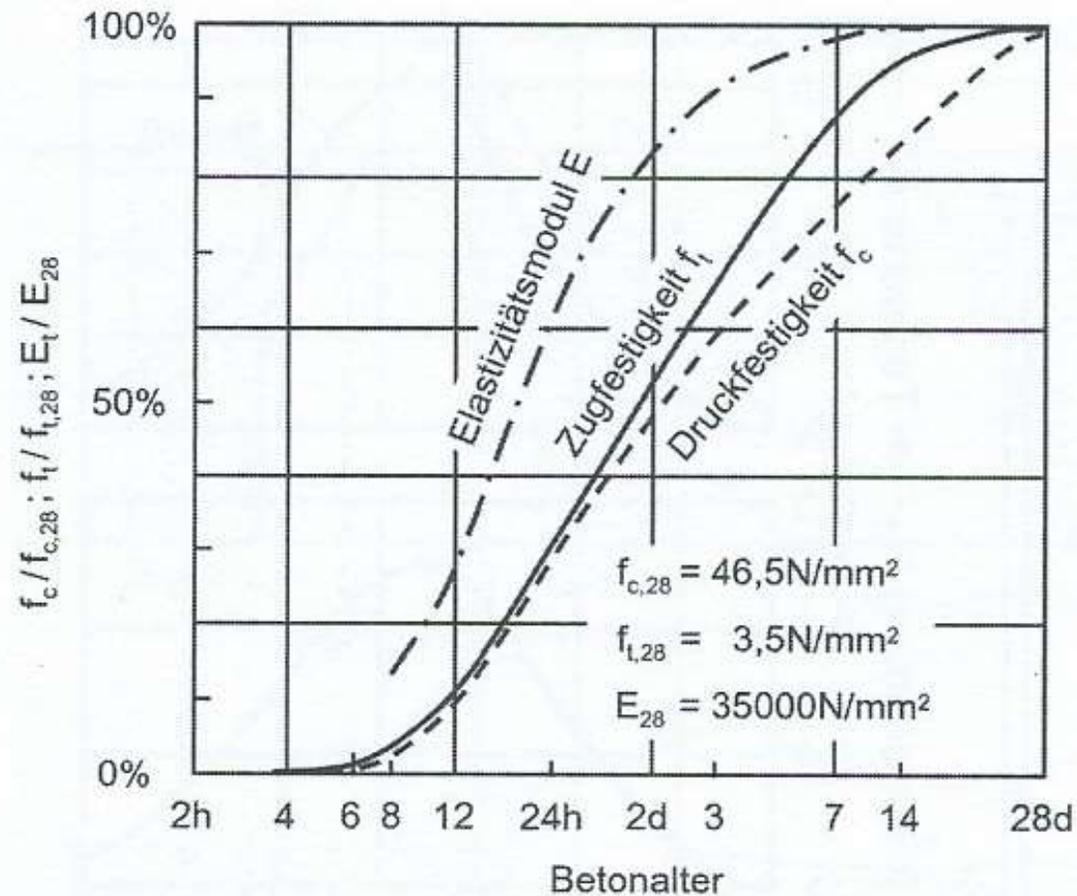
Factores que afectan al módulo de deformación

- Cor
- con
- Tipo
- sup
- Vel



Factores que afectan al módulo de deformación

- Composición
- Tipo de agregado (y tipo de superficie)
- Velocidad de hidratación
- Edad del hormigón



textura

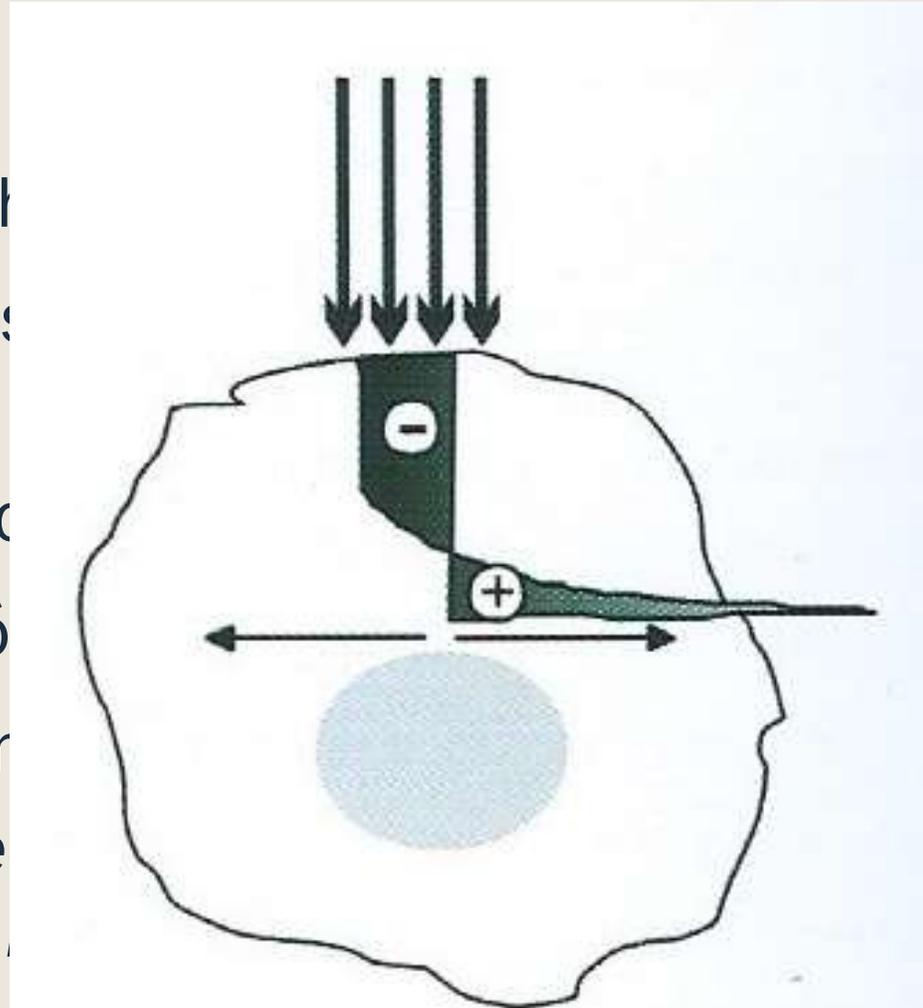
Crecimiento del módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y a la tracción en porcentaje respecto de los 28 días de edad

Factores que afectan al módulo de

- Composición del hormigón
- Tipo de agregados (tamaño y textura superficial)
- Velocidad de aplicación de la carga
- Edad del hormigón
- Condición de humedad

La humedad afecta la resistencia a la compresión y al módulo de elasticidad.

- *La resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad disminuyen al aumentar la humedad y*



Esfuerzos de tracción en un material poroso sometido a cargas de compresión

Fuente: Libro "Este material llamado Hormigón". 2012

a y textura

a resistencia a la

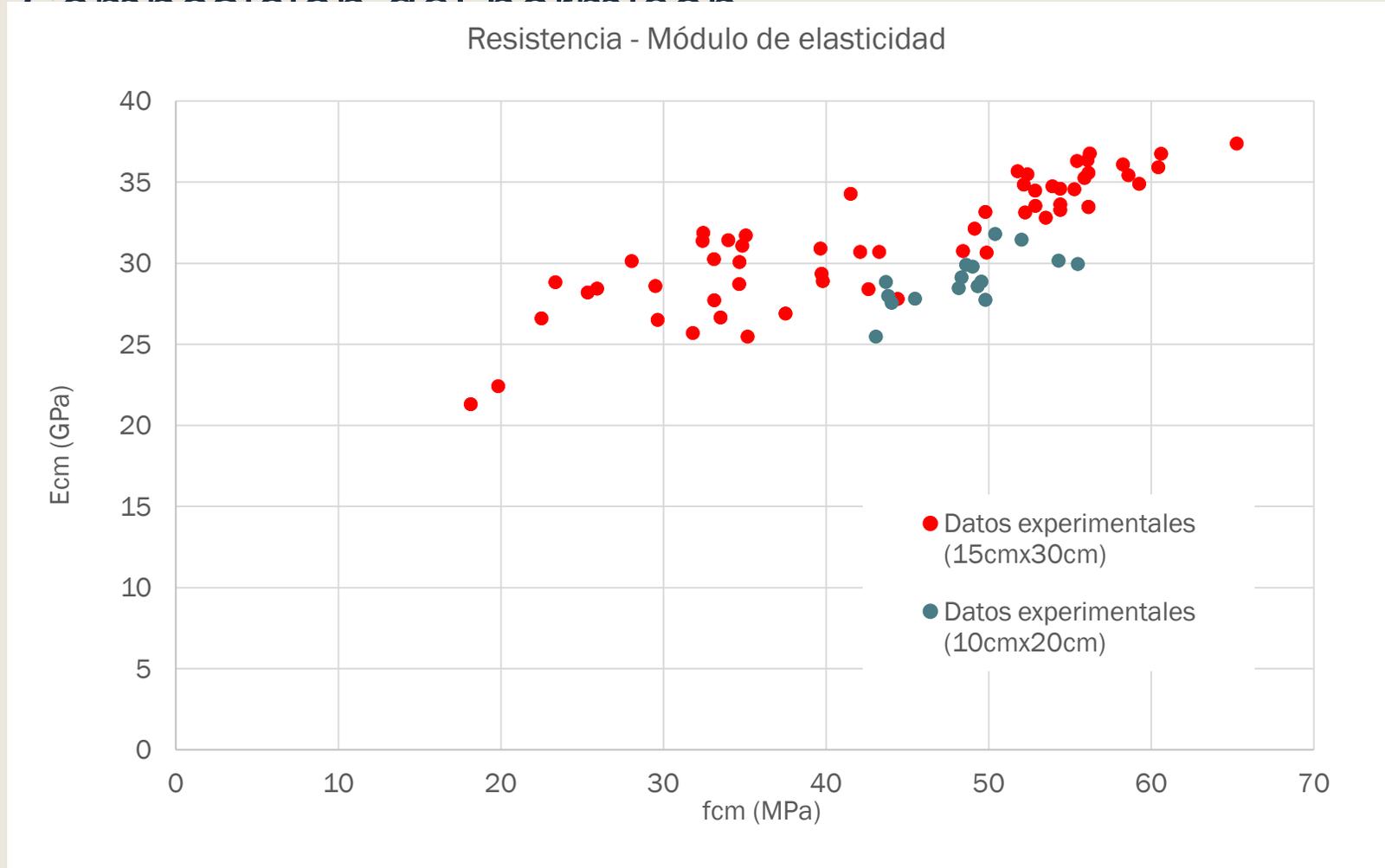
umenta la humedad y

Factores que afectan al módulo de deformación

- Composición del hormigón
- Tipo de agregados utilizados (mineralogía, forma y textura superficial)
- Velocidad de aplicación de la carga
- Edad del hormigón
- Condición de humedad de la probeta
- Longitud de medida de la deformación
 - *Deberá ser mayor a 3 veces el tamaño máximo del agregado*
 - *Centrado en la probeta, preferentemente de una longitud de medida igual a la mitad de la probeta.*

Factores que afectan al módulo de deformación

Composición del hormigón



textura

Estimación teórica del módulo de deformación

Fórmulas teóricas propuestas por normativas de referencia en el medio

UNIT 1050

$$E = 19000 * \sqrt{f_c}$$

Con f_c resistencia característica, considerando:

Condiciones previstas para la ejecución de la obra	Valor aproximado de la resistencia media f_{cm} necesaria en laboratorio (daN/cm ²)
Medias	$f_{cm} = 1,50f_{ck} + 20$
Buenas	$f_{cm} = 1,35f_{ck} + 15$
Muy buenas	$f_{cm} = 1,20f_{ck} + 10$

Estimación teórica del módulo de deformación

Fórmulas teóricas propuestas por normativas de referencia en el medio

ACI 318-11

$E = 4700 * \sqrt{f_c}$ para hormigones de densidad normal (entre 2000 y 2800kg/m³)

$E = w_c^{1,5} 0,043 * \sqrt{f_c}$ para hormigones con una densidad comprendida entre 1440 y 2550 kg/m³

Con f_c resistencia característica, considerando:

Resistencia especificada (MPa)	Resistencia media requerida (MPa)
$f_{ck} < 21$	$f_{cm} = f_{ck} + 7$
$21 \leq f_{ck} \leq 35$	$f_{cm} = f_{ck} + 8,3$
$f_{ck} > 35$	$f_{cm} = 1,10f_{ck} + 5$

Estimación teórica del módulo de deformación

Fórmulas teóricas propuestas por normativas de referencia en el medio

EHE/08

$$E = 8500 * \sqrt[3]{f_{cm}}$$

Con f_{cm} resistencia media, si la fabricación son buenas, se puede usar:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2$$

Se introduce un coeficiente de corrección de la naturaleza del árido:

ÁRIDO		VALOR DE α
CUARCITA		1,0
ARENISCA		0,7
CALIZA	NORMAL	0,9
	DENSA	1,2
OFITA, BASALTO, Y OTRAS ROCAS VOLCÁNICAS ⁽¹⁾	POROSO	0,9
	NORMAL	1,2
GRANITO Y OTRAS ROCAS PLUTÓNICAS ⁽²⁾		1,1
DIABASAS		1,3

Estimación teórica del módulo de deformación

Fórmulas teóricas propuestas por normativas de referencia en el medio

Eurocódigo EN 1992

$$E = 22 * \frac{f_{cm}^{0,3}}{10}$$

Con f_{cm} resistencia media, si no se conoce, se puede estimar como:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2.$$

Esta expresión es válida para hormigones con agregados cuarcíticos. Para agregados de piedra caliza y arenizca, debería reducirse en un 10 y un 30% respectivamente, mientras que para basaltos se debería aumentar en un 30%

Estimación teórica del módulo de deformación

Fórmulas teóricas propuestas por normativas de referencia en el medio

Código Modelo 2010

$$E = 21500 * \alpha_E * \frac{f_{cm}^{1/3}}{10}$$

$$E_c = \alpha_i * E \text{ con } \alpha_i = 0,8 + 0,2 * \frac{f_{cm}}{88}$$

Con f_{cm} resistencia media, si no se conoce, se puede estimar como:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2.$$

α_E = factor de corrección por

Table 5.1-6: Effect of type of aggregates on modulus of elasticity

Types of aggregate	α_E	$E_{c0} * \alpha_E$ [MPa]
Basalt, dense limestone aggregates	1.2	25800
Quartzite aggregates	1.0	21500
Limestone aggregates	0.9	19400
Sandstone aggregates	0.7	15100

Ensayo para la determinación del módulo de deformación

Sistema de medida de las deformaciones

- Se deben medir deformaciones en al menos dos generatrices de la probeta, en forma independiente (compresímetros independientes, o strain gages) o utilizando un sistema de anillos rígidos vinculados mediante un sistema pivotante, con un único compresímetro.

Ensayo para la determinación del módulo de deformación

Sistema de

rmaciones

Compresímetros individuales electrónicos



Sistema de anillos rígidos con un único compresímetro mecánico

Strain gages

Ensayo para la determinación del módulo de deformación

Preparación de las probetas

- Encabezado habitual en nuestro medio actualmente: neoprenos
- El tipo de rotura de la probeta con encabezado de neopreno difiere de la rotura de la probeta con encabezado rígido, como negro de humo (en desuso) o pulido de caras de compresión.

Ensayo para la determinación del módulo de deformación

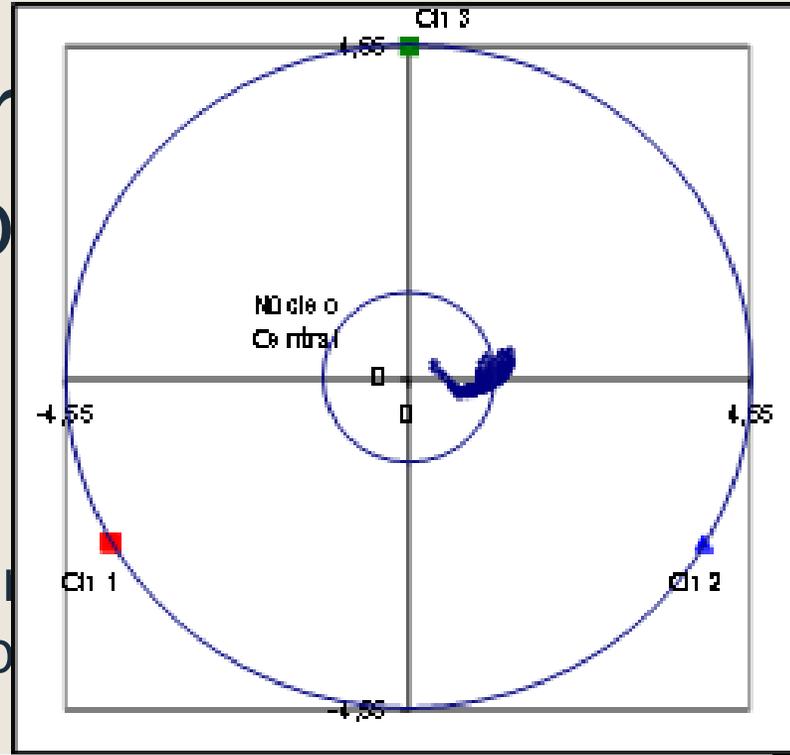
Preparación de las probetas

- Encabezado habitual en nuestro medio actualmente: neoprenos
- El tipo de rotura de la probeta con encabezado de neopreno difiere de la rotura de la probeta con encabezado rígido, como negro de humo (en desuso) o pulido de caras de compresión.
- Mediante el pulido de las caras se obtienen las condiciones normativas exigidas para el ensayo, tanto de planeidad como de paralelismo de las caras de compresión y su perpendicularidad al eje de la probeta.

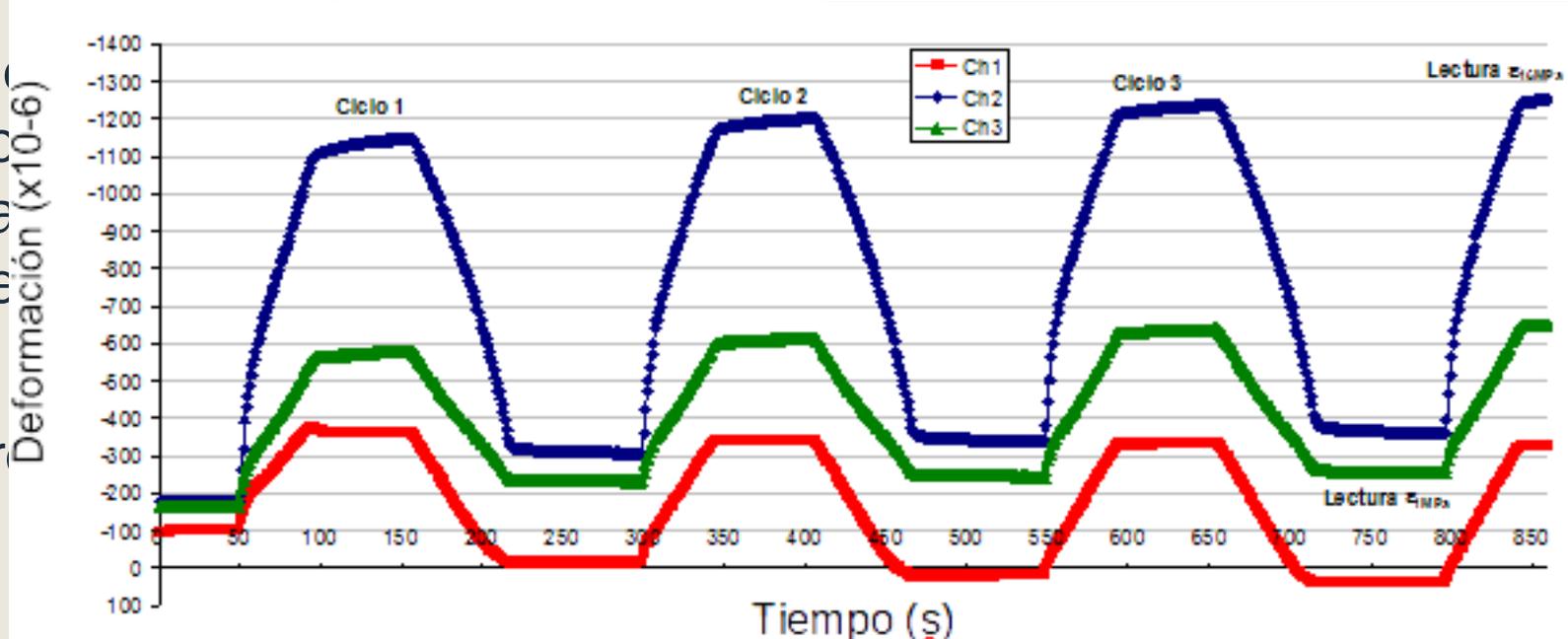
Enc

Prepar

- Enc
- El ti
- la ro
- (en



- Me
- nc
- pa
- de
- Si
- pr



ulo

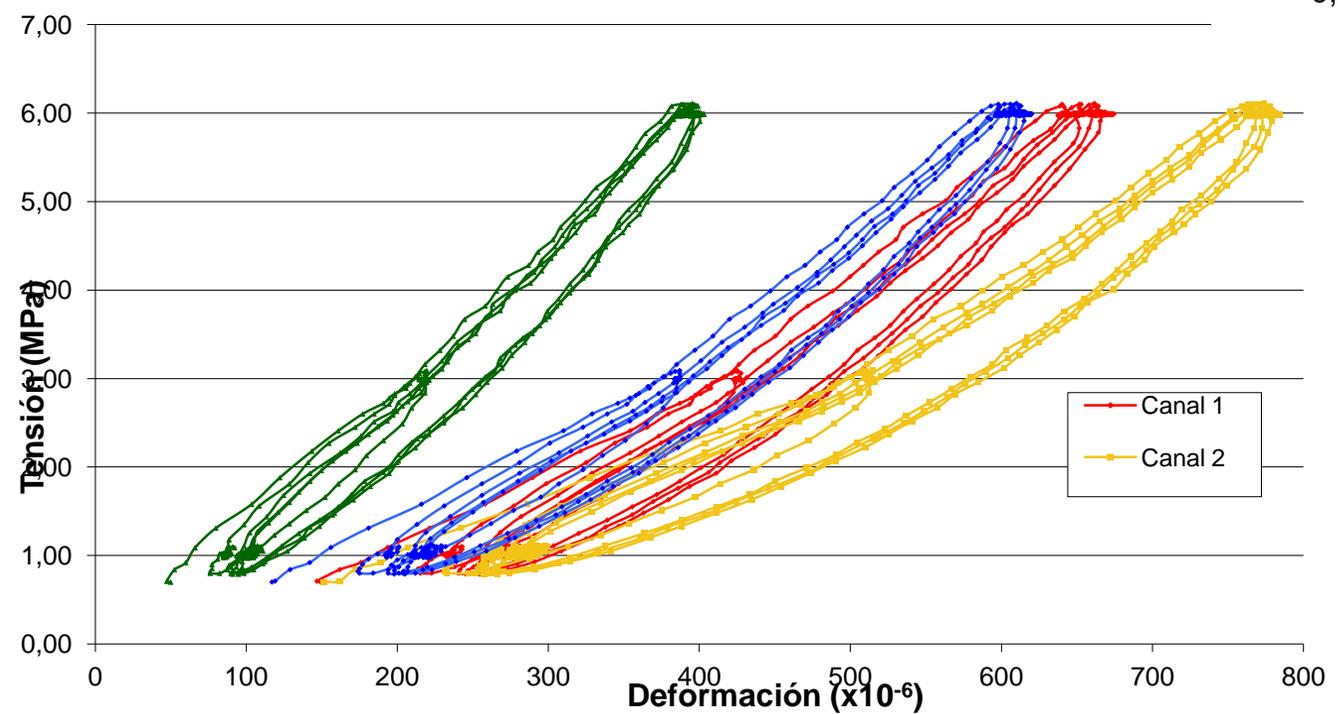
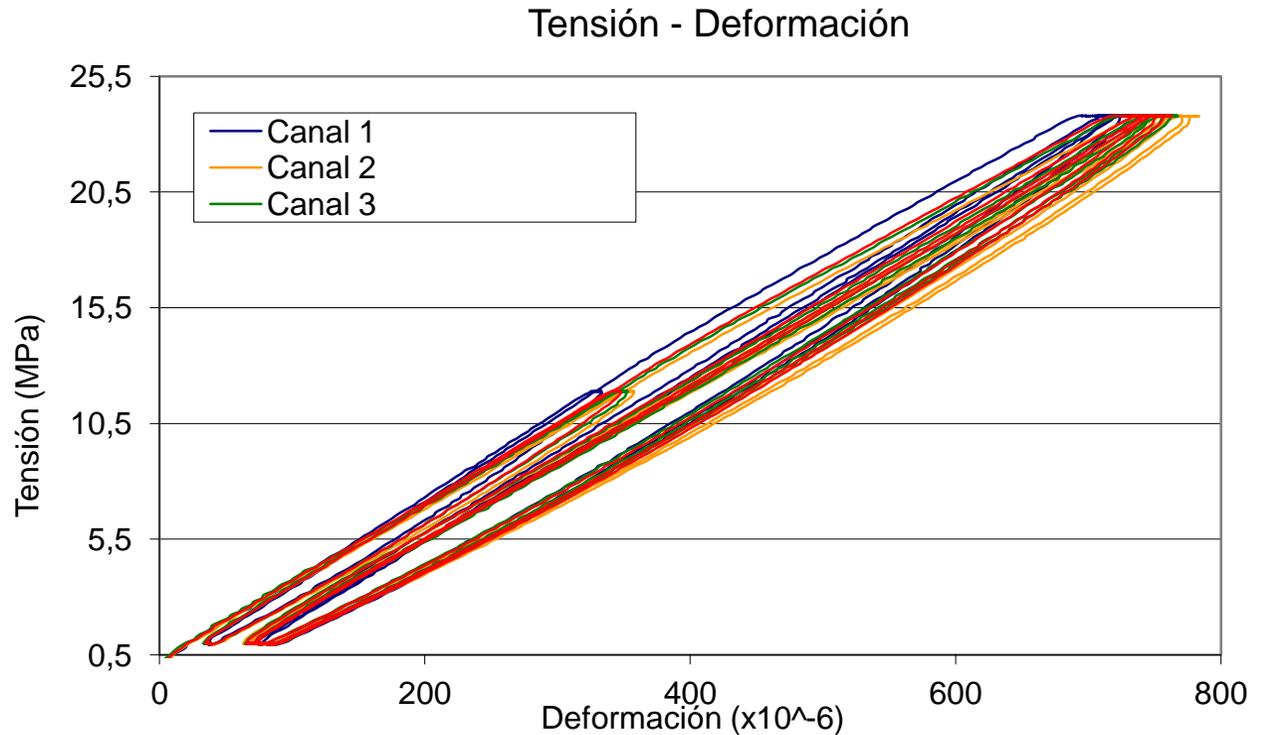
OS
fiere de
humo

de
ad al eje
de la

Ensayo para la detección de defectos

Preparación de las probetas

- Encabezado habitual en nuestros ensayos
- El tipo de rotura de la probeta con el tipo de defecto
- la rotura de la probeta con el tipo de defecto



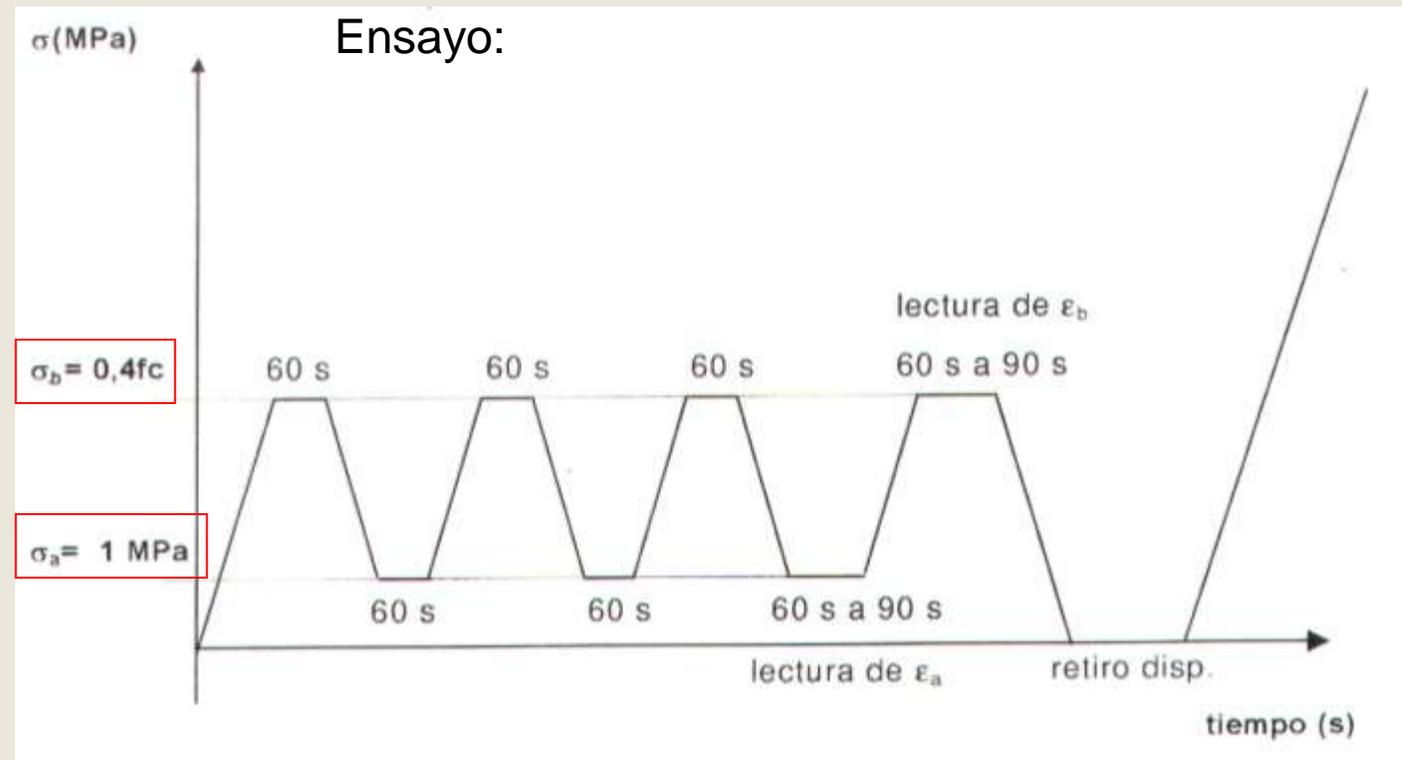
obtienen las condiciones
tanto de planeidad como de
orientación y su perpendicularidad al eje

son y perpendiculares al eje de la
correctamente.

Ensayo para la determinación del módulo de deformación

Método de ensayo UNIT 1088:2004

Módulo de deformación secante (E_c):



Ensayo para la determinación del módulo de deformación

Resultado de ensayo UNIT 1088:2004

$$E = \frac{\sigma_{40\%} - 1MPa}{\varepsilon_{40\%} - \varepsilon_{1MPa}}$$

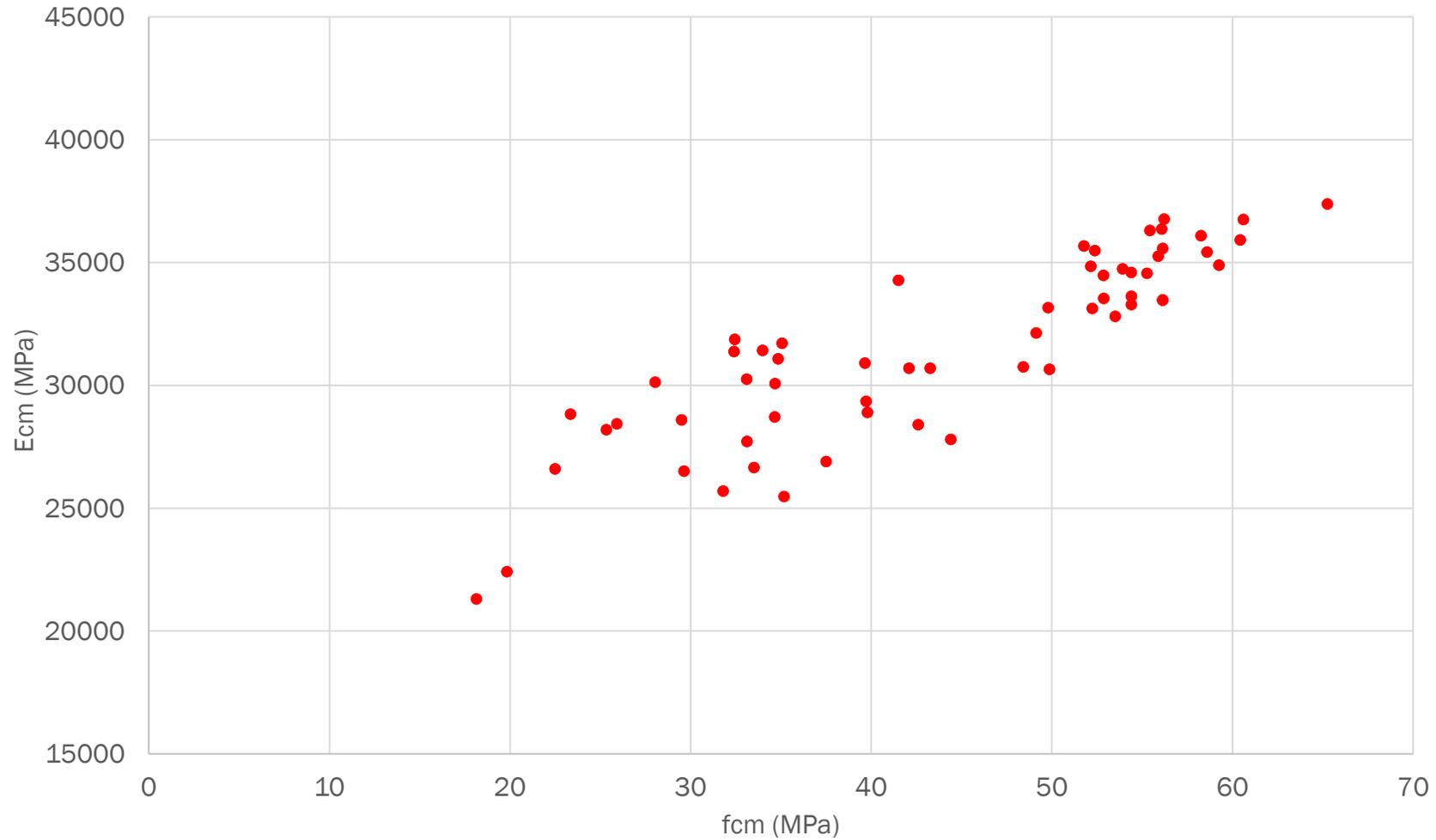
Se deberá informar: Identificación del ejemplar, dimensiones, curado, edad de ensayo, módulo de elasticidad y resistencia, densidad y curva tensión deformación si se determinan.

Resultados experimentales

Algunos aspectos a tener en cuenta para el análisis de los resultados experimentales:

- Los ensayos se realizaron a los 28 días de edad, siguiendo la norma UNIT 1088:2004, en distintas condiciones de humedad.
- En todos los casos las probetas fueron preparadas mediante el pulido de sus caras para el ensayo.
- Se tomaron medidas de deformaciones en 3 generatrices de la probeta utilizando compresímetros electrónicos directamente conectados al sistema de adquisición de datos de la prensa.
- Se trata de resultados de ensayos de control realizados para distintas obras del medio, por lo que se desconoce en la mayoría de los casos la dosificación utilizada.
- No se tiene registro del tipo de agregado utilizado, salvo en algunos casos, por lo que no se tiene en cuenta para el análisis.

Resistencia - Módulo de elasticidad



• Datos experimentales (15cmx30cm)

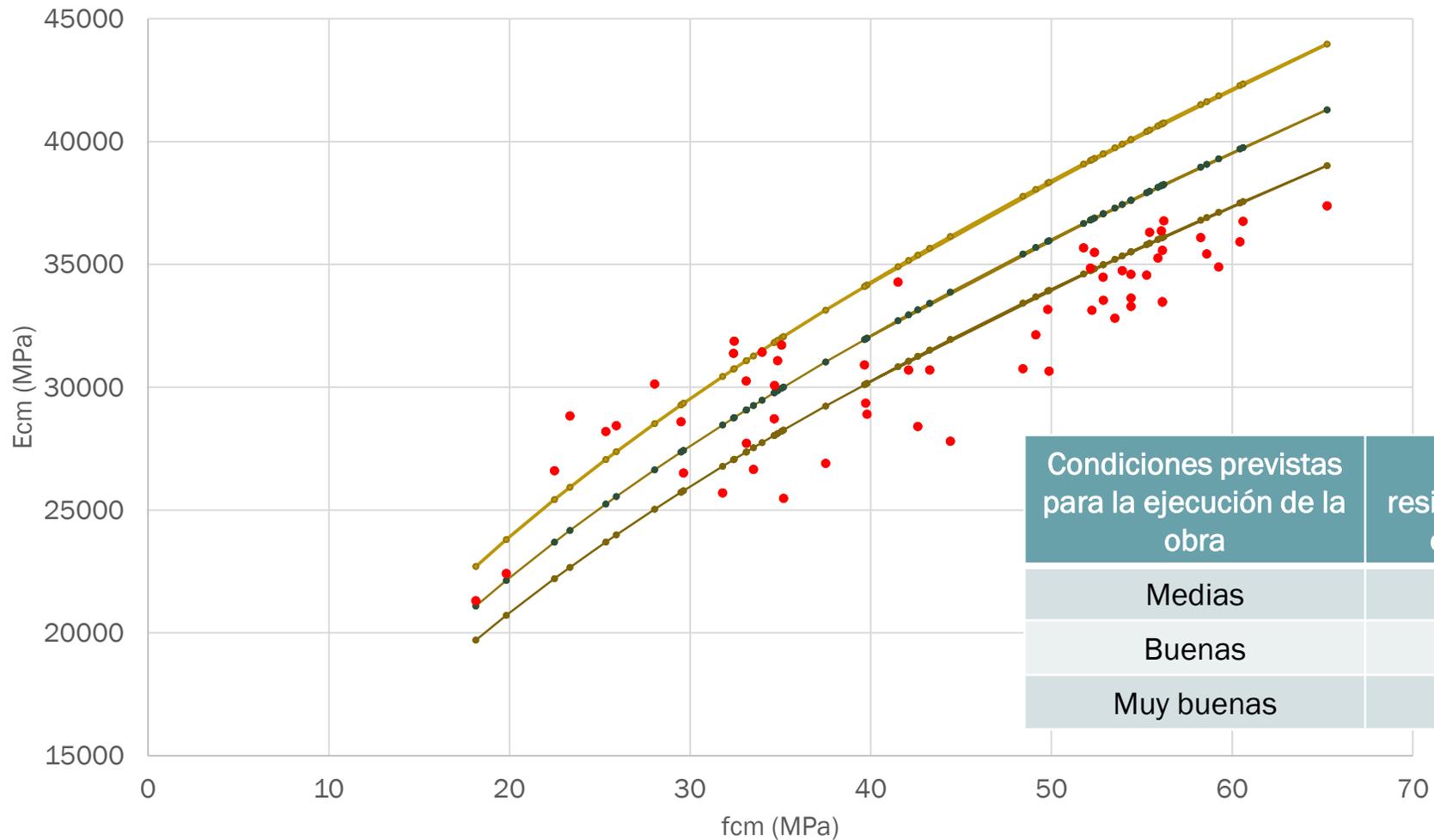
Resultados experimentales

Resultados experimentales vs. Resultados teóricos estimados a partir de fórmulas.

Se determina el valor de módulo teórico a partir de las resistencias determinadas experimentalmente.

En los casos que las normas utilicen resistencia característica para la determinación del módulo, se utiliza el criterio de la propia norma para su determinación, a partir del valor de resistencia obtenido experimentalmente.

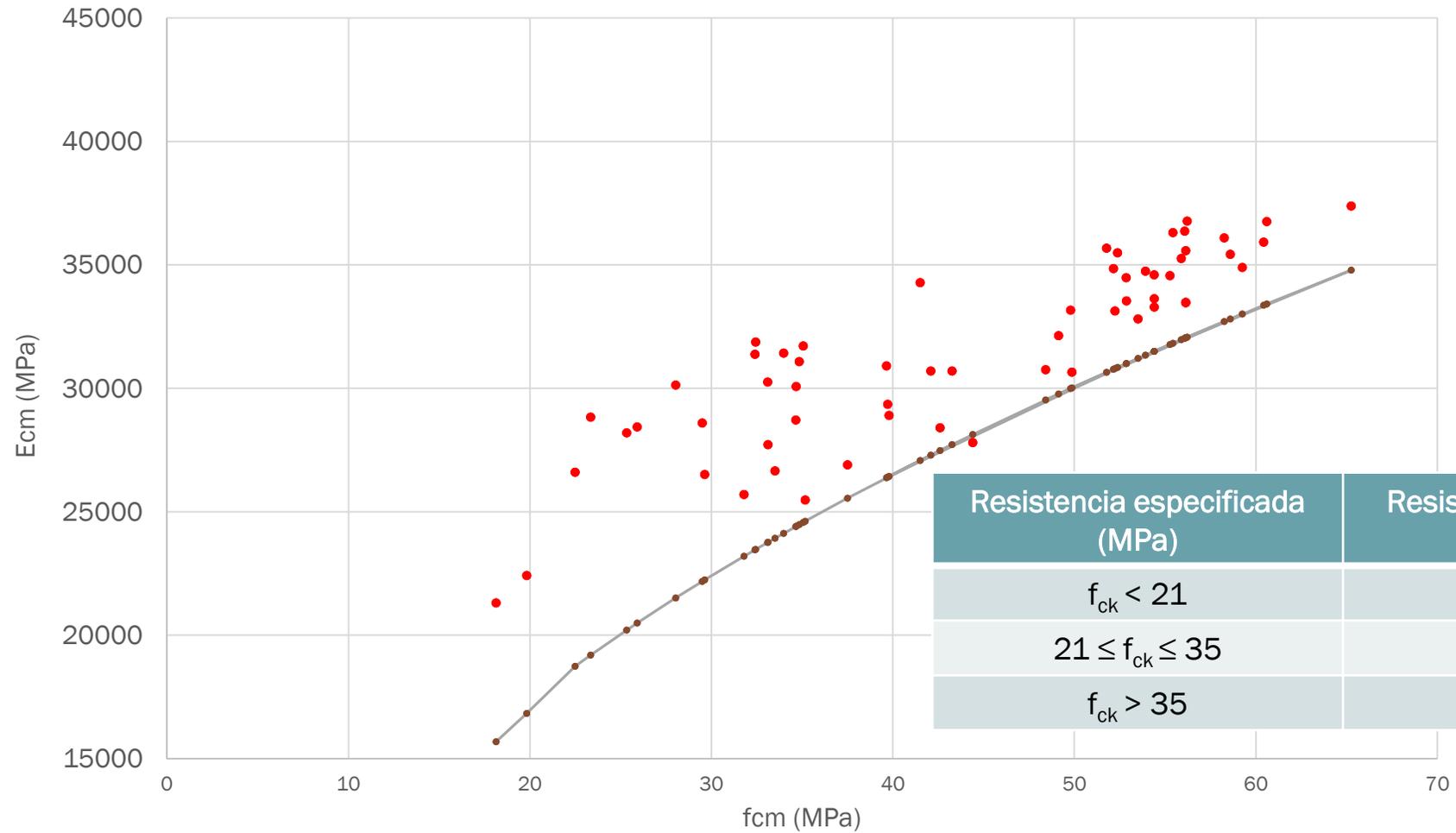
Resistencia - Módulo de elasticidad



Condiciones previstas para la ejecución de la obra	Valor aproximado de la resistencia media f_{cm} necesaria en laboratorio (daN/cm ²)
Medias	$f_{cm} = 1,50f_{ck} + 20$
Buenas	$f_{cm} = 1,35f_{ck} + 15$
Muy buenas	$f_{cm} = 1,20f_{ck} + 10$

- Datos experimentales (15cmx30cm)
- UNIT 1050 Condiciones buenas
- UNIT 1050 Condiciones medias
- UNIT 1050 Condiciones muy buenas

Resistencia - Módulo de elasticidad

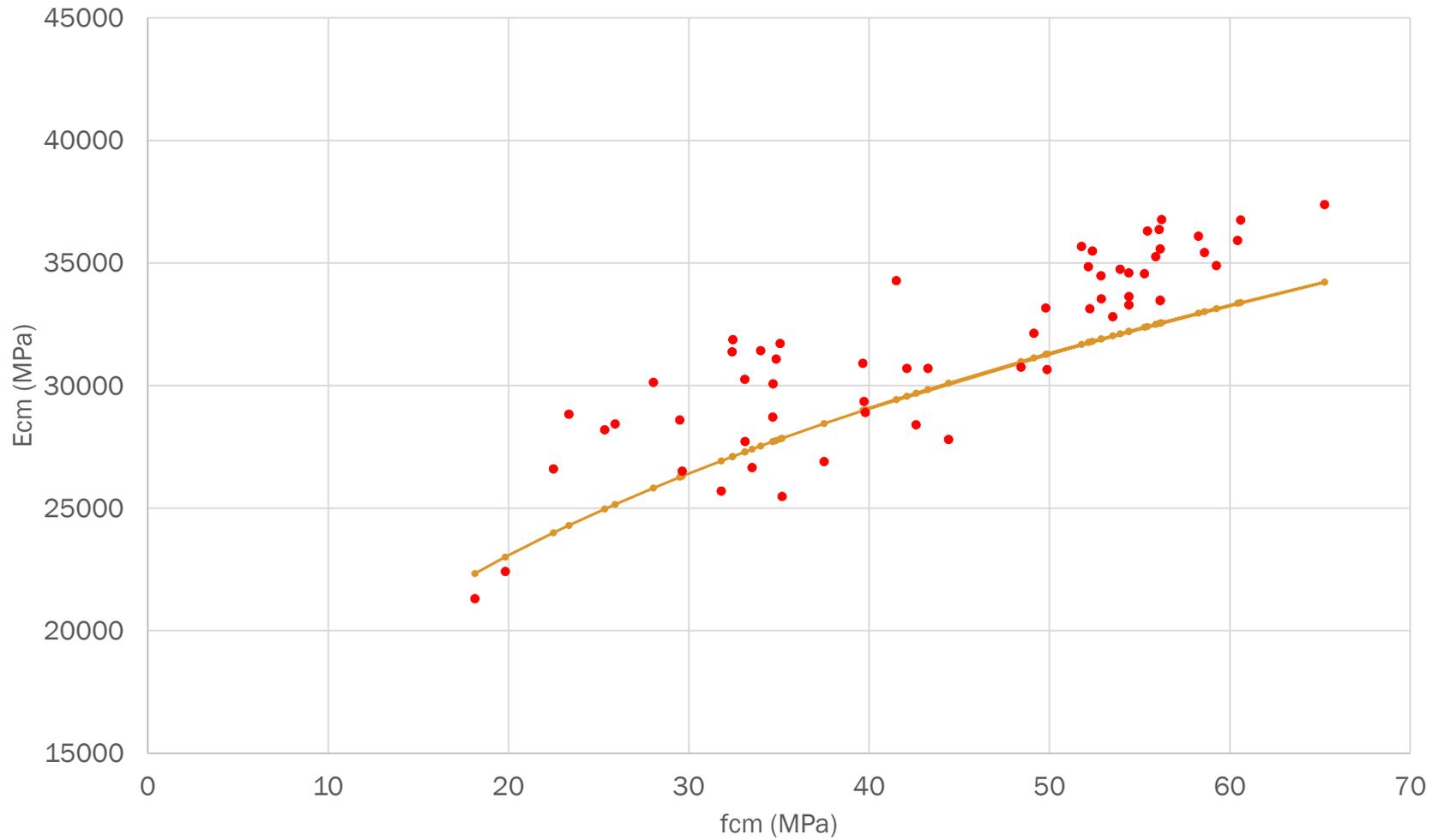


Resistencia especificada (MPa)	Resistencia media requerida (MPa)
$f_{ck} < 21$	$f_{cm} = f_{ck} + 7$
$21 \leq f_{ck} \leq 35$	$f_{cm} = f_{ck} + 8,3$
$f_{ck} > 35$	$f_{cm} = 1,10f_{ck} + 5$

● Datos experimentales (15cmx30cm)

—●— ACI 318 sin wc

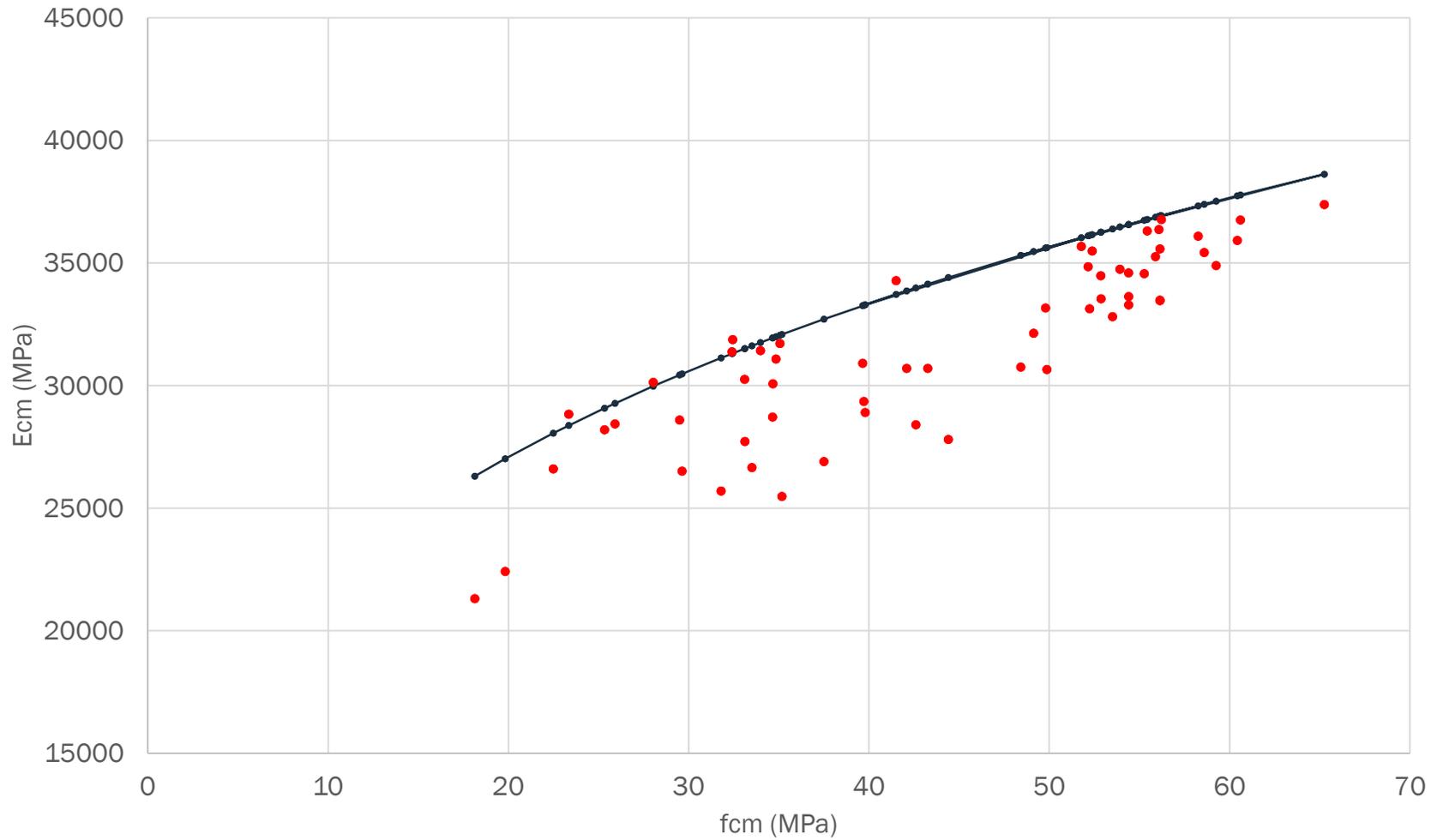
Resistencia - Módulo de elasticidad



• Datos experimentales (15cmx30cm)

— EHE08

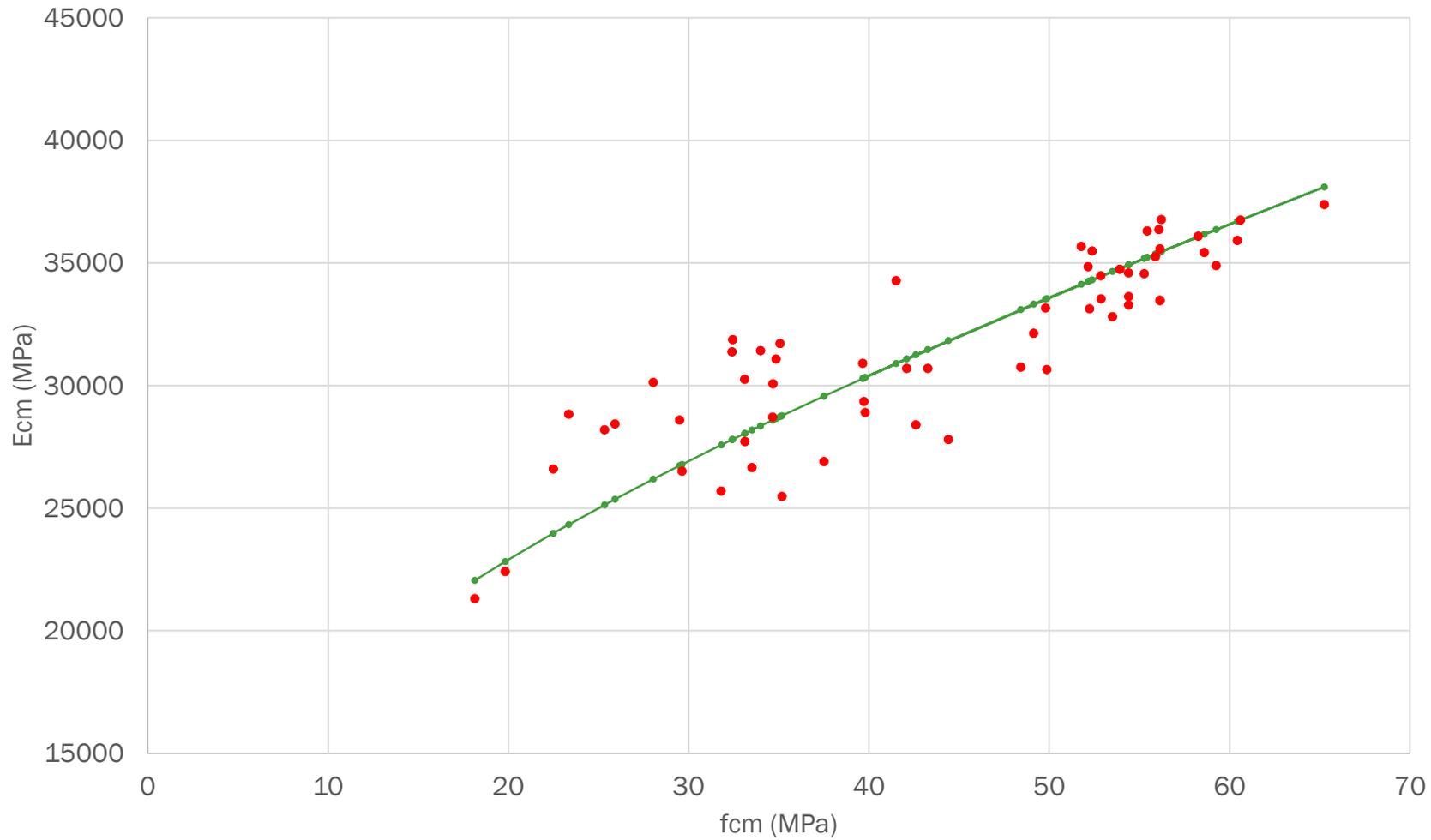
Resistencia - Módulo de elasticidad



• Datos experimentales (15cmx30cm)

—• Eurocódigo

Resistencia - Módulo de elasticidad



• Datos experimentales (15cmx30cm)

—• Código Modelo 2010

Conclusiones

- La correcta ejecución del ensayo es fundamental para obtener resultados confiables (preparación de las caras de compresión, correcta colocación de los sistemas de medida de deformaciones).
- El calculo teórico del módulo de elasticidad a partir de la norma UNIT, considerando condiciones medias de ejecución, se ajusta correctamente para valores de resistencia de entre 20MPa y 40 MPa. Para valores mayores sobreestima los valores de cálculo.
- Los valores de módulo obtenidos a partir del Eurocódigo, si bien presentan un comportamiento similar al de los valores experimentales, se encuentran sobreestimados.
- Los valores obtenidos a partir de la fórmula propuesta por la ACI, al contrario del Eurocódigo, arrojan valores por debajo de los valores determinados experimentalmente.

Conclusiones

- Los valores calculados a partir del Código Modelo 2010 resultan ser los que más se ajustan a los valores determinados experimentalmente, encontrándose el menor error relativo en los resultados.

Comentarios finales

- Se considera necesario realizar una campaña de ensayos que permita realizar un análisis estadístico para un mejor ajuste de los cálculos teóricos propuestos por la normativa nacional (considerando distintos niveles de resistencia y hormigones especiales).
- Es necesario analizar la influencia de los diferentes agregados disponibles en el medio en el resultado del módulo de elasticidad, permitiendo realizar un ajuste de los valores de cálculo en función del origen del agregado utilizado en la dosificación.
- El Departamento de Construcción del Instituto de Estructuras y Transporte está comenzando un proyecto CSIC de investigación de vinculación con el medio, que considera los aspectos mencionados.