

2ª Jornada de Avances en Diseño y Tecnología del Hormigón

Ensayos y control de calidad en Hormigones con Fibras

Luis Segura (lsegura@fing.edu.uy)

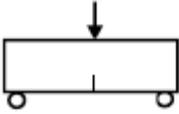
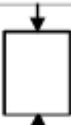
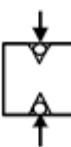
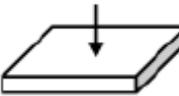
Montevideo, 27 de julio de 2016

Universidad de la República – Uruguay



- **Ensayos para control de resistencia y tenacidad**
 - Primeros ensayos
 - Ensayos “compactos”.
 - Factores relevantes en ensayos de HRF
 - Presentación del “Ensayo Montevideo” (MVD)
- **Control de calidad en proyectos de HRF**

Ensayos de tenacidad y resistencia en HRF

Test	Standard / Reference	Setup	Dimensions ¹ [mm]	
3-point bending test	EN 14651:2005		600 x 150 x 150	Ensayos de viga
4-point bending test	NBN B 15-238		600 x 150 x 150	
Uniaxial tensile test	RILEM TC 162-TDF recommendations		Φ150 x 150	Ensayos compactos
Wedge-splitting test	Tschegg and Linsbauer (1986)		150 x 150 x 150	
Barcelona test	UNE 83515:2010		Φ150 x 150	
Double-edge wedge splitting test	di Prisco <i>et al.</i> (2010)		150 x 150 x 150	
EFNARC panel test	EFNARC European Specification for Sprayed Concrete		600 x 600 x 10	Ensayos de placa
Round panel test	ASTM C1550 - 10a		Φ800 x 75	

- **El hormigón con fibras presenta dos tipos de comportamiento:**

- Ablandamiento (softening) o Endurecimiento (hardening)
- Depende de varios factores, como contenido de fibras y esbeltez de las mismas.
- Una misma dosificación puede presentar distintos comportamientos según como es ensayado.

- **Tenacidad:**

- Energía que es capaz de absorber el material antes de romper.
- Se cuantifica midiendo el área bajo la curva fuerza-desplazamiento.

- **Resistencia residual:**

- Fuerza que es capaz de ejercer el material para un desplazamiento dado

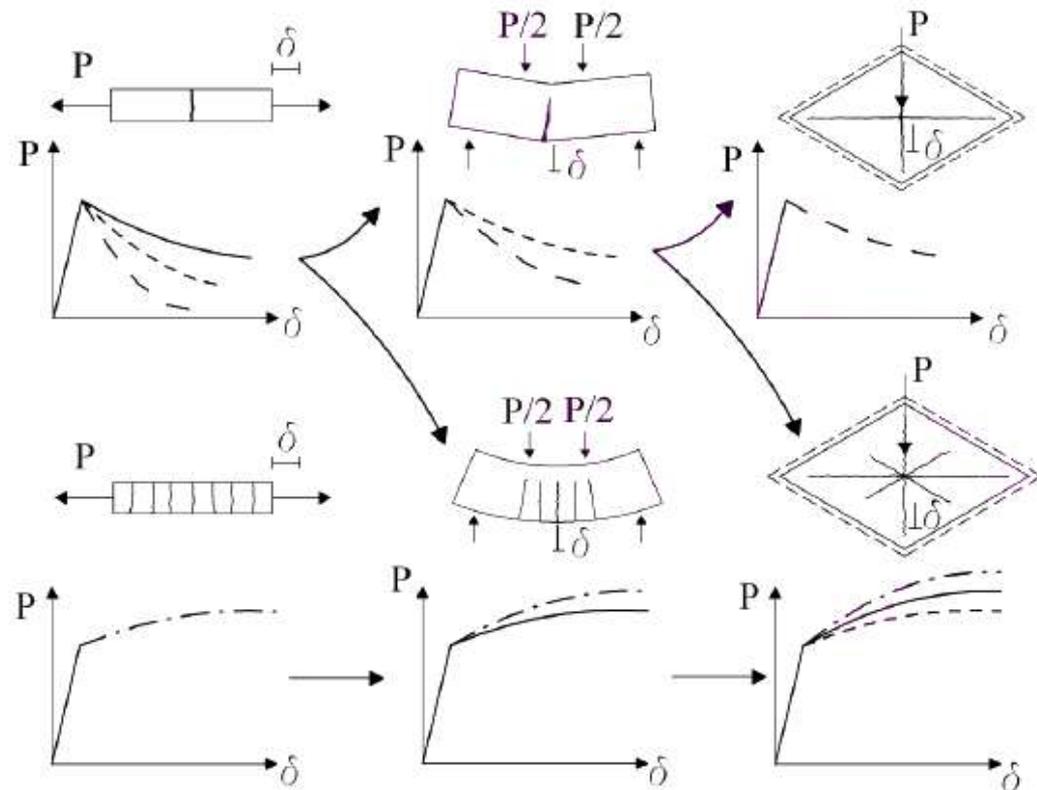


Figure 5.6-1: Main differences between materials having softening or hardening behaviour from material to structural level

Model Code (2010).

Ensayos para determinar tenacidad y resistencia residual en HRF

Primeros ensayos

- **Ventaja:**

- Permite determinar directamente las relaciones constitutivas.

- **Desventajas:**

- Ensayo muy costoso.
- Elaboración del ensayo
- Dificultades de implementación
 - Introducción de fuerza centrada
 - Prensa con control de desplazamiento cerrado



Diferentes configuraciones de ensayo a tracción uniaxial:

- a) Barragán (2002);
- b) Markovic (2006);
- c) Stälhi (2008)

Ensayo restringido a temas de investigación

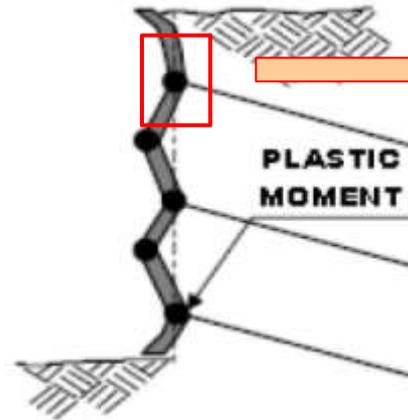
Ensayos de placa

27 de julio de 2016 Luis Segura Ensayos y Control de Calidad en HRF

7



- **Simula el efecto del anclaje**
 - Punto crítico en el hormigón proyectado
- **Ensayo “de estructura”**
 - No del material



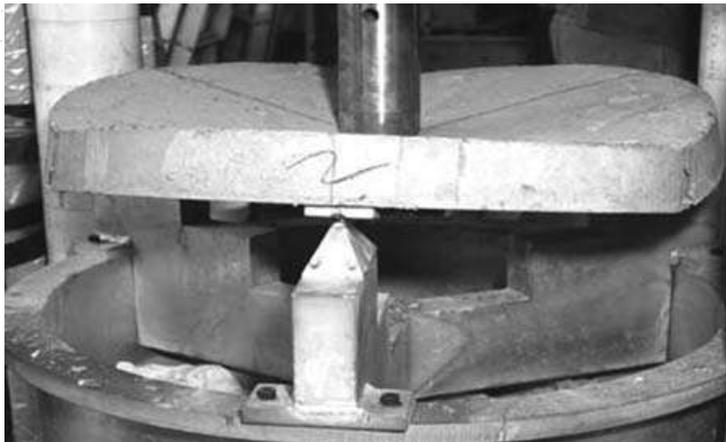
Ensayos de placa



EFNARC (1996)

600x600x100

≈85kg



ASTM C1550 (2005).

φ800x75

≈90kg

- **Ensayo costoso.**
 - Elementos de gran tamaño.
- **Información reducida del comportamiento constitutivo del material.**
 - Varios mecanismos colaboran en la resistencia total del elemento

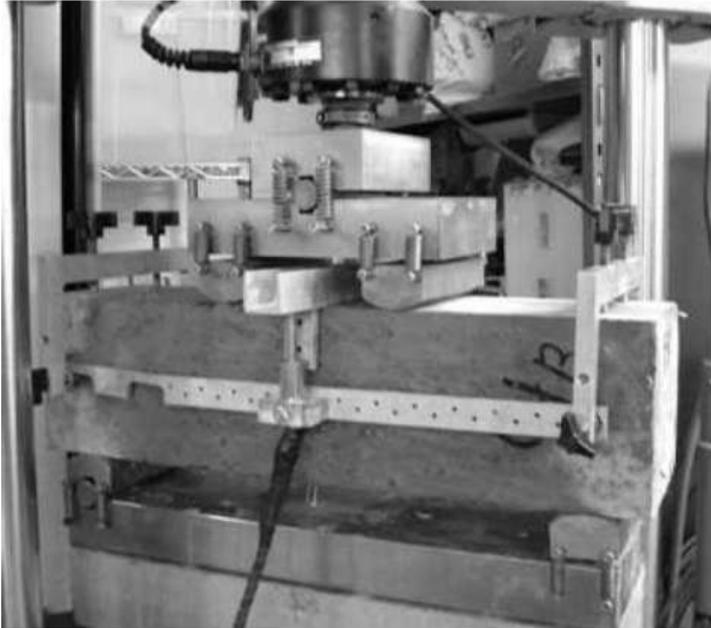
Ensayos a flexión en viga – 4 puntos

27 de julio de 2016 Luis Segura Ensayos y Control de Calidad en HRF

9

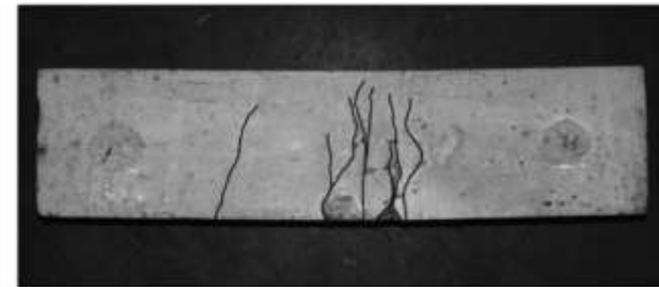


- **Obtener la ecuación constitutiva, a través de un análisis inverso.**
 - A partir de la curva Fuerza-Desplazamiento
 - => obtener la curva **Tensión-Deformación** o **tensión-Apertura de Fisura**

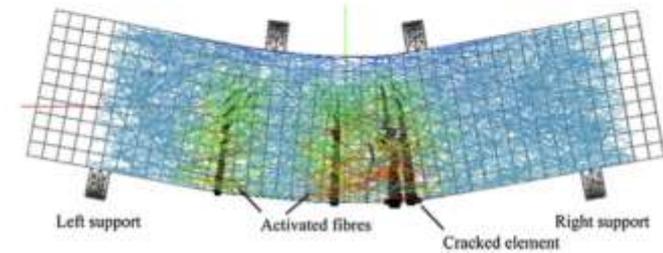
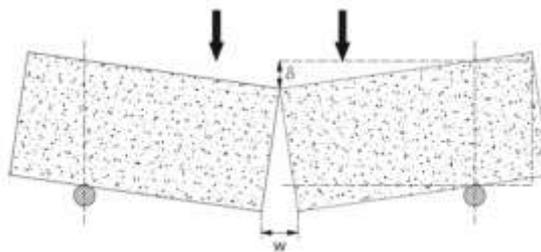


ASTM C1609 (2013)
NBN B 15-238 (1992)
 $\approx 150 \times 150 \times 600$
 $\approx 32 \text{ kg}$

Soetens (2014)



Molins (2009)



- **“Problemas”**
 - Múltiple fisuración
 - Alta dispersión

Ensayos a flexión en viga – 3 puntos

27 de julio de 2016 Luis Segura Ensayos y Control de Calidad en HRF

10



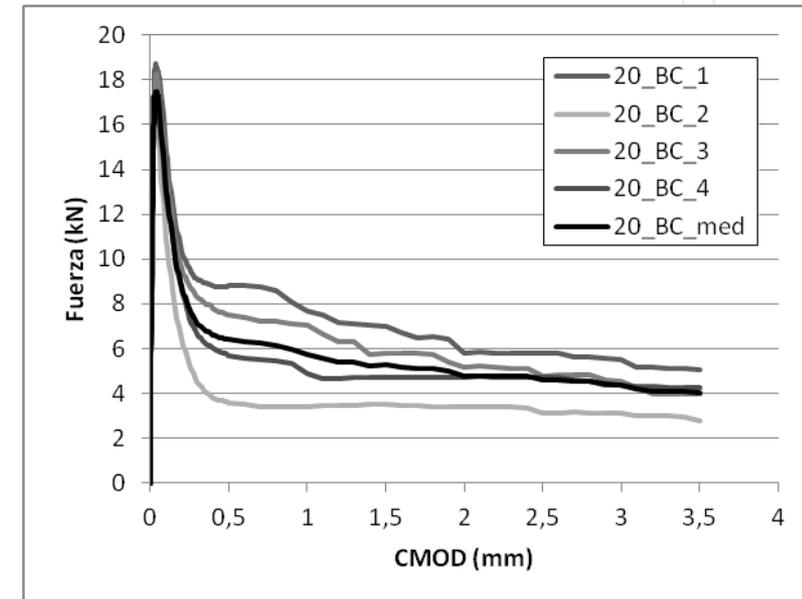
EN14651 (2007)

150x150x600

≈32kg



- **Se entalla la viga**
 - induce la posición de la fisura
- **Permite medir directamente la abertura de fisura (clip-gauge)**
- **Ensayo de referencia**
 - “Model Code” y normativa Europea “EN”.



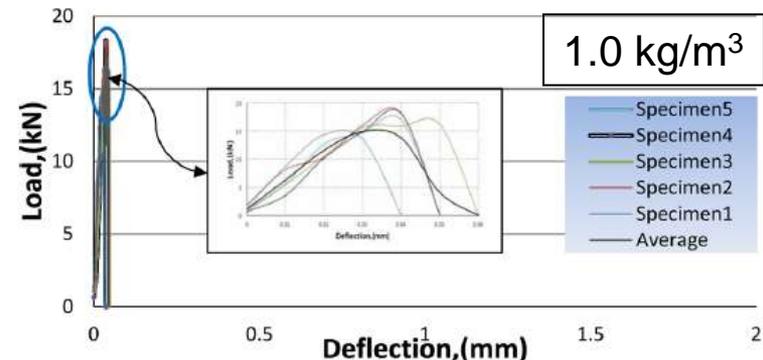
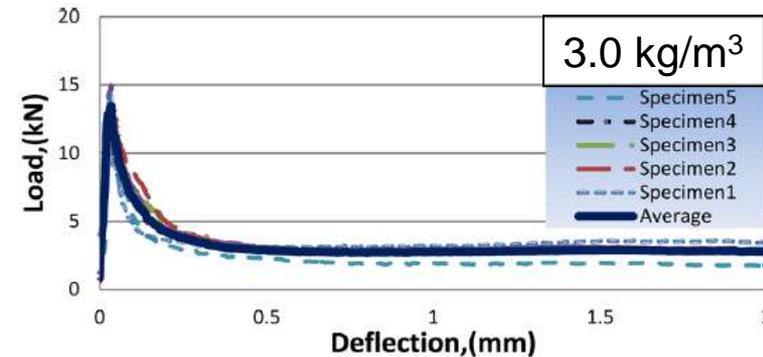
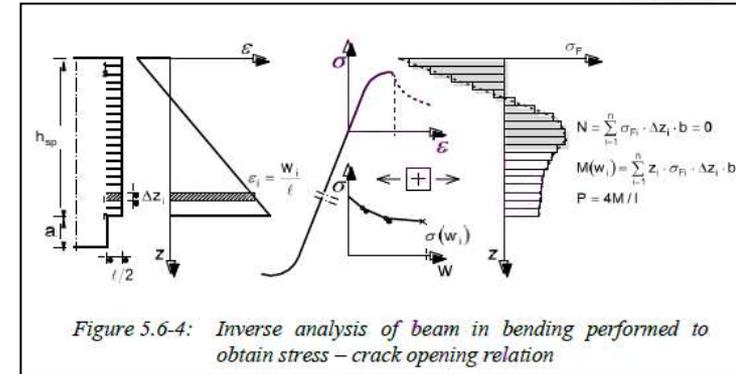
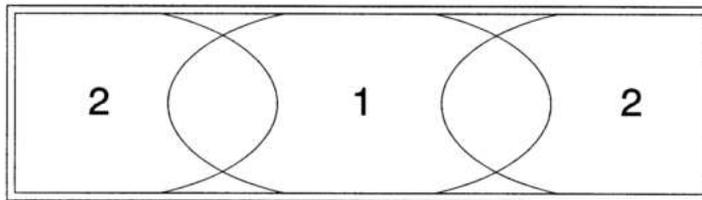
Ensayos a flexión en viga

• Ventajas

- Mecanismo de trabajo simple e intuitivo.
- Permite inferir la ecuación constitutiva del material mediante un análisis inverso.

• Inconvenientes

- Es necesaria una prensa con control de desplazamiento de ciclo cerrado (close loop)
 - Con una tasa elevada de adquisición y una rápida respuesta.
 - Para evitar roturas bruscas inestabilidad post-pico.
- Se evalúa el comportamiento en una dirección específica
 - No adecuado para evaluación de estructuras existentes



Ensayos para determinar tenacidad y resistencia residual en HRF

Ensayos “compactos”

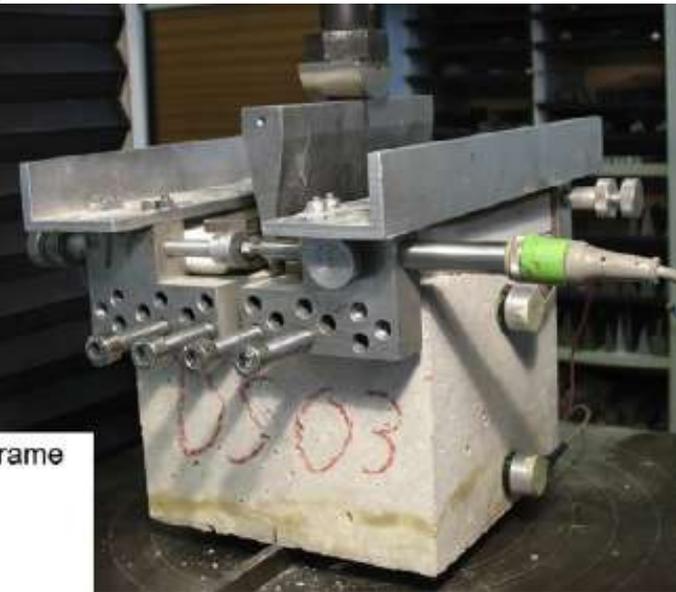
Ensayo de cuña - Wedge splitting test (WST)

27 de julio de 2016 Luis Segura Ensayos y Control de Calidad en HRF

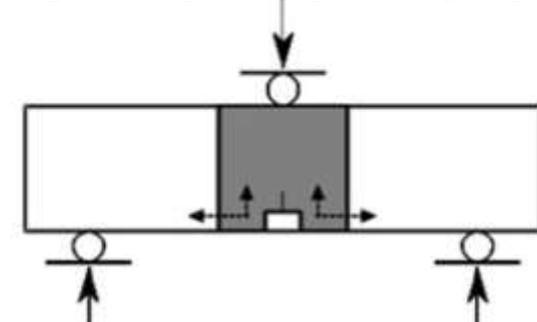
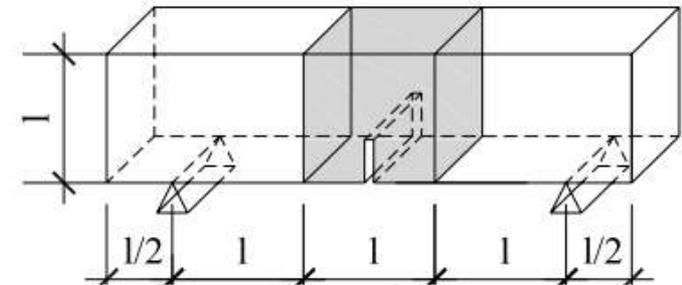
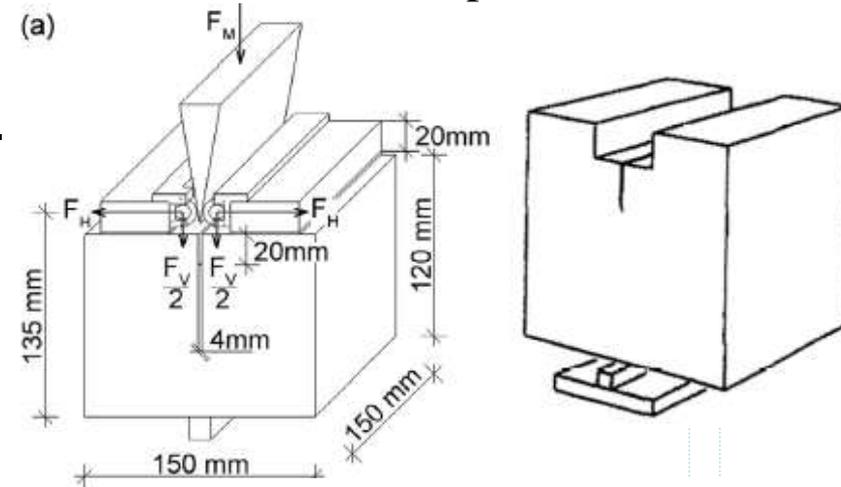
13

- **Mediante el dispositivo de carga, reducir al máximo el rozamiento.**

– De este modo, se descompone con precisión la fuerza vertical en las componentes verticales y horizontales.



Tscheegg (1986).
150x150x150
≈ 8 kg



- **Desventajas:**

– Compleja preparación de la probeta (doble entalla)
– Dispositivo de carga

- **Ventajas:**

– Gran estabilidad post-pico

Ensayo DEWS (Double-edge wedge splitting)

27 de julio de 2016 Luis Segura Ensayos y Control de Calidad en HRF

14

- **Basado en el ensayo de cuña.**

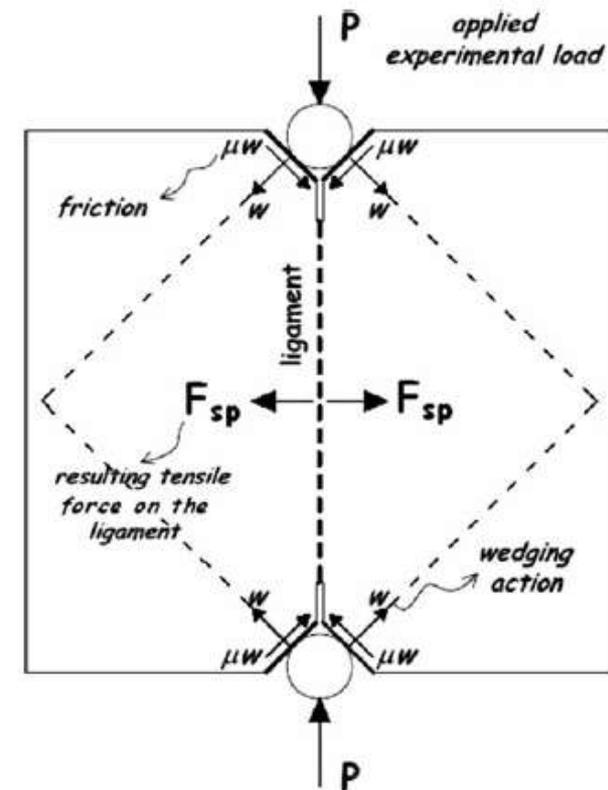
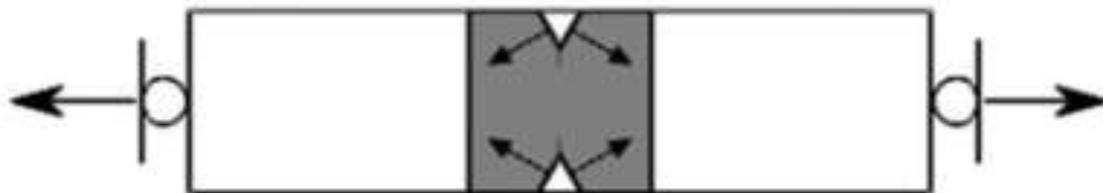
- Busca simplificar el dispositivo de introducción de carga.
 - Rodillos deslizando sobre platinas
- Obtener una tracción pura (para obtener directamente la ecuación constitutiva)



Di Prisco et al (2010).

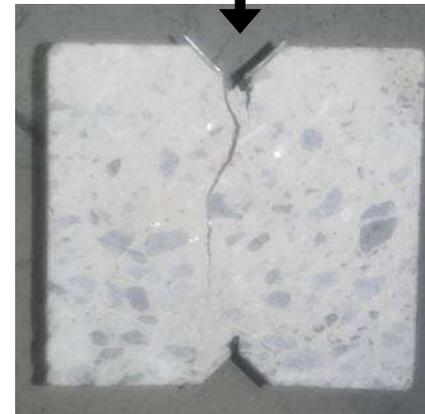
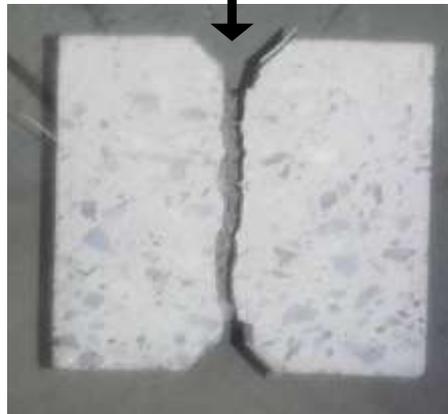
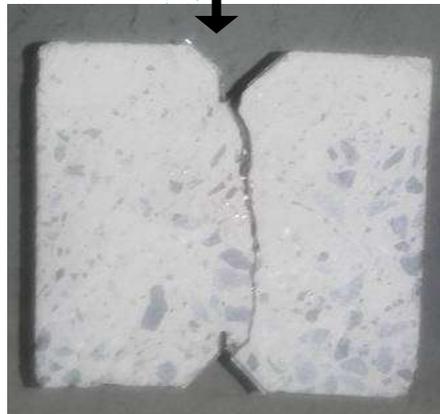
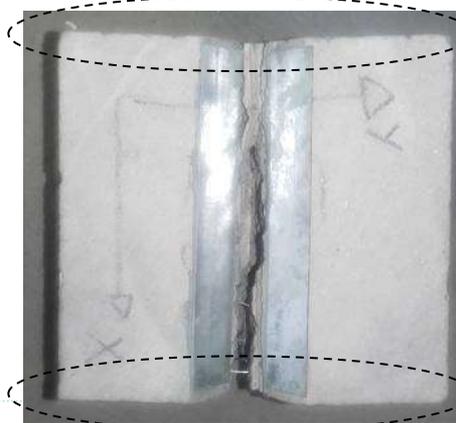
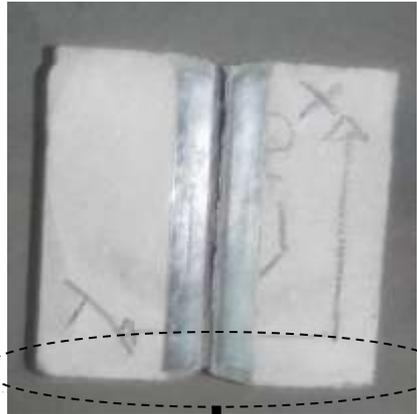
150x150x150

≈ 8 kg

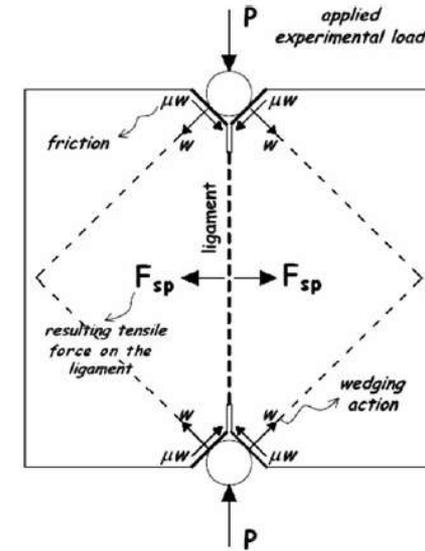


Mecanismos de rotura en DEWS

- Muestras de ensayo DEWS realizados en USP.



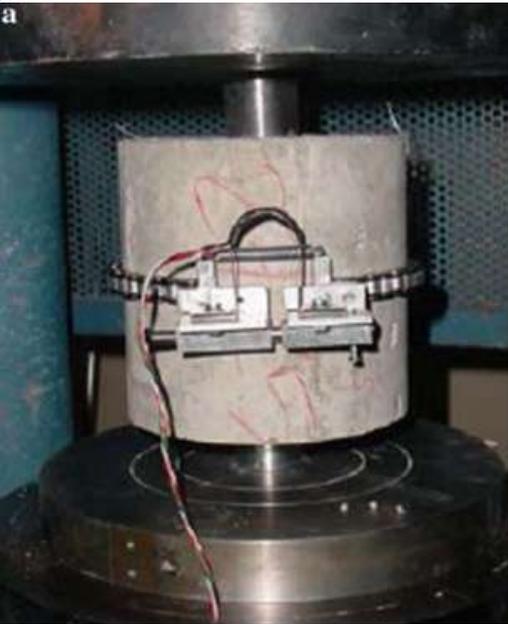
Idealizado



(Di Prisco et al 2013)

Ensayo Barcelona (BCN)

- **Ensayo por doble punzonamiento**



(UNE 83515, 2010).

$\phi 150 \times 150$

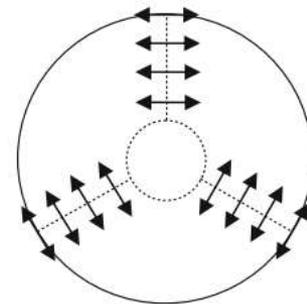
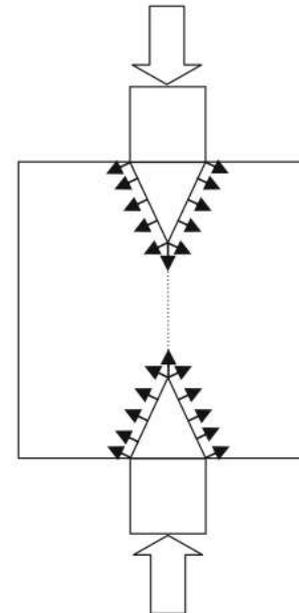
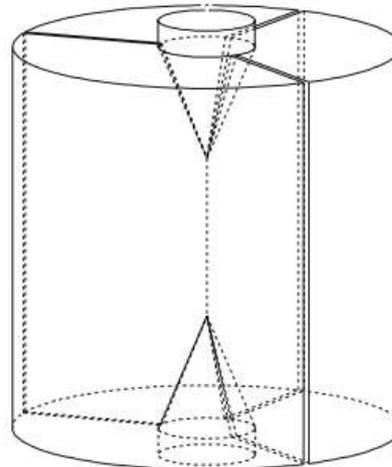
$\approx 6 \text{ kg}$

- **Ventajas:**

- Ensayo de muy simple ejecución
- Prensa de compresión
- Velocidad constante

- **Mayor inconveniente:**

- Mecanismo “complejo”

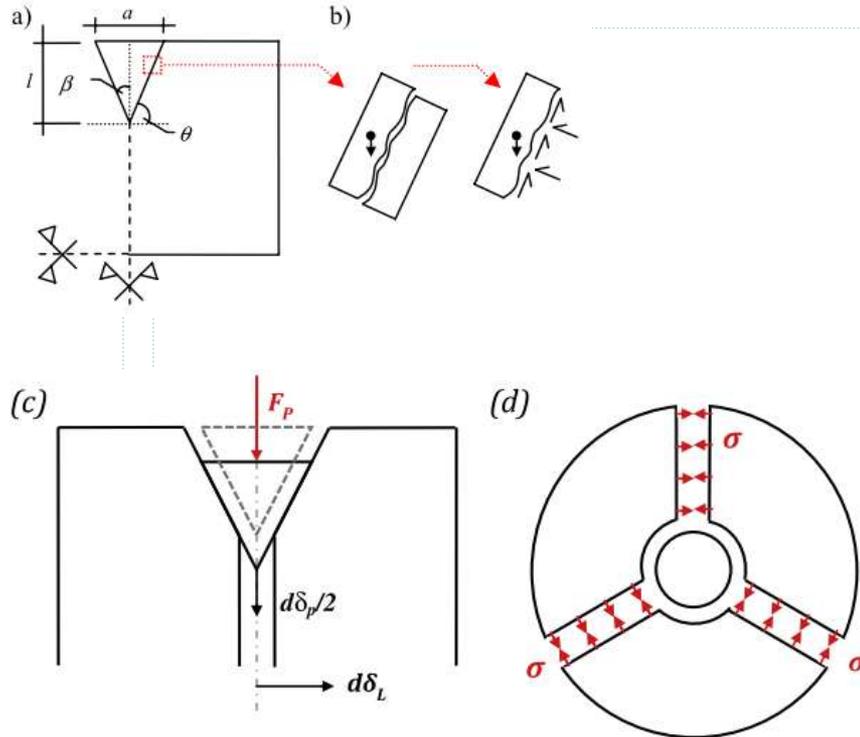


Molins (2009)

Eliminación de la cadena



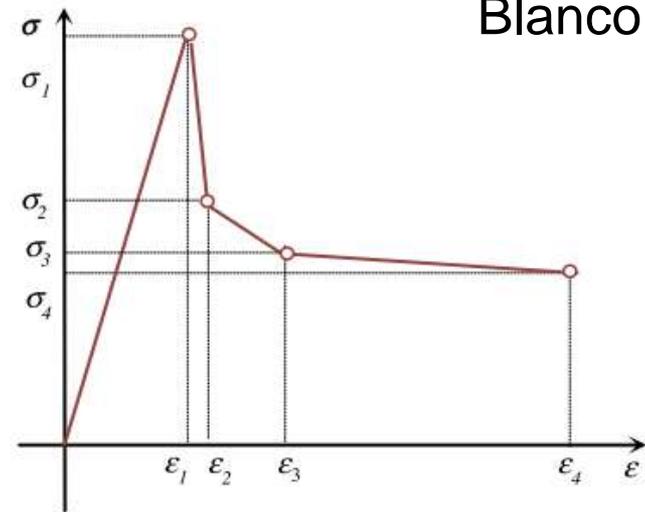
Pujadas (2014)



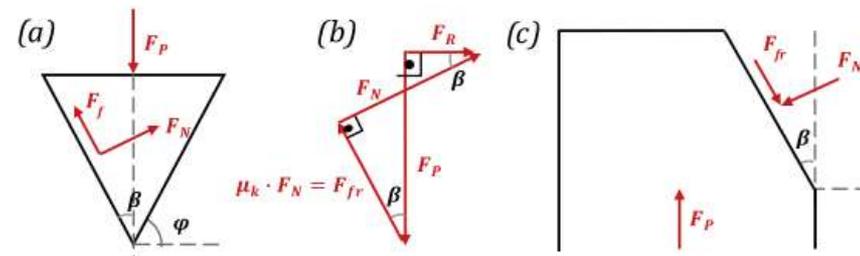
Desarrollo de ecuación constitutiva

Parameters of the simplified model.

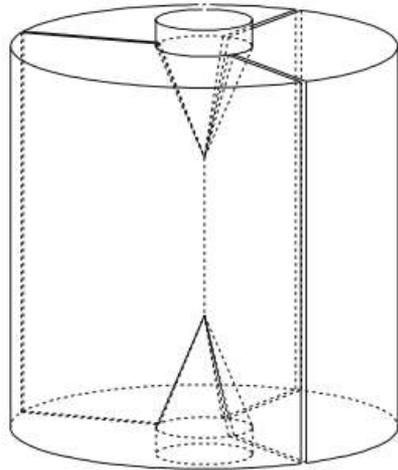
Strain ($\%e$)	Stress (MPa)
$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{cm}}$	$\sigma_1 = \frac{F_{Pmax}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \text{sen } \beta}{\text{sen } \beta + \mu_k \cdot \cos \beta} = \omega F_{Pmax}$
$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0.1$	$\sigma_2 = \frac{F_{0.02mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \text{sen } \beta}{\text{sen } \beta + \mu_k \cdot \cos \beta} = \omega F_{0.02mm}$
$\varepsilon_3 = 4.0$	$\sigma_3 = \frac{F_{0.75mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \text{sen } \beta}{\text{sen } \beta + \mu_k \cdot \cos \beta} = \omega F_{0.75mm}$
$\varepsilon_4 = 20.0$	$\sigma_4 = \frac{F_{4mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \text{sen } \beta}{\text{sen } \beta + \mu_k \cdot \cos \beta} = \omega F_{4mm}$



Blanco (2014)



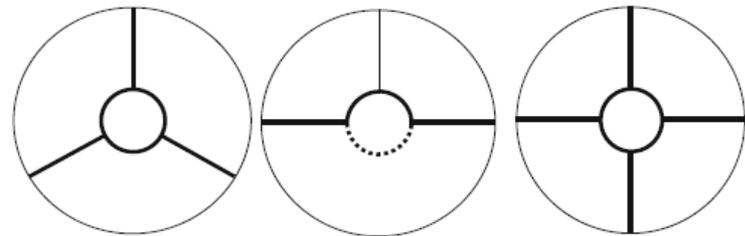
- Mecanismo “idealizado”



Muestras del laboratorio de USP



- Mecanismos habituales



Resultados según distintos mecanismos

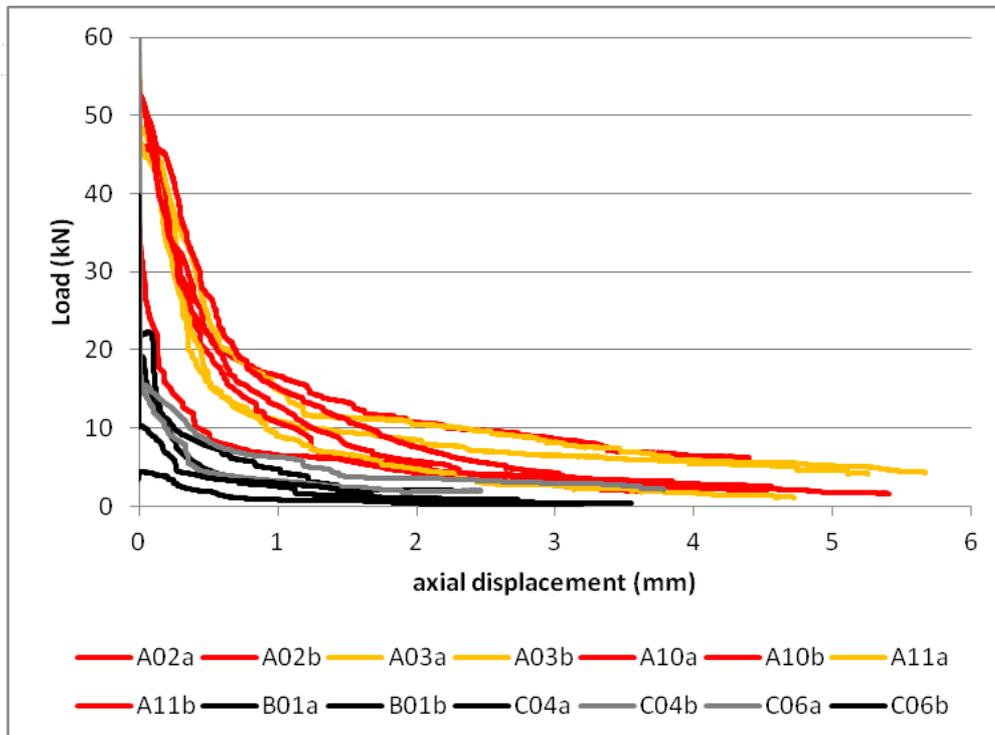
- Se ensayó un hormigón anisotrópico
- Dos mecanismos de totura
 - Falla tipo “tensión” y falla tipo “corte”
- Respuesta similar con ambos mecanismos
 - No se ven diferencias significativas



Falla por corte



Falla por tracción



		
Falla “corte”		
Falla “tracción”		

Segura (2016)

Dirección de fibras determinan fisura ppal.

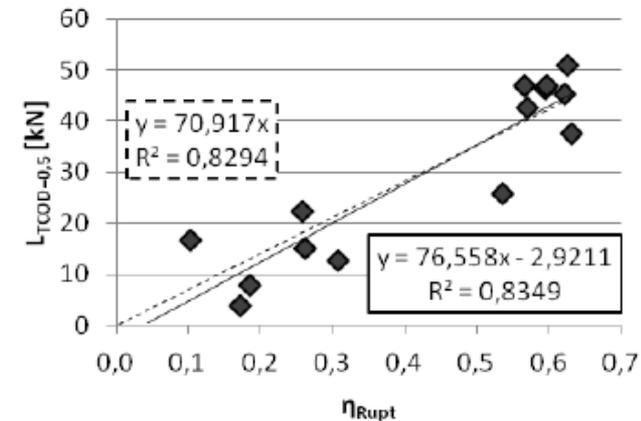
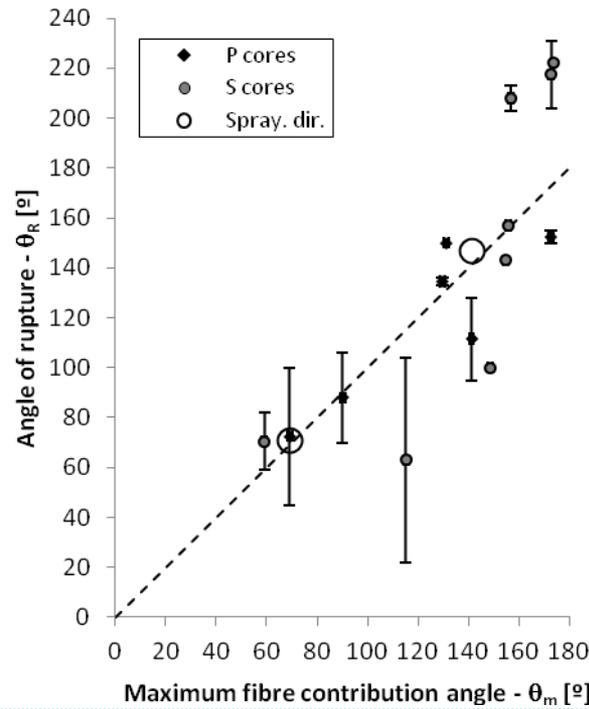
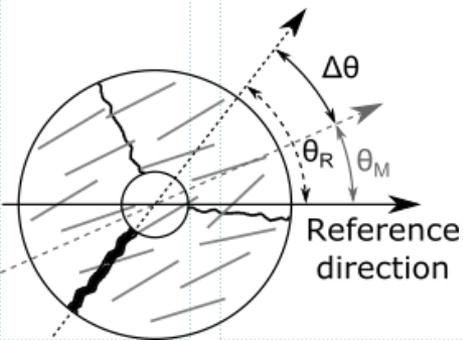
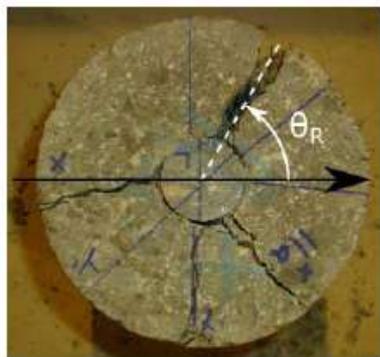
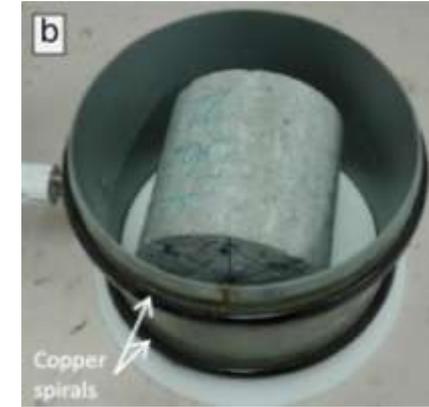
- **Cuantía y orientación de fibras**

- Se puede determinar con métodos no destructivos (ensayo inductivo).

- **Fisura principal**

- Un plano de fisuras abre más que los restantes.
- Dirección determinada por la orientación de fibras

- **Resistencia del ensayo bien correlacionada con la orientación de las fibras**



- **Probetas (cuerpos de prueba):**

- Tamaño/peso
- Forma de obtención (moldeadas, extraídas de elementos existentes)
 - Afecta la orientación y distribución de fibras.
- Preparación de la probeta
 - Necesidad de entalla.
 - Cortes especiales / placas

- **Equipamiento necesario**

- Prensas: Close loop / Open loop
- Control de carga /desplazamiento
- Dispositivos de introducción de carga

- **Tiempo de ensayo**

- **Capacidad de evaluar:**

- Softening / hardening
- Tenacidad / Resistencia residual
- Dirección del ensayo

- **Mecanismo que representa:**

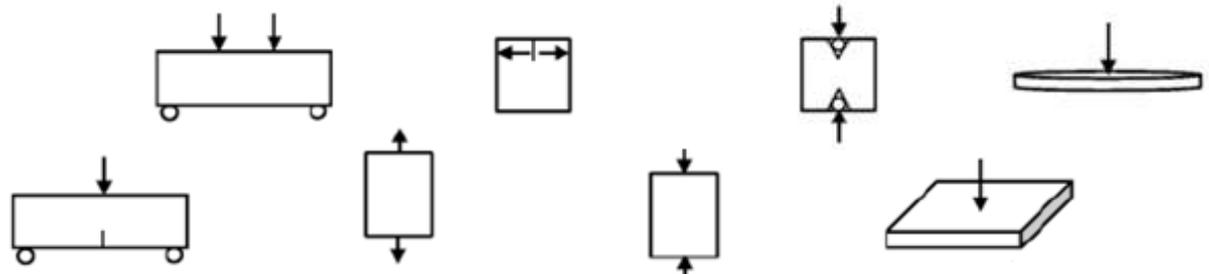
- Facilidad de modelado e interpretación.
- Conocimiento de los parámetros involucrados

- **Dispersión de resultados**

- **Estabilidad del ensayo**

- Fenómenos en fisuración post-pico

Tabla comparativa



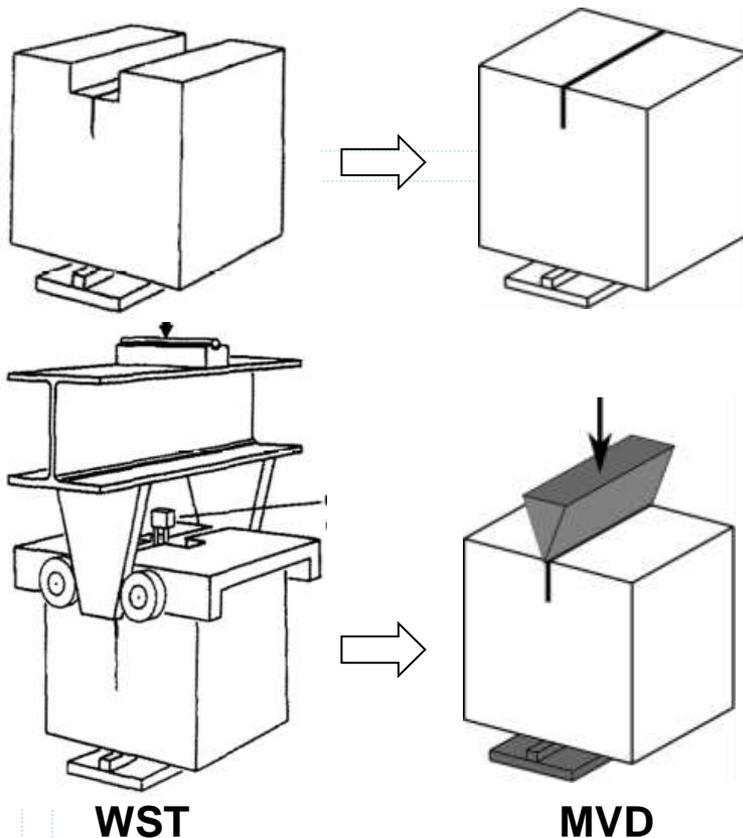
		3point	4point	uniax.	WST	BCN	DEWS	EFNARC	ROUND
Probeta	Tamaño	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Red	Red
	Preparación previa	Yellow	Green	Red	Red	Green	Red	Green	Green
Equipo	Control de prensa	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
	Dispositivo de carga	Yellow	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green
Ensayo	Estabilidad del ensayo	Red	Red	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Green	Green
	Orientación de ensayo	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Red	Red
	Mecanismo de ensayo	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Yellow	Yellow
	Certeza en parámetros	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green
	Dispersión (?)	Orange	Orange	White	White	Yellow	White	Green	Green

Ensayos para determinar tenacidad y resistencia residual en HRF

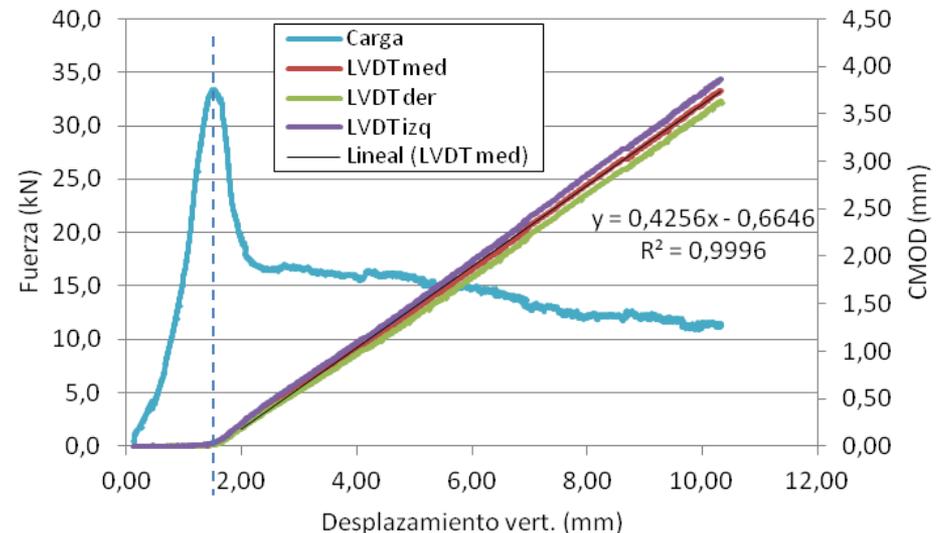
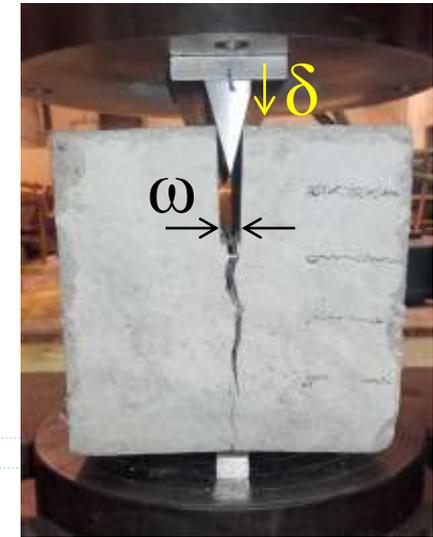
Ensayo Montevideo (MVD)

Desarrollando un nuevo ensayo

- El ensayo se basa principalmente en el ensayo de cuña (WST)
- Se simplifica considerablemente utilizando conceptos de los ensayos Barcelona y DEWS
- Obteniendo un nuevo ensayo compacto.

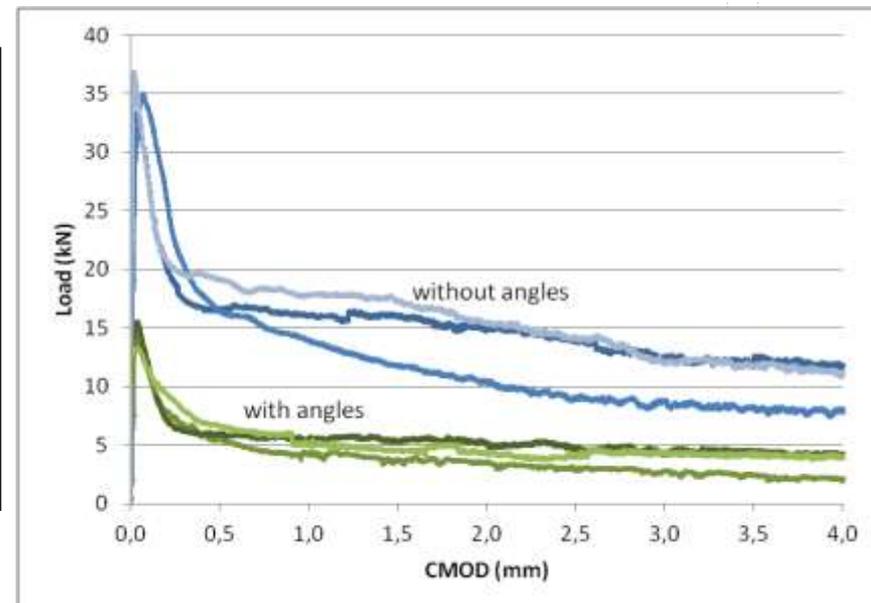
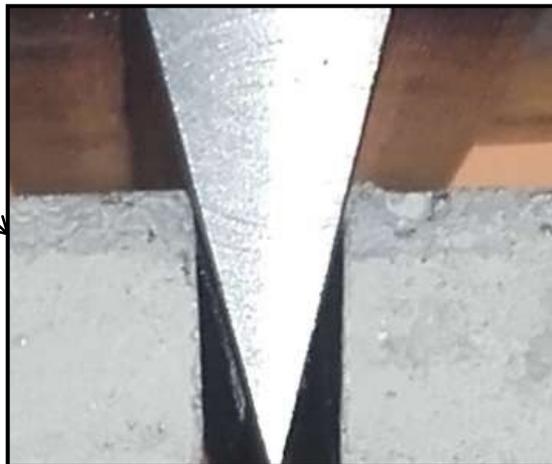
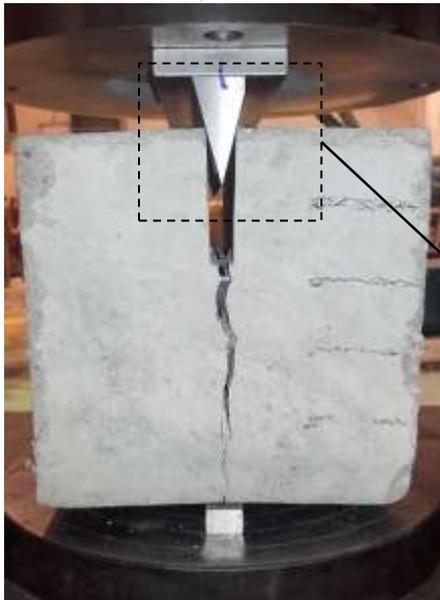


- **Curva fuerza desplazamiento vertical típica del ensayo de viga.**
- **Ensayo muy estable**
 - Caída suave en el tramo post-pico
- **Muy buena correlación entre el desplazamiento de la prensa y la apertura de fisura (CMOD).**
 - Calculada mediante relaciones geométricas, se puede predecir con un error en torno al 2%.
- **No sería necesario:**
 - Utilizar prensa con control de desplazamiento cerrado.
 - Medición directa de la apertura de fisura.



Primeras pruebas

- **Mayor defecto: contacto cuña-concreto**
 - Daño progresivo durante el ensayo.
 - Contacto variable.
 - En Softening, daño post-pico menor.
 - En hardening, daño progresivo al aumentar carga.
- **“Solución”:**
 - Pegar esquineros metálicos
 - Uniformiza el contacto de la cuña.
 - Reduce rozamiento (ensayo con cargas menores).

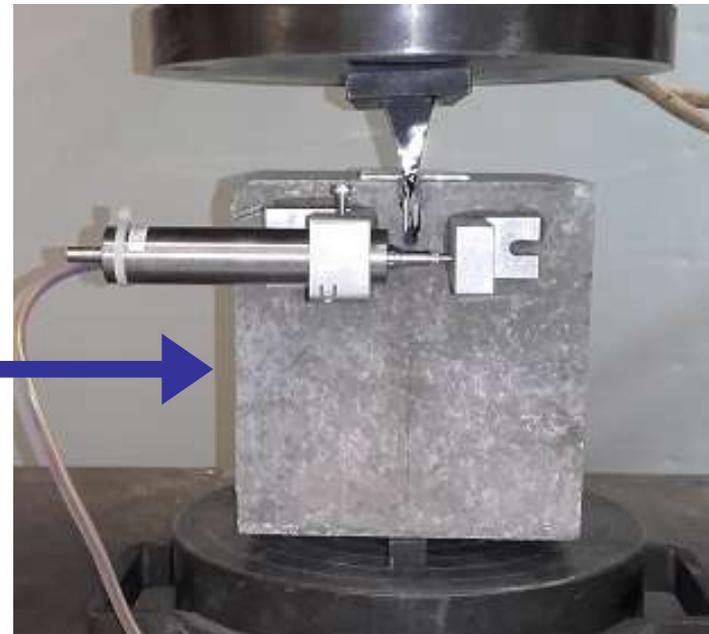
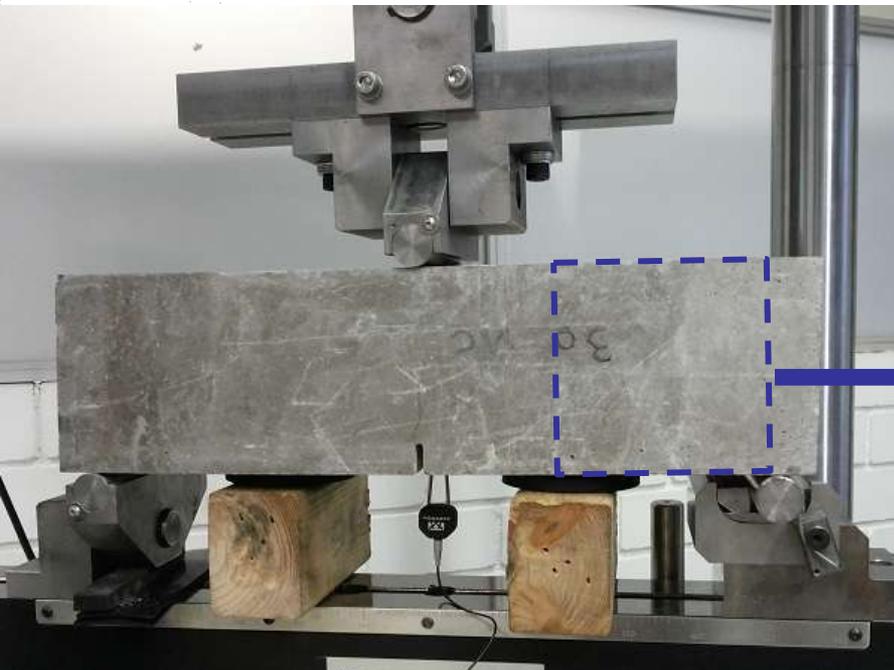


Relación “Viga EN”-MVD

27 de julio de 2016 Luis Segura Ensayos y Control de Calidad en HRF

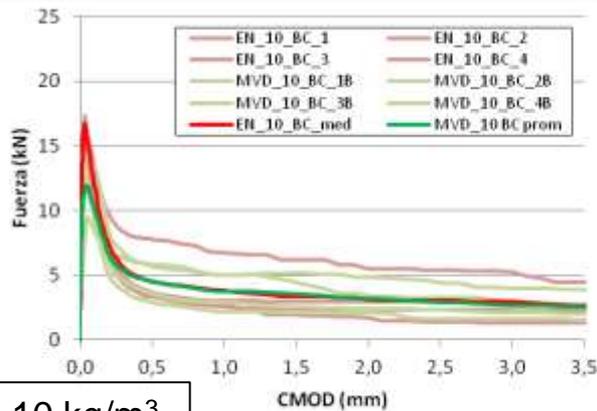
27

- **24 vigas ensayadas según EN14651 (ensayo de referencia actual)**
 - 2 tipos de fibra (bajo/medio contenido de carbono)
 - 3 cuantías de fibras (10/20/30 kg/m³)
- **Luego de ensayadas, se cortan los extremos y se ensayan con el MVD.**
- **Se evaluó:**
 - Correlación entre ensayos “EN” y “MVD”
 - Dispersión de resultados?

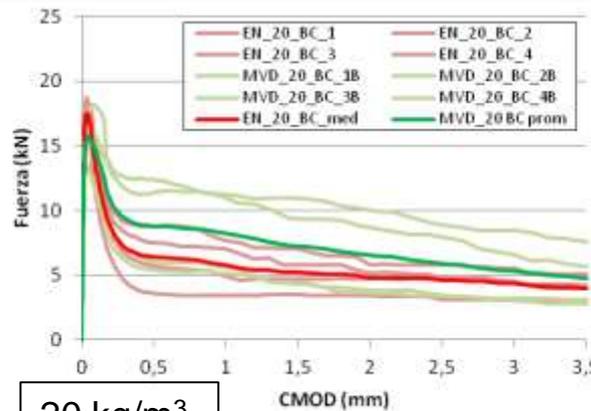


• Resultados de ensayos.

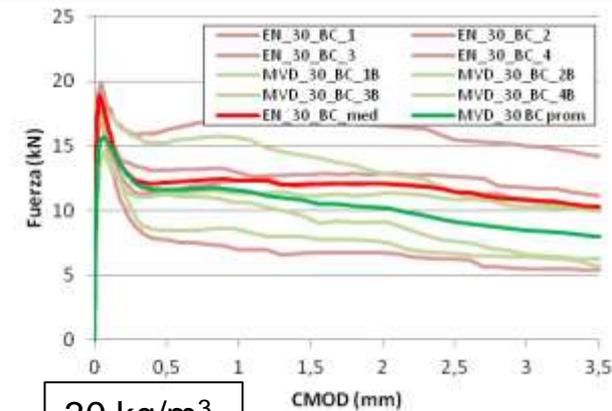
- Excelente correlación (factor de corrección constante).
- Basados en leyes de comportamiento mecánico, 30% de diferencia al mejor ajuste.



10 kg/m³

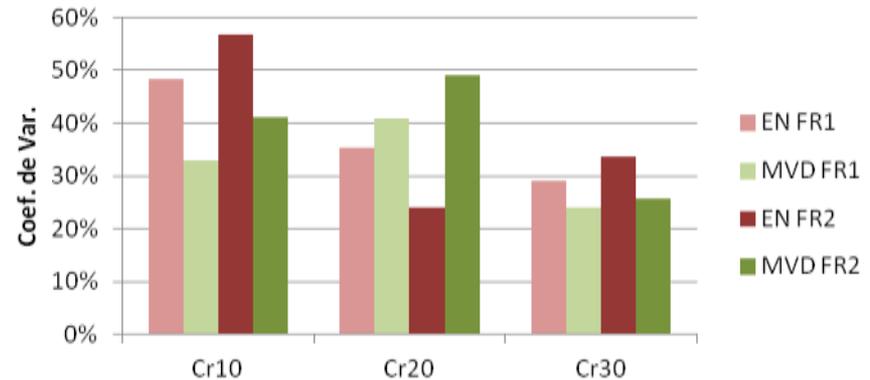
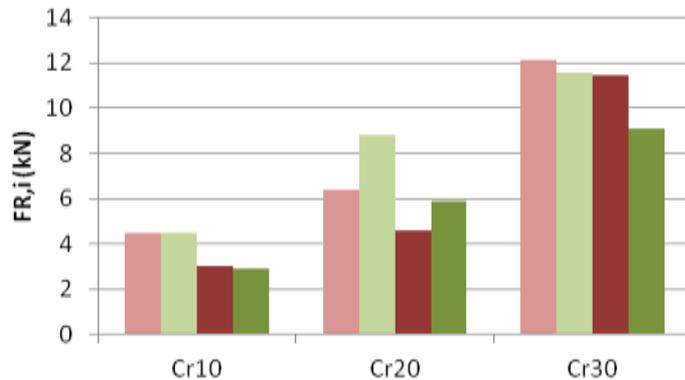


20 kg/m³



30 kg/m³

- Coeficientes de variación similares



- **Ventajas**

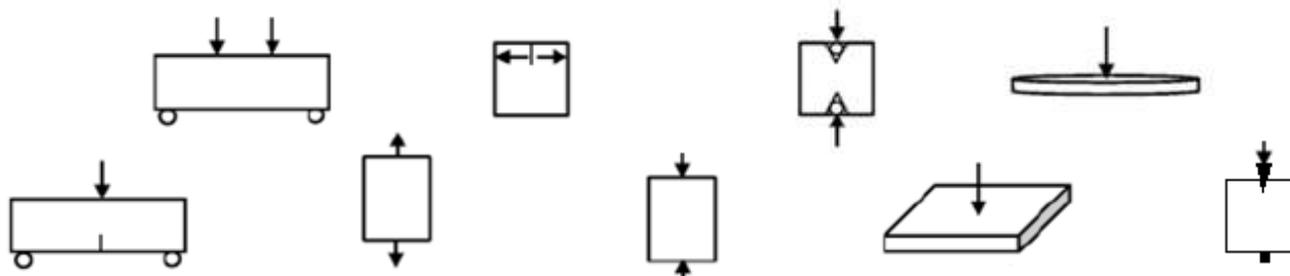
- Representa un mecanismo de carga simple
- Prensa de control de desplazamiento
- Dispositivo de carga simple
- Probetas pequeñas (cubo de 15cm)
- Pequeña preparación de probetas
- Evalúa resistencia residual y tenacidad
- CMOD según desplazamiento vertical
- Dirección de carga conocida (orientable)
- Rápido y estable

- **Inconveniente**

- Evaluación del rozamiento (?)
- Alta dispersión



Resumen / Conclusiones

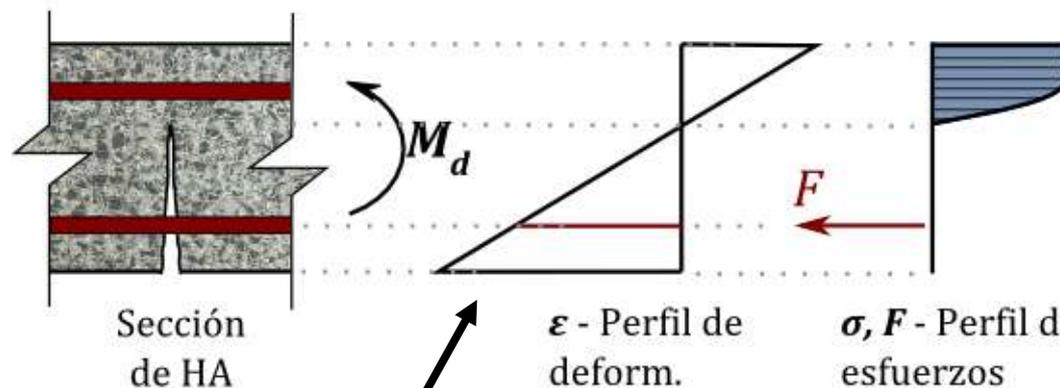


		3point	4point	uniax.	WST	BCN	DEWS	EFNARC	ROUND	MVD
Probeta	Tamaño	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green
	Preparación previa	Yellow	Green	Red	Red	Green	Red	Green	Green	Yellow
Equipo	Control de prensa	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	Dispositivo de carga	Yellow	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green
Ensayo	Estabilidad del ensayo	Red	Red	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Green	Green	Green
	Orientación de ensayo	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Red	Red	Green
	Mecanismo de ensayo	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Green
	Certeza en parámetros	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Yellow
	Dispersión (?)	Orange	Orange	White	White	Yellow	White	Green	Green	Orange

Control de calidad en proyectos de HRF

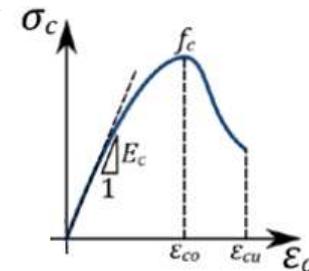
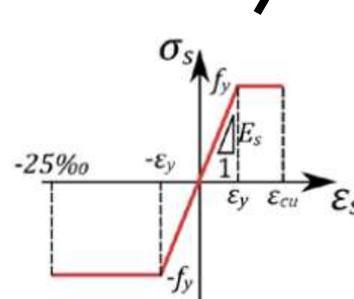
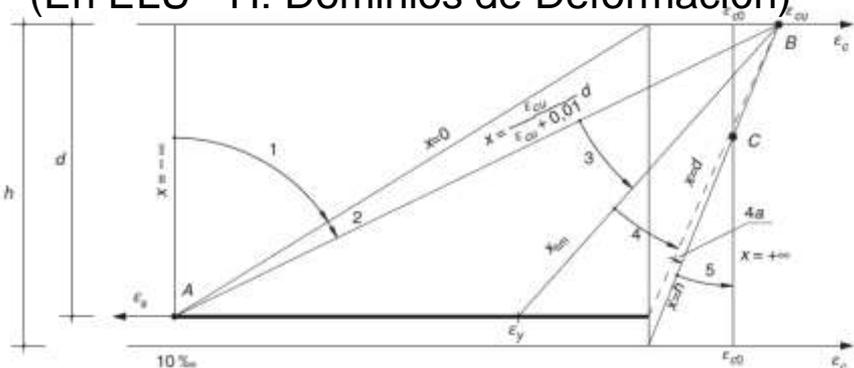
Control en Hormigón Armado

• Diseño en HA



H: Navier-Bernoulli

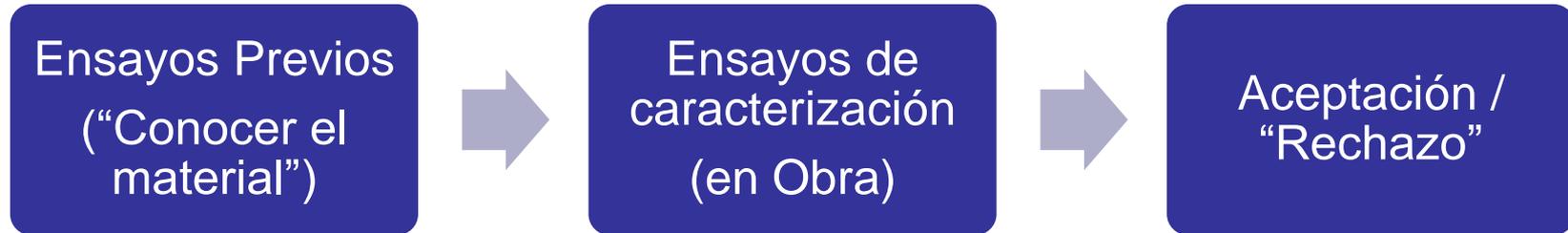
(En ELU - H: Dominios de Deformación)



Conociendo el comportamiento de cada material (Hormigón y Acero), mediante un modelo "simple", conocemos el comportamiento seccional.

Controlamos, por un lado el acero, y por otro lado, el hormigón.

• Filosofía del control según EHE-08



Por cada dosificación:

- 4 series de probetas de amasadas distintas.
- 6 probetas por serie.
- Ensayo EN14651 ($f_{R1,m}$ y $f_{R3,m}$)
- Contenido de fibras
 - EN14721 o EN14488
- Control de trabajabilidad
 - Ensayo de cono

• **Control de resistencia:**

- 3 Probetas por lote
- Ensayo según EN 14651 a 28 días ($f_{R1,est}$ y $f_{R3,est}$)
- **Contenido de fibras**
- **Control de trabajabilidad**
 - Ensayo de cono

• Si: $f_{Ri,est} \geq f_{Ri,k} \Rightarrow$ el lote se acepta

• Si: $f_{Ri,est} < f_{Ri,k} \Rightarrow$ a falta de una previsión explícita (sanciones, correcciones, etc.):

- Si: $f_{Ri,est} \geq 0,9 \cdot f_{Ri,k} \Rightarrow$ se acepta
- Si: $f_{Ri,est} < 0,9 \cdot f_{Ri,k} \Rightarrow$ estudios o ensayos complementarios.

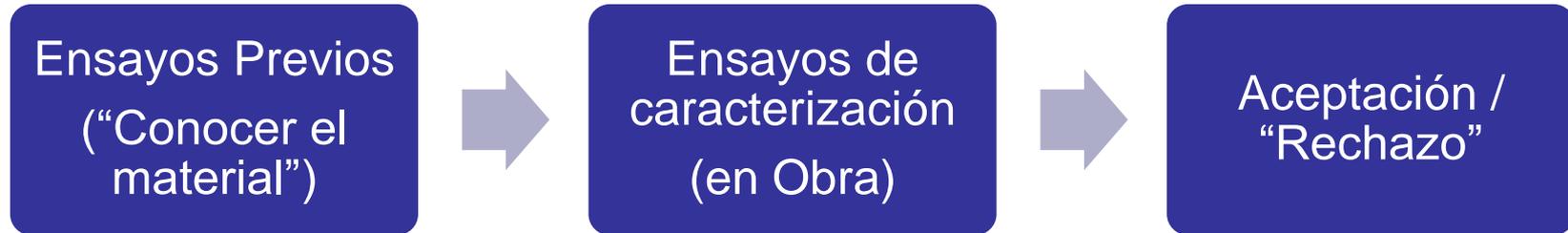
- *“La Dirección Facultativa podrá valorar, bajo su responsabilidad, el empleo de otros procedimientos que faciliten el control, como puede ser en caso del ensayo Barcelona” ... o el ensayo Montevideo!*

En paralelo, se pueden realizar ensayos “compactos” BCN o MVD y correlacionar con el EN.

• **Control de resistencia:**
con el ensayo compacto

• Igual criterio de aceptación

• Filosofía del control en discusión (Europa, Brasil)



Por cada dosificación:

- 4 series de probetas de amasadas distintas.
- 6 probetas por serie.
- Ensayo EN14651 ($f_{R1,m}$ y $f_{R3,m}$)
- Contenido de fibras
 - EN14721 o EN14488
- Control de trabajabilidad
 - Ensayo de cono

- **Control de cada material**
 - Hormigón
 - Fibras
 - Acero
- **Control de ejecución**
- **Contenido de fibras**
- **Control de trabajabilidad**
 - Ensayo de cono

- Varía en función del material

• Distinguir tipos de control según responsabilidad estructural?

- AENOR, UNE 83515 - Fibre reinforced concrete. Determination of cracking strength, ductility and residual tensile strength. Barcelona Test. , p.10.
- ASTM, 2010. C1550-10a Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel). *ASTM Standard*, pp.1–14.
- ASTM C1609, 2013. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). *ASTM standard C1609/C1609M-12*, pp.1–9.
- Blanco, A. et al., 2014. Constitutive model for fibre reinforced concrete based on the Barcelona test. *Cement and Concrete Composites*, 53, pp.327–340. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.017>.
- Carmona Malatesta, S., Aguado de Cea, A. & Molins Borrell, C., 2012. Generalization of the Barcelona test for the toughness control of FRC. *Materials and Structures*, 45(7), pp.1053–1069. Available at: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-011-9816-8> [Accessed March 17, 2014].
- CPH, 2008. *EHE-08: Instrucción del Hormigón Estructural (in Spanish)*,
- di Prisco, M., Ferrara, L. & Lamperti, M.G.L., 2013. Double edge wedge splitting (DEWS): an indirect tension test to identify post-cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites. *Materials and Structures*, 46, pp.1893–1918.
- EFNARC, 1999. *European specification for sprayed concrete - GUIDELINES*,
- EN 14651, 2005. Test method for metallic fibre concrete — Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).
- FIB, 2010. Model Code 2010, Comité Euro-International du Beton-Federation International de la Precontrainte, Paris.
- Molins, C., Aguado, A. & Saludes, S., 2009. Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test). *Materials and Structures*, 42(4), pp.415–425. Available at: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-008-9391-9> [Accessed April 8, 2014].
- Pujadas, P. et al., 2013. New Analytical Model To Generalize the Barcelona Test Using Axial Displacement. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(2), pp.259–271. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3846/13923730.2012.756425> [Accessed March 13, 2014].
- Segura-castillo, L. et al., 2016. Correlation of residual strength and fibre orientation for highly anisotropic SFRC. In *9th RILEM Symposium on fibre-reinforced concretes (FRC) – BEFIB 2016, Vancouver, Cannada; 2016*. p. 9.
- Segura-Castillo, L. et al., 2016. Evaluation of the Anisotropy of Fibre Reinforced Sprayed Concrete (In Preparation). *In preparation*.
- Soetens, T. & Matthys, S., 2014. Different methods to model the post-cracking behaviour of hooked-end steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 73, pp.458–471. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.093>.
- Tschegg, E.K., 1986. [Equipment and Appropriate Specimen Shapes for Tests to Measure Fracture Values], Prüfeinrichtung zur Ermittlung von bruchmechanischen Kennwerten sowie hierfür geeignete Prüfkörper.

Muchas gracias.