



2ª JORNADA DE AVANCES EN DISEÑO Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

ASPECTOS NORMATIVOS Y DE DISEÑO DE ELEMENTOS DE HRF

ALBERT DE LA FUENTE ANTEQUERA

Dr. Ingeniero Civil

Profesor del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la UPC

Montevideo, 27 de Julio de 2016

- DEFINICIÓN EHE: *hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y distribuidas aleatoriamente en su masa.*



Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

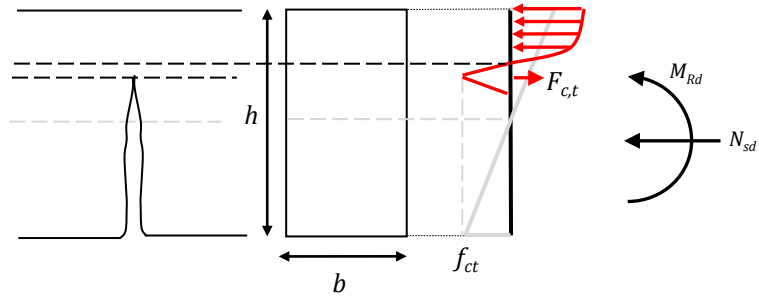
Seguridad

Análisis

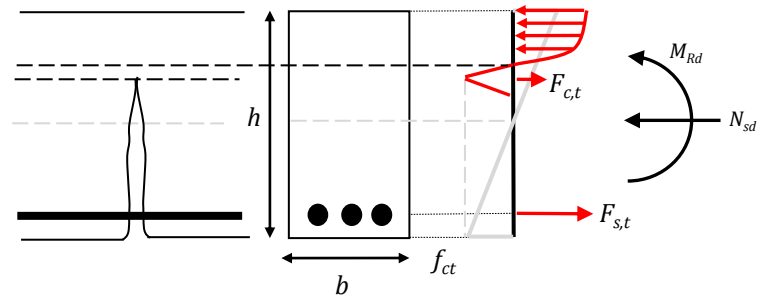
Estado Límite

Conclusiones

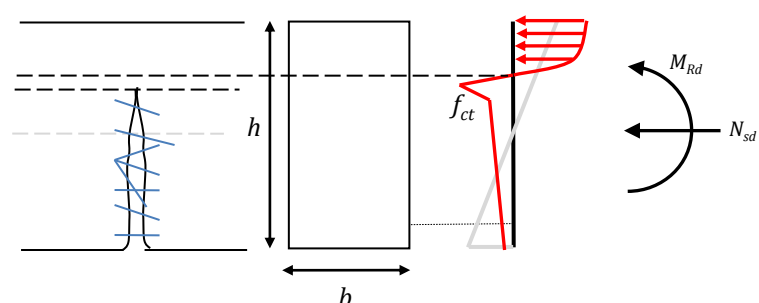
HORMIGÓN EN MASA



HORMIGÓN ARMADO



HORMIGÓN CON FIBRAS

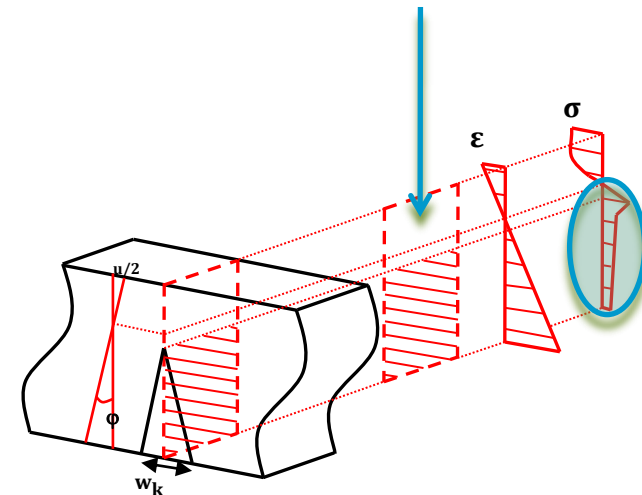


Importante aumento de la resistencia residual (tras la fisuración)

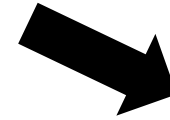
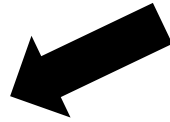
Menor **separación entre fisuras**

Menor ancho **fisuras**

DURABILIDAD



Hasta la fecha aplicaciones con poca responsabilidad estructural o las fibras no se han tenido en cuenta a nivel resistente (o aportación muy reducida de las fibras)



BARRERA TÉCNICA

Desconocimiento de los métodos de fabricación, diseño y control de estructuras de HRF

Falta de métodos de diseño sistemático similares a los existentes en estructuras de HA y/o HP

BARRERA PSICOLÓGICA

La falta de experiencias publicadas o transmitidas a la comunidad técnica

La gran inercia al cambio que presenta el sector de la construcción

Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

Seguridad

Análisis

Estado Límite

Conclusiones

SE EXCLUYEN DE LA DEFINICIÓN DE HRF DE LA EHE – 08:

- Hormigones poliméricos
- Hormigones con fibras distintas a las especificadas en el Anejo 14
- Hormigones en los que la distribución y/o orientación de las fibras ha sido forzada intencionadamente



UNE-EN 1916:2008 Tubos y piezas complementarias de hormigón en masa, hormigón armado y hormigón con fibra de acero.

Introducción

Fibras

Ensayos

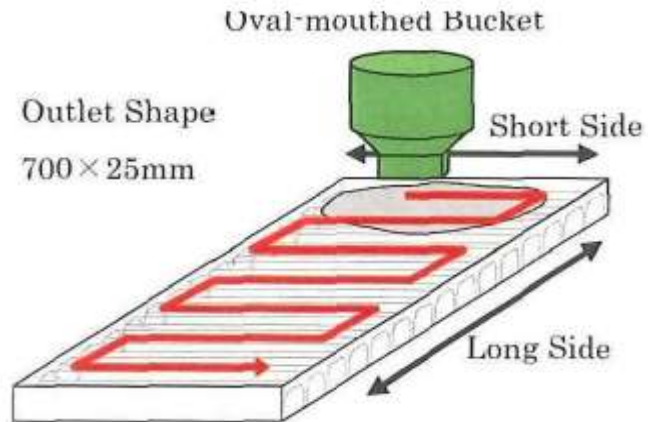
Tipificación

Seguridad

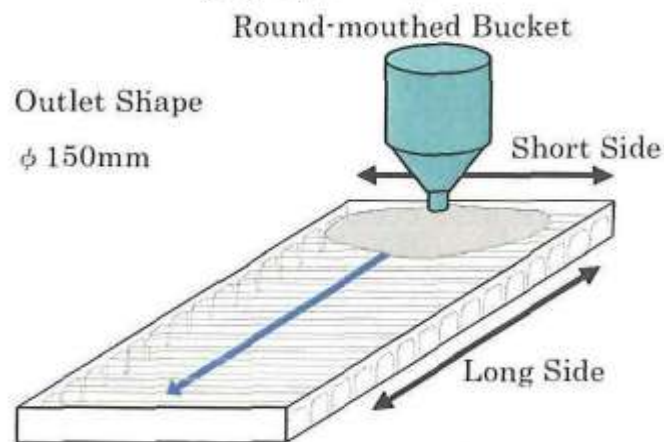
Análisis

Estado Límite

Conclusiones



(a) Specimen 1



(b) Specimen 2



Hormigón con altas cuantías de fibras

Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

Seguridad

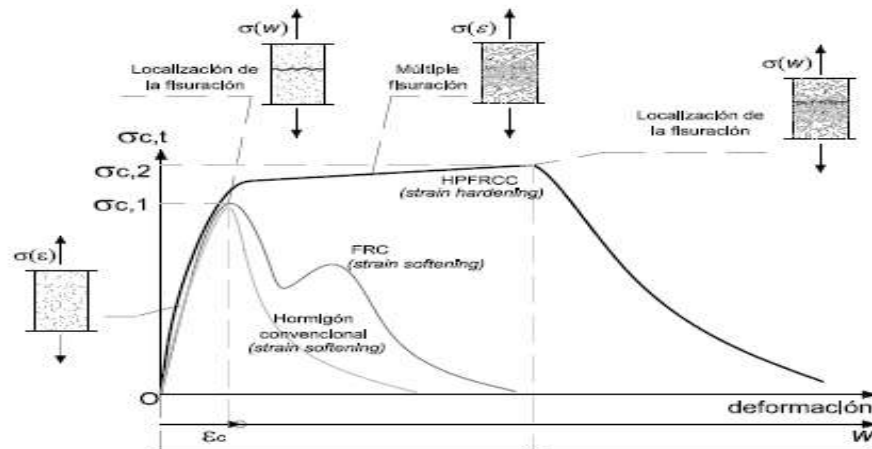
Análisis

Estado Límite

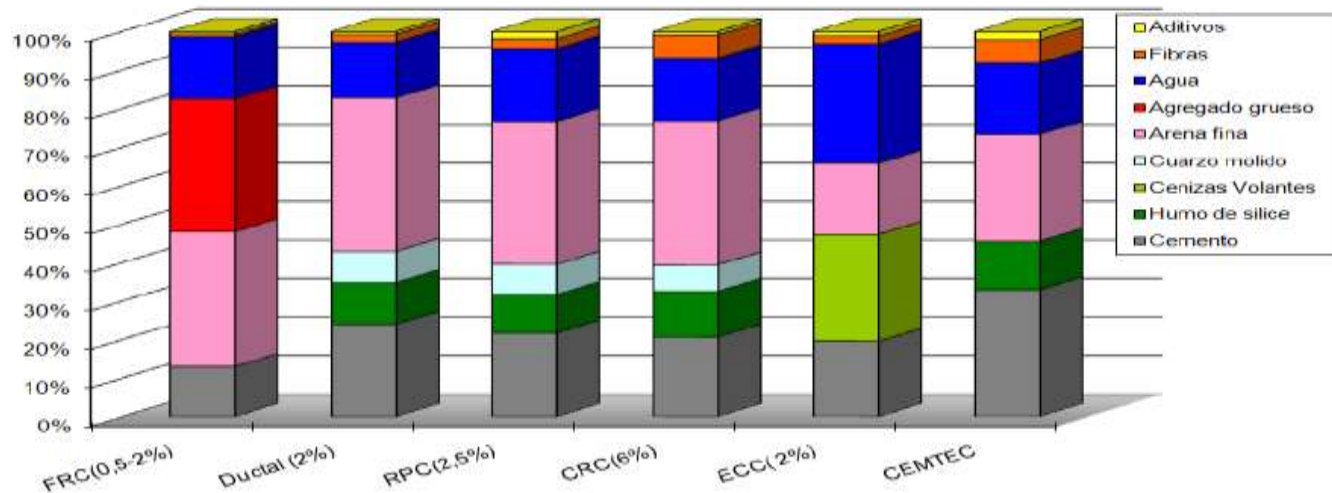
Conclusiones

- Hormigones con dosificación de fibras superior al 1,5% en volumen

(117 kg/m³ de fibras metálicas)



FRC (% Volumen)



Introducción

Fibras

Ensayos

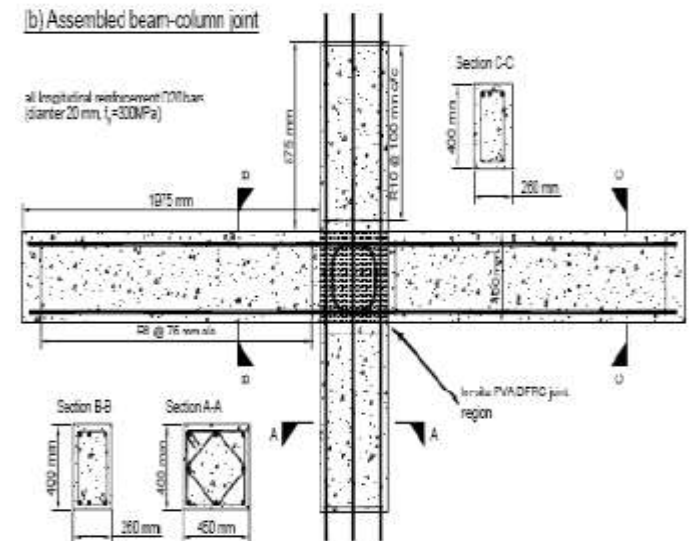
Tipificación

Seguridad

Análisis

Estado Límite

Conclusiones





Hormigón con altas cuantías de fibras

Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

Seguridad

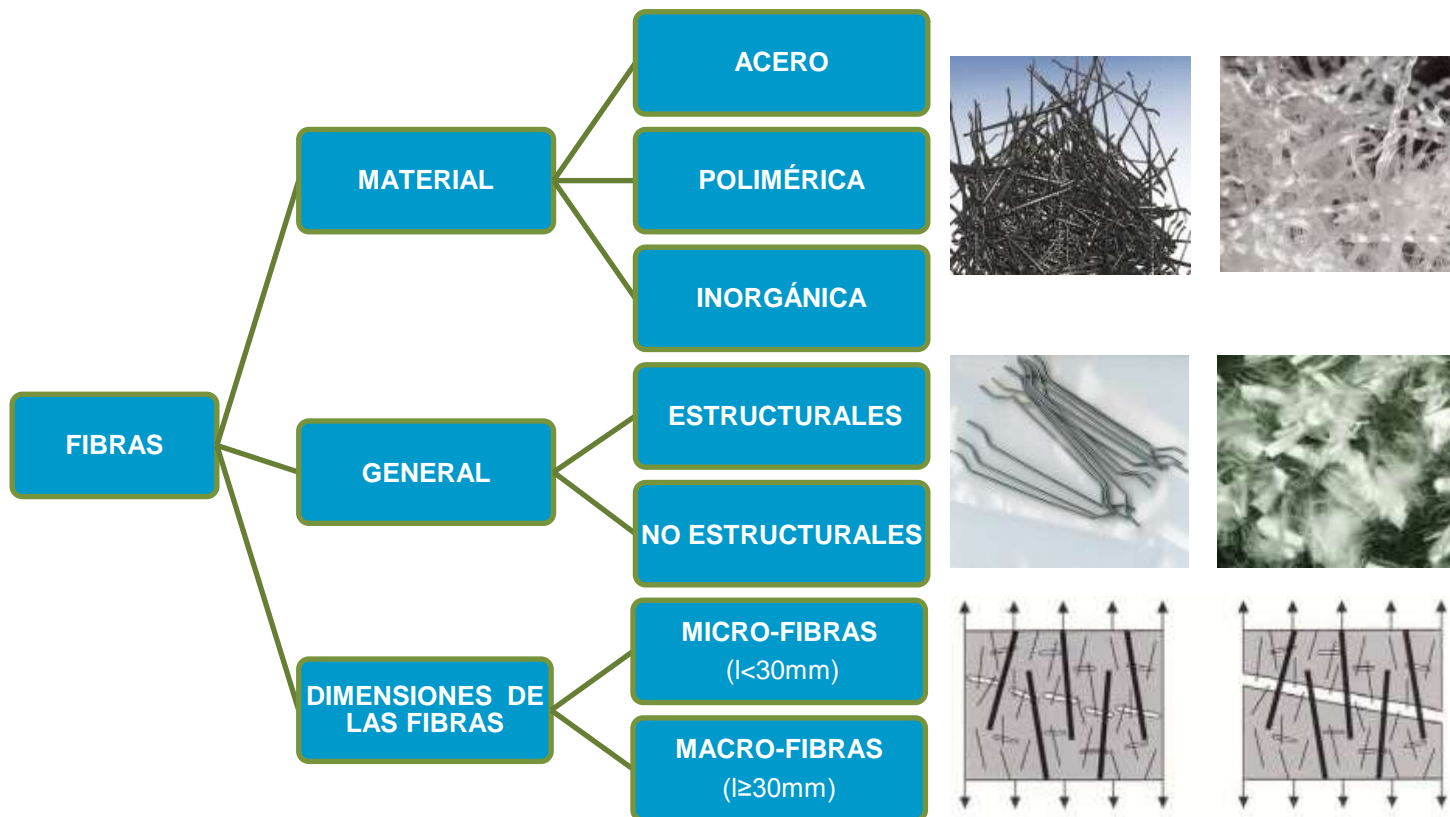
Análisis

Estado Límite

Conclusiones



- TIPOS DE FIBRAS Y CLASIFICACIÓN (anejo 14 EHE 08):



Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

Seguridad

Análisis

Estado Límite

Conclusiones

Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

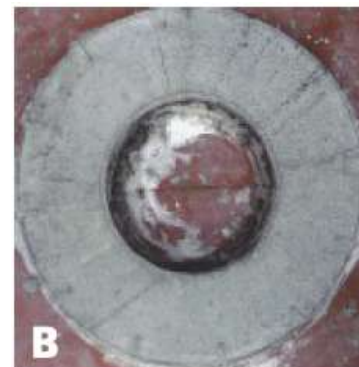
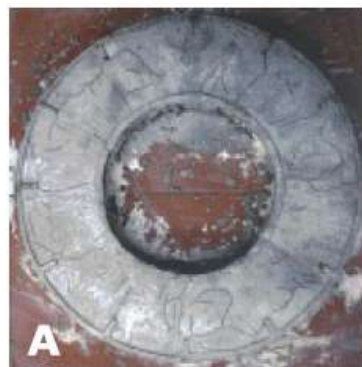
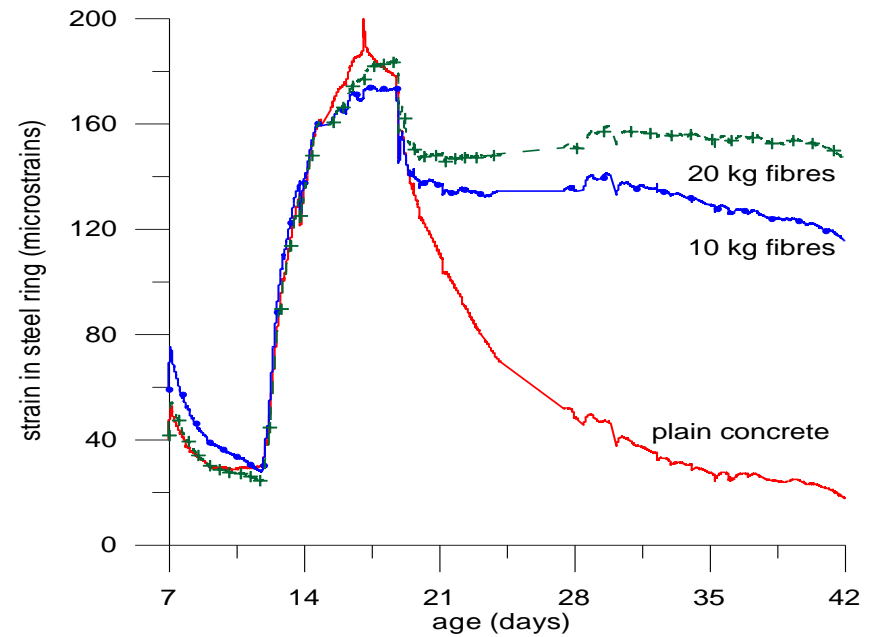
Seguridad

Análisis

Estado Límite

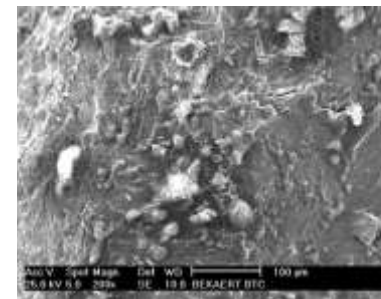
Conclusiones

■ FISURACIÓN DEL HORMIGÓN EN ESTADO PLÁSTICO:



▪ **DURABILIDAD FRENTE A CORROSIÓN:**

- polipropileno → químicamente inertes. NO corrosión



▪ **DURABILIDAD FRENTE AL IMPACTO:**

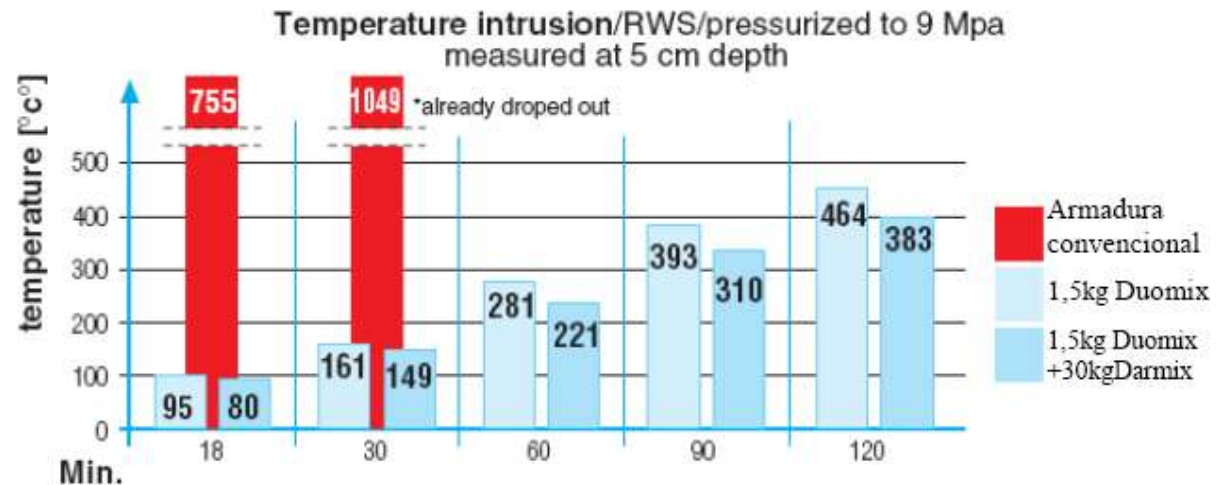
- Fibras → Ductilidad → absorber energía de impacto
- Valor crítico
- Mejores resultados con fibras de acero



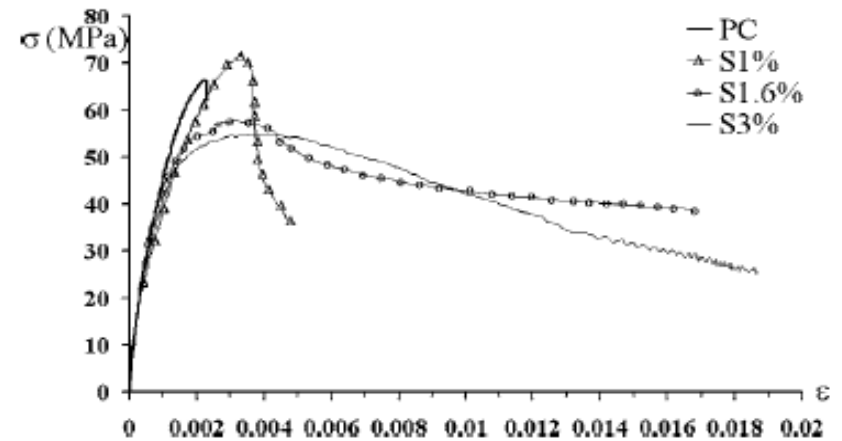
- Durabilidad frente al FUEGO:
 - Micro-fibras POLIPROPILENO → se evita el spalling:



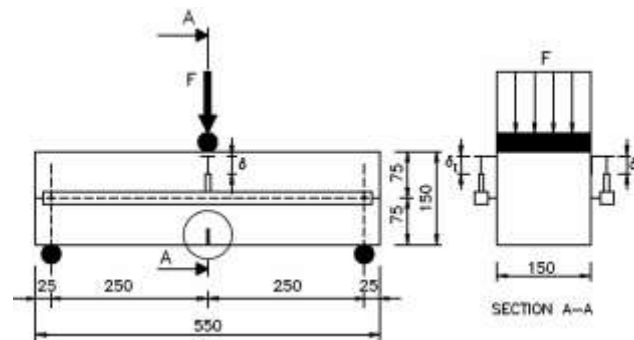
- Las fibras → alcanzan su temperatura de fusión → se descomponen → → red de canales conectados → vía de escape → ↓ presión en los poros.



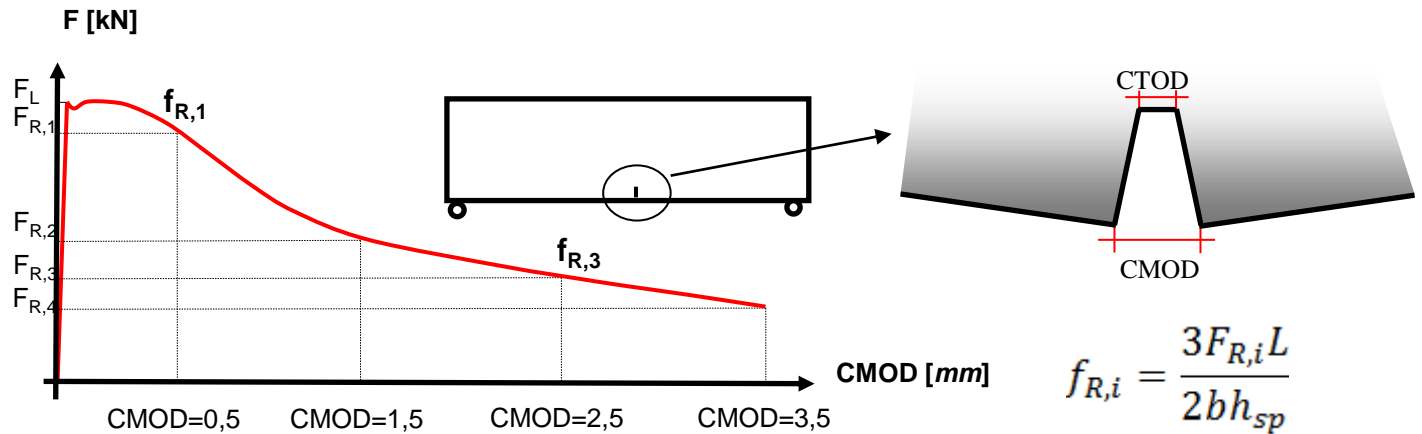
- Resistencia a compresión simple



- Resistencia a flexotracción



UNE-EN 14651:2007+A1:2008 Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).



Resistencia residual a flexotracción

- La resistencia residual del hormigón se refiere a unidad de producto o amasada.
 - Para que sea estructural $f_{R,1,k} \geq 0,4F_L$ y $f_{R,3,k} \geq 0,2F_L$
 - Para garantizar homogeneidad de la amasada (3 probetas): recorrido < 35%
- Si $h < 12,5$ cm o $f_{R,1} > F_L$ adaptar el ensayo al comportamiento real de la estructura .





Resistencia a Flexotracción

Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

Seguridad

Análisis

Estado Límite

Conclusiones



Ensayo	Esquema	Dimensiones (cm)	Peso (kg)	Superficie rotura (cm ²)	Superficie específica de rotura	C.V. (%)
ASTM C-1018		35x10x10	8,40	100	0,0286	15
NBN B 15-238		(60-75) x15x15	40,50	225	0,0133	12-20
Ensayo de viga EFNARC		55x7,5x12,5	12,37	93,8	0,0182	20
Ensayo de viga con carga centrada		55x7,5x12,5	12,37	93,8	0,0182	17
RILEM 3-point bending test		(55-60) x15x15	29,70	187,5	0,0152	10 - 25
Ensayo de panel EFNARC		60x60x10	86,40	2.597,7	0,0722	9
Round determinate panel test		7,5xΦ80	90,65	900	0,0238	6 - 13
Ensayo de doble punzonamiento		15xΦ15	6,36	337,5	0,1274	13



Se deja abierta la posibilidad a emplear otros ensayos distintos al de viga con entalla (Autor de Proyecto o Dirección Facultativa)



Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

Seguridad

Análisis

Estado Límite

Conclusiones



Hormigones designado por propiedades

$T - R / f - R1 - R3 / C / TM - TF / A$

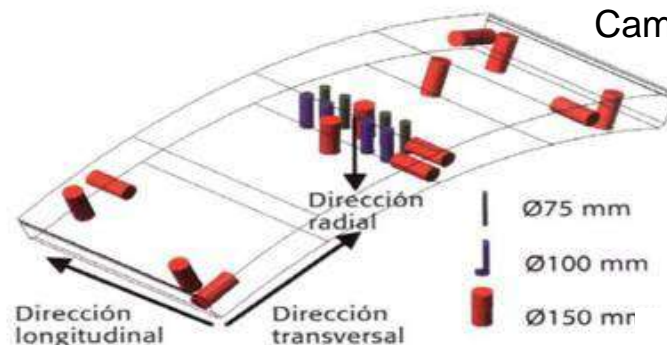
- **T:** HMF Hormigón en Masa reforzado con Fibras; HAF Hormigón Armado reforzado con Fibras; HPF Hormigón Pretensado reforzado con Fibras.
- **R:** Resistencia característica a compresión especificada.
- **f:**
 - Función estructural: R1 y R3 son las resistencias características residuales a flexotracción especificadas $f_{R,1,k}$ y $f_{R,3,k}$ en N/mm². (Emplear serie 1,0 – 1,5 – 2,0 – 2,5 – 3,0 – 3,5 – 4,0 - ...)
 - Otras funciones: CR Control de Retracción, RF Resistencia al fuego y O Otros
- **C:** Consistencia del hormigón.
- **TM:** Tamaño máximo del árido, en mm.
- **TF:** Longitud máxima de la fibras, en mm.
- **A:** Designación del ambiente. (IIIb, IIIc, IV y F deberá justificarse uso de fibras mediante pruebas si se emplean fibras de acero al carbono. En Qa, Qb y Qc deberá justificarse para cualquier tipo de fibra).

$HAF - 30 / 1,5 - 1,0 / B / 12 - 50 / IIb$

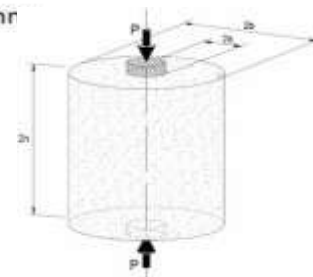
- La densidad del HRF no se modifica de forma sustancial respecto a los HM.
- Para los ELS y ELU se opta por mantener los mismos coeficientes parciales de seguridad para el material (γ_c)

Situaciones de Proyecto	Hormigón (γ_c)	Acero (γ_s)
Persistentes o Transitorias	1.5	1.15

(Para la resistencia a tracción puede estar del lado de la inseguridad)



Camós et al. 2012



1. Ensayo Barcelona sobre testigos extraídos.
2. Análisis estadístico – estructural puso de manifiesto que $\gamma_{ct} = 1,77$.
 γ_{ct} dependerá del material, del tipo de ensayo, de la geometría del elemento estructural, del método de hormigonado....

Análisis estructural. Régimen Fisurado y Rotura

Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

Seguridad

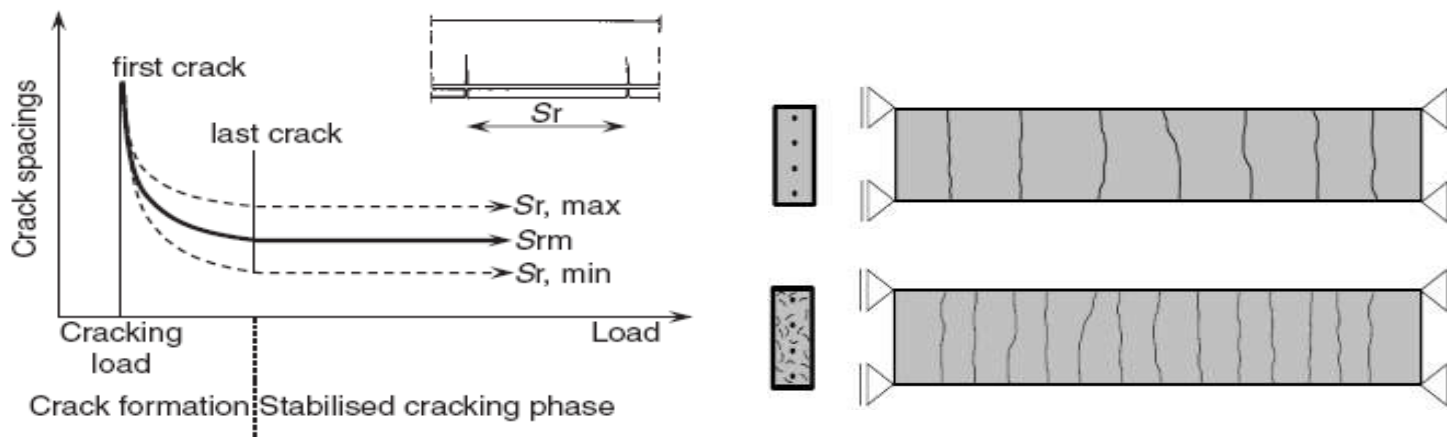
Análisis

Estado Límite

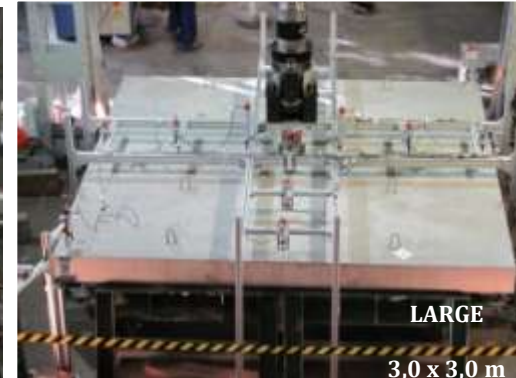
Conclusiones

- La incorporación de fibras en el hormigón modifica fuertemente el comportamiento **no lineal** tanto del material como de la estructura. Se recomienda el análisis no lineal en los casos que el refuerzo con fibras tenga una misión resistente.

- Control del ancho de fisura (más fisuras de menos ancho).



- Aumento de la ductilidad de las secciones críticas (aplicación de los métodos de análisis no lineal con redistribución limitada y análisis plástico del Art. 19)



Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

Seguridad

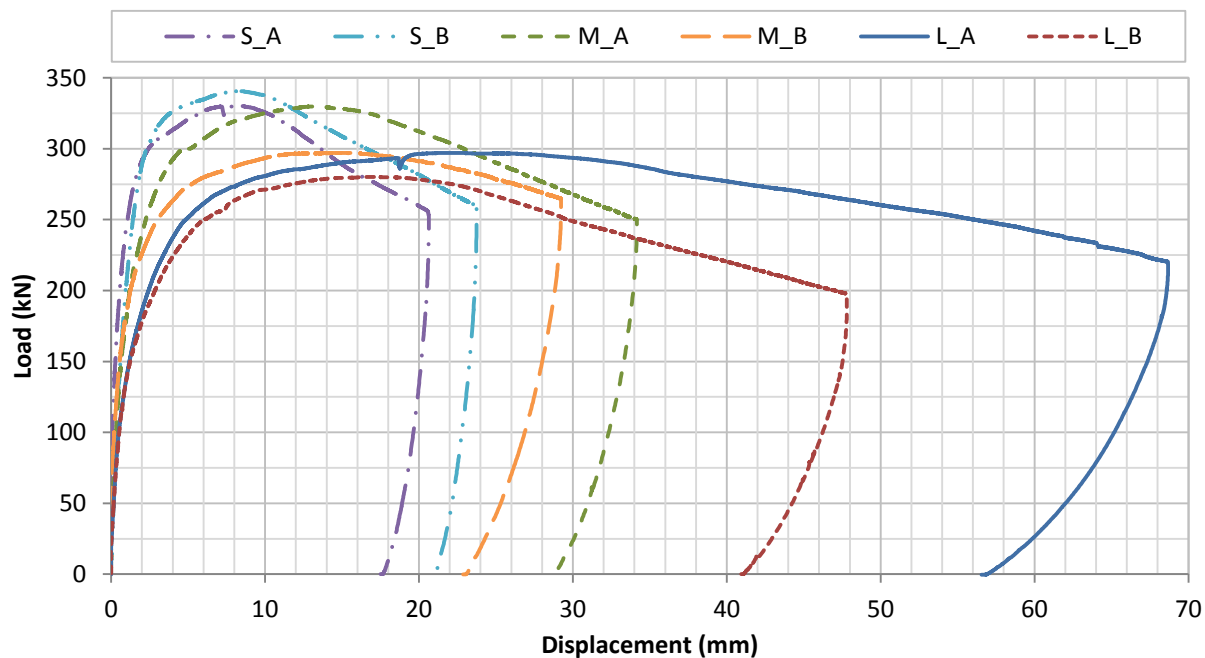
Análisis

Estado Límite

Conclusiones



Aplicación de la teoría de Meyerhoff en ELU si $x_n \leq 0,3d$



Comportamiento Diferido. Fibras Plásticas

- Si se emplean **fibras sintéticas para uso estructural**, el fabricante debe **proporcionar el coeficiente de fluencia del hormigón** obtenido experimentalmente.

Introducción

Fibras

Ensayos

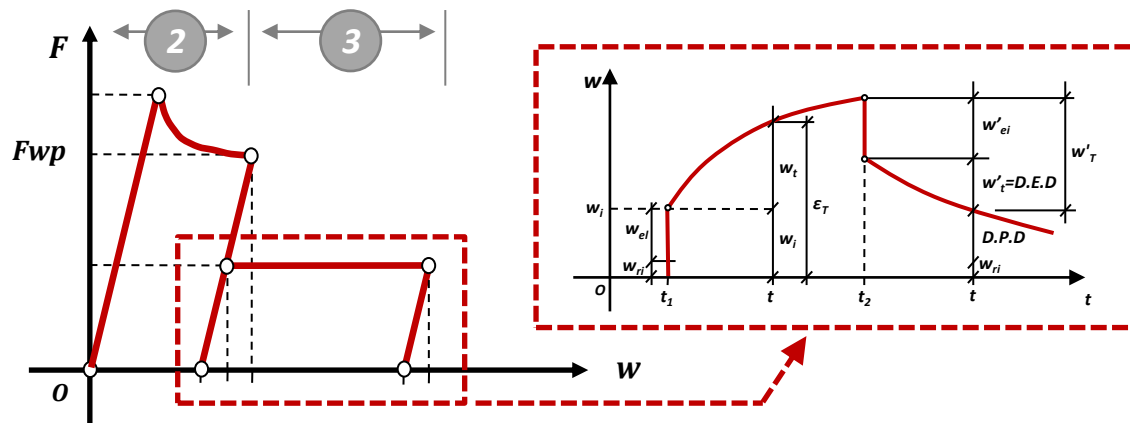
Tipificación

Seguridad

Análisis

Estado Límite

Conclusiones



Comportamiento Diferido. Fibras Plásticas



Fibras

Ensayos

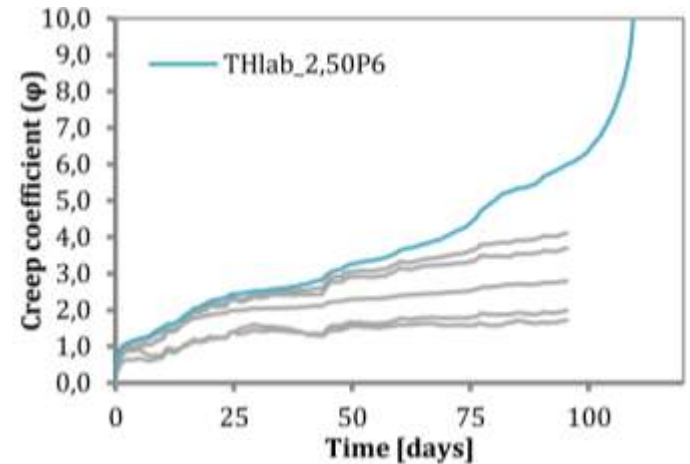
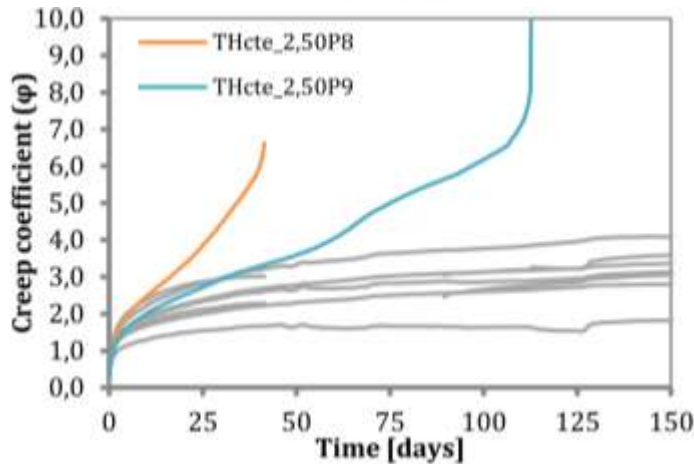
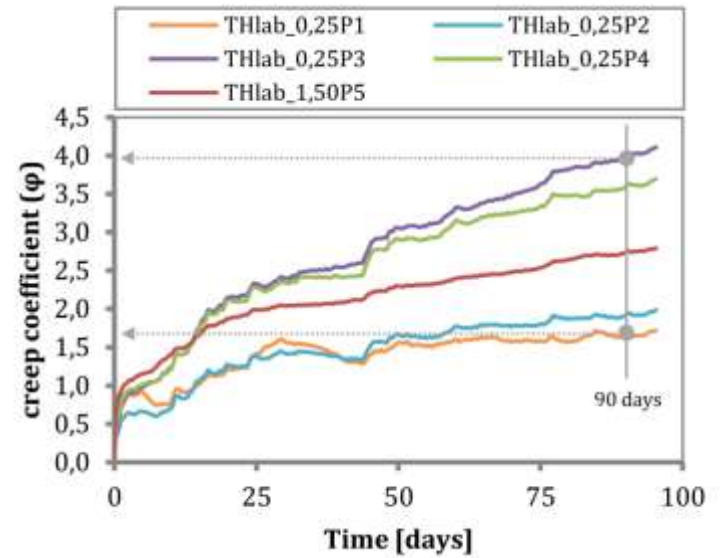
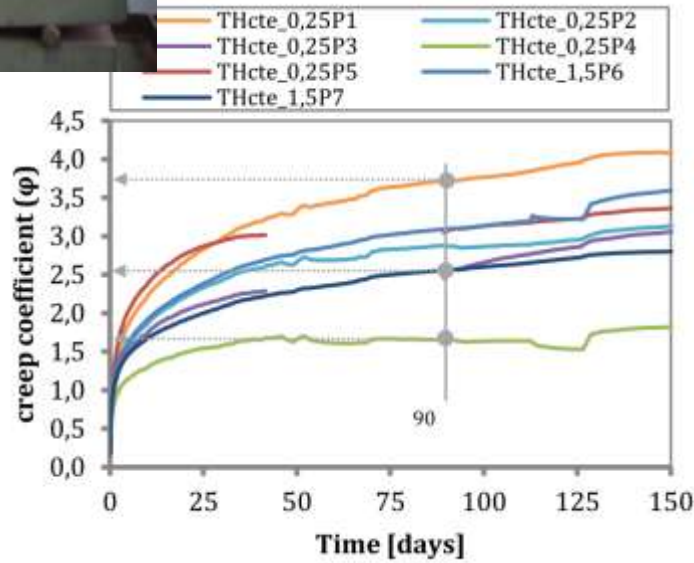
Tipificación

Seguridad

Análisis

Estado Límite

Conclusiones



Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

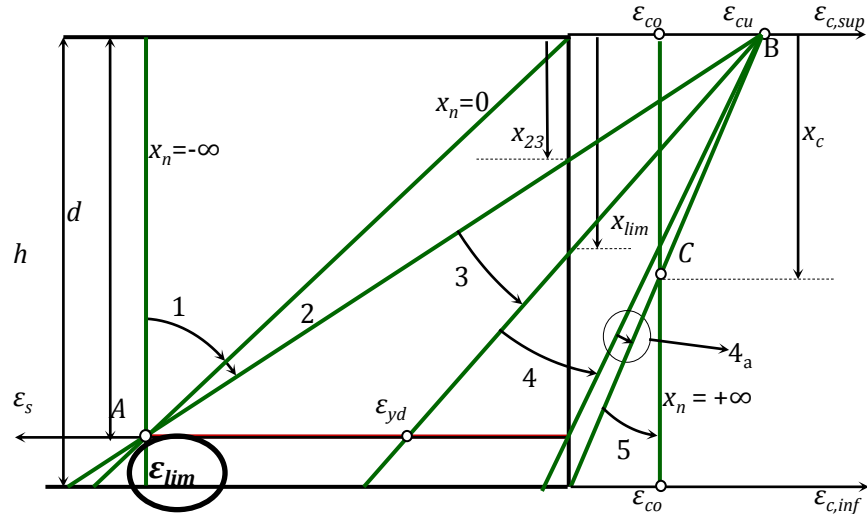
Seguridad

Análisis

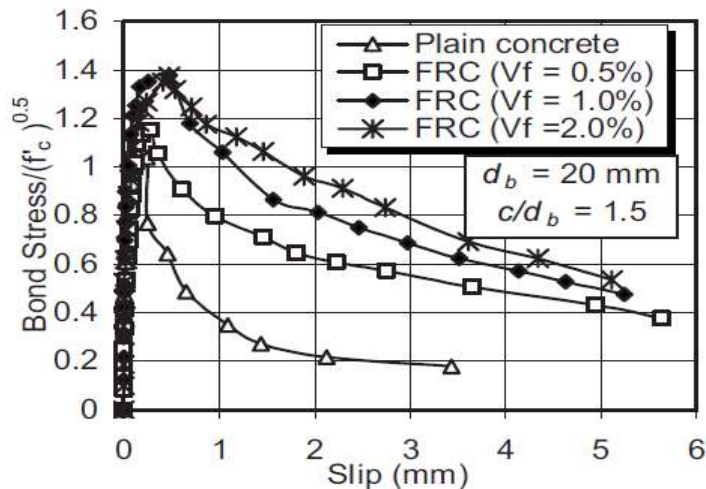
Estado Límite

Conclusiones

• DIAGRAMA DE PIVOTES

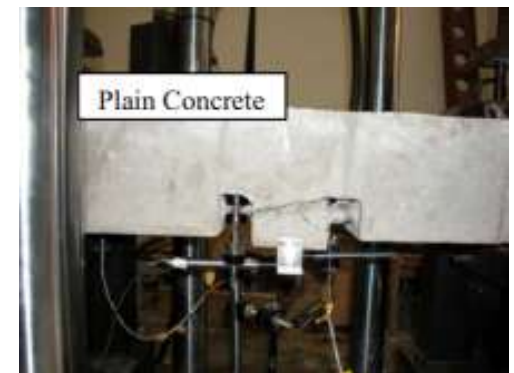


ϵ_{lim} del 20‰ para flexión y 10‰ para tracción



Adherencia perfecta

$$\epsilon_{s,i}(y_{s,i}) = \epsilon_c(y_c)_{y_c=y_{s,i}}$$



Mejora la adherencia de las barras embebidas

Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

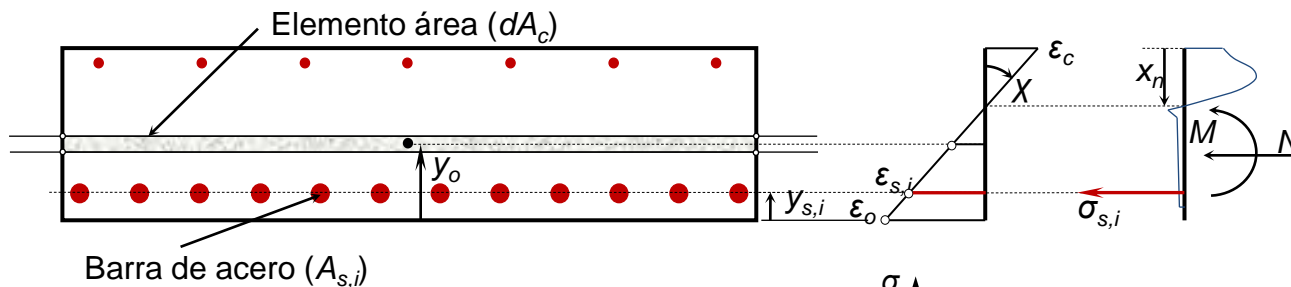
Seguridad

Análisis

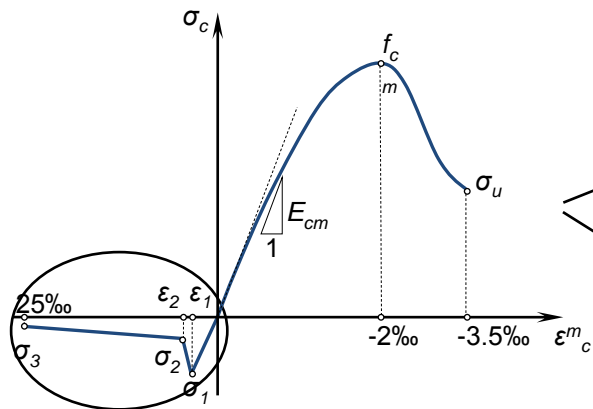
Estado Límite

Conclusiones

Discretización sección transversal

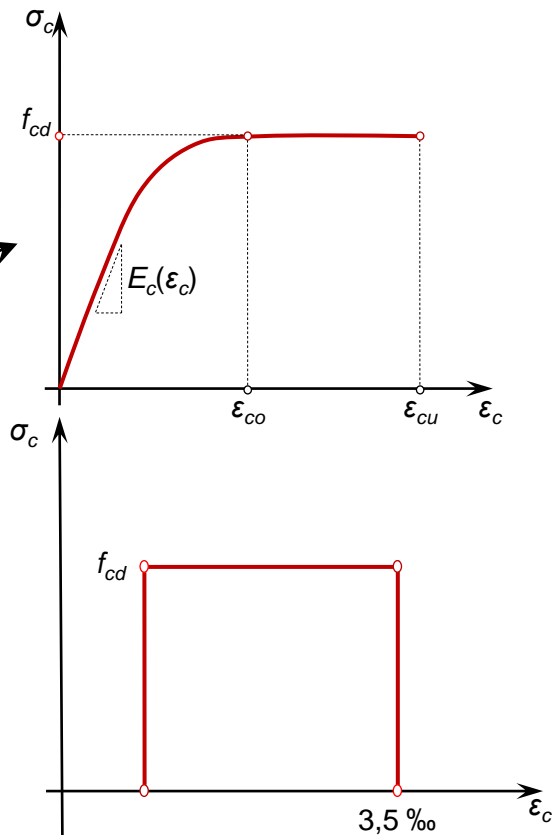


Respuesta uniaxial HRF



Parábola-Rectángulo

Rectangular



$$N_i = \int_{A_c} \sigma_c(\varepsilon_c) dA_c + \sum_{i=1}^{n_{s,i}} \sigma_{s,i}(\varepsilon_{s,i}) A_{s,i}$$

$$M_i = N_i e_o = \int_{A_c} \sigma_c(\varepsilon_c) y_c dA_c + \sum_{i=1}^{n_{s,i}} \sigma_{s,i}(\varepsilon_{s,i}) A_{s,i} y_{s,i}$$

ELU frente a Solicitaciones Normales



Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

Seguridad

Análisis

Estado Límite

Conclusiones



Diagram	Parameters	Characterization test	
	$\sigma_1 = f_{0p,cd,1} = f_{0p,ck,1} \cdot \alpha_d \cdot \alpha_{sp} / \gamma_{cd} \leq f_{0p,cd,1}$ (α_{sp} : coefficient for size effect; α_d : coefficient for longterm strength behaviour) $\epsilon_1 = \epsilon_u = 10\%$	NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = f_{Rt} = f_{R2}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ softening} ; 10\% \text{ hardening}]$	UNI 11039 	CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{ct,td} = 0.33 f_{R2,d}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ bending} ; 10\% \text{ tensile}]$	UNE EN 14651 	EHE
	$\sigma_1 = f_{0p,cd,1} = f_{0p,ck,1} \cdot \alpha_d \cdot \alpha_{sp} / \gamma_{cd}$ $\sigma_2 = f_{0p,cd,1} = f_{0p,ck,1} \cdot \alpha_d \cdot \alpha_{sp} / \gamma_{cd} \leq f_{0p,cd,1}$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = 10\%$	NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = f_{Rt} = 0.45 f_{R2}$ $\sigma_2 = f_{Rt} = k [f_{Rt} - (w_u/w_{i2}) (f_{Rt} - 0.5 f_{R2} + 0.2 f_{R1})]$ $k = [0.7 \text{ pure tension, 1 other cases}]$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = [20\% \text{ softening} ; 10\% \text{ hardening}]$	UNI 11039 	CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{ct,d} = \alpha_c \cdot f_{ct,k} / \gamma_{ct}$ $\sigma_2 = f_{0p,cd,1} = f_{0p,ck,1} \cdot \alpha_d \cdot \alpha_{sp} / \gamma_{cd}$ $\sigma_3 = f_{0p,cd,1} = f_{0p,ck,1} \cdot \alpha_d \cdot \alpha_{sp} / \gamma_{cd} \leq f_{0p,cd,1}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRP} ; \epsilon_2 = \epsilon_1 + 0.1\%$; $\epsilon_3 = \epsilon_u = 10\%$	NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = 0.7 f_{ct,td} (1.6 - d)$ $\sigma_2 = 0.45 \cdot k_N \cdot f_{R1}$ $\sigma_3 = 0.37 \cdot k_N \cdot f_{R4}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRP} ; \epsilon_2 = \epsilon_1 + 0.1\%$; $\epsilon_3 = \epsilon_u = 25\%$	RILEM TEST 	RILEM
	$\sigma_1 = f_{ct,d} = 0.6 f_{ct,td}$ $\sigma_2 = f_{ct,td} = 0.45 f_{R1,d}$ $\sigma_3 = f_{R2,d} = k_1 (0.5 f_{R2,d} - 0.2 f_{R1,d})$ $\epsilon_1 = 0.1 + 1000 \cdot f_{ct,d} / E_{c,d}$ $\epsilon_2 = 2.5 / l_{cs}$ (l_{cs} : characteristic length) $\epsilon_u = [20\% \text{ bending} ; 10\% \text{ pure tension}]$	UNE EN 14651 	EHE
	$f_{ct,td} = 0.30 (f_{ck})^{2/3}$ $f_{Rt} = 0.45 f_{R1}$ $f_{Rt} = k [f_{Rt} - (w_u/CMOD_2) (f_{Rt} - 0.5 f_{R2} + 0.2 f_{R1})]$ $E_{SL,S} = CMOD_1 / l_{cs}$ $E_{SL,U} = w_u / l_{cs} = \min(\epsilon_{Fu}, 2.5 / l_{cs} = 2.5 / \gamma)$ $\epsilon_u = [20\% \text{ softening} ; 10\% \text{ hardening}]$	UNE EN 14651 	MC



Alemania
DBV (2001)



RILEM
(2003)



Italia
CNR-DT (2006)



España
EHE-08 (2008)



FIB
MC (2010)



ELU frente a Solicitaciones Normales

Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

Seguridad

Análisis

Estado Límite

Conclusiones

Diagram	Parameters	Characterization test		
	$\sigma_1 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctd,II} \cdot \alpha_d^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{cf} \leq f_{eq,ctd,I}$ (α_{sys} : coefficient for size effect; α_d^f : coefficient for longterm strength behaviour) $\epsilon_1 = \epsilon_u = 10\text{‰}$	NBN B 15-238 	NBN B 15-238	DBV
	$\sigma_1 = f_{Rt} = f_{eq,2}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\text{‰ softening}; 10\text{‰ hardening}]$	UNI 11039 	UNI 11039	CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{ct,Rd} = 0.33 f_{R,3,d}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\text{‰ bending}; 10\text{‰ tensile}]$	UNE EN 14651 	UNE EN 14651	EHE
	$\sigma_1 = f_{Rt} = f_{R3}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\text{‰ softening}; 10\text{‰ hardening}]$	UNE EN 14651 	UNE EN 14651	MC
	$\epsilon_u = [20\text{‰ bending}; 10\text{‰ pure tension}]$	UNE EN 14651 	UNE EN 14651	MC
	$f_{ctm} = 0.30 (f_{ck})^{2/3}$ $f_{Rt} = 0.45 f_{R3}$ $f_{Rt} = k [f_{Rt} - (w_u / CMOD_0) (f_{Rt} - 0.5 f_{R3} + 0.2 f_{Rt})]$ $\epsilon_{SL,5} = CMOD_1 / l_{cr}$ $\epsilon_{SL,U} = w_u / l_{cr} = \min(\epsilon_{R,U}, 2.5 / l_{cr} = 2.5 / y)$ $\epsilon_{R,U} = [20\text{‰ softening}; 10\text{‰ hardening}]$	UNE EN 14651 	UNE EN 14651	MC



Introducción

Fibras

Ensayos

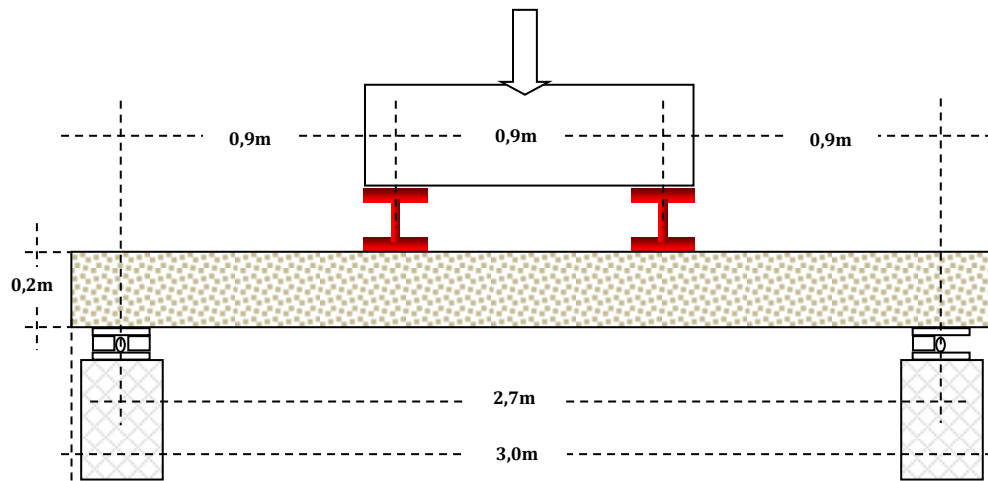
Tipificación

Seguridad

Análisis

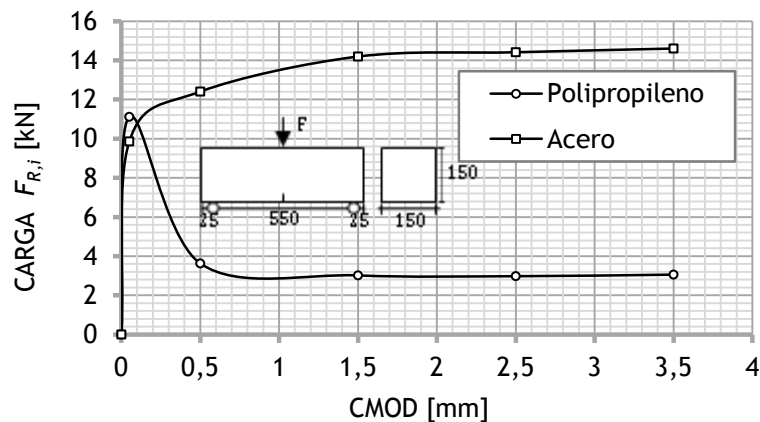
Estado Límite

Conclusiones



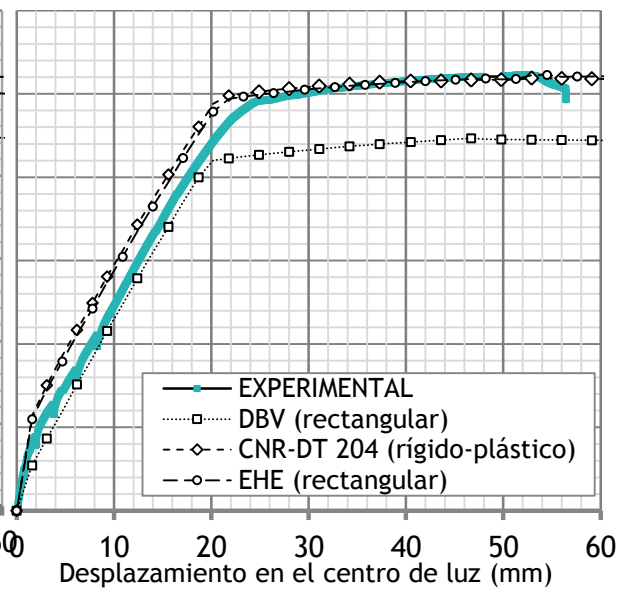
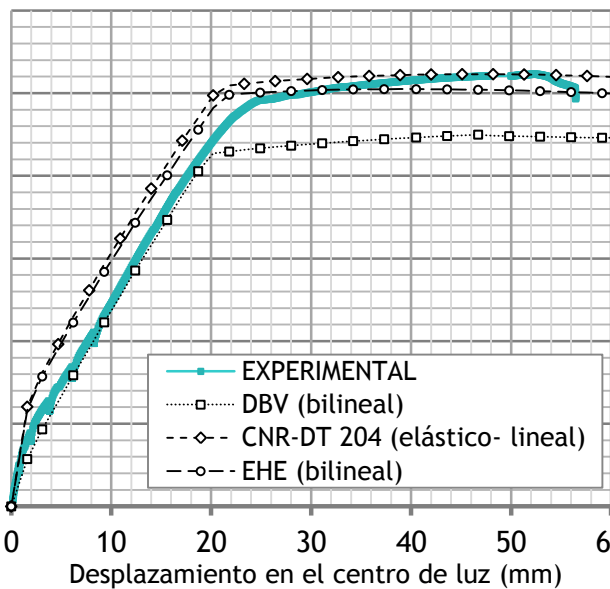
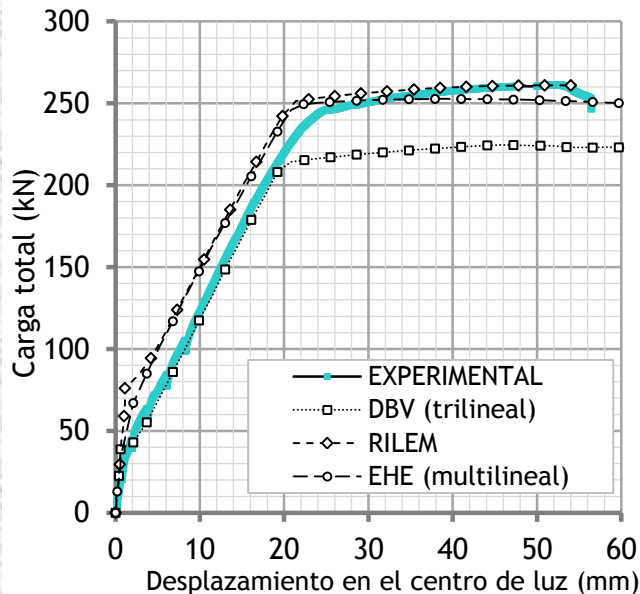
Pujadas (2008) - Barras + Fibras de polipropileno
 Blanco (2008) - Barras + Fibras metálicas

18 losas





ENSAYO A FLEXIÓN. Fibras metálicas



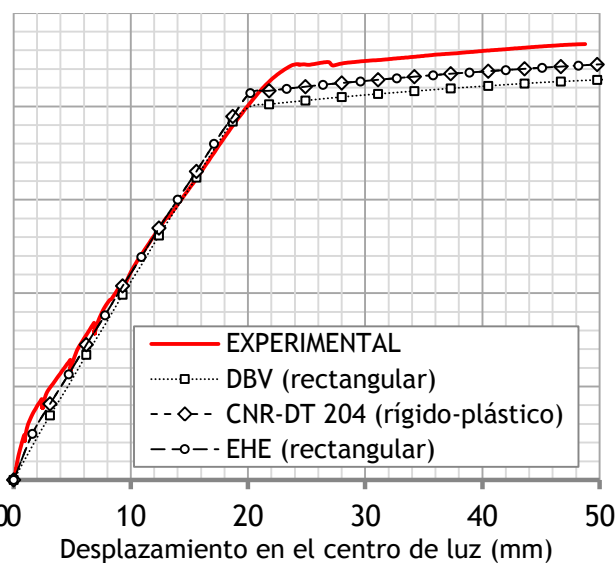
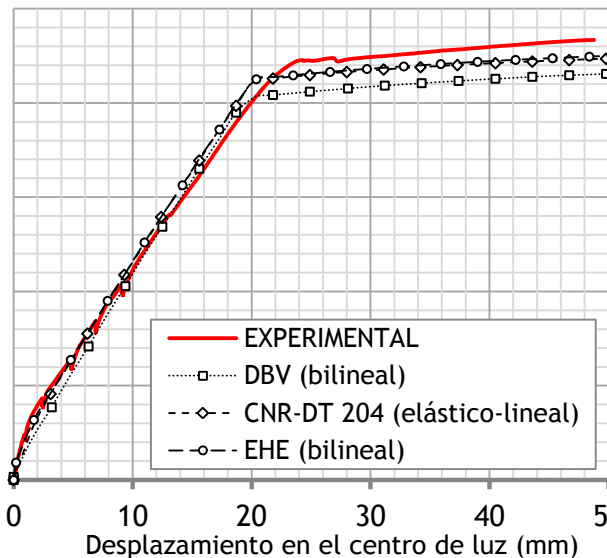
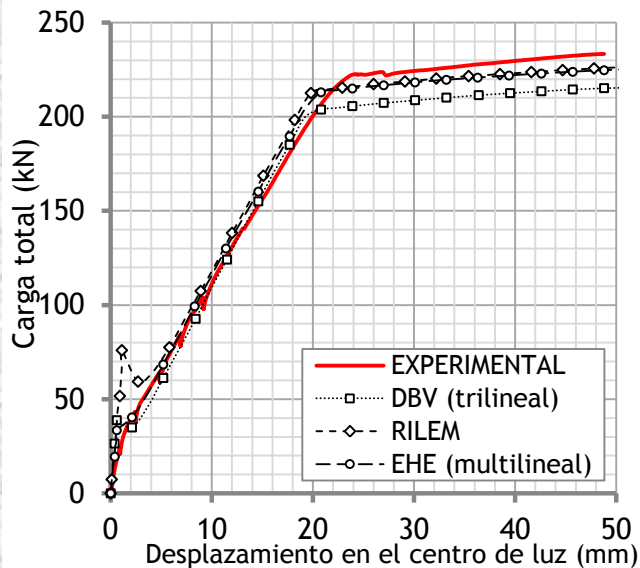
Análisis

Estado Límite

Conclusiones

Modelos		Flecha = 10 mm	Flecha = 20 mm	Flecha = 40 mm
Datos Experimentales		123,4	220,3	257,7
DBV	Trilineal	118,4	211,1	223,1
	Bilineal	118,1	212,0	223,0
	Rectangular	114,6	208,7	220,9
RILEM	Trilineal	150,2	243,5	259,8
CNR-DT 204	Elástico-lineal	153,2	246,7	261,1
	Rígido-plástico	147,1	242,0	257,7
EHE	Multilineal	148,5	239,3	257,7
	Bilineal	148,3	239,2	252,4
	Rectangular	143,5	237,3	257,0





Análisis

Estado Límite

Conclusiones

Modelos		Flecha = 10 mm	Flecha = 20 mm	Flecha = 40 mm	
DBV	Experimental	111,0	200,0	229,5	
	Trilineal	109,3	201,7	212,7	
	Bilineal	109,0	201,6	212,6	
	Rectangular	106,0	198,7	210,7	
RILEM		Trilineal	118,3	212,8	223,3
CNR-DT 204	Elástico-lineal	115,4	209,9	220,9	
	Rígido-plástico	110,5	205,3	218,6	
EHE	Trilineal	115,8	208,4	222,0	
	Bilineal	115,6	209,5	222,0	4%
	Rectangular	110,4	205,3	218,5	6%

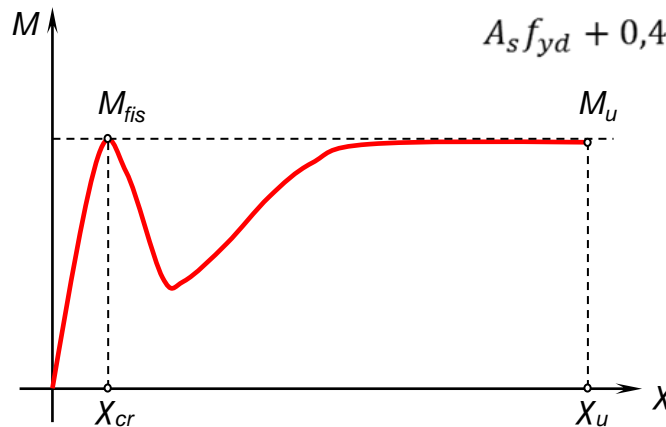
- Flexión simple o compuesta (mecánica)

- General

$$A_p f_{pd} \frac{d_p}{d_s} + A_s f_{yd} + \frac{z_f}{z} A_{ct} f_{ctR,d} > \frac{W_1}{z} f_{ctm} + \frac{P}{z} \left(\frac{W_1}{A} + e \right)$$

- Secciones rectangulares

$$A_s f_{yd} + 0,4 A_c f_{ctR,d} > 0,04 A_c f_{cd}$$



Condición de rotura dúctil estricta

$$M_{fis} - M_u (C_f) = 0$$

Ecuación no lineal

Recomendación EHE
Cuantía mínima de 20 kg/m³

LADO DE LA SEGURIDAD

- Tracción simple o compuesta (mecánica)

$$A_p f_{pd} + A_s f_{yd} + A_c f_{ctR,d} > 0,20 A_c f_{cd}$$

- Geométrica mínima

Las cuantías de la tabla 42.3.5 puede reducirse $A_c f_{ctR,d}$

Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

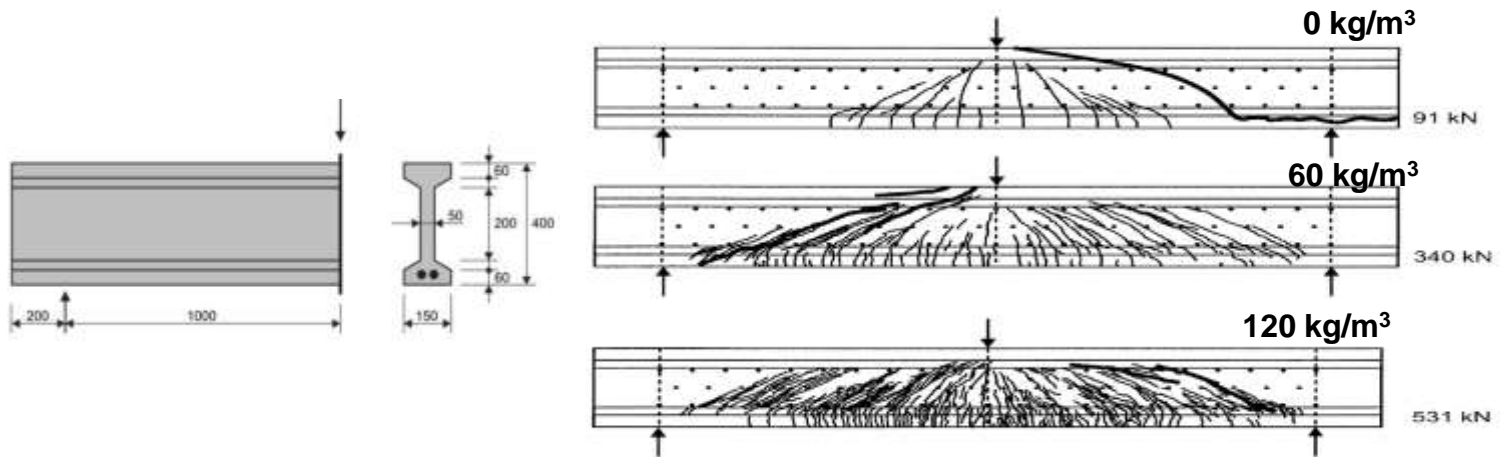
Seguridad

Análisis

Estado Límite

Conclusiones

- Las **fibras con función estructural contribuyen** de forma significativa **a resistir el esfuerzo a cortante**.
- En rotura, la fuerza de cortante transferida por el alma debido al efecto **engranaje de los áridos se incrementa**, ya que ésta depende de la **apertura de fisura** y con el **HRF el tamaño de la fisura se ve claramente reducido**.



- Normas europeas y el código ACI **EVALUACIÓN CORTANTE ÚLTIMO** $V_{u,2}$:

$$V_{u2} = V_{cu} + V_{su} + V_{fu}$$

$$V_{fu} = 0,7\xi\tau_{fd}b_0d$$

$$\tau_{fd} = 0,5f_{ctR,d}$$

$$V_{su,min} + V_{fu} > \frac{f_{ctR,d}}{7,5} b_0d$$

V_{cu} = contribución del hormigón

V_{su} = armadura de cortante

V_{fu} = contribución de las fibras de acero

SE PUEDE ELIMINAR LA ARMADURA DE CORTANTE



Introducción

Fibras

Ensayos

Tipificación

Seguridad

Análisis

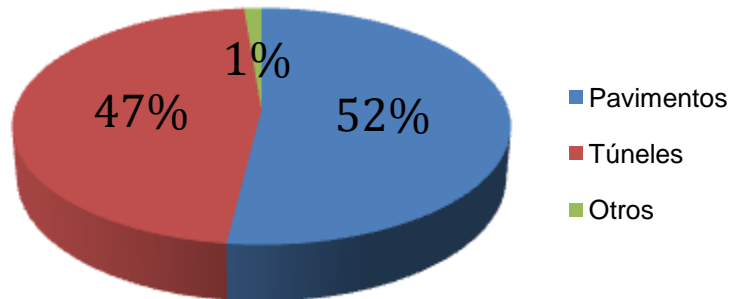
Estado Límite

Conclusiones

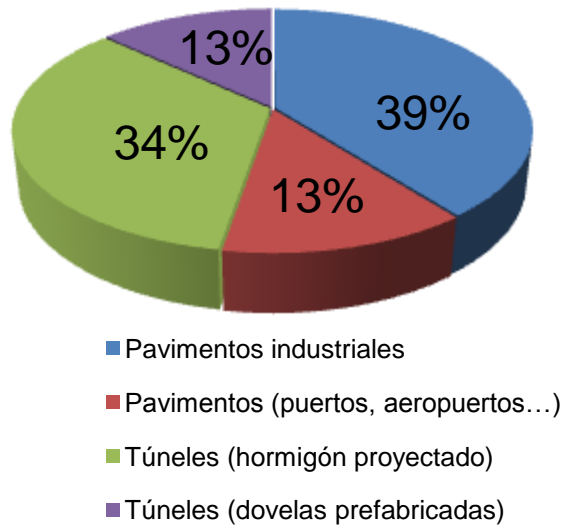


Conclusiones Generales

- Existe un apoyo sólido normativo nacional e internacional para el diseño, ejecución y control de estructural de HRF.
- Las normativas europeas convergen todas hacia una misma dirección y no hay aspectos discordantes entre ellas.
- El Anejo 14 de la Instrucción deja está planteado desde un punto de vista que no coacciona la libertad de proyectista (siempre que se justifique técnica y/o experimentalmente las propuestas) y está abierto a la innovación, mejoras y aportaciones.
- Quedan muchos aspectos en los que avanzar e incorporar en los códigos normativos:
 - Coeficientes de seguridad adaptados a la geometría, método de hormigonado y tipo de fibra.
 - Evaluación de la orientación y distribución de fibras y su inclusión a nivel de cálculo.
 - Aspectos de control.



(38 toneladas de fibras de acero)

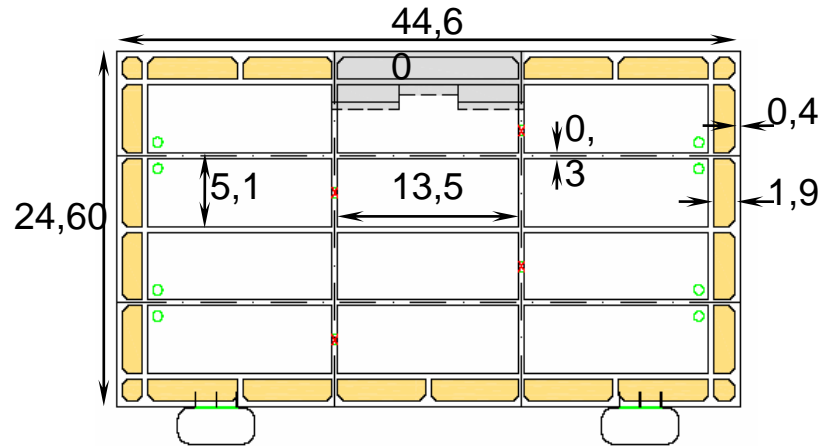


- ✓ Aumento de la resistencia a flexotracción
- ✓ Mejora ductilidad después de la fisuración
- ✓ Aumento de la resistencia al impacto y a la fatiga
- ✓ Disminución del descascarillamiento
- ✓ Mejoras frente a la abrasión
- ✓ Aumento de las resistencias al deslizamiento y a la rodadura





Definición Geométrica



- ✓ **Muros Exteriores 40cms**
- ✓ **Losa Superior Compuesta** (9cms Prefabricados y 31cms *in situ*)
- ✓ **Losa Inferior *in situ* de 35cms**

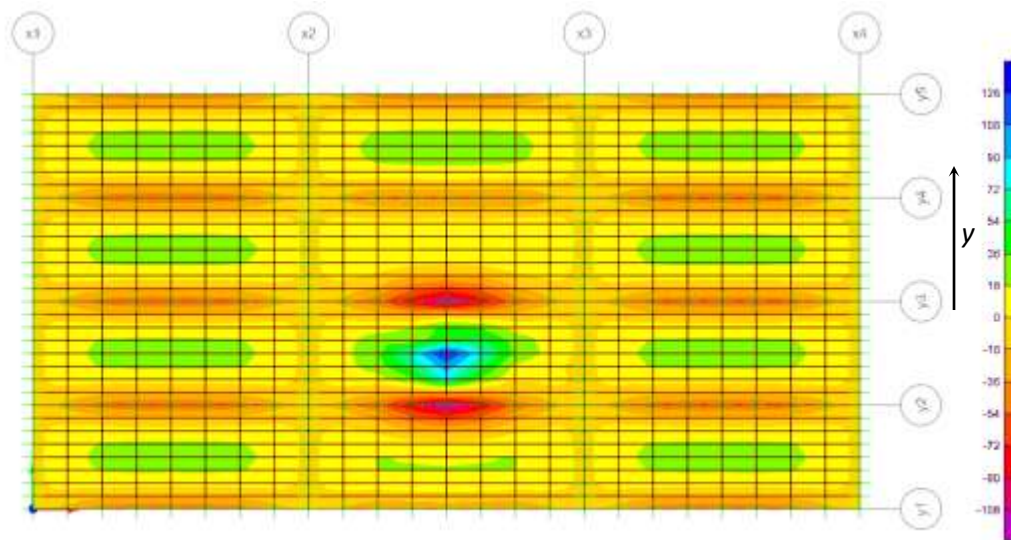


Cargas Consideradas

Peso específico del hormigón*	25 kN/m ³
Cargas muertas	2 kN/m ²
Sobrecarga uniforme	4 kN/m ²
Vehículo Pesado	650 kN

Modelización Numérica

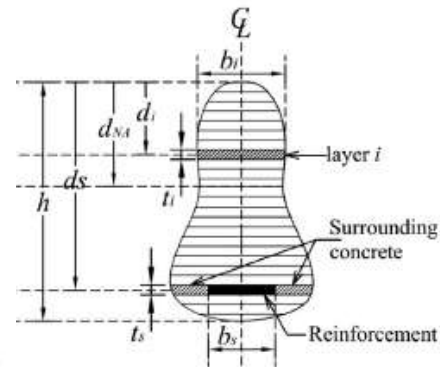
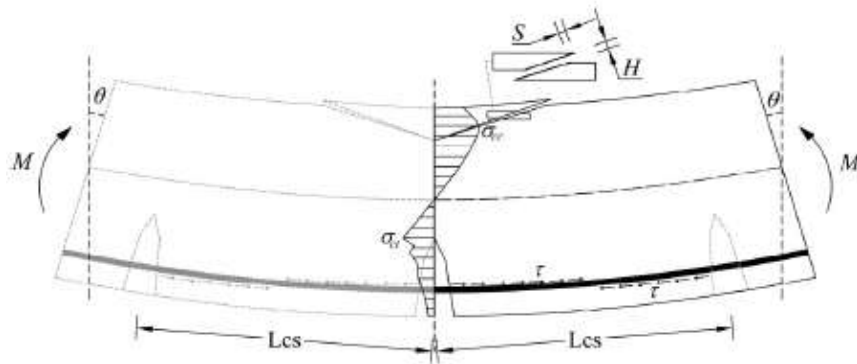
- ✓ **Cálculo Elástico Lineal** con SAP2000 V11.0 non linear version



M_{yy} Losa Superior

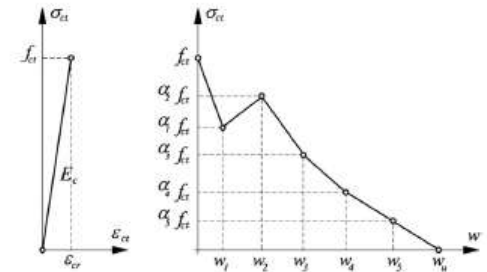
$M_{max} : 130\text{mkN/m}$ y $M_{min} : -121\text{mkN/m}$

Modelo de análisis seccional



Estrategia

Cuantía mínima mecánica Acero Tradicional + X Fibras



	Losa Superior	Losa Inferior	Muro Perimetral	Muro Interior
Armadura Tradicional	Φ16/33	Φ16/33	Φ16/33	Φ16/33
Fibras	15	30	15	20
Ahorro Tradicional (%)	25,3	52,2	47,3	40,0
Ahorro Total (%)	5,1	32,3	30,7	20,9

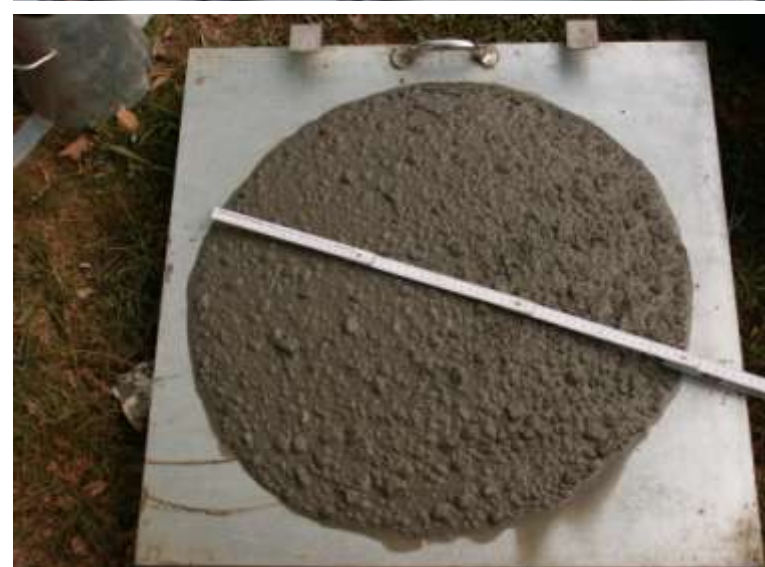
Reducción media del 55% de la armadura pasiva



Eliminación de la armadura de positivos y negativos

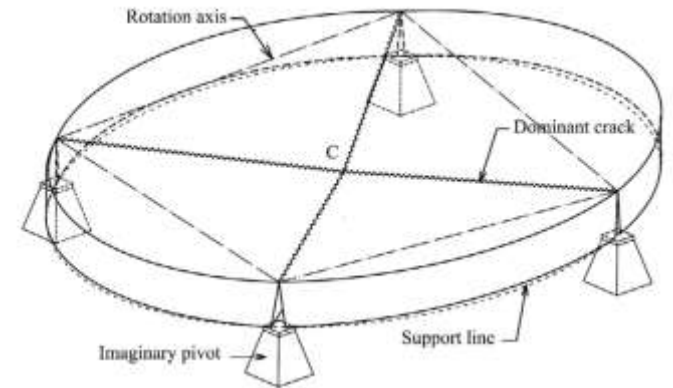
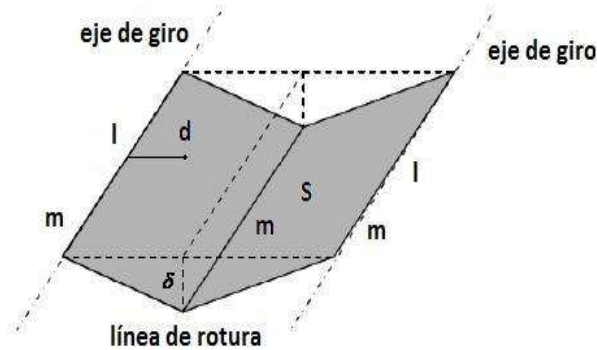
Mejora de tiempos de construcción y rendimientos

Altas cuantías de fibras ($C_f \geq 80 \text{ kg/m}^3$)



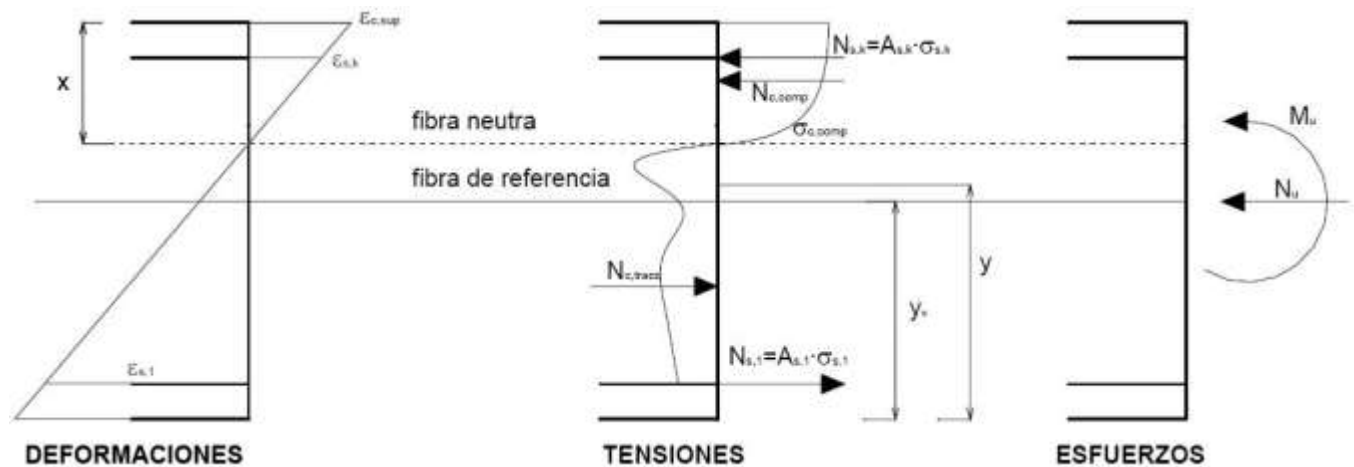


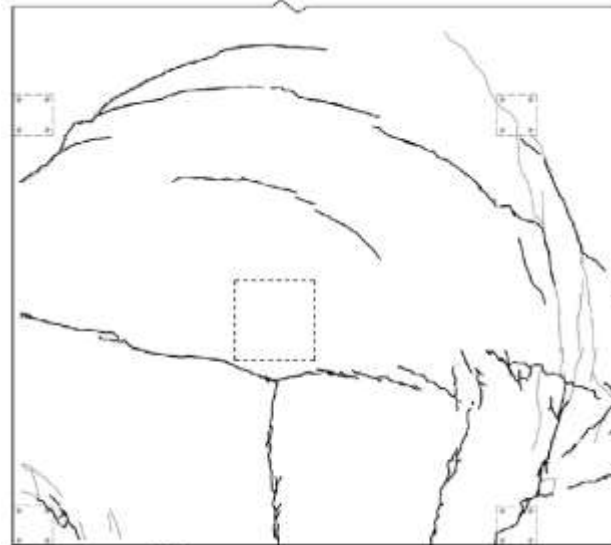
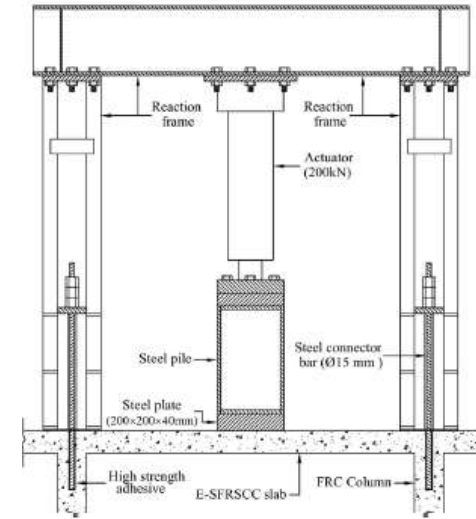
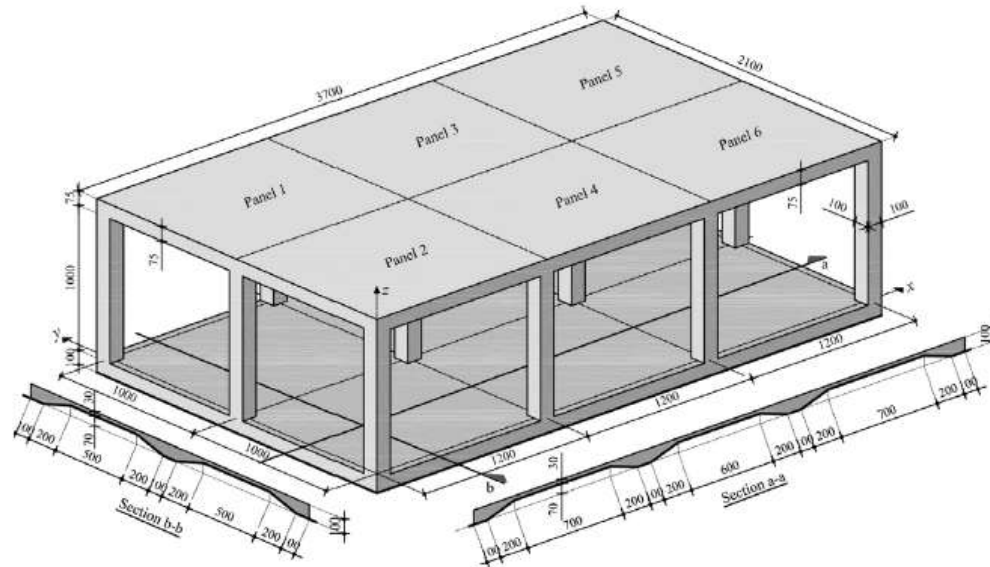




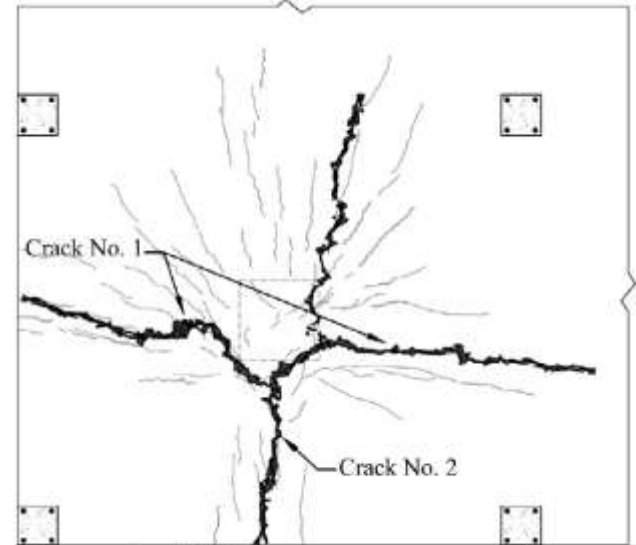
$$W_{ext} = W_{int} \Rightarrow q \int_S \delta dS = \sum_{i=1}^{i=n} m \theta_{LRi} \Rightarrow q?$$

YIELD LINE THEORY
JOHANSEN
 +
SECTIONAL
ANALYSIS





Top surface of slab



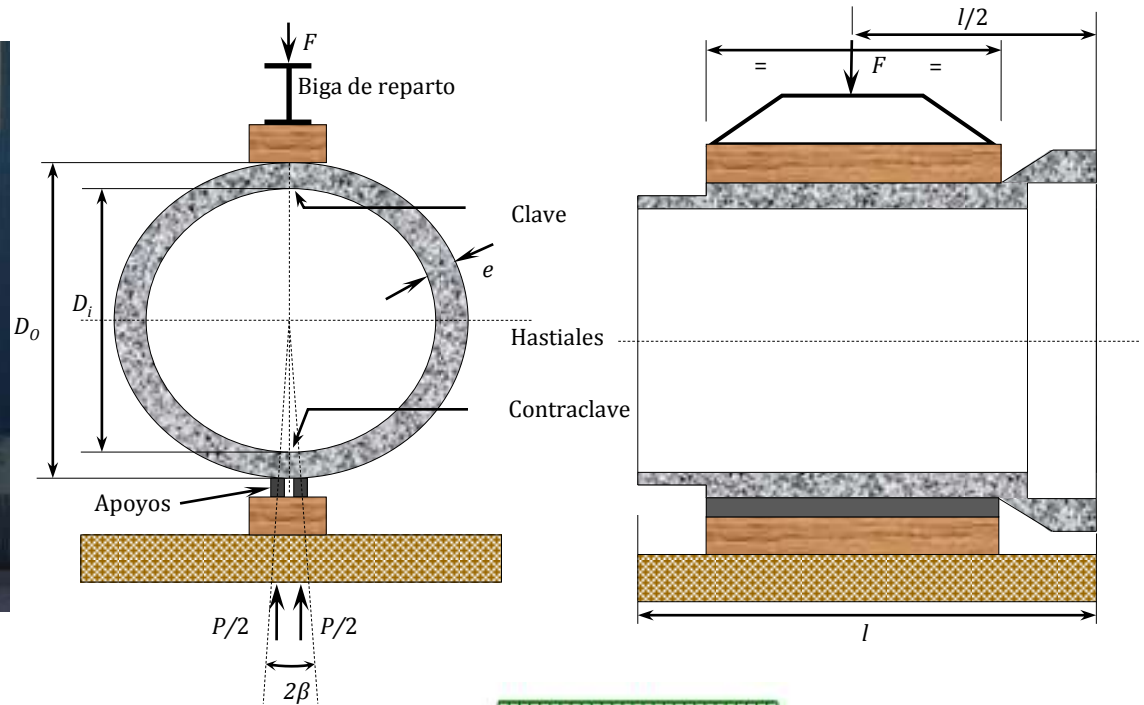
Bottom surface of slab



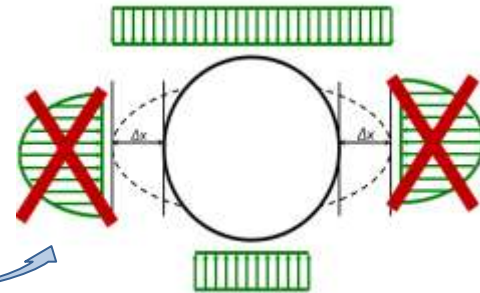
ACI 544.6R-15. Report on design and construction of SFRC elevated slabs



UNE-EN 1916:2002 (NBR 8890:2007)



- **Sistemático y Fiable** (Lambrechts, 2007)
- **Ideal para tubos Rígidos** (Heger, 1963)



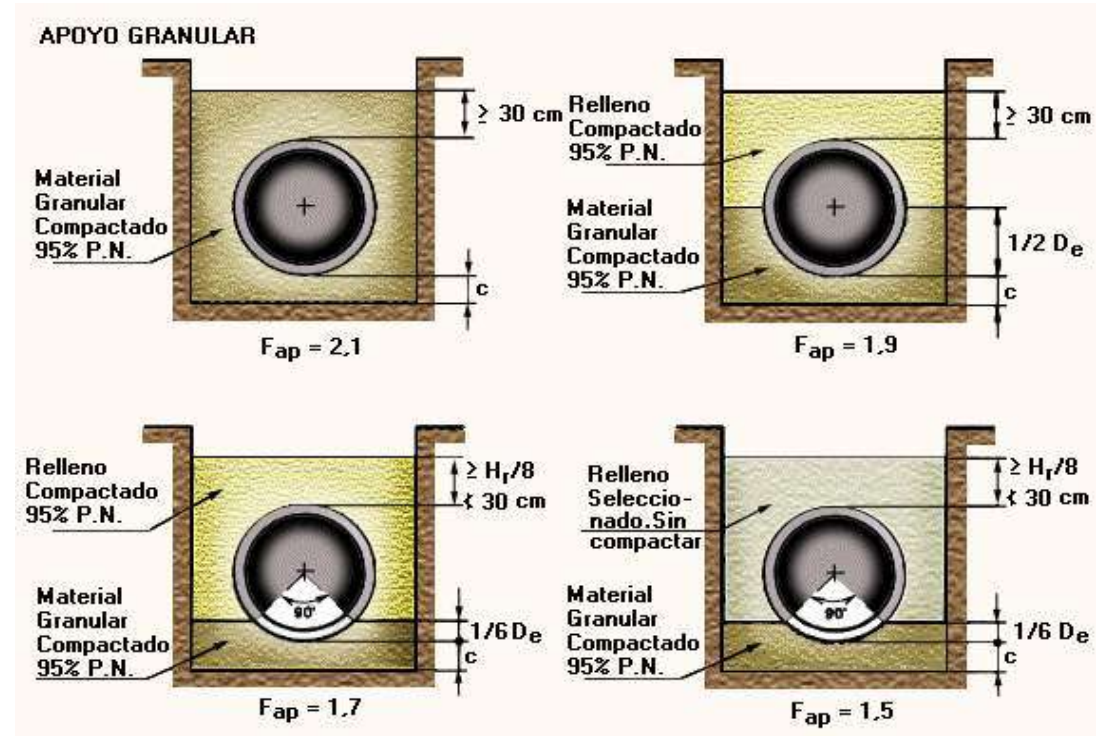


Punzonamiento

Situación más desfavorable

(Apoyo Directo, $F_{ap} = 1.0$)

Factores de Apoyo



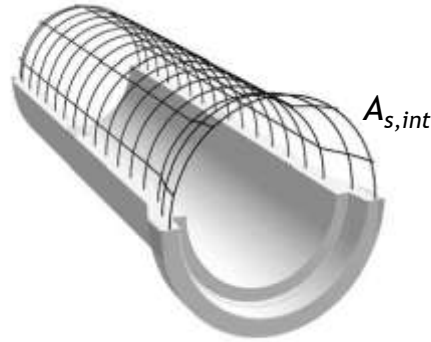
Spangler 1933 \longleftrightarrow Kang 2007

Nuevos Procedimientos de Compactación

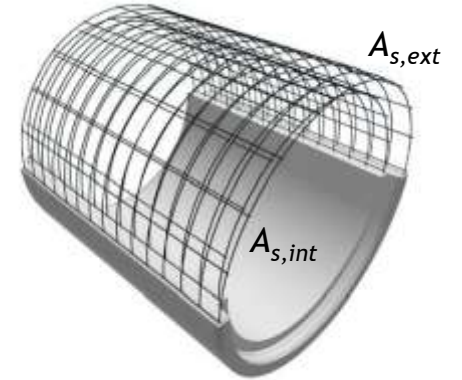
Ensayo de tres aristas



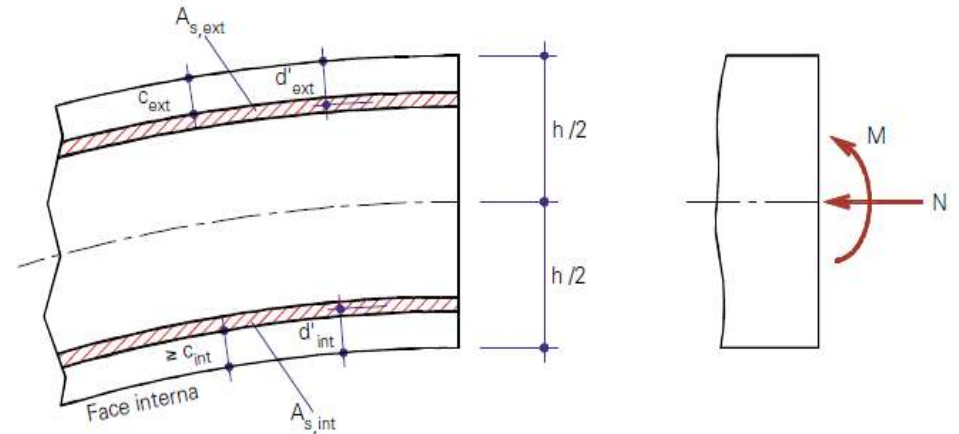
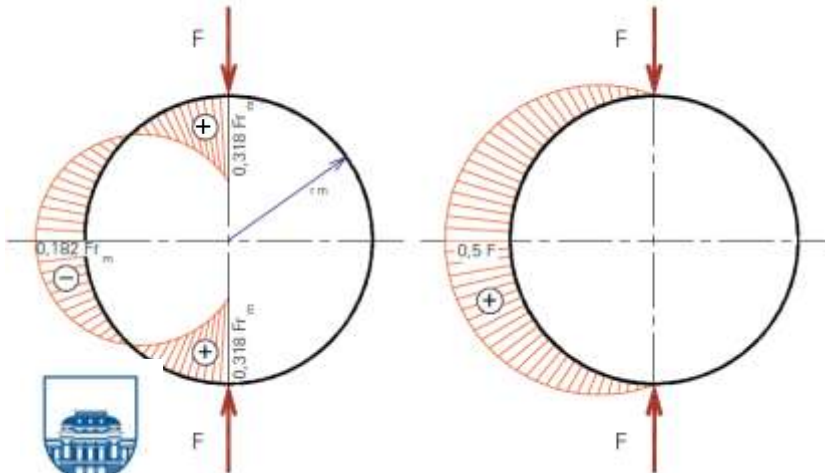
Malla simple



Malla doble

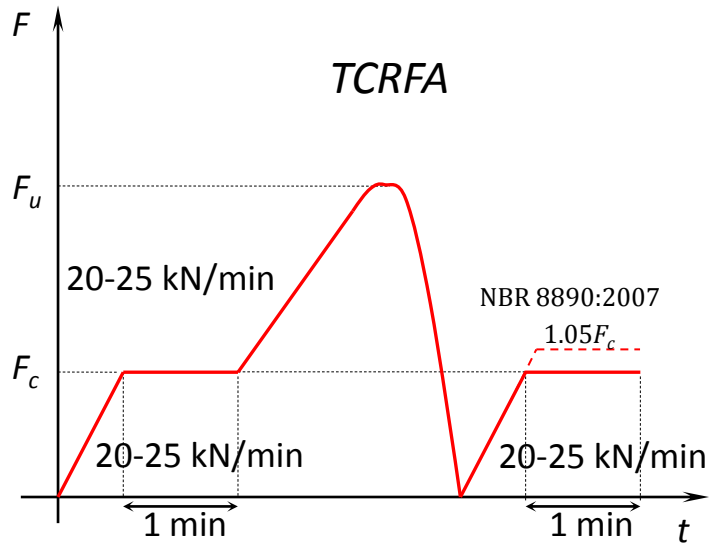


Distribuciones de esfuerzos en la directriz media



Flexión Simple en clave

Flexión compuesta en hastiales



DIÁMETRO NOMINAL (MM)	CARGAS MÍNIMAS DE FISSURA (kN/m)			CARGAS MÍNIMAS DE RUPTURA (kN/m)		
	EA2	EA3	EA4	EA2	EA3	EA4
300	18	27	36	27	41	54
400	24	36	48	36	54	72
500	30	45	60	45	68	90
600	36	54	72	54	81	108
700	42	63	84	63	95	126
800	48	72	96	72	108	144
900	54	81	108	81	122	162
1000	60	90	120	90	135	180
1100	66	99	132	99	149	198
1200	72	108	144	108	162	216
1500	90	135	180	135	203	270
1750	105	158	210	158	237	315
2000	120	180	240	180	270	360

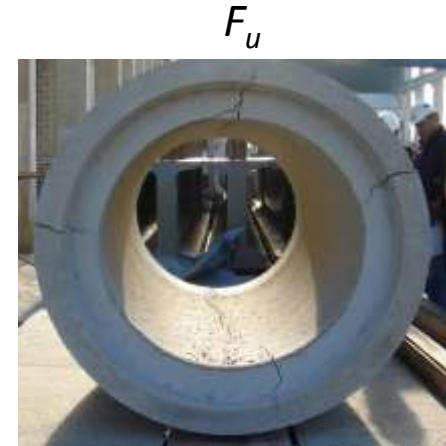
$F_c =$

Carga de fisura controlada ($w=0.25\text{mm}$)

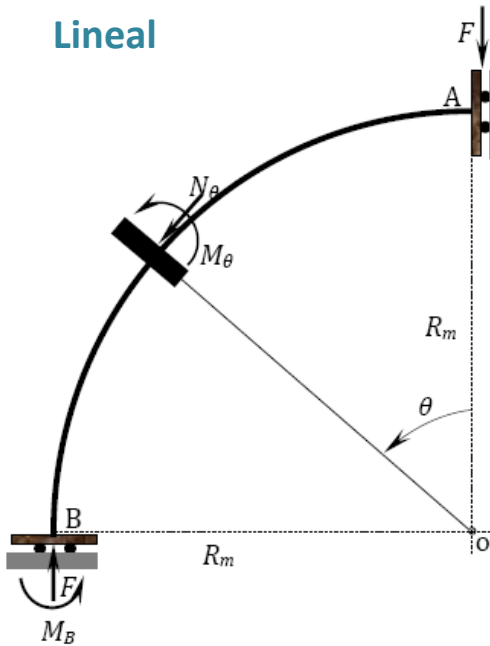
Carga isenta de daño (TCRFA)



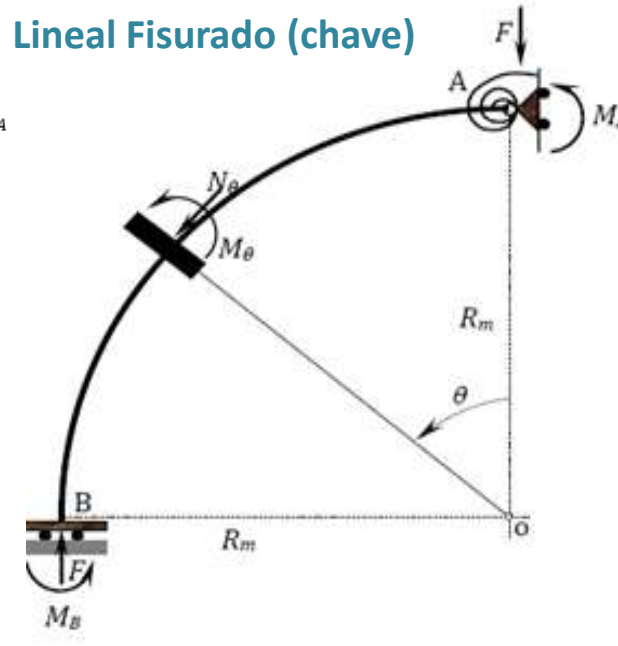
$$F_c > 0.67 F_u$$



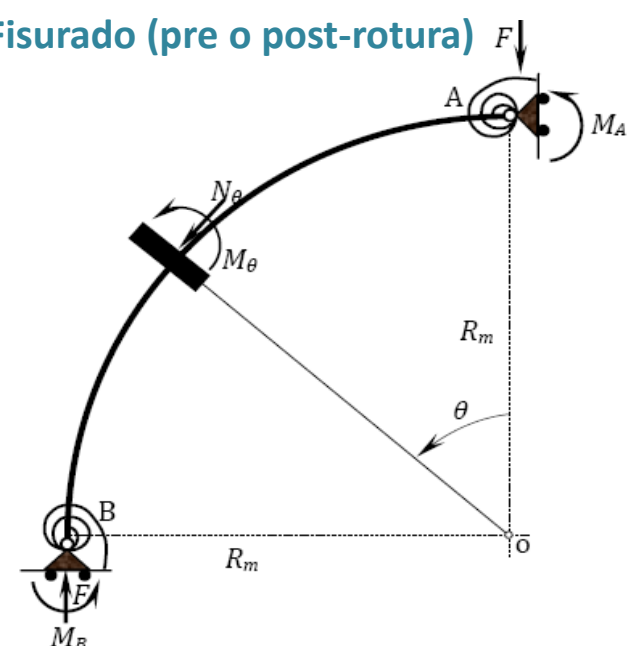
Lineal



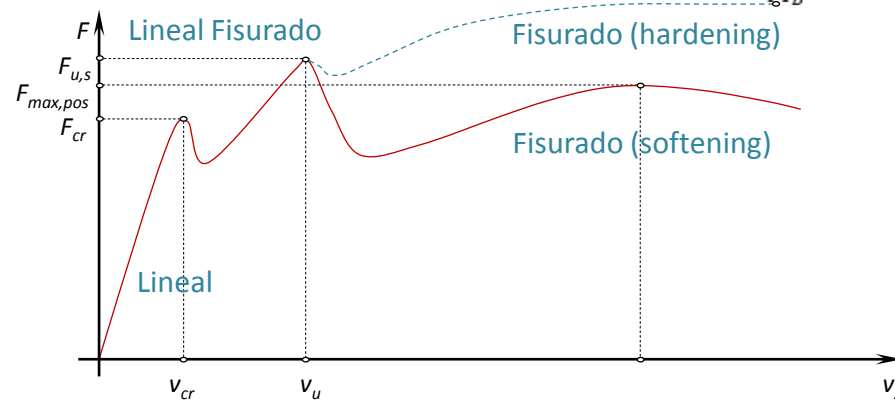
Lineal Fisurado (chave)



Fisurado (pre o post-rotura)



(Pedersen, 1995)



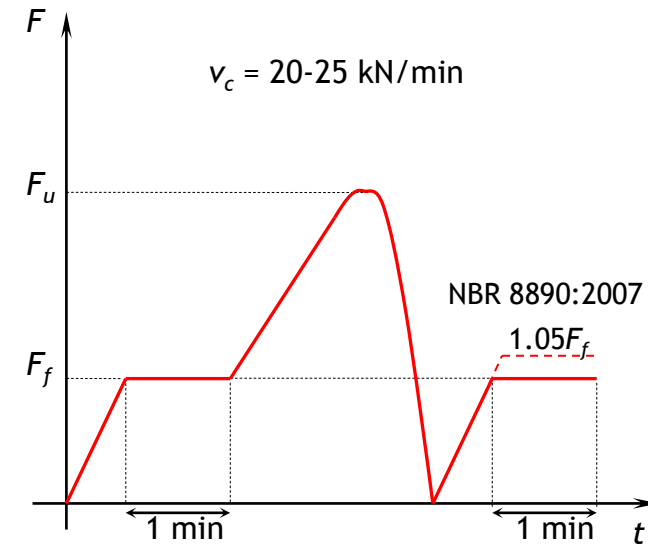
Tuberías de hormigón prefabricado para saneamiento

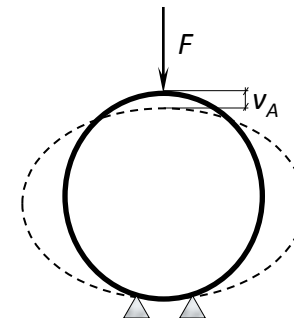
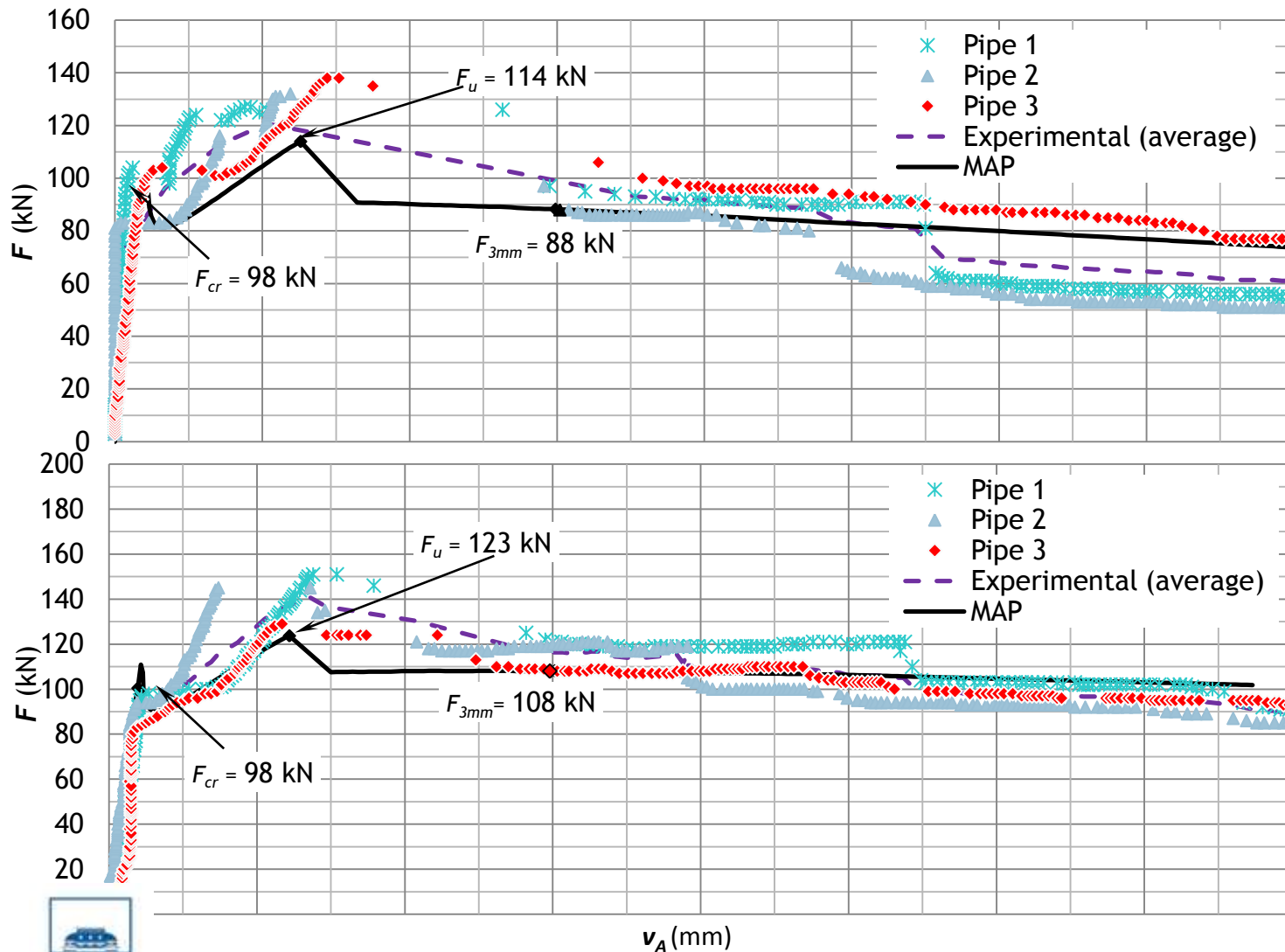
COLABORACIÓN CON LA USP

1. Se fabricaron 18 tubos de HRFA de $D_i = 600$ mm y $e = 72$ mm
2. Se ensayan en la prensa de tres aristas midiendo la curva carga (F) - desplazamiento (v_A)

Material	Dosificación
Arena de río ($d_{max} = 1.2$ mm)	679 kg/m ³
Arena de machaqueo ($d_{max} = 4.8$ mm)	340 kg/m ³
Arido de machaqueo ($d_{max} = 9.5$)	1067 kg/m ³
Cemento	355 kg/m ³
Agua	152 l/m ³
Fibras	10, 20 y 40 kg/m ³

Dosificación del hormigón de para la fabricación de los tubos

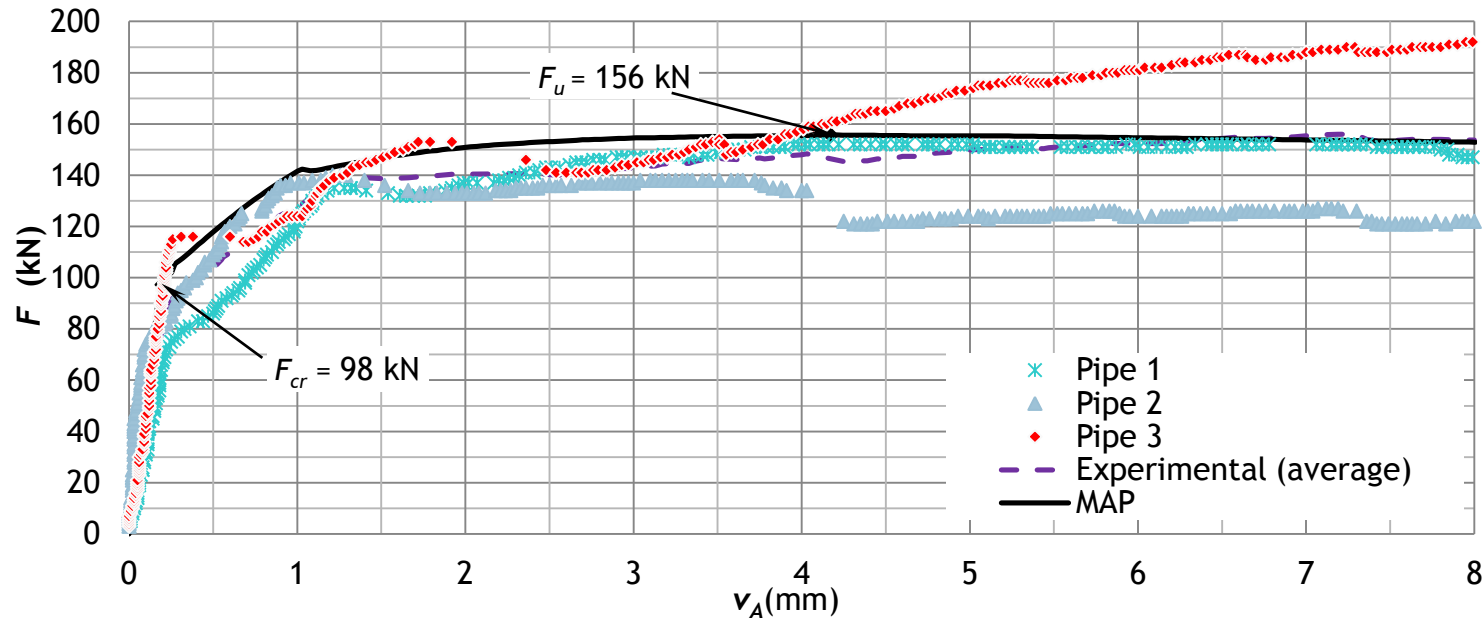




$C_f = 10 \text{ kg/m}^3$

Reblandecimiento

$C_f = 20 \text{ kg/m}^3$

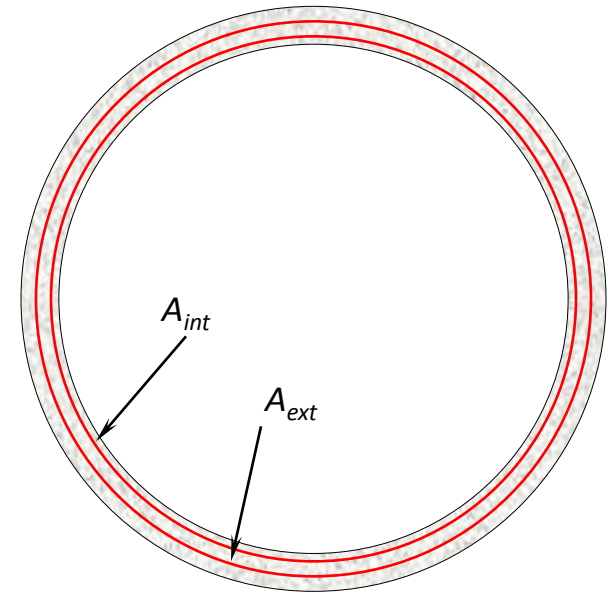
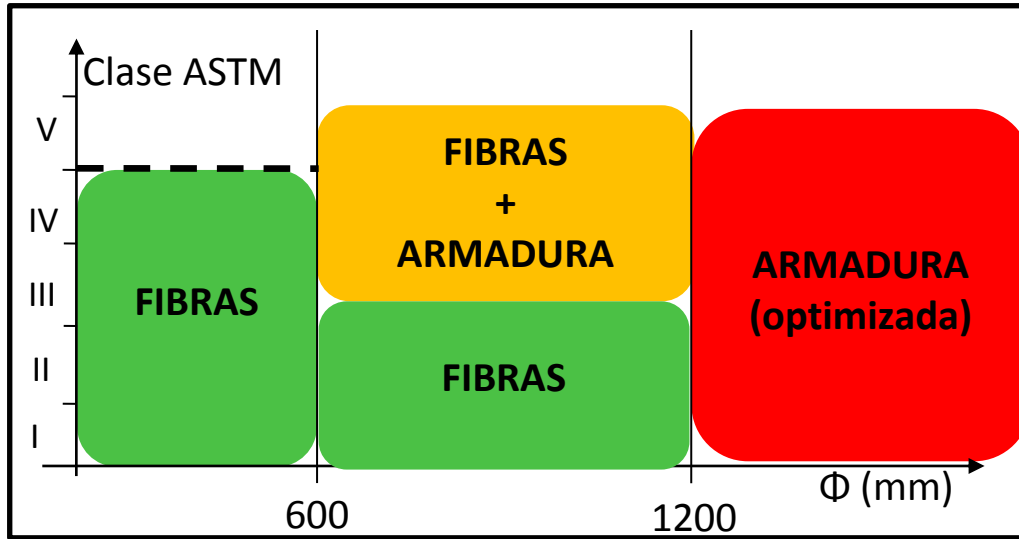


$C_f = 40 \text{ kg/m}^3$

Endurecimiento

Fibre dosage (kg/m^3)	F_{cr}			F_u			F_{3mm}		
	Exp. (kN)	MAP (kN)	ξ (%)	Exp. (kN)	MAP (kN)	ξ (%)	Exp. (kN)	MAP (kN)	ξ (%)
10	94	98	-4.3	132	114	13.6	94	88	6.4
20	93	98	-5.4	142	123	13.4	116	108	6.9
40	92	98	-6.5	162	156	3.7	-	-	-
			(-5,4%)			(10,2%)			(6,7%)

Comparación resultados experimentales - modelo MAP



1. Eliminación barras A_{ext} y A_{int} $\Phi_{int} < 600\text{mm}$

2. Eliminación A_{ext} $600 < \Phi_{int} < 1.200$ + Reducción del 40% - 60% A_{int}

3. Reducción de 25% - 40% Armadura total

$25 \text{ kg/m}^3 < C_f < 40 \text{ kg/m}^3$
(Económicamente Razonable)

Dovelas para el revestimiento de túneles con TBM





Armadura mínima para evitar la rotura frágil en el eventual caso de fisuración en fase transitoria
¿Se puede substituir por una C_f competitiva?



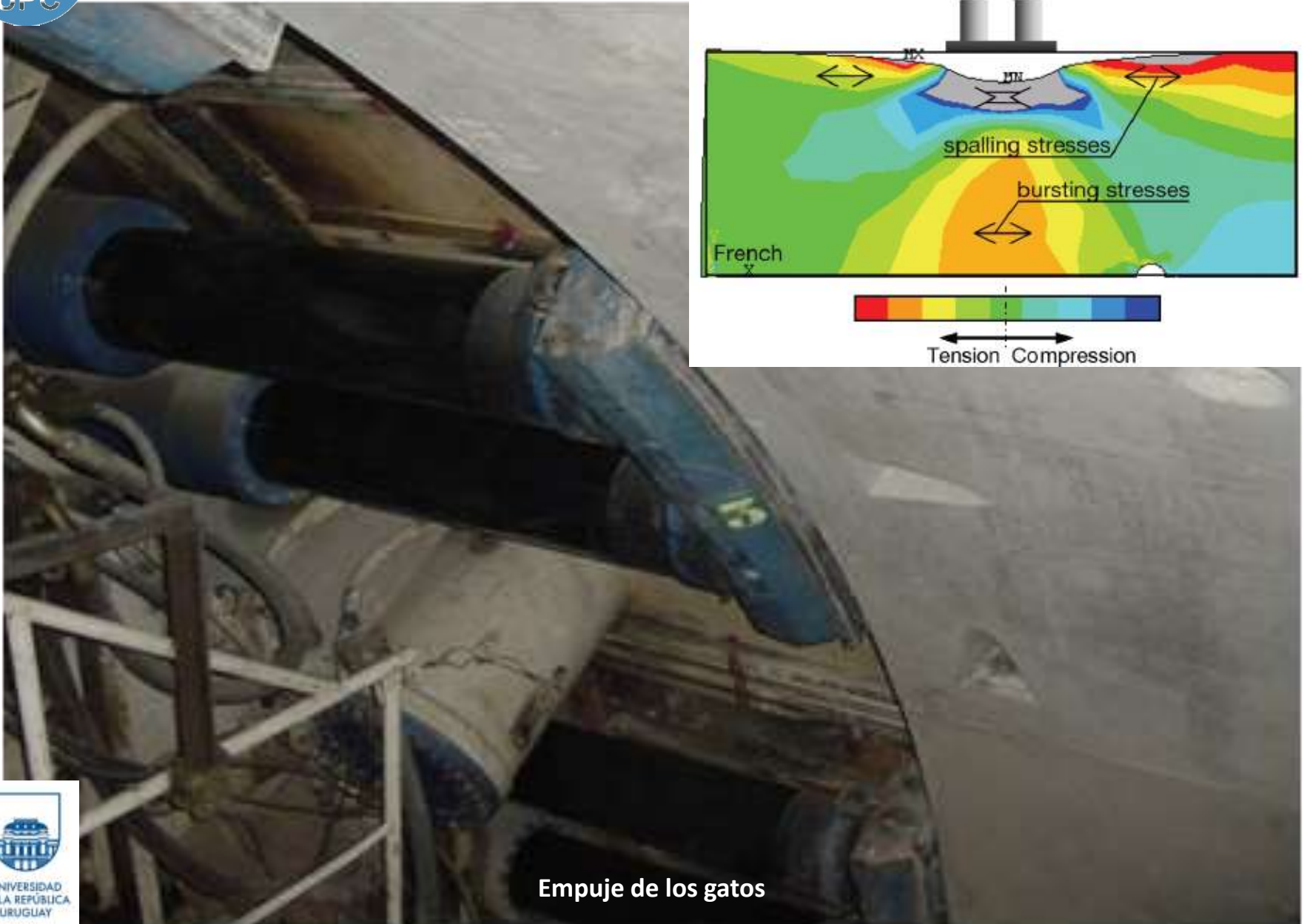
ETR Report

Design and Construction of Steel Fiber-Reinforced Precast Concrete Tunnel Segments

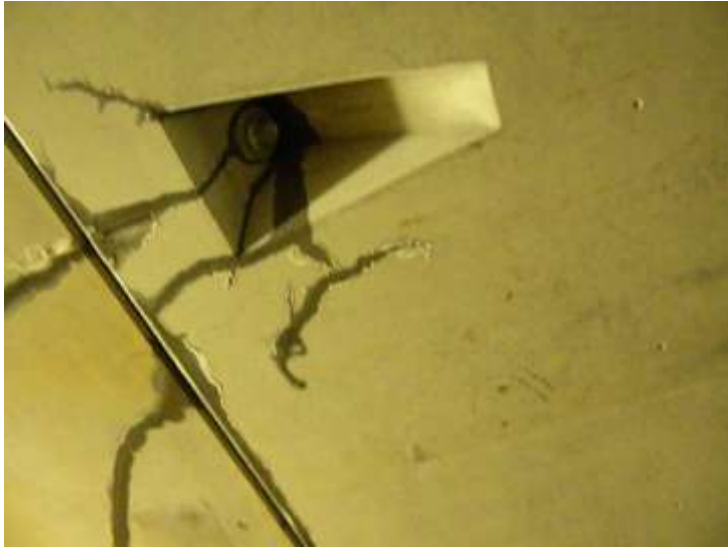
Chair	Secretary	Membership Secretary
Barzin Mobasher	Neven Kostulovic-Opara	Clifford N. MacDonald
1	25	
2	26	
3 Voting Members	27 David A. Lange	
4 Conna-Maria Aldea	28 Michael A. Mahoney	
5 P. N. Balaguru	29 Bruno Massicotte	
6 Mehdi Bakhshi †	30 Christian Meyer	
7 Nemkumar Banthia	31 Nicholas C. Mitchell, Jr.	
8 Joaquim Oliveira Barros	32 Gerald H. Morton	
9 Peter H. Bischoff	33 Antoine E. Naïman	
10 Aboozar Bonakdar	34 Jeffrey L. Novak	
11 Jean-Philippe Chamon	35 Max L. Porter	
12 Xavier Destree	36 Klaus Alexander Rieder	
13 Ashish Dubey	37 Pierre Rossi	
14 Mahmut Ekenel	38 Giovanni Pizzan *	
15 Gregor D. Fischer	39 Surendra P. Shah	
16 Dean P. Forgeron	40 Kay Wille	
17 Antonio Gallovich	41 Carla V. Yland	
18 Rishi Gupta	42 Robert C. Zellers	
19 George C. Hoff	43 Lihe Zhang	
20 Akm Anwarul Islam	44	
21 M. Invernizzi *	45 Consulting Members	
22 John Jones	46 V. Nanni *	
23	47 S. Guikani-Leonardi *	
24	48 G. Tiberi *	

*Members who prepared this report
†Chair of the task group who drafted this report





SPALLING/BURSTING EN DOVELAS DE HORMIGÓN CON ARMADURA CONVENCIONAL



PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO PARA DOVELAS DE HRF

1. DISEÑO POR ENSAYOS

Flexión (carga lineal distribuida)



Flexión (acopio dovelas – excentricidad)



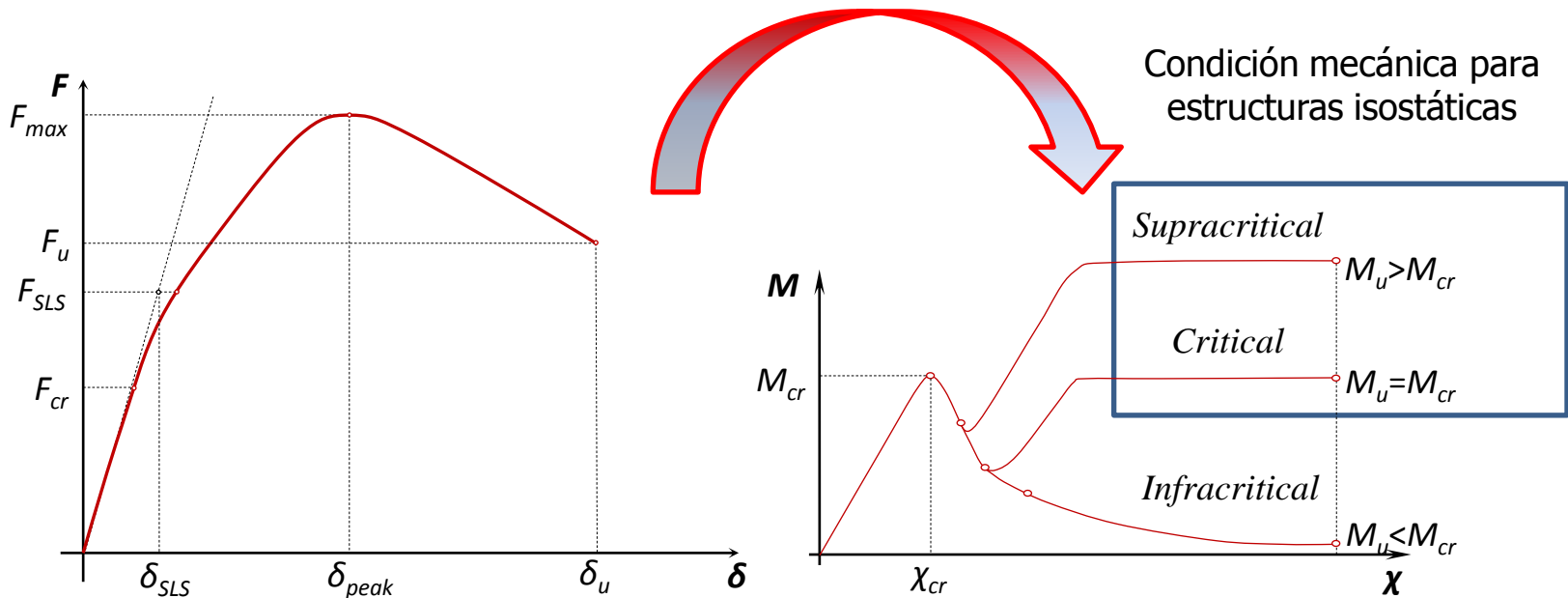
Diseño basado en la ductilidad

- Introduction of FRC in MC-2010 (total substitution of the rebars)
- Requerimientos básicos:
 - $F_u \geq F_{cr}$ y $F_u \geq F_{SLS}$ (requerimientos mecánicos)
 - $\delta_u \geq 20\delta_{SLS}$ o $\delta_{peak} \geq 5\delta_{SLS}$ (requerimientos de deformabilidad)

Requerimiento del HRF

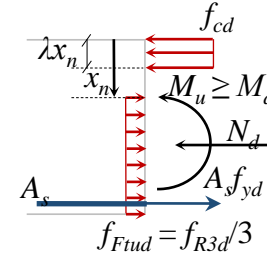
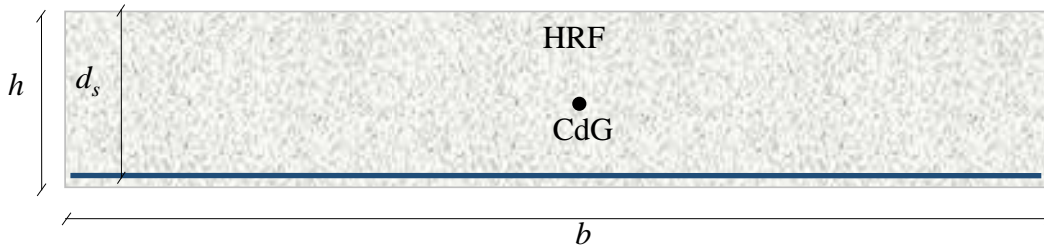
$$f_{R1k}/f_{LOPk} \geq 0.4$$

$$f_{R1k}/f_{R3k} \geq 0.5$$



Para estructuras isostáticas (dovelas en etapas transitorias)

Análisis seccional

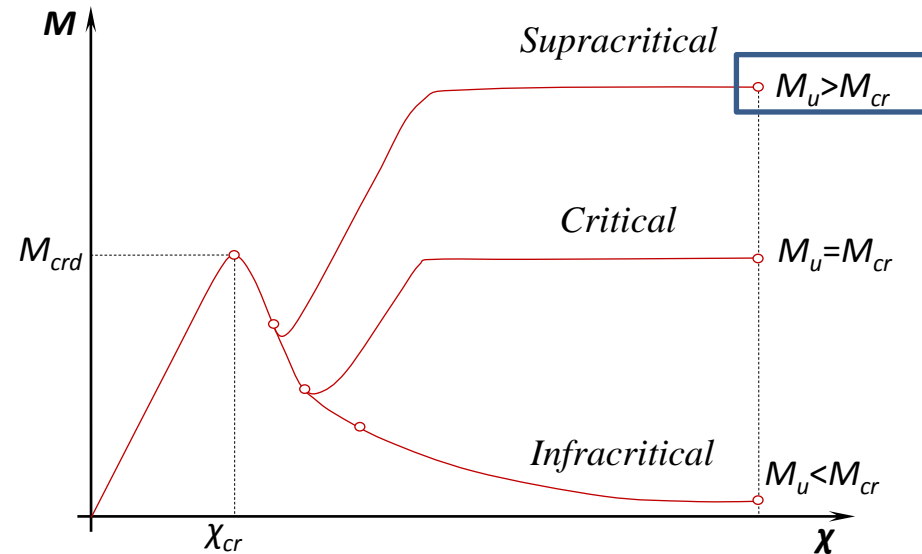


- **Caso A ($M_u \geq M_d \geq M_{crd}$) - supracrítico**

$$M_{crd} = \frac{bh^2}{6} f_{ctd,fl}$$

$$\xi_n = \frac{5}{8}(4 - 5w_s) \left\{ 1 + \sqrt{1 - \frac{16 \left[w_s(2\xi_s - 1) - \frac{2M_d}{f_{cd}bh^2} \right]}{4 - 5w_s}} \right\}$$

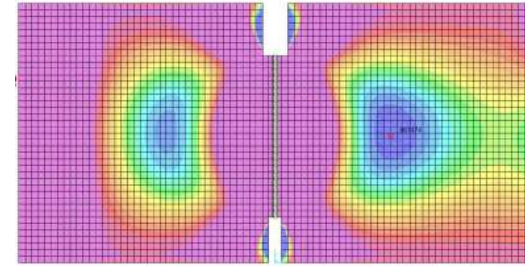
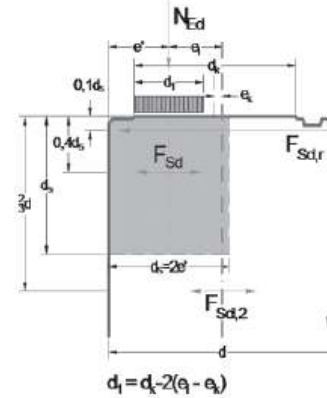
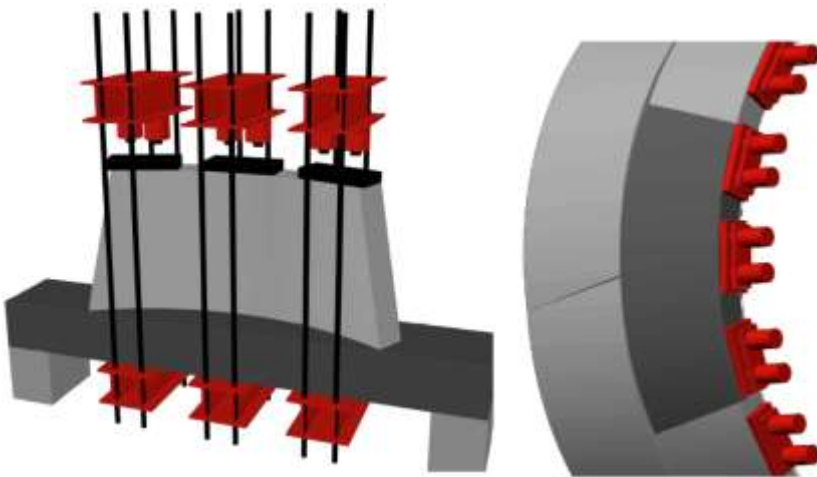
$$\frac{f_{R3k}}{f_{ck}} \geq 3 \frac{\gamma_{FRC}}{\gamma_c} \frac{4\xi_n - 5w_s}{5 - 4\xi_n}$$



ξ_n = Profundidad relativa del eje neutro (x_n/h)

w_s = Cuantía mecánica de armadura ($A_s f_{yd} / f_{cd} bh$)

Cargas concentradas (empuje de los gatos)



Cargas concentradas (contacto entre juntas)



MÁS DE 50 APLICACIONES

- **Funciones:** agua/agua de desechos; gas; cables eléctricos, metro, ferrocarril y carreteras.
- **Máximos diámetros:** 2,2 m – 11,4 m
- **Mínimo y máximo espesor:** 15 cm – 40 cm
- **Dosificación de fibras:** 25 – 60 kg/m³
- **Esbeltez (diámetro/espesor):** 12 – 30

Name	Year	State	Function	D_i (m)	h (m)	λ [°]	Rebars
Metrosud	1982	IT	MT	5.8	0.30	19,3	No
Fanaco	1985	IT	WT	3,0	0.20	15,0	No
Heathrow Baggage Handling Tunnel	1995	UK	ST	4.5	0.15	30,0	No
2 nd Heineoord Tunnel	1999	NL	RT	7.6	0.27	28,1	No
Ecuador's Trasmases Manabi	2001	ECU	WTT	3.5	0.20	17,5	No
Hydraulic Tunnel Canal de Navarra	2003	ES	WTT	5.4	0.25/0.30	21,6/18,0	No
Oënzberg Tunnel	2003	SUI	RWT	10.8	0.30	36,0	No
Channel Tunnel Rail Link	2004	FR-UK	RWT	7.2	0.35	20,6	No
The Hofolding Stollen	2004	DE	WTT	2.9	0.18	16,1	No
San Vicente	2006	USA	WTT	3.2	0.18	17,8	No
Lötschberg	2007	SUI	RWT	4.5	0.20	22,5	No
Line 1 of the Valencia Metro	2007	VEN	MT	8.4	0.40	21,0	Yes
Beacon Hill Tunnels	2007	USA	RT	6.7	0.30	22,3	No
Gold Coast Desalination Plant	2008	AUS	WTT	2.8/3.4	0.20	14,0/17,0	No
Heathrow Express Ext. Tunnel to T5	2008	UK	RWT	5.7	0.22	25,9	No
São Paulo Metro Line 4	2009	BRA	MT	8.4	0.35	24,0	No
Heating Tunnel Amager - Copenhagen	2009	DEN	WTT	4.2	0.30	14,0	No
Fontsanta-Trinitat Tunnel	2010	ES	WTT	5,2	0.20	26,0	Yes
The Clem Jones Tunnel - Clem 7	2010	AUS	RT	11.3	0.40	28,3	No
Ems-Dollard Crossing	2010	DE-NL	GPT	3.0	0.25	12,0	No
Cuty West Cable Tunnel	2010	AUS	EP	2.5	0.20	12,5	No
Adelaide Desalination Plant	2010	AUS	WT	2.8	0.20	14,0	No
Extension of the FGC in Terrassa	2010	ES	RWT	6.0	0.30	20,0	Yes
Brightwater East	2011	USA	WTT	5.1	0.26	19,6	No
Brightwater Central	2011	USA	WTT	4.7	0.33	14,2	No
Brightwater West	2011	USA	WTT	3.7	0.26	14,2	No
East Side CSO Tunnel	2011	USA	WTT	6.7	0.36	18,6	No
Victorian Desalination Plant	2011	AUS	WTT	4.0	0.23	17,4	No
Monte Lirio Tunnel	2012	PAN	WTT	3.2	0.25	12,8	No
Lee Tunnel Sewer	u.c.	UK	WTT	-	0.35	0,0	No
Line 9 of Barcelona Metro	u.c.	ES	MT	10.9	0.35	31,1	Yes
Brenner Base Tunnel	u.c.	ITA-AUT	RT	5.6	0.20	28,0	Yes
The Wehrhahn Line	u.c.	DE	MT	8.3	0.45	18,4	No
Crossrail	u.c.	UK	RWT	6.2	0.30	20,7	No

Metro Riyadh (Emirates), Lina 5 y 6 de Metro de São Paulo (Brasil), Metro de Guadalajara (México), Folloline Metro (Noruega), Santoña (España)

ALIVIADERO PRESA

❖ Razón de ser:

- Fibras de acero: 50 kg/m^3
- Control fisuración
- Resistencia a abrasión, desgaste y fisuración



Presa de Tous (Valencia)



Presa de Tous (Valencia)



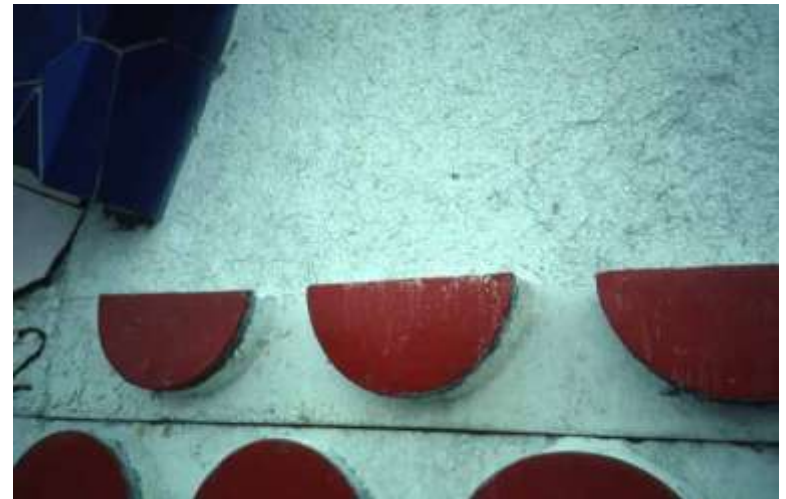
OCEANOGRÁFICO DE VALENCIA

❖ Razón de ser:

- Lámina delgada vs. armado convencional
- Función estructural (malla de $\phi 8$ cada 15 cm insuficiente).
- Control de la fisuración



LA CARA DE BARCELONA (ROY LICHTENSTEIN)





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



GRACIAS POR SU ATENCIÓN