



INTRODUCCIÓN AL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

Pablo PUJADAS ÁLVAREZ



Departament d'Enginyeria
de la Construcció

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO
Y SUS APLICACIONES

Zaragoza, 15 Diciembre de 2016

APLICACIONES ESTRUCTURALES DEL HORMIGÓN CON FIBRAS EN EDIFICACIÓN



INTRODUCCIÓN AL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

Pablo PUJADAS ÁLVAREZ



Departament d'Enginyeria
de la Construcció

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO
Y SUS APLICACIONES

Zaragoza, 15 Diciembre de 2016



¿Qué es el Hormigón Reforzado con Fibras?

HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

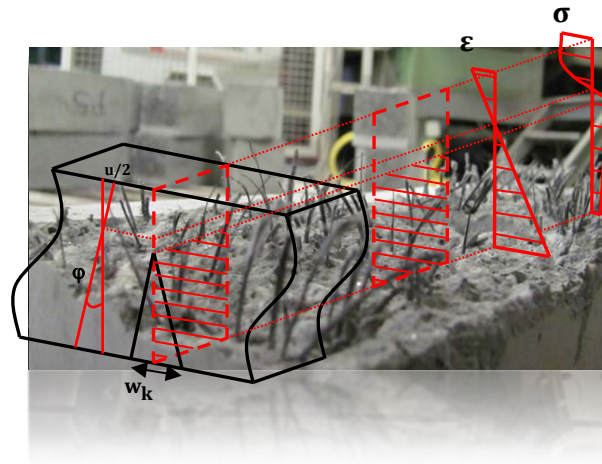
INTRODUCCIÓN

HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (HRF)

HORMIGONES QUE INCLUYEN EN SU COMPOSICIÓN FIBRAS CORTAS, DISCRETAS Y ALEATORIAMENTE DISTRIBUIDAS EN SU MASA

EHE-08

- ✓ Modifica el comportamiento no lineal
- ✓ EFECTO PUENTE
- ✓ Mecanismos: *debonding* y *pull-out*
- ✓ Mayor tenacidad → resistencia residual
- ✓ Substitución total o parcial de la armadura convencional



INTRODUCCIÓN***HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (HRF)***

HORMIGONES QUE INCLUYEN EN SU COMPOSICIÓN FIBRAS CORTAS, DISCRETAS Y ALEATORIAMENTE DISTRIBUIDAS EN SU MASA

EHE-08

- ✓ Modifica el comportamiento no lineal
- ✓ EFECTO PUENTE
- ✓ Mecanismos: *debonding* y *pull-out*
- ✓ Mayor tenacidad → resistencia residual
- ✓ Substitución total o parcial de la armadura convencional

Refuerzo de materiales frágiles no es nuevo → DUCTILIDAD



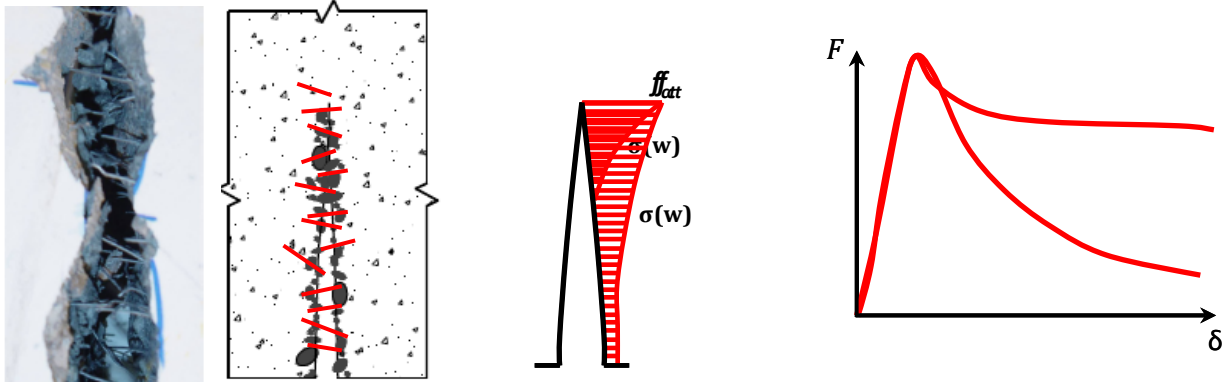
INTRODUCCIÓN

- RAZÓN DE SER:
 - ✓ **CONTROL DE LA FISURACIÓN**
 - ✓ Reducción de la **fragilidad** - Aumenta la ductilidad.
 - ✓ Mejoras en **durabilidad**
 - ✓ Aumenta la resistencia a temprana edad.
 - ✓ Aumenta la resistencia al impacto.
 - ✓ Aumenta la resistencia a la abrasión.
 - ✓ Reducción de espesores
 - ✓ Aplicación **más simple y rápida**
 - ✓ Eliminación de **mallado**

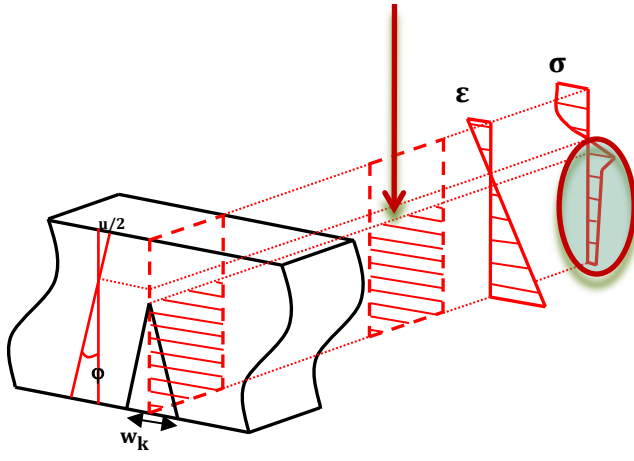
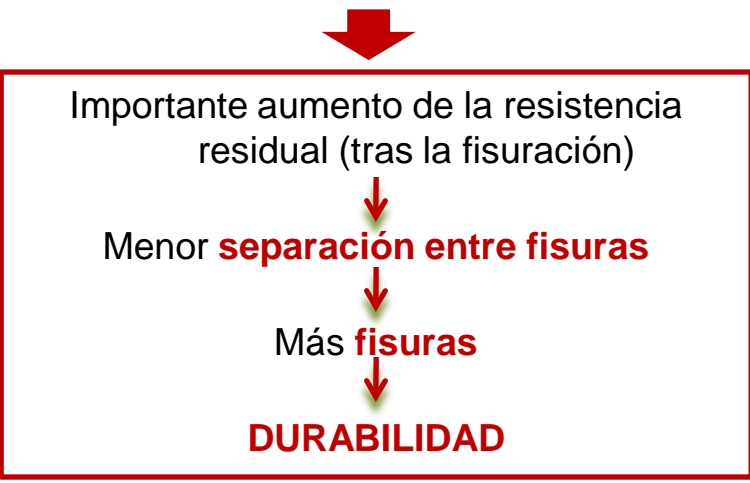


INTRODUCCIÓN

- **HORMIGÓN EN MASA** → comportamiento **FRÁGIL**
- **HRF** → Post-fisuración → resiste **tracciones en las fisuras** → **resistencia residual**



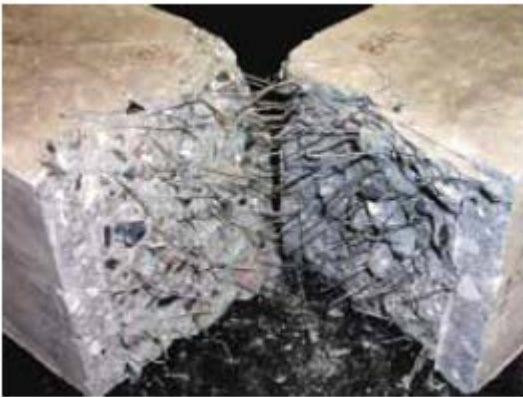
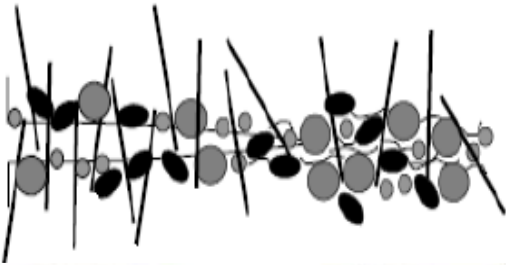
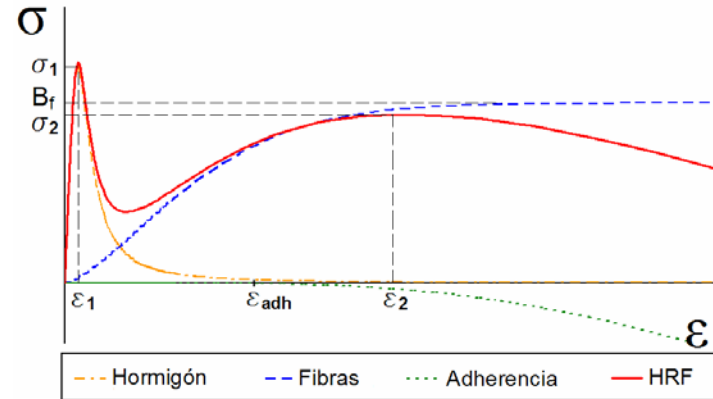
- **Debonding** y **pull out** las fibras (bridge effect) → zona trabajando a **TRACCIÓN**



INTRODUCCIÓN

- HRF: superposición de 3 factores

- HORMIGÓN.
- FIBRAS.
- PÉRDIDA DE ADHERENCIA



FIBRAS DISTRIBUIDAS TRIDIMENSIONALMENTE



COSEN LAS FISURAS DEL HORMIGÓN



“PUENTE” ENTRE LOS ÁRIDOS GRUESOS



FORMACIÓN CONTROLADA DE LAS FISURAS



COMPORTAMIENTO DÚCTIL TRAS LA FISURACIÓN



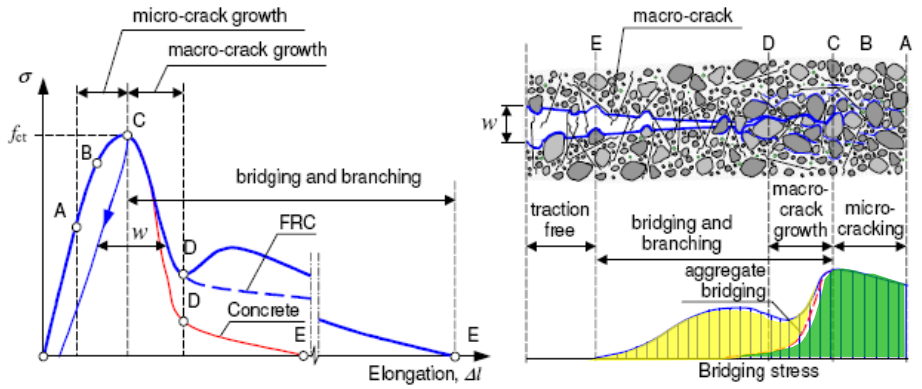
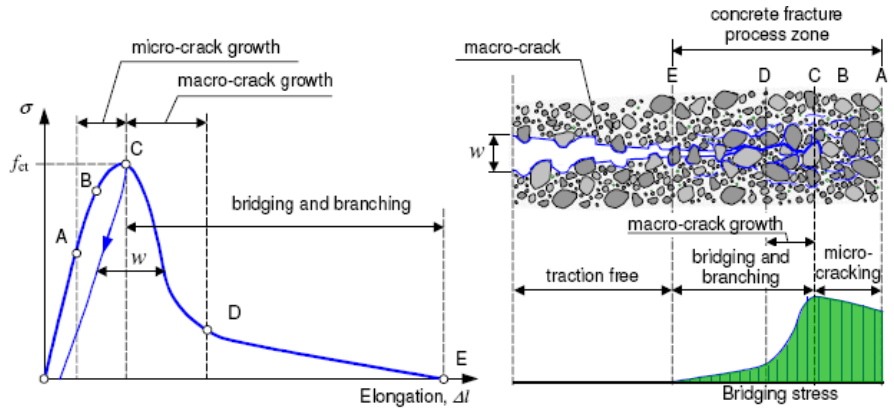
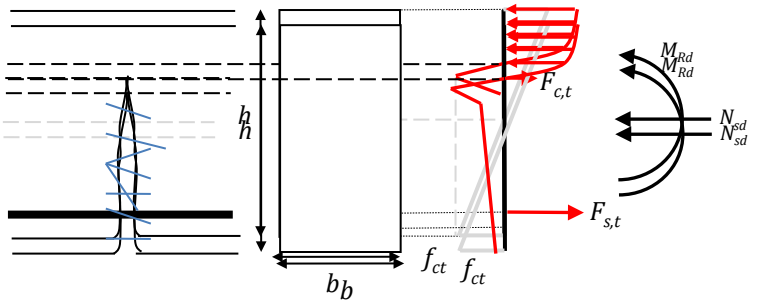
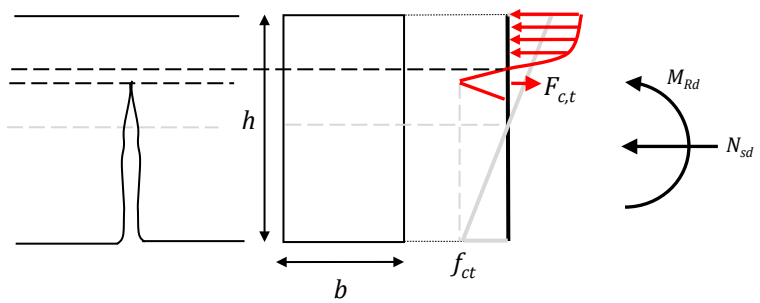
EVITANDO LA FRACTURA FRÁGIL

INTRODUCCIÓN

Comportamiento POST-PICO

HORMIGÓN EN MASA

HORMIGÓN CON FIBRAS



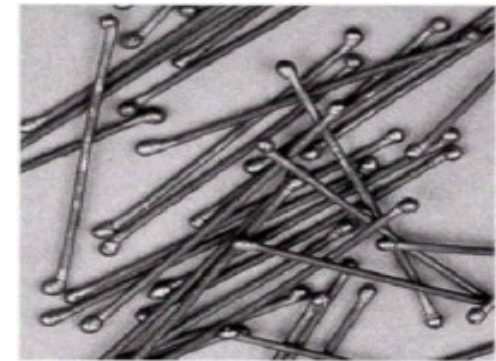


¿Sólo existen las fibras de acero?

TIPOS DE FIBRAS

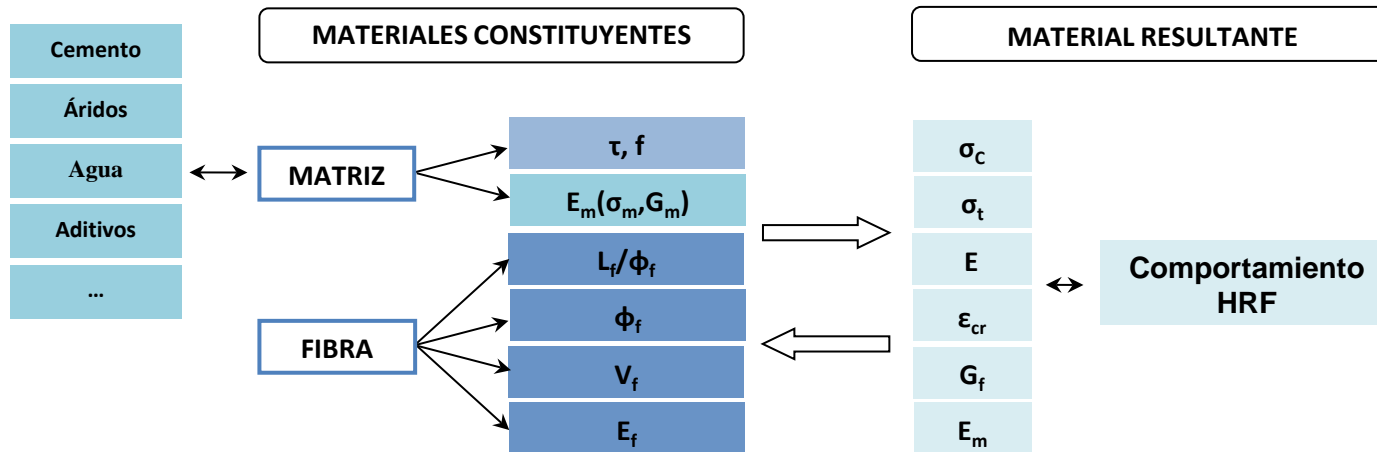
TIPOS DE FIBRA

TIPOS DE FIBRAS:

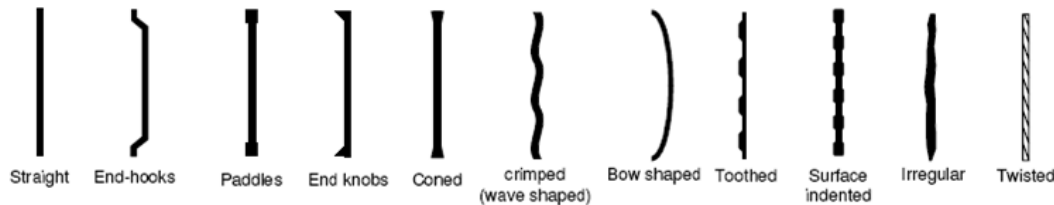


TIPOS DE FIBRA

- Vínculo entre Materiales constituyentes \leftrightarrow Material resultante

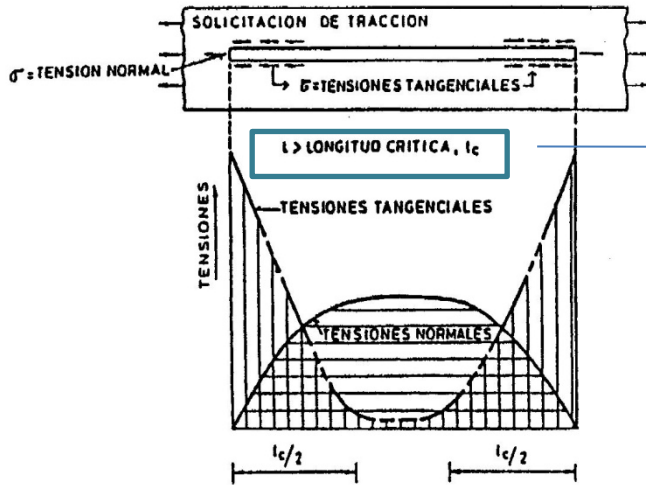


- La **efectividad de la acción reforzante** y **de la transmisión de tensiones** por parte de las fibras **depende**:
 - ✓ Naturaleza
 - ✓ Características geométricas: longitud, diámetro, esbeltez, n^o de fibras...



TIPOS DE FIBRA

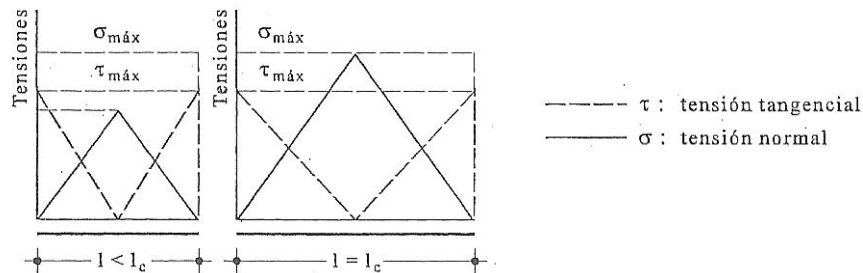
- La **tensión tangencial** es **máxima en los extremos** de dichas fibras y resulta casi **nula en la zona central**, donde, sin embargo, presenta el **valor máximo de tensión axial**.



necesaria para garantizar:

- ✓ **compatibilidad fibra-matriz**
- ✓ **transferencia de los esfuerzos**

- Cualquier refuerzo cuya **longitud sea menor** a esta magnitud (l_c), **no participa** plenamente de **los mecanismos de transferencia de esfuerzo**



TIPOS DE FIBRA

- Para que una fibra trabaje de forma efectiva, ésta debe presentar las siguientes propiedades:
 - **Elevada** resistencia **a tracción**.
 - Resistencia a la **adherencia** con la matriz del mismo orden o incluso superior a la resistencia a tracción de dicha matriz.
 - **Módulo elástico** mayor que el correspondiente a la matriz (por lo menos 3 veces mayor).
 - Debe presentar un **coeficiente de Poisson** y coeficiente **de dilatación térmica** preferiblemente semejantes al de la matriz.

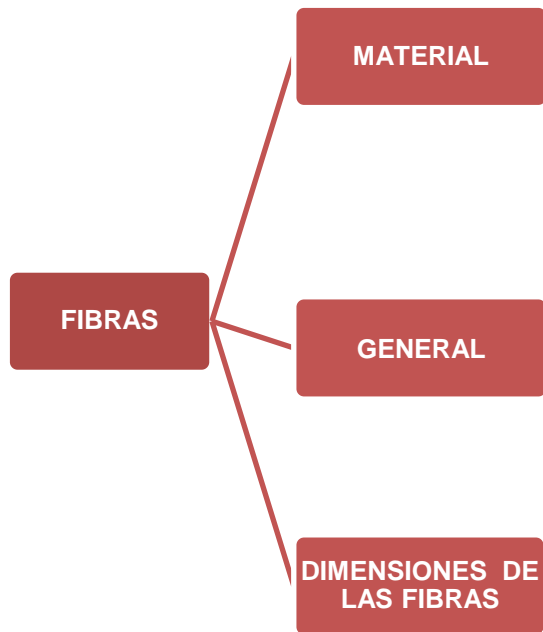
TIPOS DE FIBRA

TIPOS DE FIBRAS:

TIPO DE FIBRA	DIÁMETRO EQUIVALENTE (mm)	DENSIDAD (kg/m ³)	RESISTENCIA A TRACCIÓN (MPa)	MÓDULO DE YOUNG (GPa)	ALARGAMIENTO DE ROTURA (%)
Acrílico	0,02-0,35	1100	200-400	2	1.1
Asbesto	0,0015-0.02	3200	600-1000	83-138	1-2
Algodón	0,2-0,6	1500	400-700	4,8	3-10
Vidrio	0,005-0,15	2500	1000-2600	70-80	1,5-3,5
Grafito	0,008-0,009	1900	1000-2600	230-415	0.5-1
Aramida	0,01	1450	3500-3600	65-133	2,1-4
Nylon	0,02-0,4	1100	760-820	4,1	16-20
Poliéster	0.02-0,4	1400	720-860	8.3	11-13
Polipropileno (PP)	0,02-1	900-950	200-760	3,5-15	5-25
Polivinil alcohol (PVA)	0,027-0,660	1300	900-1600	23-40	7-8
Carbón	-	1400	4000	230-240	1,4-1.8
Rayón	0,02-0.38	1500	400-600	6,9	10-25
Basalto	0.0106	2593	990	7,6	2.56
Polietileno	0,025-1	960	200-300	5,0	3
Sisal	0,08-0,3	760-1100	228-800	11-27	2,1-4,2
Coco	0,11-0,53	680-1020	108-250	2,5-4,5	14-41
Yute	0,1-0,2	1030	250-350	26-32	1,5-1,9
Acero	0,15-1	7840	345-3000	200	4-10

TIPOS DE FIBRA

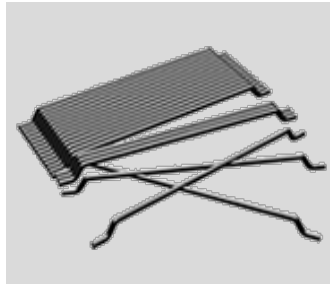
- TIPOS DE FIBRAS:



TIPOS DE FIBRA

TIPOS DE FIBRAS:

- ✓ **FIBRAS ESTRUCTURALES:** proporcionan una **mayor energía de rotura** al hormigón en masa. La **contribución** de las mismas puede ser **considerada** en el **cálculo** de la respuesta de la sección de hormigón.



- ✓ **FIBRAS NO ESTRUCTURALES:** **sin considerar en el cálculo** esta energía suponen una mejora ante determinadas propiedades como por ejemplo el **control de la fisuración** por retracción, incremento de la **resistencia al fuego, abrasión, impacto** y otros.





¿Para qué sirven las fibras no estructurales?

FIBRAS NO ESTRUCTURALES

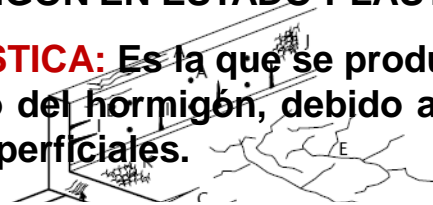
DURABILIDAD

- DURABILIDAD FRENTE A LA FISURACIÓN:

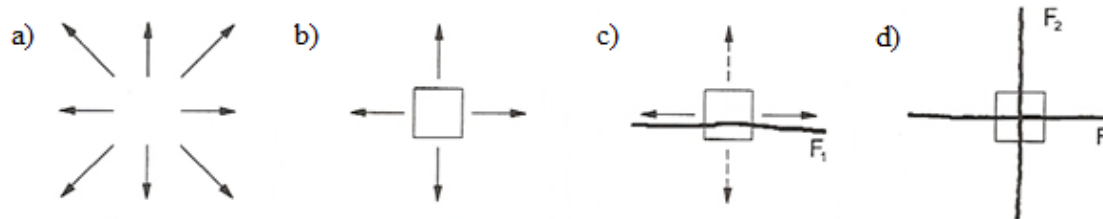
- La **incorporación de fibras inhibe la aparición y el desarrollo de fisuras** en especial en estas **primeras edades** que son las más vulnerables, permitiendo al hormigón desarrollar toda su capacidad de resistencia y de impermeabilidad.

- FISURACIÓN DEL HORMIGÓN EN ESTADO PLÁSTICO:

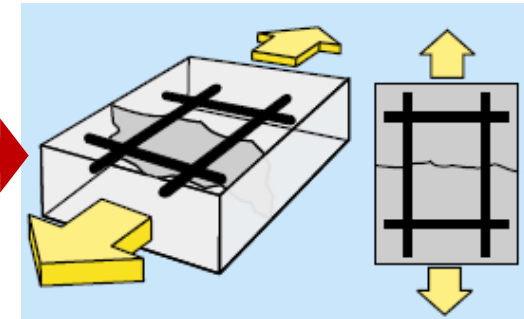
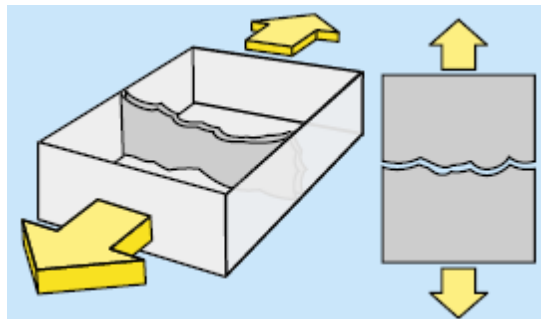
- RETRACCIÓN PLÁSTICA:** Es la que se produce durante las primeras horas de edad, durante el fraguado del hormigón, debido a una rápida evaporación del exceso de H_2O de los poros superficiales.



- A, B, C Asentamiento plástico.
- D, E, F Retracción plástica.
- G, H Fisuras de origen térmico.
- I Fisuras de origen plástico.
- J, K Afogado
- L, M Corrosión de armadura.

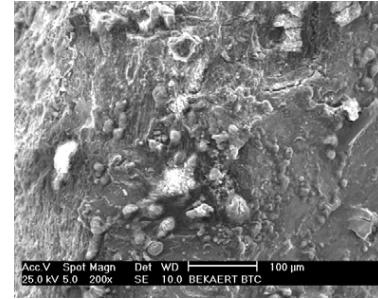


- Millones de puentes → la **distribución tridimensional** de las **mini-redes**, conlleva la **reducción del agrietamiento del hormigón**



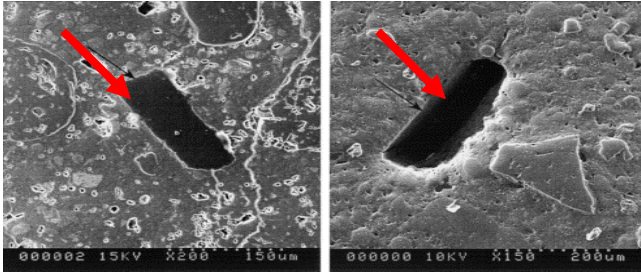
DURABILIDAD

- **DURABILIDAD FRENTE A CORROSIÓN:**
 - polipropileno → químicamente inertes. NO corrosión

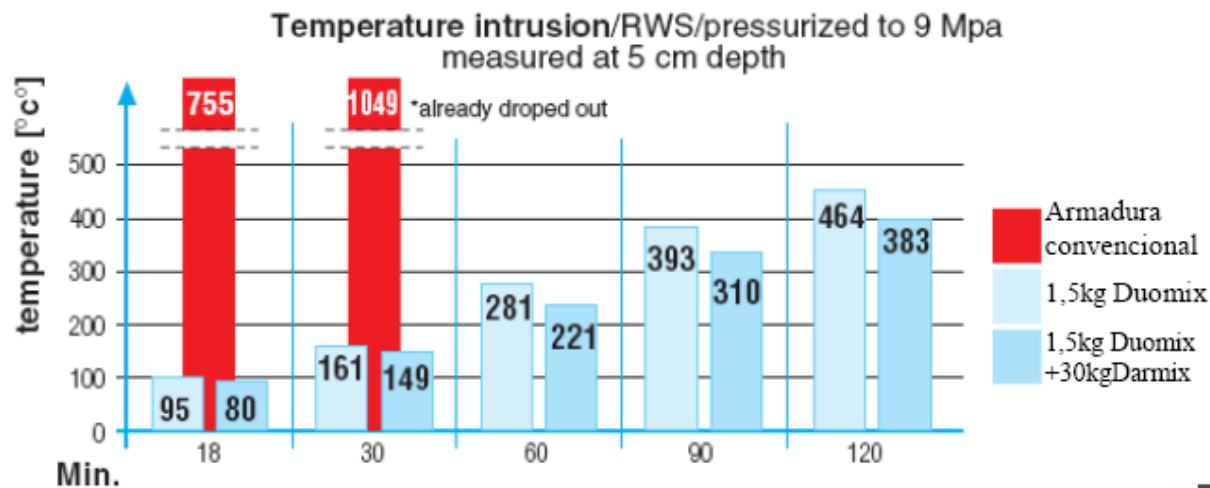


DURABILIDAD

- Durabilidad frente al FUEGO:
 - Micro-fibras POLIPROPILENO → **evitamos spalling:**



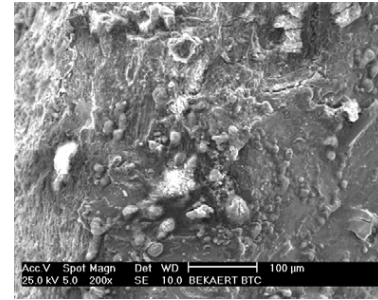
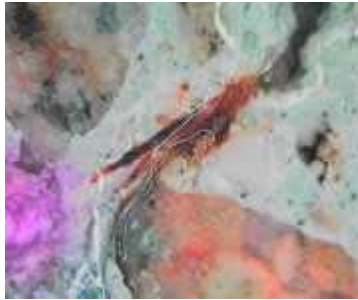
- Las fibras → alcanzan su **temperatura de fusión** → se descomponen → **red de canales conectados** → **vía de escape** → ↓ presión en los poros.



DURABILIDAD

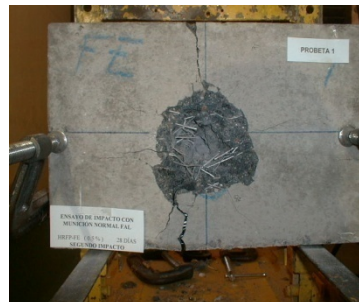
▪ DURABILIDAD FRENTE A CORROSIÓN:

- polipropileno → químicamente inertes. NO corrosión



▪ DURABILIDAD FRENTE AL IMPACTO:

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





¿Cómo trabajan?

FIBRAS ESTRUCTURALES

ORIENTACIÓN**HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (HRF)**

**HORMIGONES QUE INCLUYEN EN SU COMPOSICIÓN FIBRAS CORTAS, DISCRETAS Y
~~ALEATORIAMENTE DISTRIBUIDAS EN SU MASA~~**

EHE-08



Orientación final de las fibras → NO es aleatoria → resultado final de una serie de etapas



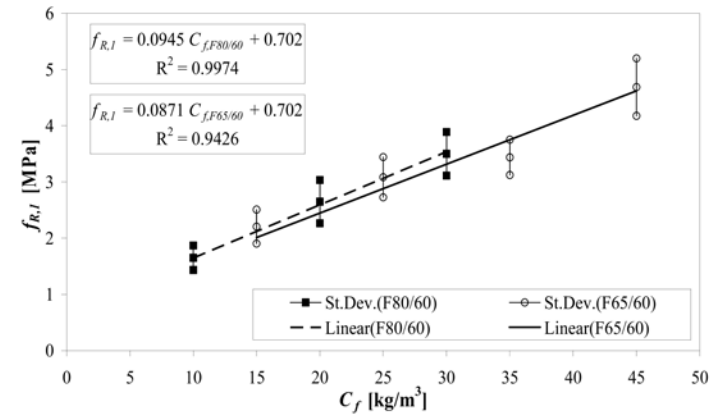
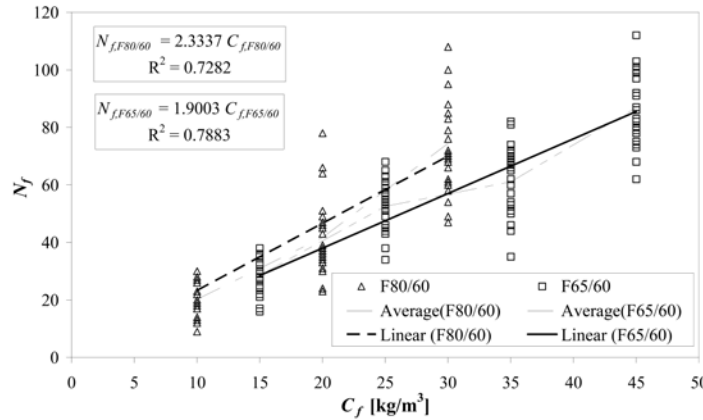


¿Es importante la orientación de las fibras?

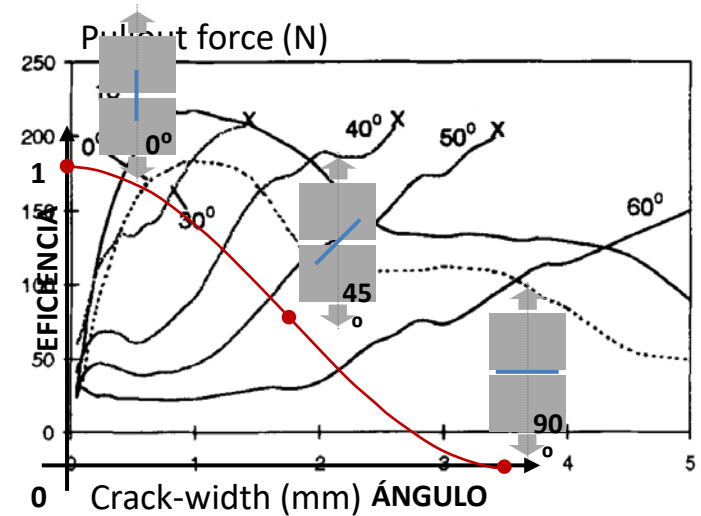
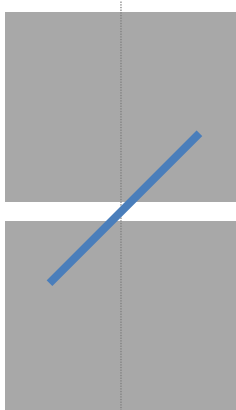
ORIENTACIÓN – RESPUESTA MECÁNICA

ORIENTACIÓN

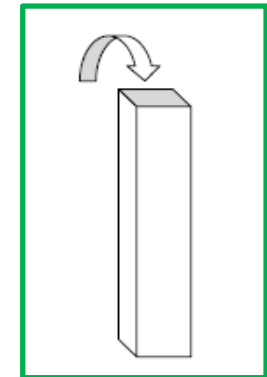
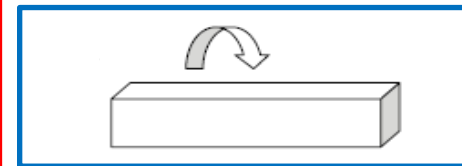
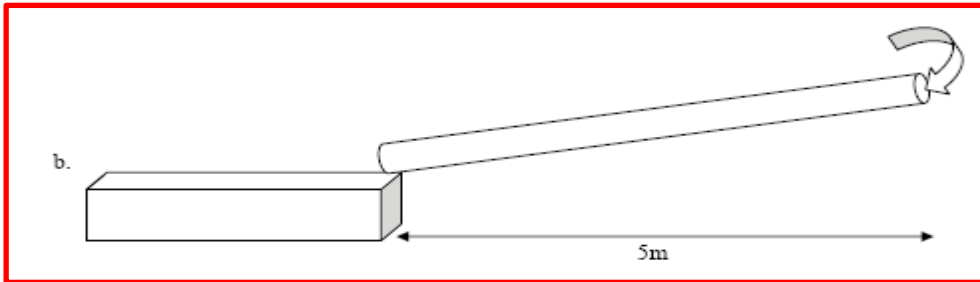
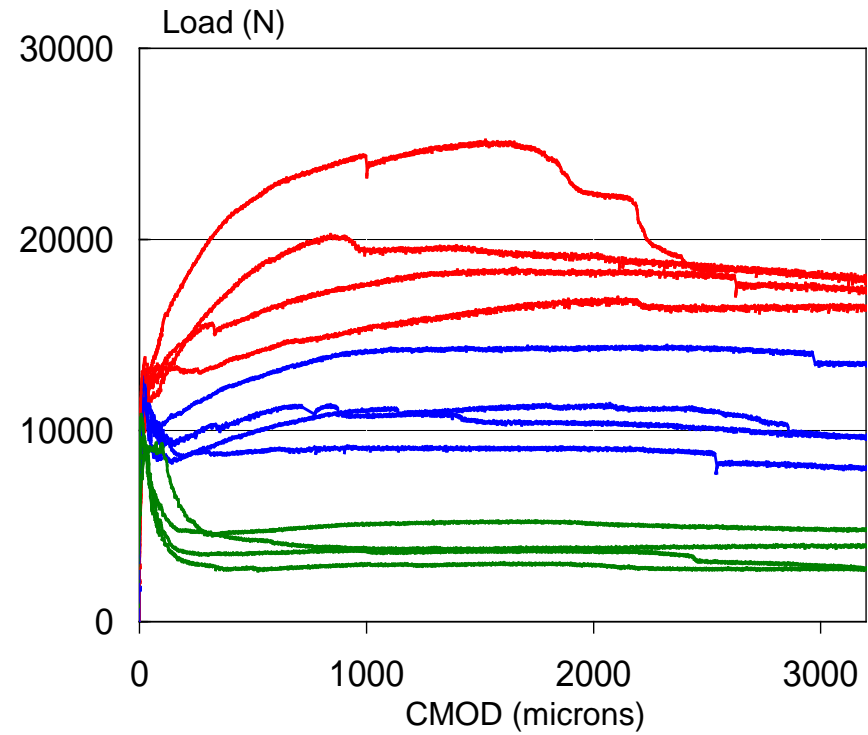
- ✓ resistencia postfisuración → proporcional al número de fibras efectivas presentes en las fisuras activas



- ✓ la efectividad de las fibras depende de su orientación



ORIENTACIÓN



ORIENTACIÓN

- ✓ El HRF **no es un material isótropo**, las fibras **no proporcionan un refuerzo uniforme** en las tres direcciones con igual rendimiento en todas ellas.
- ✓ Existen **orientaciones preferenciales** puede ser una ventaja o una desventaja en función de la aplicación
- ✓ y, es de especial interés el poder **entender – controlar - considerar**.



¿ Cómo y por qué se orientan las fibras?

FACTORES DETERMINATES

ORIENTACIÓN

Causas de la orientación de las fibras. Anisotropismo

MATERIAL

PROPIEDADES EN
ESTADO FRESCO

PROCESO DE PRODUCCIÓN

PROCESO DE
HORMIGONADOEFECTOS
DINÁMICOS

ESTRUCTURA

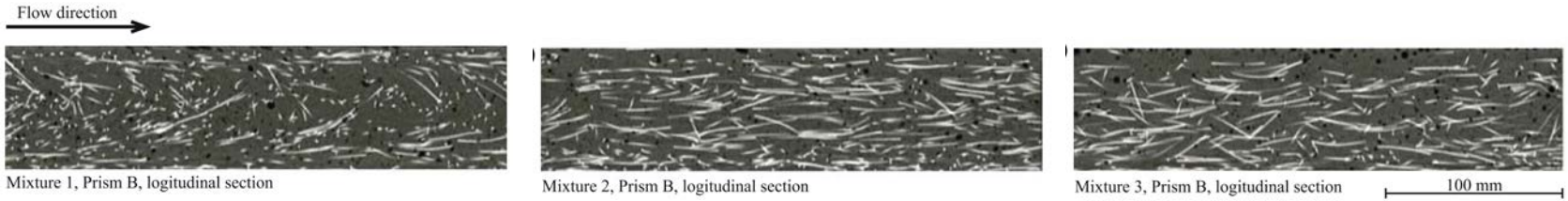
GEOMETRÍA DEL
ENCOFRADOORIENTACIÓN DE
LAS FIBRAS

ORIENTACIÓN

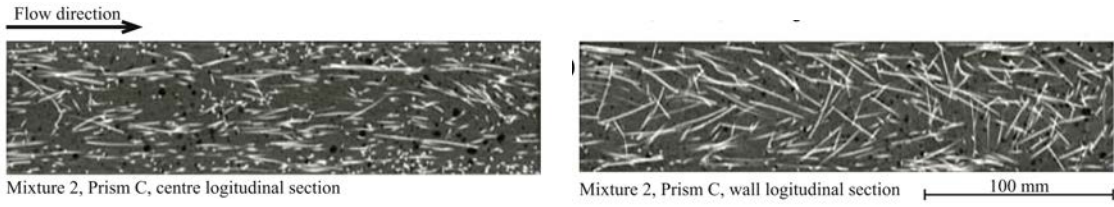


FLUJO DE HORMIGONADO

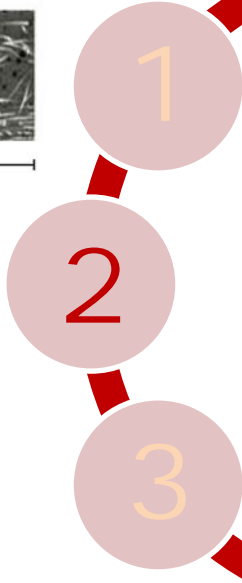
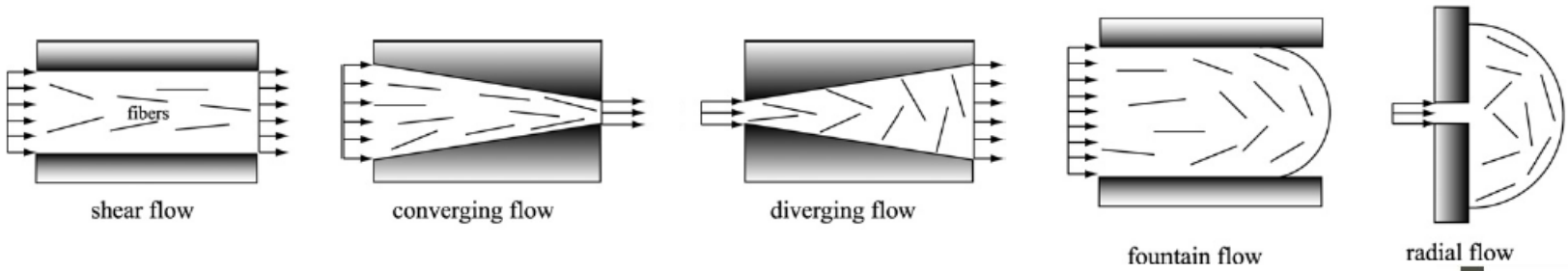
✓ este efecto es más evidente para hormigones **con baja viscosidad**



✓ la orientación se ve afectada por la **velocidad de flujo** y el **tiempo**

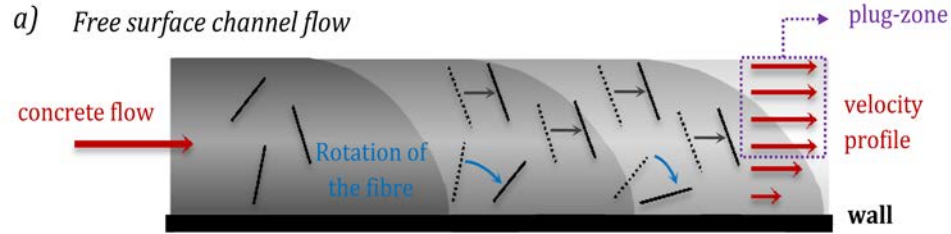


...al flujo de hormigonado podemos considerar diferentes patrones

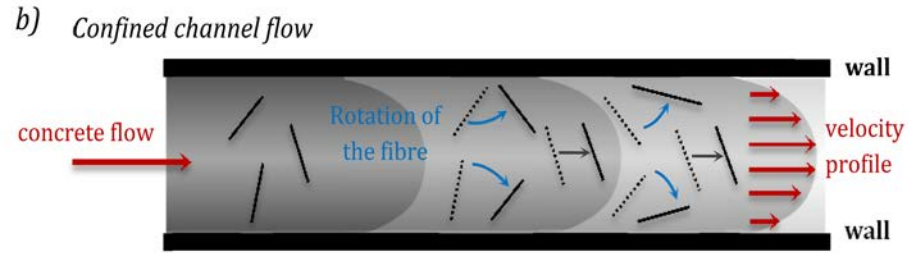


ORIENTACIÓN

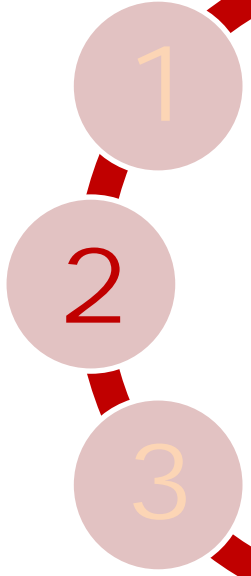
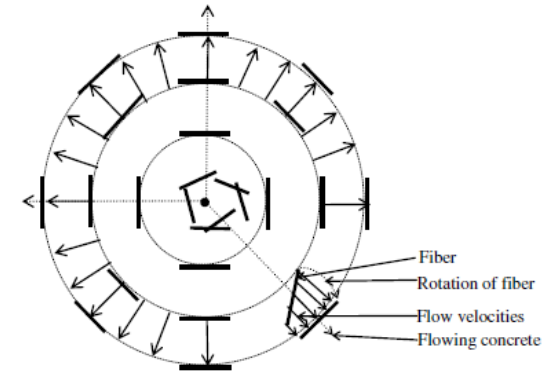
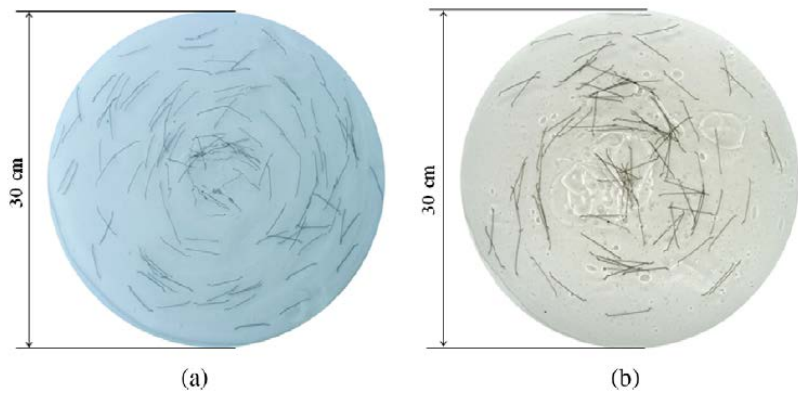
FLUJO DE HORMIGONADO



(a)



(b)

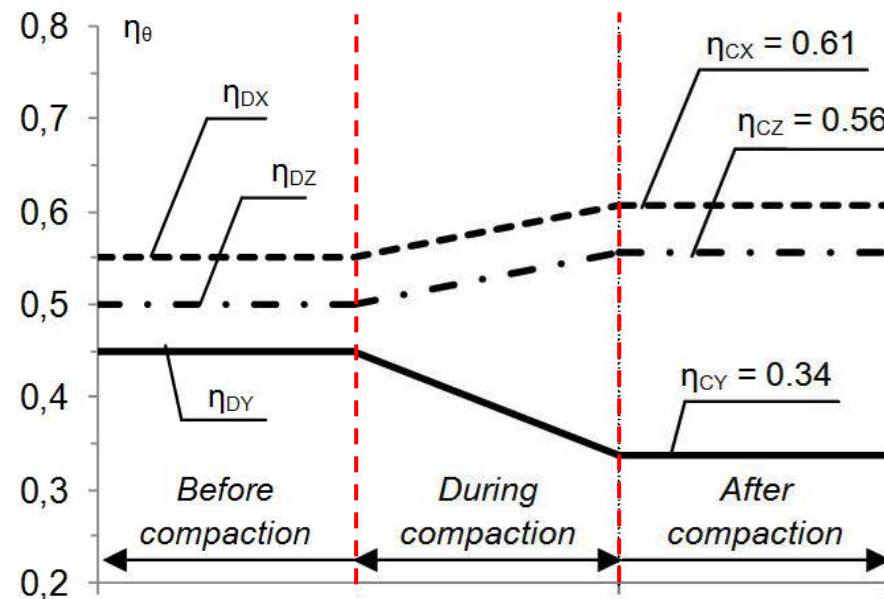
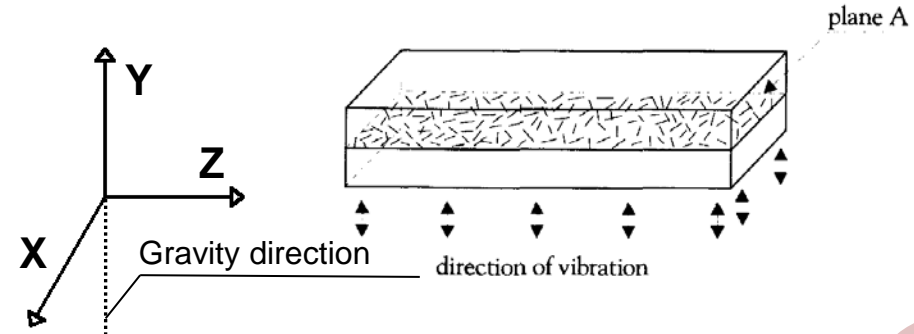


ORIENTACIÓN

la **vibración** puede producir también la **rotación y la alineación de las fibras** preferentemente en una dirección específica (Gettu et al., 2005).

la vibración externa tiende a orientar las fibras en un **plano perpendicular a la dirección de la vibración** (Eddington y Hannant, 1972), con la **tendencia hacia una orientación de la fibra plana** (Soroushian y Lee, 1990; Kooiman, 2000),

cuanto **más se hace vibrar** el HRF **más tienden a alinearse** las fibras en el plano horizontal.



1

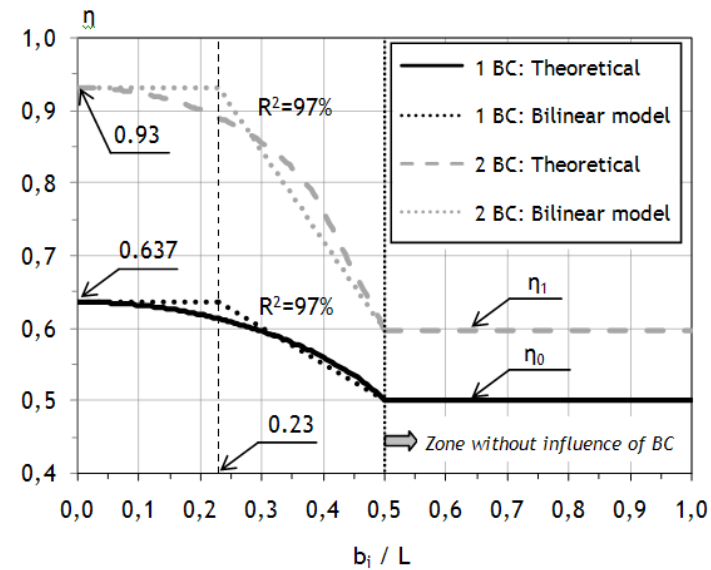
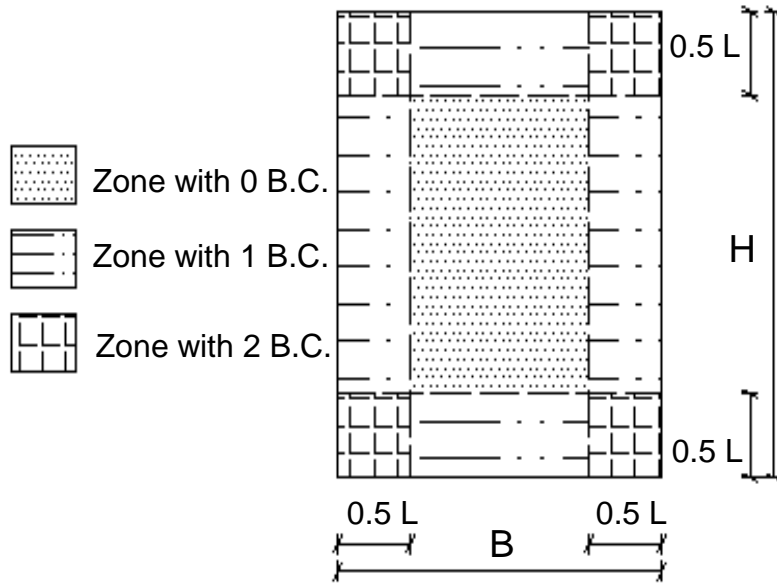
2

3

ORIENTACIÓN



las fibras tienden a tomar una orientación preferencial, **paralelas a la superficie encofrada (efecto pared)**.



1

2

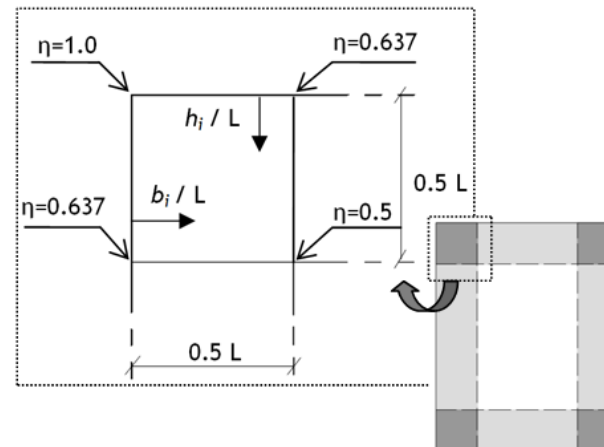
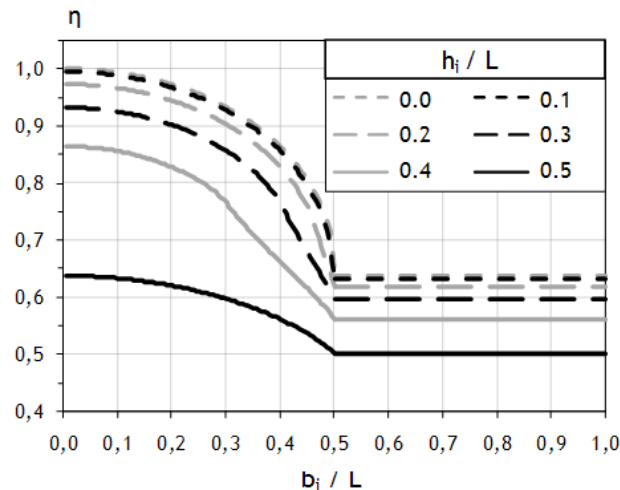
3

ORIENTACIÓN



las fibras tienden a tomar una orientación preferencial, **paralelas a la superficie encofrada (efecto pared)**.

es necesario precisar que este **efecto sólo es local** (en el hormigón en contacto con el encofrado), pero puede ser **importante en elementos de poco espesor y cuando las fibras son largas**.



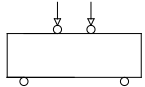
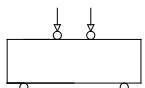
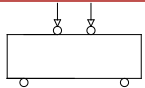
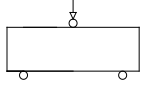
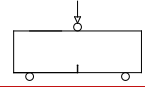
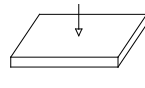
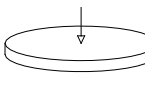

1

2

3

MÉTODOS PARA CONTROL

CONTROL

TEST	SCHEME	Volume (cm ³)	Failure area (cm ²)	Specific Failure area	CV (%)
4-point bending test (ASTM C-1018)		3.500	10x10 = 100	0,0286	15
4-point bending test (NBN B 15-238)		16.875	15x15 = 225	0,0133	12-20
4-point bending test (EFNARC)		5.156	7,5x12,5 = 93,8	0,0182	20
3-point bending test		5.156	7,5x12,5 = 93,8	0,0182	17
3-point bending test (RILEM)		12.375	15x12,5 = 187,5	0,0152	15-25
EFNARC Panel		36.000	8x(32,5x10) = 2.597,7	0,0722	9
Round determinate panel test		37.700	3x(40x7,5) = 900	0,0238	6-13
Double punching test (DPT) BCN - DEWS		2.650	3x(7,5x15) = 337,5	0,1274	13

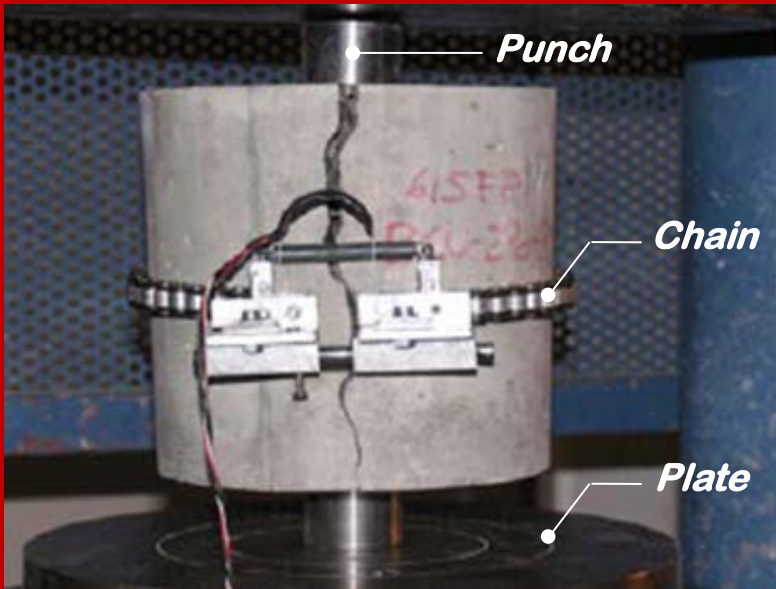
Molins et al. (2009)

CONTROL

DOUBLE PUNCH TEST (DPT)

INDIRECT TENSION TEST FOR
PLAIN CONCRETE

Chen (1970)



CONTROL

influencia directa de las fibras (y su orientación) sobre la resistencia residual



la anisotropía del HRF → ventaja o desventaja (en función de la aplicación)

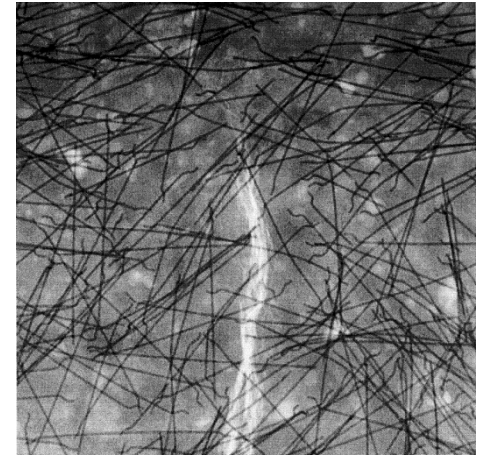
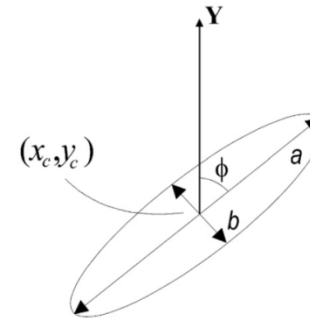
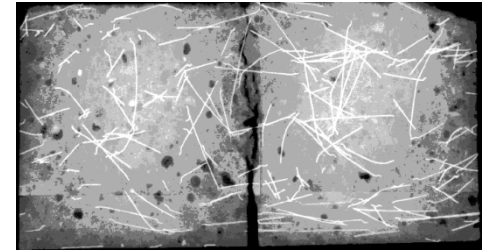
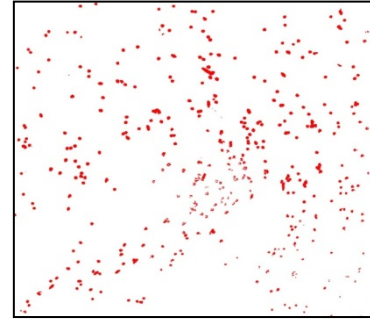
EL PODER CONOCERLA Y CONSIDERARLA EN EL DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS RESULTA A LA VEZ IMPORTANTE Y NECESARIO



MÉTODO	MEDIDA	TÉCNICA	REFERENCIA
DESTRUCTIVO	INDIRECTO	Contaje manual + expression teórica de Krenchel (1975)	Soroushian and Lee (1990); Gettu et al. (2005); Dupont and Vandewalle (2005)
		Ensayos mecánicos	Kooiman (2000); Barragán (2002); Grünewald (2004); Pujadas et al. (2011)
	DIRECTO	Análisis de imagen	Grünewald, 2004; Lappa, 2007
NO DESTRUCTIVO	DIRECTO	Rayos X	Van Gysel, 2000; Robins et al., 2003; Vandewalle et al., 2008
		Tomografía computarizada	Molins et al., 2008; Stälhi and van Mier, 2007
		Espectroscopía de impedancia en corriente alterna	Ozyurt et al., 2006; Ferrara et al., 2008
		Línea de transmisión coaxial	Torrents et al., 2007; Van Damme et al., 2004
		Antena de ondas guía	Roqueta et al., 2009
		Resistividad eléctrica	Lataste et al., 2008
Resistividad magnética	Faifer et al., 2010		
Método inductivo	Torrents, 2012		

CONTROL

- ✓ Ejemplos de **ensayos DESTRUCTIVOS** directos e indirectos



CONTEO
MANUAL

DETERMINACION
DEL PESO

ANÁLISIS
DE IMAGEN

RAYOS - X

CONTROL



CONTEO MANUAL

- Simplicidad y bajo coste
- Aplicable a todo tipo de fibras
- Información de la superficie de fractura

- Impracticable para micro-fibras y altos contenidos de fibras
- Time-consuming

DETERMINACIÓN DEL PESO

- Bajo coste

- Time-consuming
- Solo control de dispersión

ANÁLISIS DE IMAGEN

- Permite medidas individuales
- Sin limitaciones de diametro o cuantía

- Requiere de imágenes de alta resolución
- Únicamente para fibras de acero

X-Ray / TAC

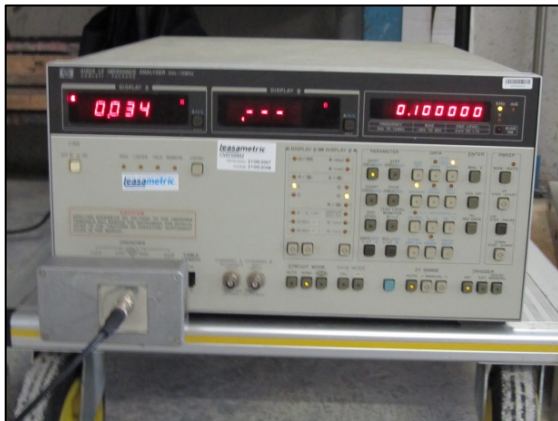
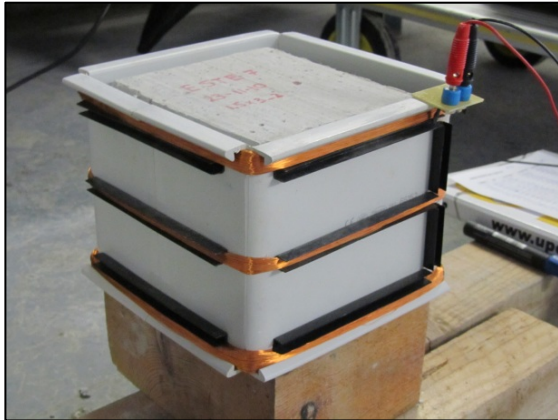
- Permite medidas individuales
- Sin limitaciones de tipo de fibra
- Construcción de modelos 3D

- Limitación del ancho de las muestras
- Costoso economicamente
- Impracticables para el uso industrial

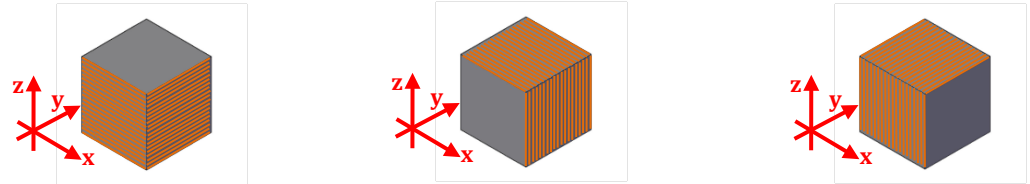


CONTROL

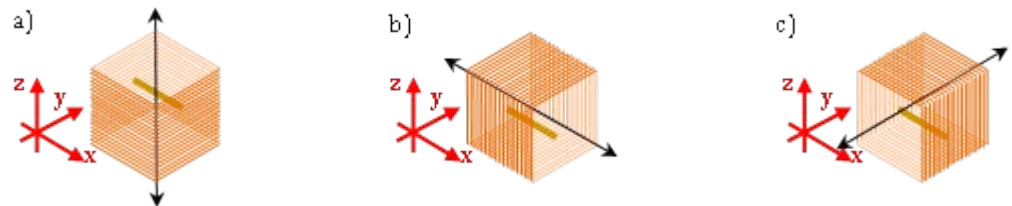
MÉTODO	MEDIDA	TÉCNICA	REFERENCIA
NO DESTRUCTIVO	DIRECTO	Espectroscopía de impedancia en corriente alterna	Ozyurt et al., 2006; Ferrara et al., 2008
		Línea de transmisión coaxial	Torrents et al., 2007; Van Damme et al., 2004
		Antena de ondas guía	Roqueta et al., 2009
		Resistividad eléctrica	Lataste et al., 2008
		Resistividad magnetica	Faifer et al., 2010
		Método inductivo	Torrents et al., 2012



una fibra a lo largo del flujo magnético modifica el coeficiente de inducción mientras que una que lo atraviesa prácticamente no lo modifica



podemos determinar la fracción de fibras que se encuentran orientadas en cada dirección



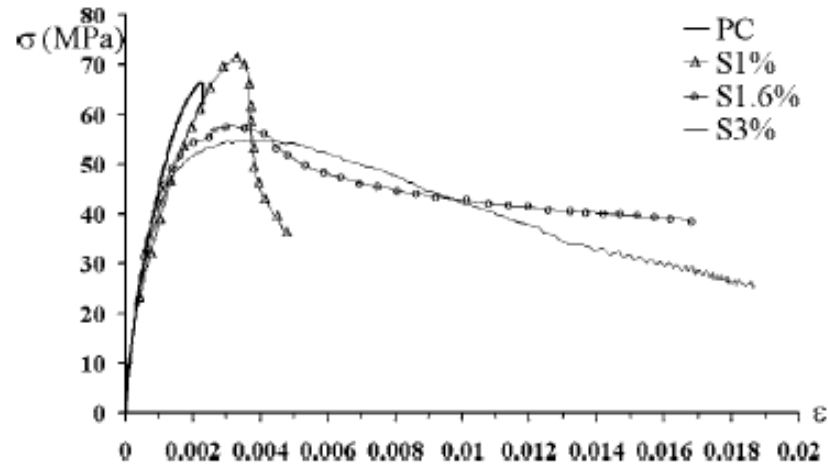


¿Cómo modifican las fibras las características mecánicas del hormigón?

PROPIEDADES MECÁNICAS

P. MECANICAS

- ADICIÓN DE FIBRAS
 - NO afecta a la **resistencia a compresión**
 - SÍ mejora la **tenacidad y ductilidad**

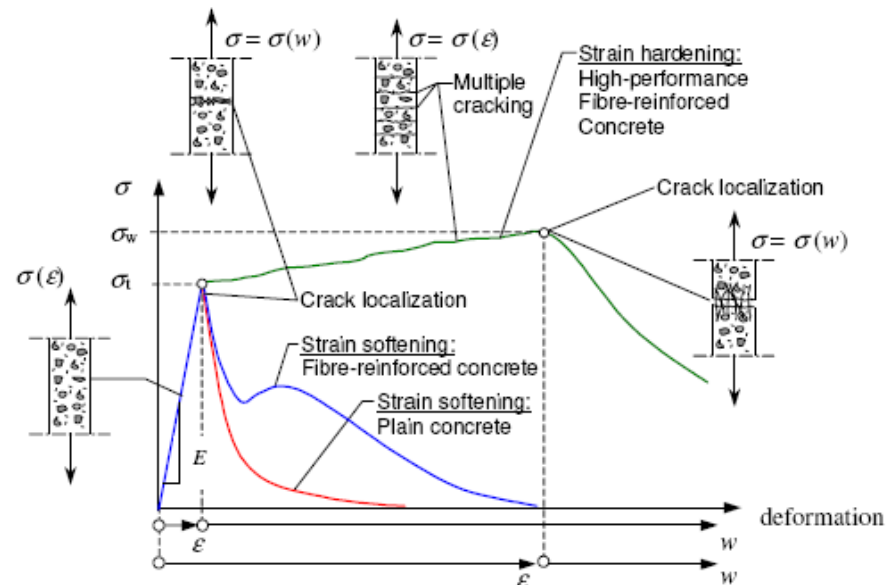


Bencardino et al. , 2008

- FIBRA → **acción de confinamiento** → ↑ **deformaciones** tras la resistencia pico
- DOSIFICACIONES:
 - Bajas - Intermedias (<1%) → ↑ f_{ck}
 - Altas (> 1%) → ↓ f_{ck}
- FIBRA = ÁRIDO DE BAJO COEFICIENTE DE FORMA**

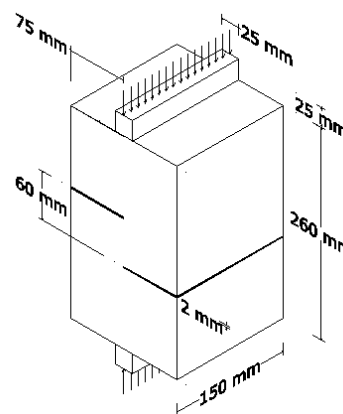
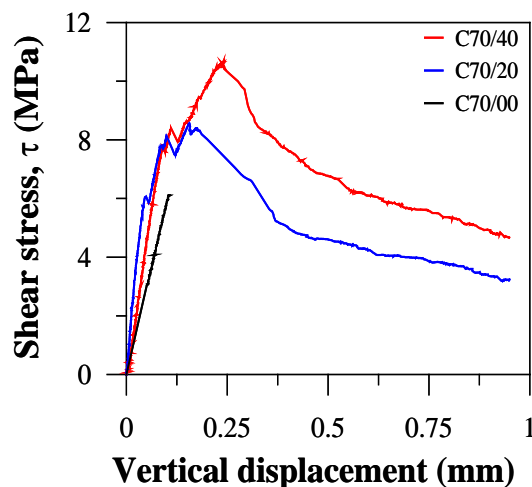
P. MECÁNICAS

- FIBRAS → **NO** afecta a la **resistencia a TRACCIÓN** → dada por la **MATRIZ**
- DIAGRAMA **TENSIÓN-DEFORMACIÓN**
 - Hormigón **SIN** fibras:
 - lineal hasta fisuración + agotamiento frágil
 - Hormigón **CON** fibras:
 - lineal hasta fisuración + resistencia residual



P. MECÁNICAS

- Las **fibras** con **función estructural contribuyen** de forma significativa a **resistir el esfuerzo a cortante** (Lars Kützing, 1997).
- 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 :

$$V_u = V_c + V_w + V_f$$

V_c = contribución del hormigón

V_w = armadura de cortante

V_f = contribución de las fibras de acero



¿Cómo lo dosificamos?

DOSIFICACIÓN DEL HRF

DOSIFICACIÓN**❖ Factores a considerar en la dosificación:**

- Relación a/c
- Contenido cemento
- Tamaño máx. y granulometría del árido
- Tipo y contenido de fibras
- Tipo y contenido de adiciones / aditivos



DOSIFICACIÓN

Factores

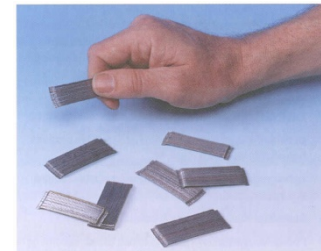
- ❖ Relación a/c influye en la **porosidad**
- ❖ Contenido de cemento
- ❖ Árido influye en **dispersión** fibra y **cohesión**
- ❖ Fibra (contenido y geometría) influye en la **efectividad** y la **trabajabilidad**.
- ❖ Aditivos influyen en la **consistencia**
- ❖ Adiciones (cenizas volantes y humo de sílice)

Cuidado con:

- Durabilidad y Resistencia
- Docilidad
- Segregación
- Formación de erizos
- Relación a/c

Recomendaciones

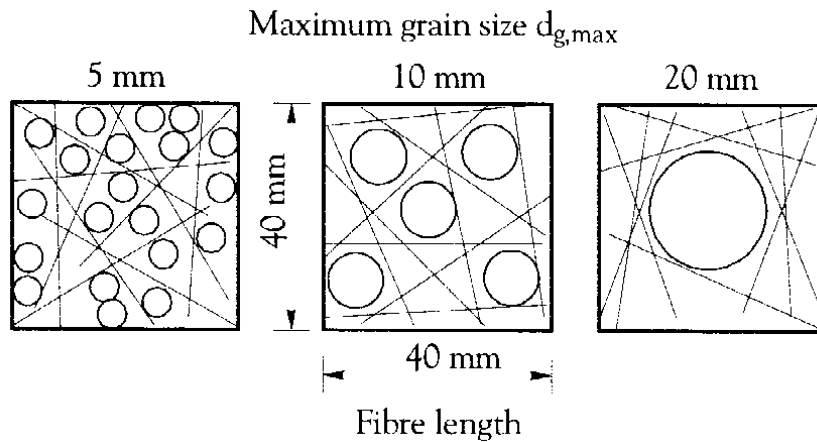
- ✓ Relación a/c : 0,4-0,65
- ✓ Contenido cemento: 300-450 kg/m³ (30-40% pasta de cemento)
- ✓ Tamaño máx. del árido menor que un H. convencional
- ✓ Fibras encoladas en peines (formación de erizos)
- ✓ $l_f > 1,5$ tamaño máx. árido



DOSIFICACIÓN

ÁRIDOS, ADITIVOS y ADICIONES

- ❖ Áridos **rodados** y mayor cantidad de **finos**
- ❖ Limitación del tamaño máx. de árido para facilitar **movilidad de fibras**



- ❖ Limitaciones:
 - ✓ 2/3 de la longitud de la fibra
 - ✓ 1/5 del lado menor del elemento
 - ✓ 3/4 de la distancia libre entre barras de armado
- ❖ Aditivos: superfluidificantes
- ❖ Adiciones: materiales puzolánicos

NORMAS EUROPEAS



DBV Merkblatt Stahlfaserbeton,
Deutsche Beton Vereins (2001)



RILEM TC 162-TDF Test and design methods for steel
fibre reinforced concrete σ - ϵ design method:
Final Recommendation (2003)



CNR-DT 204 Istruzioni per la Progettazione,
l'Esecuzione e il Controllo di Strutture
Fibrorinforzate (2006)



EHE-08: Instrucción del Hormigón Estructural.
Anejo 14: Recomendaciones para la
utilización del hormigón con fibras (2008)

FUTURO

- Herramientas de cálculo para el **diseño de elementos con HRF y/o armadura mixta** (fibras + barras de acero) como **solución competitiva**.
- La inclusión de los HRF en las **normas y recomendaciones** para eliminar el vacío normativo que impide a los profesionales emplear este material como solución estructural.
- **Reducción de la armadura convencional** a favor de las fibras en elementos masivos como las dovelas en un túnel.
- Nueva generación de HRF como **“cocktail” de diferentes tipos de fibra** (geometría y/o material).



Pablo PUJADAS ÁLVAREZ
pablo.pujadas@upc.edu

