

23
Novembre

LA FIBRA DE CARBONI EN REFORÇ D'ESTRUCTURES DE FORMIGÓ

Josep Baquer

¿PER QUÉ LA FIBRA DE CARBONI (CFRP)?

Molt bona solució de cara al reforç d'estructures existents de FA

- Increment de sobrecàrrega
- Resolució de defectes de projecte o d'execució
- Canvis en configuració estructural original
- Pèrdua de resistència de l'armat

Posada a obra

- Facilitat d'execució
- Temps de prestació



¿PER QUÉ LA FIBRA DE CARBONI (CFRP)?

- Què pot resoldre?

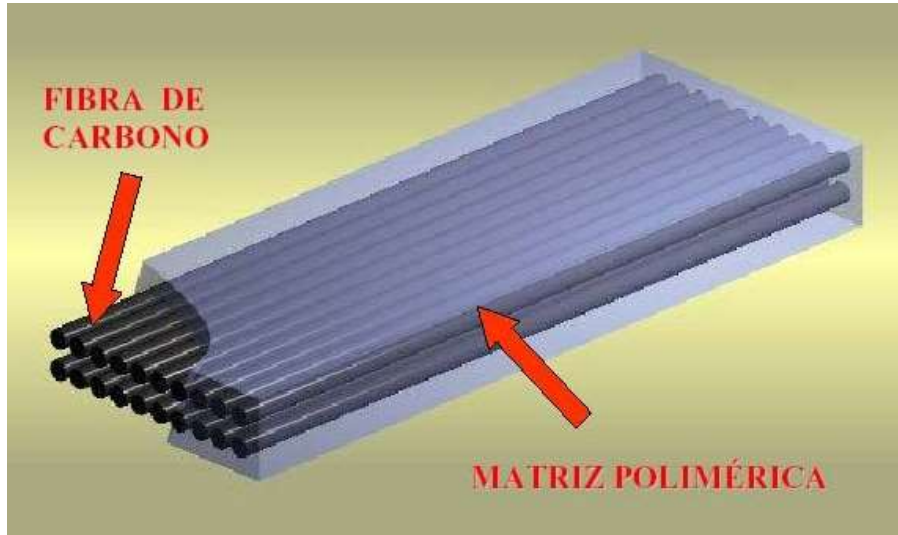
- Mancances de tracció a **flexió**
- Mancances de **tallants**
- Insuficiència de resistència a **compressió** pilars
- Millora de la **ductilitat** (sisme)



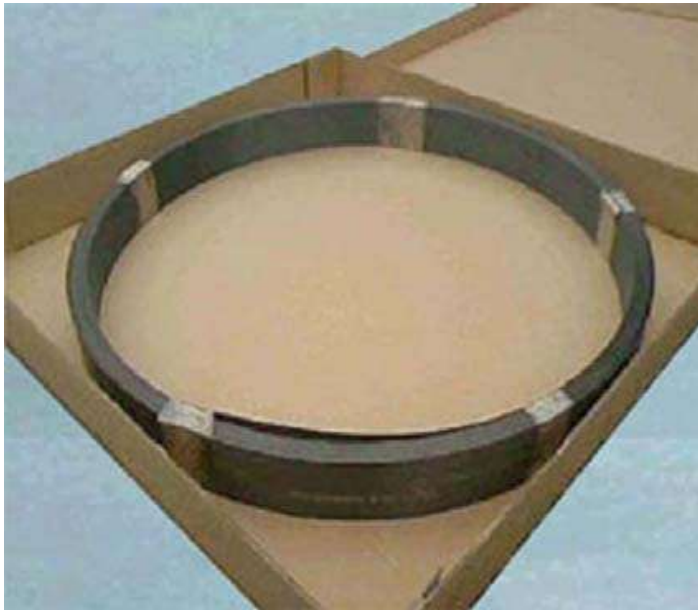
- Què no pot resoldre?

- Problemes de **deformacions** (“fletxa”)
- Problemes de **tallant**: bigues planes o lloses
- No s’hi pot comptar en situació accidental **d’incendi**

¿DE QUÈ ESTEM PARLANT?



CFRP: **C**arbon **F**iber
Reinforced **P**olymer



LAMINATS DE CFRP

¿DE QUÈ ESTEM PARLANT?



TEIXITS CFRP

¿DE QUÈ ESTEM PARLANT?



RESINES

¿DE QUÈ ESTEM PARLANT?



**CONTROL DE
QUALITAT**

¿PER QUÉ UN MONOGRÀFIC ACE-IEE?

“UN LLIBRE BLANC”

- Referent clarificador
- Consensuat
- Reuneix i sintetitza coneixements i experiència

GUIA DE CàLCUL

- Reforç a flexió
- Reforç a tallant
- Reforç a confinament

GUIA DE DISSENY

- Sistemes de reforç
- Requeriments
- Disseny i execució
- Inspecció i control
- Recepció a obra
- Recepció d'obra



¿PER QUÉ UN MONOGRÀFIC ACE-IEE?

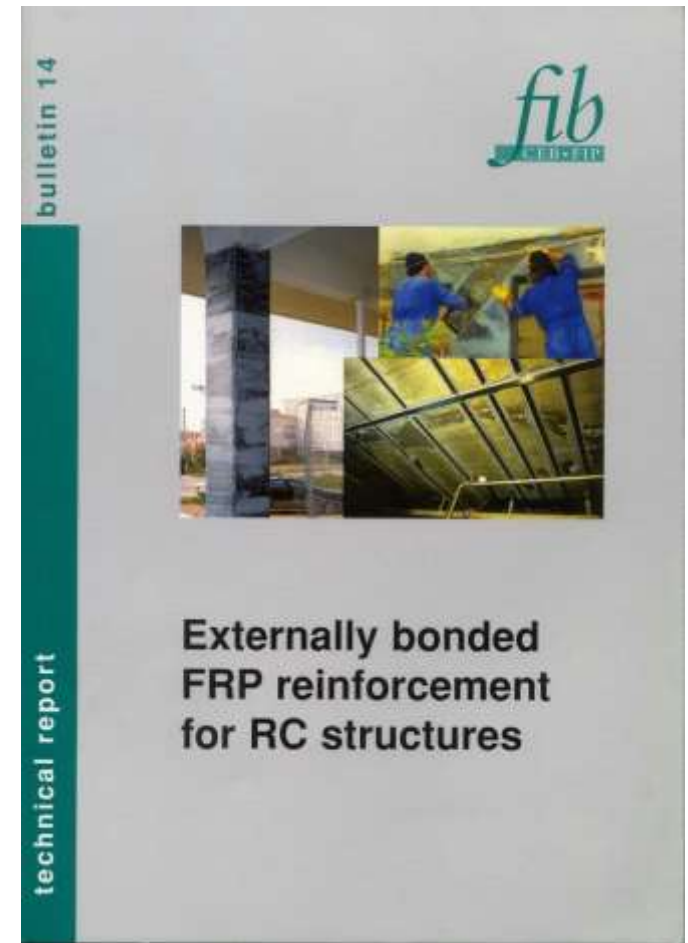
PROPOSTA



- A partir de: molts **estudis i assaigs** (fabricants, universitats)
- Considera que hi ha condicions i coneixements suficients que permeten emprar la CFRP considerant “**risc normal**”
- Homologar i **consensuar criteris**
 - fabricants i proveïdors
 - bases de càlcul
- **Empreses** que hi participen: BASF , BETEC-PROPAMSA, IBERMAPEI, , SIKA
- Referència com a “**memòria i plec de condicions**” de projecte
- Facilitar-ne l’acceptació per part de les **asseguradores**

CFRP: PRODUCTE INNOVADOR

- Prenormativa europea: Butlletí 14
- CTE-I-5.2-5: Producte innovador
- Norma Italiana: CNR



GUIA DE DISSENY

Objetiu:

Resumir, **clarificar**, **consensuar**
tots els aspectes que permetin
a qualsevol tècnic (projectista,
director d'execució, cap d'obra)

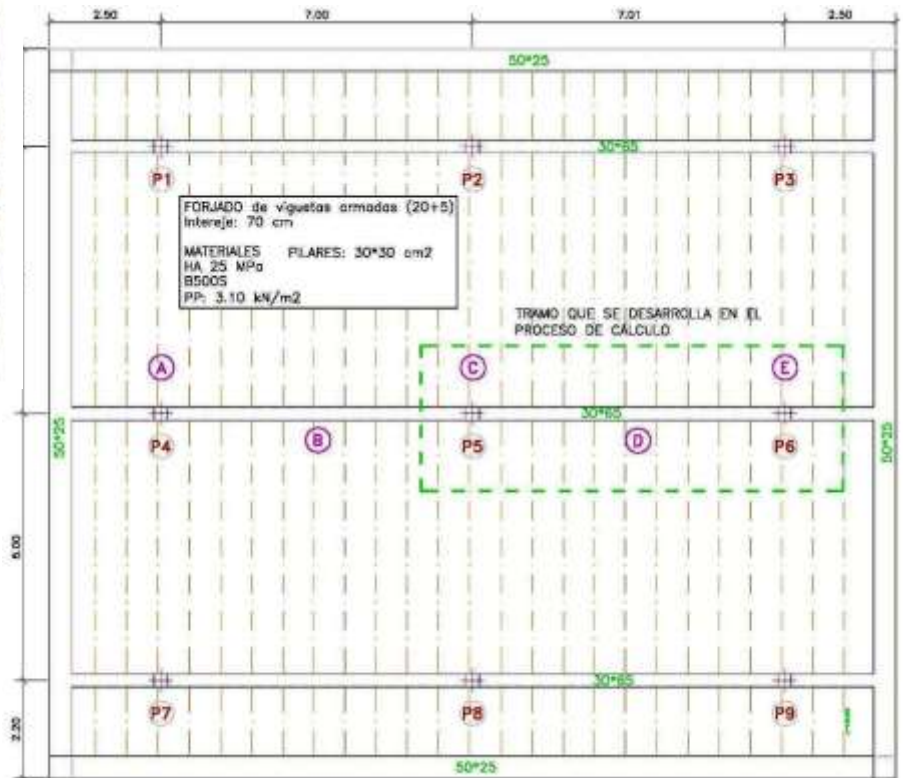
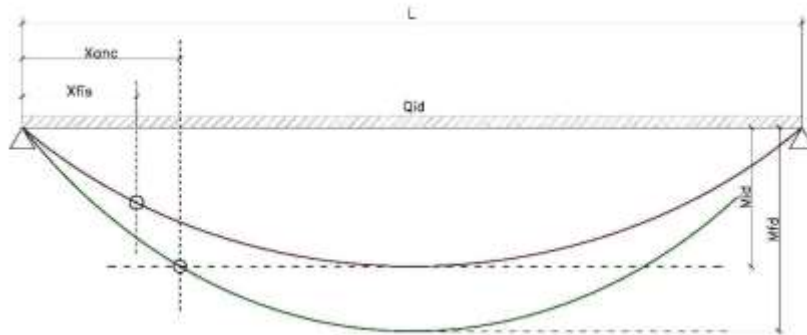
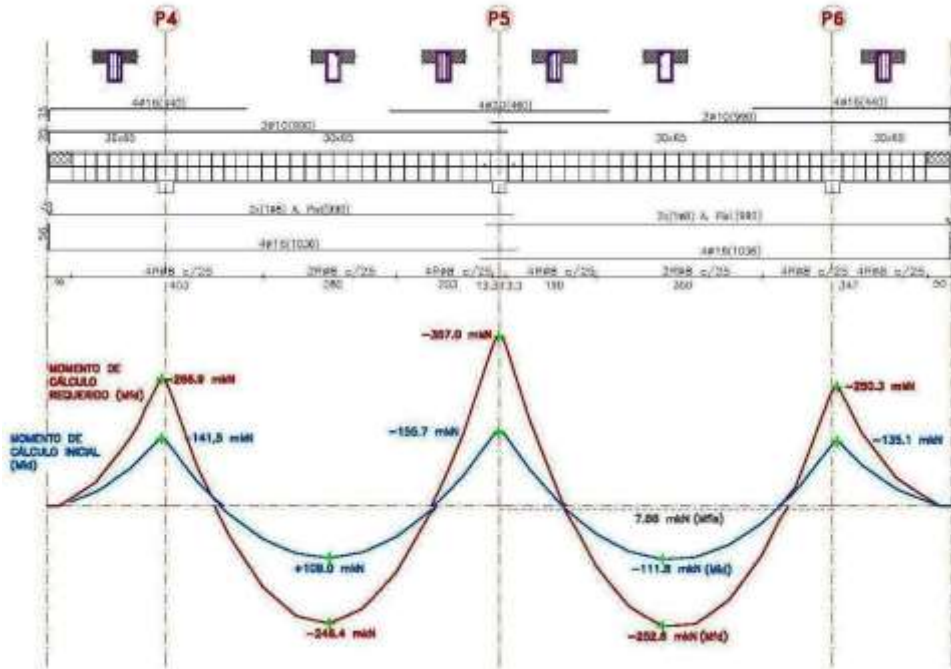
- Conèixer les condicions per a **projectar** i executar
- Facilitar-li la redacció d'una memòria i **plec de condicions** de projecte.
- Facilitar el **control de qualitat** a obra.
- Facilitar el coneixement de la bondat i fiabilitat del producte a les companyies **asseguradores**.



GUIA DE CàLCUL

OBJECTIU:

Abordar el tema del càlcul des de la realitat: normalment s'ha de **resoldre pòrtics** i no seccions (de bigues bi-recolzades)



GUIA DE CÀLCUL: CRITERIS

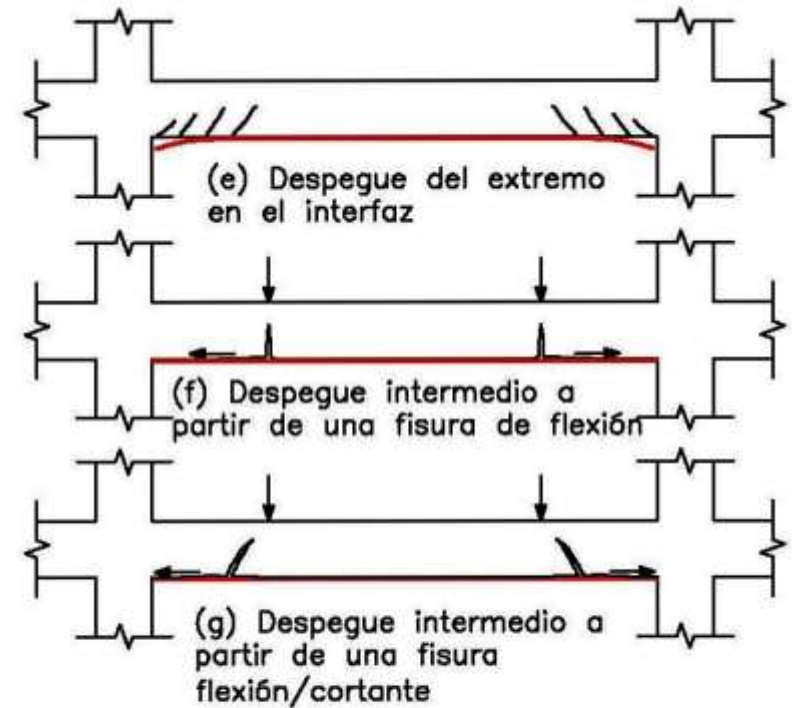
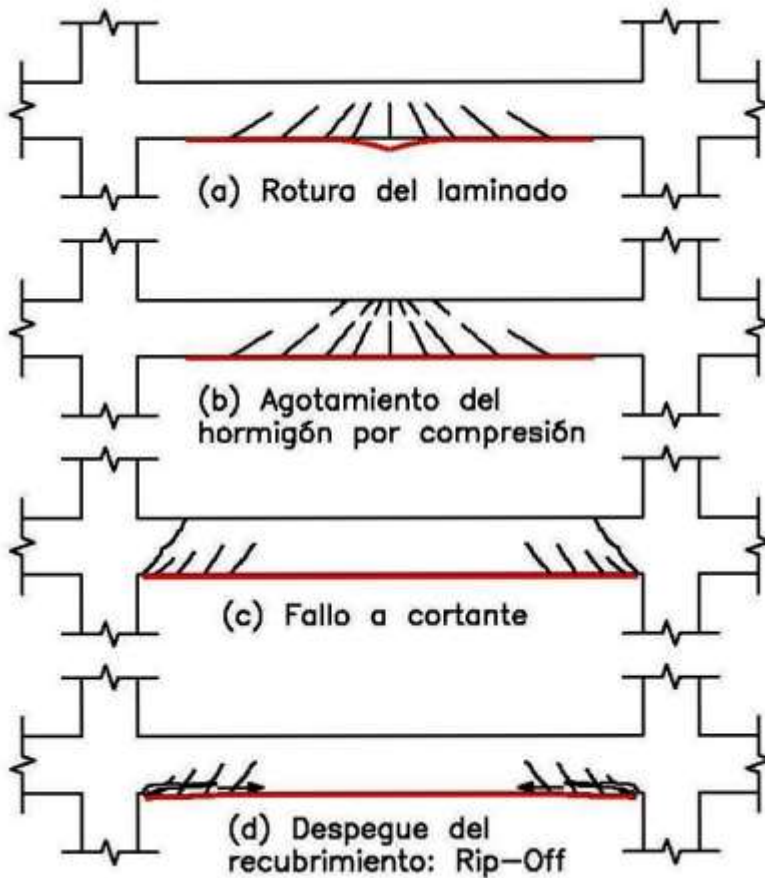
1. Referir-nos si és possible al **Fib 14** i a la normativa actual (**EHE 08**), no fent cap pas en el procés que no es justifiqui.
2. Procedir tot explicant el **procés pas a pas**, deixant molt clares totes les condicions que cal complir.
3. S'avança tot desenvolupant el procés de càlcul i al mateix temps resolent **l'exemple** del pòrtic en estudi.



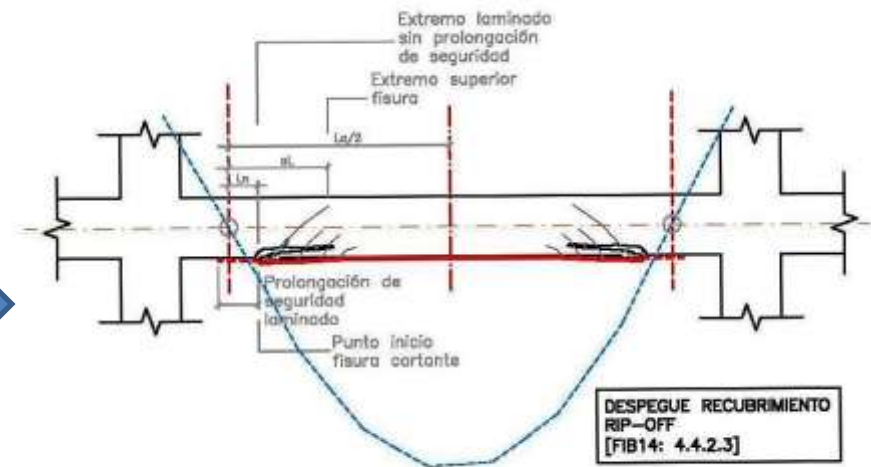
60. **OBJETIVO.** Verificar la capacidad de respuesta al despegue por «rip-off».
61. Desarrolló el método de cálculo empírico *Jarvis*. Es tal vez el «fallo» más común. En realidad, es un fallo del hormigón de recubrimiento de la armadura que es *arrastrado* por las bandas de CF. El método contempla dos condiciones, a) una referente al cortante de desgarro del hormigón (V_{rd}), y otra b) que tiene en cuenta factores geométricos: ambas deben cumplirse a la vez.
62. V_{rd} se calcula en función de la resistencia característica a cortante del hormigón (τ_{rd}) y de la superficie de la sección de hormigón comprimida ($b \cdot d$). Ese valor debe ser superior al esfuerzo cortante de la viga en el punto de momento nulo (V_{sd}).
63. Se deben cumplir además, unas condiciones geométricas un tanto «abstractas» que dependen entre otros datos de la distancia del final del refuerzo al punto de momento nulo.
64. Distancia de seguridad (L_n) respecto de la del inicio de la fisura de cortante (X_{fis}) a punto de momento nulo. Ver Fib 14: 4.4.2.3. Se estima un factor de seguridad 0.15 aplicado a X_{fis} , que permita el cumplimiento de $V_{rd} > V_{sd}$.

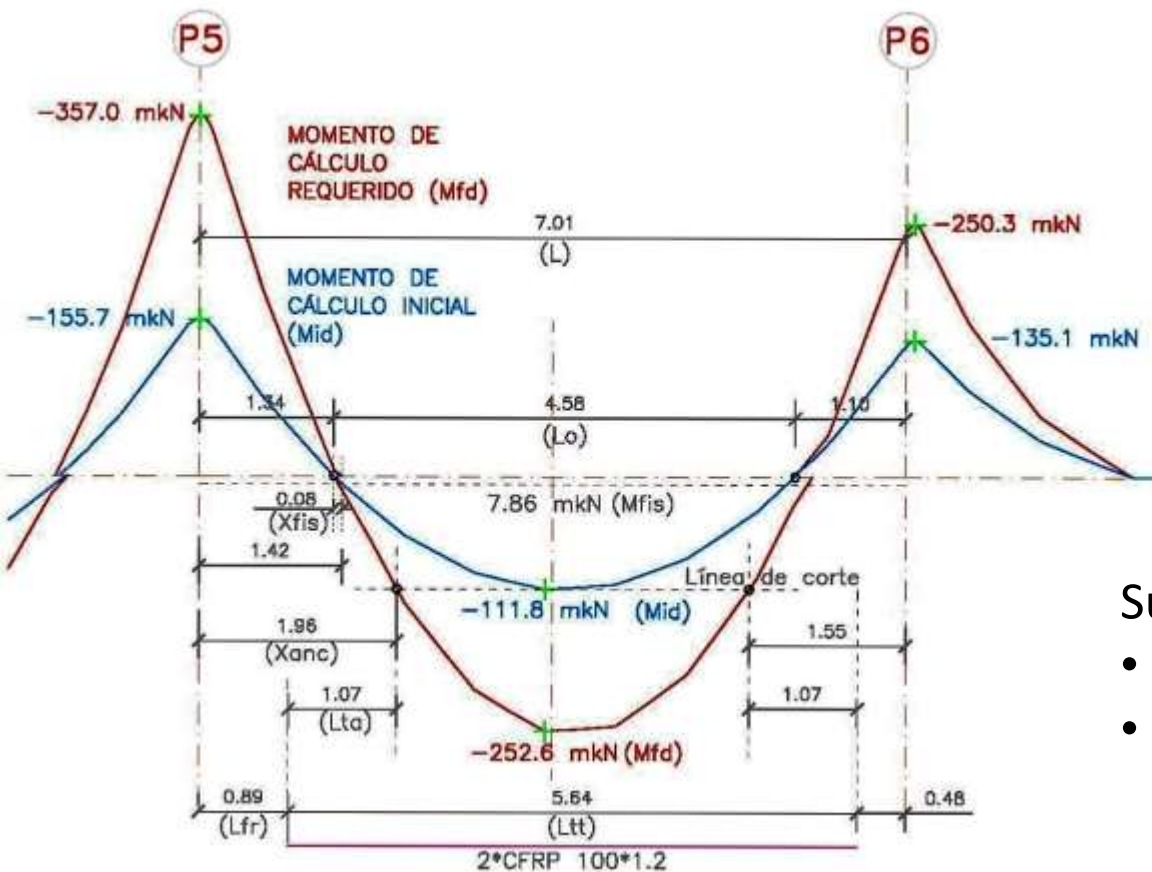
REF.	VALOR	Ud.	FÓRMULA	COMENTARIO
L_n	12,58	mm	$L_n = 0,15 \cdot X_{fis}$	Distancia de seguridad a inicio de fisura cortante.
a_L	124,60	mm	$a_L = [(1 - \rho_s^{0,5})^2 \cdot d + L_n^3 / \rho_s]^{0,25}$	Distancia del extremo superior de la fisura cortante al apoyo.
τ_{rd}	1,26	N/mm ²	$\tau_{rd} = 0,15 \cdot (3 \cdot d / a_L)^{0,33} \cdot (1 + (200/d)^{0,5}) \cdot (100 \cdot \rho_s \cdot f_{ck})^{0,33}$	Tensión de cizallamiento.
V_{rd}	231,07	kN	$V_{rd} = \tau_{rd} \cdot b \cdot d / 10^3$	Cortante de cálculo.
L_b	790,30	mm	$(L - L_n) / 2$	Distancia del extremo CF al eje del apoyo.
Cond_1	622,58		$L_n + d < L_n / 2$	Condición 1 (geométrica).
Cond_2	2.290,00		$L_n / 2 > a_L$	Condición 2 (geométrica).

MODES DE FALLIDA



Fallida más frecuente:
RIP-OFF

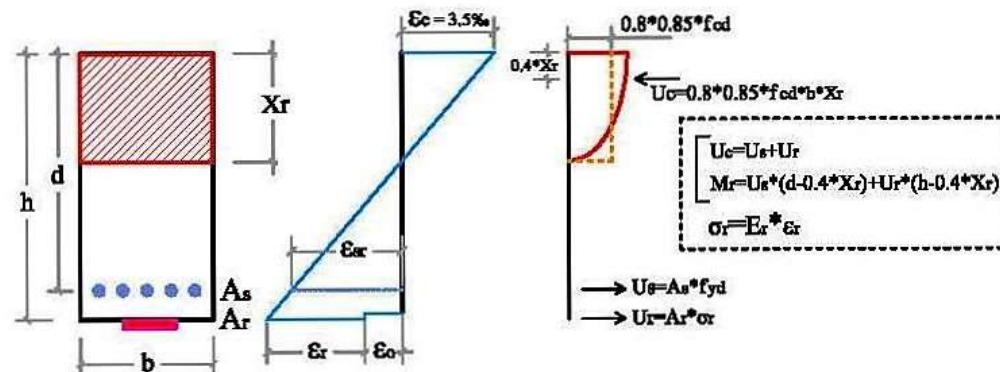




DIMENSIONAT A FLEXIÓ

- Superposició de diagrames:
- Situació **prevista** (original)
 - Situació **requerida**

Equacions d'equilibri i
diagrama de deformacions



FULL DE CàLCUL SECCIO RECTANGULA A FLEXIÓ

CFRP - FLEXIÓN - ELU

DATOS				CÁLCULO						APLICACION VIGA	
Materiales y Geometría				ELU Sección		Situación previa FIB 14		Situación reforz. FIB 14		L (mm)	
Hormigón		Acero-Tracción		X _u (mm)	102,85	ρ _s	0,0044	U _e (N)	3,40E+03	L ₀ (mm)	7.000,00
f _{ck} (N/mm ²)	25	f _y (N/mm ²)	500	M _u (mm·N)	1,99E+08	n	7,34	U _{cd} (N)	6,76E+05	Q _{ld} (N/mm)	42,64
f _{cd} (N/mm ²)	16,67	f _{yd} (N/mm ²)	434,78	M _u (m·kN)	198,92	X (mm)	59,06	U _{sd} (N)	3,50E+05	X _{fis} (mm)	6.946,91
f _{cm} (N/mm ²)	33,00	E _s (N/mm ²)	2,00E+05			I _x (mm ⁴)	2,07E+10	U _{rd} (N)	3,26E+05		81,99
f _{ct} (N/mm ²)	2,56	Ø (mm)	16			I _h (mm ⁴)	2,22E+10	X _r (mm)	198,85		Q _{rd} (N/mm)
E _c (N/mm ²)	2,73E+04	n°Ø	4			I _f (mm ⁴)	1,81E+09	X _r /d	0,33	X _{anc} (mm)	5.210
b (mm)	300	A _s (mm ²)	804,25			ε _c	9,22E-05	M _r (mm·N)	3,72E+08		1.790
h (mm)	650	Laminado CF				ε _s	8,60E-04	M _r (m·kN)	371,69		V _{sd} (kN)
r _s (mm)	40	E _r (N/mm ²)	1,70E+05			ε _o	9,23E-04	σ _r (N/mm ²)	1193,13	ANCLAJE	
d (mm)	610	σ _{fd} (N/mm ²)	1.700,00			Situación incendio		ε _{sr}	7,24E-03	M _{as} (mmN)	7,86E+06
Solicitaciones		b _r (mm)	100	DOM. DEFORMACIÓN		M _{fd-incd} (mkN)	180,43	f _{yd} /E _s	2,17E-03	M _{fs} (mkN)	7,86
M _{ld} (mkN)	111,80	t (mm)	1,2			RENTABILIDAD CF		ε _r	7,02E-03	L _{anc} (mm)	558
M _{ld} (mmN)	1,12E+08	n _r	2,00	ε _{Rd}	8,00E-03	M _{cd} <M _{FE}	Óptima	T _r (kN)	286,35	L _{ta} (mm)	1.000
M _{fd} (mkN)	252,60	A _r (mm ²)	240,00	M _{FE} (mmN)	4,37E+08	M _{ldg} <M _{ld} <M _{lim}	Buena			Y _{anc}	1,79
M _{rd} (mmN)	2,53E+08			M _{lim} (mmN)	6,25E+08	M _{ld} >M _{lim}	Mala			REFUERZO CF	
										L _{fr} (mm)	5.419

COMPROBACIÓN MODOS DE FALLO								
A flexión			A cortante					
Pérdida de adherencia del laminado			Despegue por fisuras de cortante (<i>Peeling-off</i>)		Desgarro extremo laminado + hormigón recubrimiento (<i>Rip-off</i>)			
Modelo A Rostas-Neubauer	L_a (mm)	352,52	Modelo C Matthys	ρ_l	4,39E-03	Modelo D Jansze	L_n	15,00
	k_b	1,22		ξ	1,57		a_L (mm)	142,16
	σ_a (N/mm ²)	424,98		V_{cu} (kN)	63,47		τ_{rd} (N/mm ²)	1,21
				τ_k (N/mm ²)	1,04		V_{rd} (kN)	221,23
ρ_{eq}				5,51E-03	Condiciones geométricas			
		V_c (kN)		190,98	L_{fr} (mm) =		790,30	
					Cond. 1		625,00	
					Cond. 2	2.290,00		

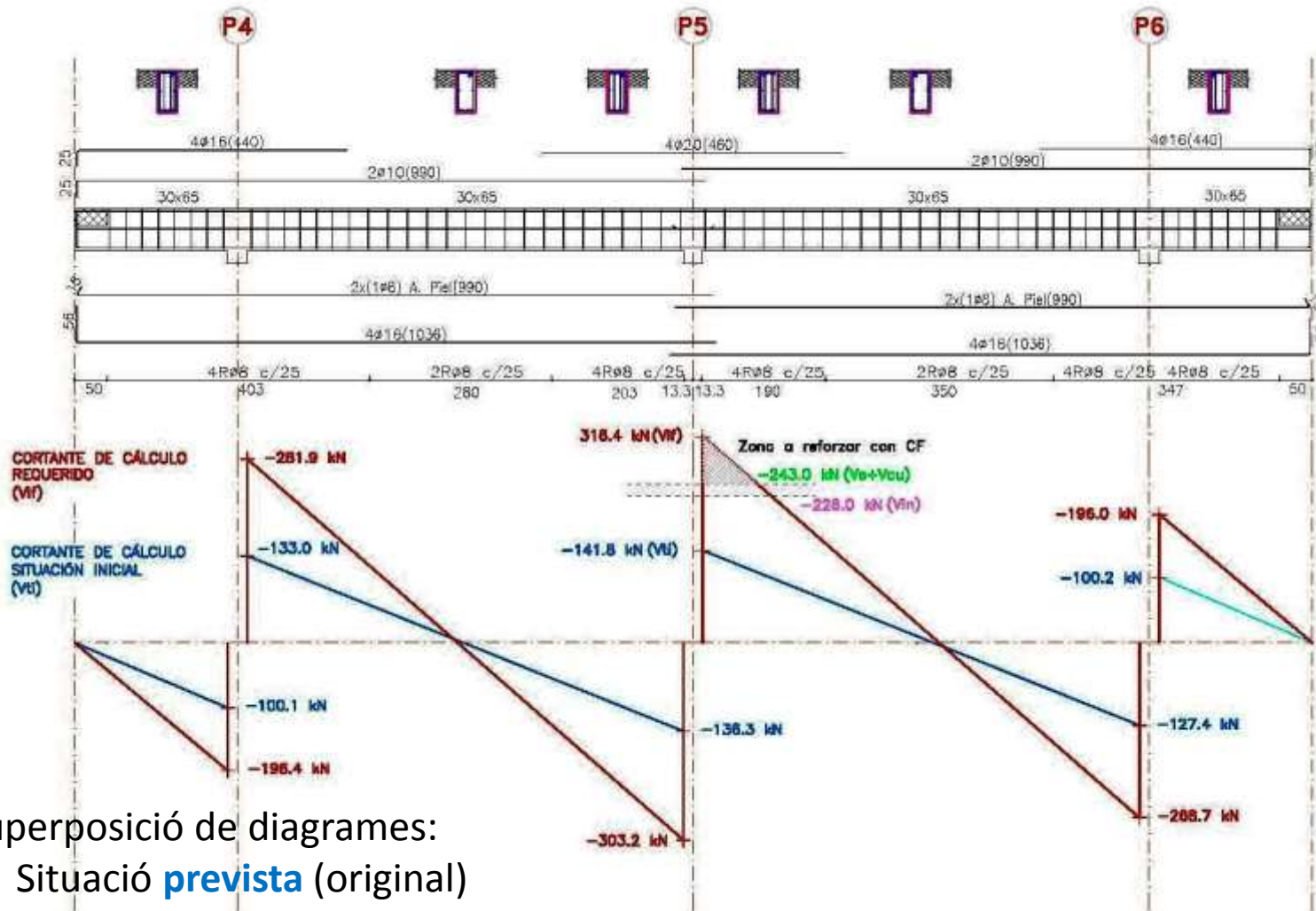
Les cel·les en groc són les variables

Condicions:

- En **blau** compleix
- En **vermell** no compleix

Considerar les sol·licitacions a “tallant”
Abans de considerar el tema de la “flexió”

**DIMENSIONAT
A TALLANT**

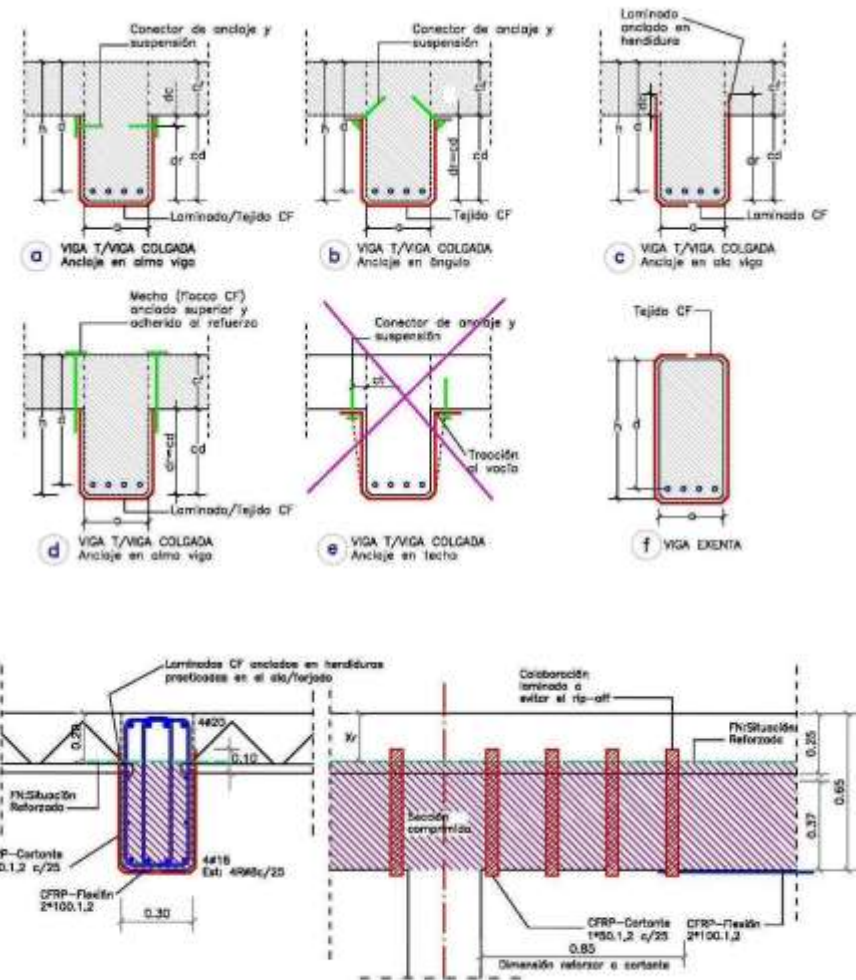


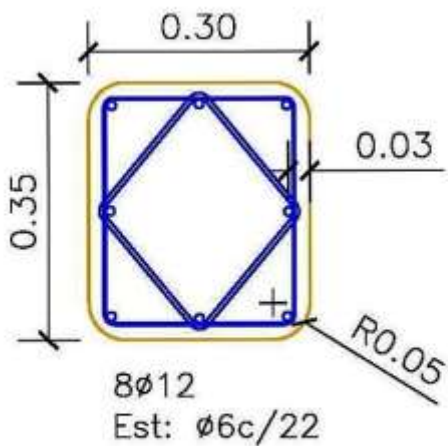
Superposició de diagrames:

- Situació **prevista** (original)
- Situació **requerida**

FULL DE CàLCUL A TALLANT

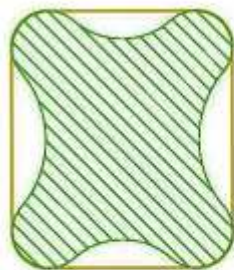
CFRP - CORTANTE- ELU									
Materiales y Geometría						Cálculo			
Hormigón		Acero-Tracción		Fibra Carbono		CONTRIBUCIÓN FRP			
f_{ck} (N/mm ²)	25	f_y (N/mm ²)	500	θ°	45	(1) Envoltura continua			
f_{cd} (N/mm ²)	16,67	f_{yd} (N/mm ²)	434,78		0,785	ρ_{fr}	8,00E-03		
f_{cm} (N/mm ²)	33,00	E_s (N/mm ²)	2,00E+05	α°	90	ε_{fr}	1,38E-03		
f_{ed} (N/mm ²)	2,56	$\varnothing$ (mm)	18		1,57	$V_{d,0}$ (kN)	279,89		
E_c (N/mm ²)	2,73E+04	$n^\circ_{\varnothing}$ (ud)	4	t (mm)	1,2	(2) Continua en U			
b (mm)	300	A_s (mm ²)	804,25	ρ_c	1	ε_d	1,47E-03		
h (mm)	650	Acero-Estribos		K_m	1	V_d (kN)	255,18		
r_s (mm)	40	$\varnothing_s$ (mm)	8	t_s (mm)	1,20		238,60		
d (mm)	610	R_r	4	b_r (mm)	50	$V_{d,0}$ (kN)	183,54		
c_r (mm)	250	A_{rs} (mm ²)	201,08	s_r (mm)	250	(3) Envoltura discontinua			
c_u (mm)	400	z (mm)	530	E_{fu} (N/mm ²)	2,00E+05	ρ_d	1,60E-03		
d_c (mm)	100	s (mm)	250	ε_{fu}	5,80E-03	ε_d	2,23E-03		
d_s (mm)	500	σ_s (N/mm ²)	420	Anclajes (2)		$V_{d,0}$ (kN)	90,72		
Solicitaciones		CONTR. ESTRIBOS		σ_{fr} (N/mm ²)	294,88	(4) Discontinua en U			
Situación previa		V_s (kN)	179,03	s_{r2} (mm)	200,00	ε_{fr}	3,63E-03		
V_d (kN)	141,80	CONTR. HORMIGON		T_{fr} (kN)	70,77	V_{fr} (kN)	96,67		
Situación reforzada		ρ_l	4,39E-03	Anclajes (4)			467,44		
V_{fr} (kN)	316,40	f_{cu} (N/mm ²)	0,35	σ_{fr} (N/mm ²)	726,21	$V_{d,0}$ (kN)	74,36		
V_{fr} (kN)	226,00	V_{cu} (kN)	63,98	T_{fr} (kN)	43,57				
RESUMEN REFUERZO CALCULADO									
SITUACIÓN INICIAL (kN)									
V_d	915,00	Compresión oblicua alma viga			$V_d < V_{cu} \rightarrow$ Cumple				
V_{fr}	141,80	Cortante cálculo situación previa							
V_{cu}	63,98	Cortante asumido por hormigón							
V_s	179,03	Cortante asumido por estribos							
$V_s + V_{cu}$	243,00	$V_s + V_{cu} > V_d \rightarrow$ Cumple							
SITUACIÓN REFORZADA (kN)									
ε_{fr}	5,80E-03	Deformación máxima CF							
ε_{fr1}	1,38E-03	Deformació CF (1)			$\varepsilon_{fr1} < \varepsilon_{fr} \rightarrow$ Cumple				
ε_{fr2}	1,47E-03	Deformació CF (2)			$\varepsilon_{fr2} < \varepsilon_{fr} \rightarrow$ Cumple				
ε_{fr3}	2,23E-03	Deformació CF (3)			$\varepsilon_{fr3} < \varepsilon_{fr} \rightarrow$ Cumple				
ε_{fr4}	3,63E-03	Deformació CF (4)			$\varepsilon_{fr4} < \varepsilon_{fr} \rightarrow$ Cumple				
V_d	915,00	Compresión oblicua alma viga			$V_d < V_{cu} \rightarrow$ Cumple				
V_{fr}	226,00	Situación incendio			$V_{fr} < V_s + V_{cu} \rightarrow$ Cumple				
$V_{d,0}$	316,40	Cortante a cálculo requerido							
$V_{d,0}$	279,89	(1) Envoltura continua							
$V_{d,0}$	183,54	(2) Continua en U							
$V_{d,0}$	90,72	(3) Envoltura discontinua							
$V_{d,0}$	74,36	(4) Laminado (discontinuo) en U							
$V_s + V_{cu} + V_{d,0}$	522,90	(1) Envoltura continua			$V_s + V_{cu} + V_{d,0} > V_d \rightarrow$ Cumple				
$V_s + V_{cu} + V_{d,0}$	426,54	(2) Continua en U			$V_s + V_{cu} + V_{d,0} < V_d \rightarrow$ Cumple				
$V_s + V_{cu} + V_{d,0}$	333,73	(3) Envoltura discontinua			$V_s + V_{cu} + V_{d,0} > V_d \rightarrow$ Cumple				
$V_s + V_{cu} + V_{d,0}$	317,37	(4) Laminado (discontinuo) en U			$V_s + V_{cu} + V_{d,0} > V_d \rightarrow$ Cumple				





Importància de la
curvatura de les
arestes

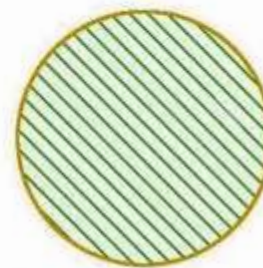
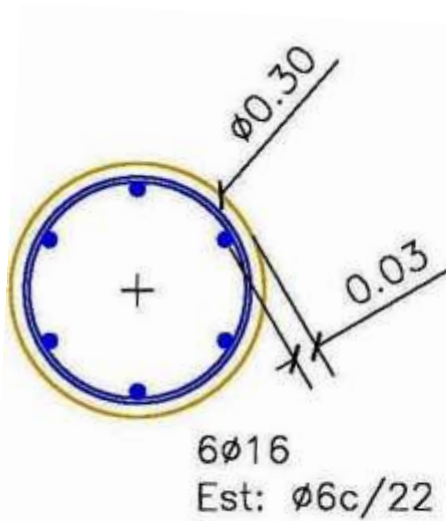
Secció circular:
òptima



Sección comprimida
por el confinamiento

CONFINAMENT DE PILARS

Millorar la capacitat de
treball dels pilars sol·licitats
a flexo-compensió

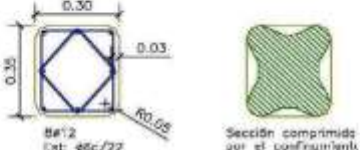


Sección comprimida
por el confinamiento

CFRP GUÍA DE CÁLCULO

REFUERZO A CONFINAMIENTO - PILARES RECTANGULARES

Referencia	Valor	Ud	Fórmula	Comentario
INFORMACIÓN NECESARIA				
1. Objetivo: Disponer de todos los datos que permitan proceder al cálculo del refuerzo				
2. Básicamente, la geometría, calidad de los materiales, sección de armadura y recubrimiento.				

MATERIALES Y GEOMETRÍA	
	

Acero (redondos)

- Tiene especial relevancia considerar tan sólo las barras longitudinales estribadas eficazmente. En el caso de los pilares circulares, los estribos confinan todas las barras, pero en el caso de los pilares de sección rectangular esa eventualidad no siempre se cumple en todos los redondos: sólo hay que considerar aquellas barras, cuyo "pando" queda coartado por estribos o ganchos.

ϕ_{barra}	12	mm		Diámetro barras pilar
n_{barra}	8	mm		Número de barras (coartadas eficazmente)
$A_{s,rec}$	9.05E+02	mm ²	$A_{s,rec} = n \cdot n_{barra} \cdot \phi_{barra}^2 / 4$	Sección armadura longitudinal confinada
f_{yk}	500.00	N/mm ²		Límite elástico
f_{td}	434.78	N/mm ²	$f_{td} = f_{yk} / 1.15$	Límite de cálculo
E_s	2.00E+05	N/mm ²		Módulo de elasticidad

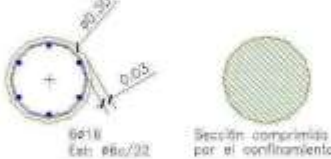
Hormigón (sección rectangular)

- El radio de esquina (r_{eq}) es un factor decisivo que condiciona la posibilidad misma de poder confinar un pilar rectangular, dado que las tensiones eficaces del efecto "Poisson", por razones obvias, se concentran en ellas. Cuanto mayor sea el radio, tanto mejor se comportará el confinado con CF. Obsérvese que el límite de ese radio en el caso de un pilar cuadrado, lo convertiría en un pilar circular. Evidentemente, el confinamiento más eficaz se da en los pilares circulares, dado que el efecto "Poisson" se reparte uniformemente en toda la superficie por igual.
- Ese radio se considera igual para las cuatro esquinas a efectos de cálculo en la presente guía. Pero el que ese radio sea el mayor posible viene condicionado por el recubrimiento de las armaduras, o más exactamente, por su diámetro y la distancia del eje de la barra de esquina a ambas caras del pilar (c_d).
- Por eso es tan importante verificar previamente la posición de las barras del pilar en toda su longitud. Conviene advertir, que en muchos casos, la armadura del pilar no es concéntrica con la sección (rectangular) de hormigón y en consecuencia, el radio mayor posible para proceder al cálculo del refuerzo a confinamiento, será el que corresponda a la armadura situada más próxima a la piel del pilar.
- Caso que esa dimensión sea muy reducida, para calcular el confinamiento, se puede prever un recorte de la sección del pilar, para poder proceder a un redondeo eficaz de las aristas y así poder confinar debidamente el pilar.

B	300	mm		Menor dimensión del pilar
D	350	mm		Mayor dimensión del pilar
D/B	1.17		$D/B = D/B$	Relación lado mayor / lado menor
c_d	30	mm		Recubrimiento a eje de armadura
r_{eq}	50	mm		Radio de esquina
$A_{s,rec}$	1.05E+05	mm ²	$A_{s,rec} = B \cdot D$	Área bruta de la sección del pilar
$A_{s,rec}$	1.04E+05	mm ²	$A_{s,rec} = A_{s,rec} - A_{s,rec}$	Área neta hormigón (deducida armadura)
B_d	200	mm	$B_d = B - 2 \cdot r_{eq}$	Canto para calcular el factor de forma
D_d	250	mm	$D_d = D - 2 \cdot r_{eq}$	Canto para calcular el factor de forma
f_{yk}	25	N/mm ²		Resistencia característica
f_{td}	16.67	N/mm ²	$f_{td} = f_{yk} / 1.5$	Resistencia de cálculo

f_{yk}	33.00	N/mm ²	$f_{yk} = f_{yk} + 8$	Resistencia media
f_{td}	2.56	N/mm ²	$f_{td} = 0.3 \cdot f_{yk}^{0.75}$	Resistencia a tracción
E_s	2.72E+04	N/mm ²	$E_s = 8500 \cdot f_{yk}^{1.5}$	Módulo de deformación secante
Tejido CF				
8. De acuerdo con Capítulo 6 del FIB 14, cuando no se efectúa un pretensado previo del tejido CF alrededor de las columnas, se recomienda para el cálculo, no sobrepasar un alargamiento del tejido (ϵ_L) superior al 4% de $\epsilon_{L,1}$ del tejido elegido ($\epsilon_L = \min \{0.004 ; 0.75 \epsilon_{L,1}\}$). Consultar con el fabricante.				
b	300	mm		Ancho banda de tejido CF
t_f	0.125	mm		Espesor
n^*	2			Número de capas
$\epsilon_{L,1}$	1.80E-02			Alargamiento máximo de rotura
f_{tk}	4000	N/mm ²		Resistencia última de tracción
E_f	2.40E+05	N/mm ²		Módulo elasticidad
$\epsilon_{L,1}$	4.00E-03			Alargamiento admisible (el menor de los dos)
$\epsilon_{L,2}$	1.20E-02		$\epsilon_{L,2} = 0.75 \epsilon_{L,1}$	
SOLICITACIONES				
9. En primer lugar hay que conocer el estado real del elemento en lo que a solicitaciones se refiere, por tanto las cargas gravitatorias que inciden realmente en la sección antes de proceder al refuerzo con CF: peso propio, cargas muertas y sobrecargas, y las solicitaciones pertinentes que afectan al pilar en cuestión.				
10. Conviene "descargar" el pilar al máximo antes de proceder a su refuerzo, para que la tensión de la fibra más comprimida sea la menor posible de modo que luego se optimice la eficacia del refuerzo al entrar en carga con las nuevas solicitaciones (efecto Poisson).				
PROCESO DE CÁLCULO				
11. Objetivo: calcular el coeficiente de confinamiento ($K_{f,rec}$) de la resistencia a compresión del hormigón				
12. Las solicitaciones debidamente ponderadas (valores de cálculo) serán la base del proceso dado que en primer lugar, hay que comprobar que la sección "actual" es apta para soportar esas cargas iniciales. Por eso, en un primer tiempo, hay que calcular la carga última (N_u) de resistencia a compresión de la sección sin reforzar, para verificar que es superior a la carga de cálculo inicial ($N_{d,i}$) para las solicitaciones reales antes de reforzar la sección. Caso contrario, esa sección no sería apta para ser reforzada (ni para soportar los esfuerzos iniciales).				
13. Dado que las resinas que adhieren la CF al hormigón, dejan de ser eficaces a partir de los 50° de temperaturas, el futuro refuerzo con esas fibras no se tendrá en cuenta para resistencia en situación de incendio, por lo que deberá ser la sección inicial, la que sea capaz de cubrir esa eventualidad. En este sentido habrá que ponderar las solicitaciones reales de la sección reforzada, de acuerdo con los coeficientes prescritos para esos casos en la normativa (normalmente $\gamma_c=1.00$, $\gamma_s=1.30$, $\gamma_t=1.00$). Si la carga de cálculo en situación de incendio ($N_{d,i}$) es superior a la carga última de la sección sin reforzar (N_u), no se debe proceder al refuerzo con CF, a no ser que se proteja el refuerzo convenientemente frente a la acción térmica.				
14. En el proceso de cálculo, estas solicitaciones deben ser previstas con anterioridad. En nuestra guía, se determina solamente la resistencia final del hormigón confinado por el tejido CF, mediante el coeficiente de confinamiento ($K_{f,rec}$). O sea: se obtiene el coeficiente con el que se pondera la resistencia inicial a compresión del hormigón del pilar. A partir de esa nueva resistencia a compresión se procederá a calcular la idoneidad del pilar así confinado, para soportar las solicitaciones requeridas.				
$K_{f,rec}$	0.67		$K_{f,rec} = 1 - ((B^2 + D^2) / (3 \cdot A_{s,rec} \cdot (1 - p_{g,rec})))$	Coeficiente de forma del pilar
$p_{g,rec}$	8.62E-03		$p_{g,rec} = A_{s,rec} / (B \cdot D)$	Cuánta geométrica armadura pilar
$p_{L,rec}$	3.10E-03		$p_{L,rec} = 2 \cdot (B \cdot D) \cdot n^* \cdot t_f / A_{s,rec}$	Cuánta geométrica del tejido de refuerzo
ϵ_L	4.00E-03		$\epsilon_L = \min \{\epsilon_{L,1}, \epsilon_{L,2}\}$	Elongación admisible del tejido.
$K_{f,rec}$	249.52		$K_{f,rec} = 0.5 \cdot K_{f,rec} \cdot p_{L,rec} \cdot E_f$	Coeficiente de confinamiento
$\sigma_{L,rec}$	0.998	N/mm ²	$\sigma_{L,rec} = K_{f,rec} \cdot f_{tk}$	Tensión de confinamiento
$K_{f,rec}$	1.25		$K_{f,rec} = 2.25 \cdot (1 + 7.94 \cdot \sigma_{L,rec} / f_{tk})^{1/3} - 2 \cdot \sigma_{L,rec} / f_{tk} - 1.254$	Coeficiente final de confinamiento
RESUMEN REFUERZO CALCULADO				
F_{dk}	25.00	N/mm ²		Resistencia característica inicial hormigón
F_{dk}	31.32	N/mm ²		Resistencia característica hormigón confinado
Δ	25.28%		$\Delta = F_{dk} / F_{dk} - 1$	Incremento de resistencia

FULLS DE CÀLCUL DE CONFINAMENT PILARS

CFRP GUÍA DE CÁLCULO				
REFUERZO A CONFINAMIENTO - PILARES CIRCULARES				
Referencia	Valor	Ud	Fórmula	Comentario
INFORMACIÓN NECESARIA				
1. Objetivo: Disponer de todos los datos que permitan proceder al cálculo del refuerzo.				
2. Básicamente, la geometría, calidad de los materiales, sección de armadura y recubrimiento				
MATERIALES I GEOMETRÍA				
				
Acero (redondos)				
$\varnothing_{ar}$	16	mm		Diámetro barras pilar
n_{ar}	6	ud		Número de barras
$A_{s,ar}$	1,21E+03	mm ²	$A_{s,ar} = n_{ar} \cdot \varnothing_{ar}^2 \cdot \pi / 4$	Sección armadura longitudinal confinada
f_{yk}	500,00	N/mm ²		Límite elástico
f_{yd}	434,78	N/mm ²	$f_{yd} = f_{yk} / 1,15$	Límite de cálculo
E_s	2,00E+05	N/mm ²		Módulo de elasticidad
Hormigón (sección circular)				
D_{ext}	300	mm		Diámetro exterior del pilar
r_s	30	mm		Recubrimiento a eje de armadura
D_{ut}	270	mm	$r_s = D_{ext} - D_{ut}$	Diámetro útil del pilar
A_{br}	7,07E+04	mm ²	$A_{br} = \pi \cdot D_{ext}^2 / 4$	Área bruta del pilar
$A_{n,ar}$	6,95E+04	mm ²	$A_{n,ar} = A_{br} - A_{s,ar}$	Área neta hormigón (deducida armadura)
f_{ck}	25	N/mm ²		Resistencia característica
f_{cd}	16,67	N/mm ²	$f_{cd} = f_{ck} / 1,5$	Resistencia de cálculo
f_{cm}	33,00	N/mm ²	$f_{cm} = f_{ck} + 8$	Resistencia media
f_{td}	2,56	N/mm ²	$f_{td} = 0,3 \cdot f_{cm}^{1/3}$	Resistencia a tracción
E_c	2,72E+04	N/mm ²	$E_c = 8500 \cdot f_{cm}^{1/3}$	Módulo de deformación secante
Tejido CF				
3. De acuerdo con Capítulo 6 del FIB 14, cuando no se efectúa un pretensado previo del tejido CF alrededor de las columnas, se recomienda para el cálculo, no sobrepasar un alargamiento del tejido (ϵ_t) superior al 4% de ϵ_{cu} del tejido elegido ($\epsilon_t = \min(0,004, 0,75 \epsilon_{cu})$). Consultar con el fabricante				
b_t	300	mm		Ancho banda de tejido CF
t_b	0,125	mm		Espesor
n^o	2			Número de capas
ϵ_{Lu}	1,60E-02			Alargamiento máximo de rotura
f_{tL}	4000	N/mm ²		Resistencia última de tracción
E_f	2,40E+05	N/mm ²		Módulo elasticidad
ϵ_{tL}	4,00E-03			Alargamiento admisible (el menor de los dos)
ϵ_{tL}	1,20E-02		$\epsilon_t = 0,75 \epsilon_{cu}$	
SOLICITACIONES				

- En primer lugar hay que conocer el estado real del elemento en lo que a solicitaciones se refiere, por tanto las cargas gravitatorias que inciden realmente en la sección antes de proceder al refuerzo con CF: peso propio, cargas muertas y sobrecargas, y las solicitaciones pertinentes que afectan al pilar en cuestión.
- Conviene "descargar" el pilar al máximo antes de proceder a su refuerzo, para que la tensión de la fibra más comprimida sea la menor posible de modo que luego se optimice la eficacia del refuerzo al entrar en carga con las nuevas solicitaciones (efecto Poláson)

PROCESO DE CÁLCULO

- Objetivo:** calcular el coeficiente de confinamiento ($K_{h,conf}$) de la resistencia a compresión del hormigón
- Las solicitaciones debidamente ponderadas (valores de cálculo) serán la base del proceso dado que en primer lugar, hay que comprobar que la sección "actual" es apta para soportar esas cargas iniciales. Por eso, en un primer tiempo, hay que calcular la carga última (N_{ul}) de resistencia a compresión de la sección sin reforzar, para verificar que es superior a la carga de cálculo inicial (N_{di}) para las solicitaciones reales antes de reforzar la sección. Caso contrario, esa sección no sería apta para ser reforzada (ni para soportar los esfuerzos iniciales).
- Dado que las resinas que adhieren la CF al hormigón, dejan de ser eficaces a partir de los 50° de temperaturas, el futuro refuerzo con esas fibras no se tendrá en cuenta para resistencia en situación de incendio, por lo que deberá ser la sección inicial, la que sea capaz de cubrir esa eventualidad. En este sentido habrá que ponderar las solicitaciones reales de la sección reforzada, de acuerdo con los coeficientes prescritos para esos casos en la normativa (normalmente $\gamma_c=1,00$, $\gamma_s=1,30$, $\gamma_a=1,00$). Si la carga de cálculo en situación de incendio (N_{di}) es superior a la carga última de la sección sin reforzar (N_{ul}), no se debe proceder al refuerzo con CF, a no ser que se proteja el refuerzo convenientemente frente a la acción térmica.
- En el proceso de cálculo, estas solicitaciones deben ser previstas con anterioridad. En nuestra guía, se determina solamente la resistencia final del hormigón confinado por el tejido CF, mediante el coeficiente de confinamiento ($K_{h,conf}$). O sea: se obtiene el coeficiente con el que se pondera la resistencia inicial a compresión del hormigón del pilar. A partir de esa nueva resistencia a compresión se procederá a calcular la idoneidad del pilar así confinado, para soportar las solicitaciones requeridas.

$K_{h,conf}$	1,00			Coeficiente de forma del pilar ($K_{h,conf}=1$)
ρ_{ar}	1,71E-02		$\rho_{ar} = A_{s,ar} / A_{br}$	Cuántía geométrica armadura pilar
ρ_{tej}	3,33E-03		$\rho_{tej} = n^o \cdot D_{ext} \cdot n^o / A_{n,ar}$	Cuántía geométrica del tejido de refuerzo
ϵ_L	4,00E-03	%	$\epsilon_L = \min(\epsilon_{Lu}, \epsilon_{tL})$	Elongación admisible del tejido
$K_{h,conf}$	400,00		$K_{h,conf} = 0,5 \cdot K_{h,conf} \cdot \rho_{ar} \cdot E_f$	Coeficiente de confinamiento
$\sigma_{L,conf}$	1,60	N/mm ²	$\sigma_{L,conf} = K_{h,conf} \cdot \epsilon_L$	Tensión de confinamiento
$K_{h,conf}$	1,39		$K_{h,conf} = 2,254 \cdot (1 + 7,94 \cdot \sigma_{L,conf} / f_{cd})^{0,5} \cdot 2 \cdot \sigma_{L,conf} / f_{cd} > 1,254$	Coeficiente final de confinamiento

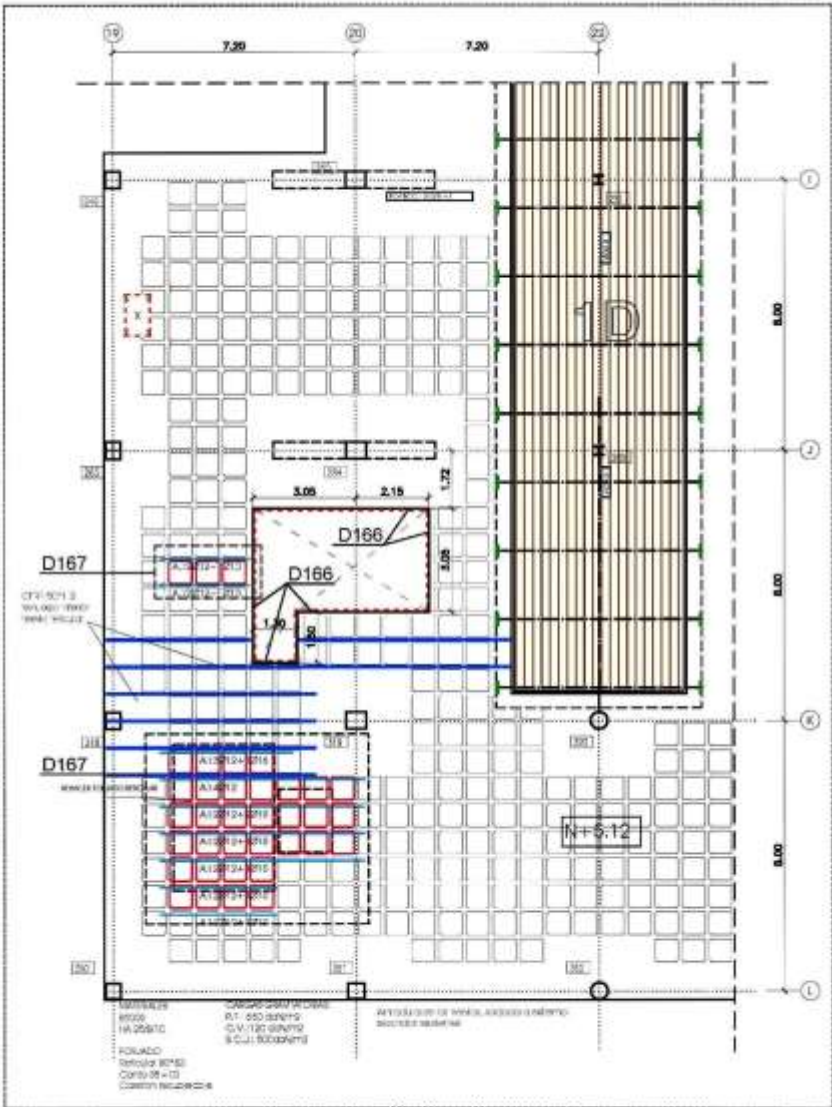
RESUMEN REFUERZO CALCULADO

F_{cd}	25,00	N/mm ²		Resistencia característica inicial hormigón
F_{cd}	34,65	N/mm ²		Resistencia característica hormigón confinado
Δ	38,61%		$\Delta = F_{cd} / F_{cd} - 1$	Incremento de resistencia

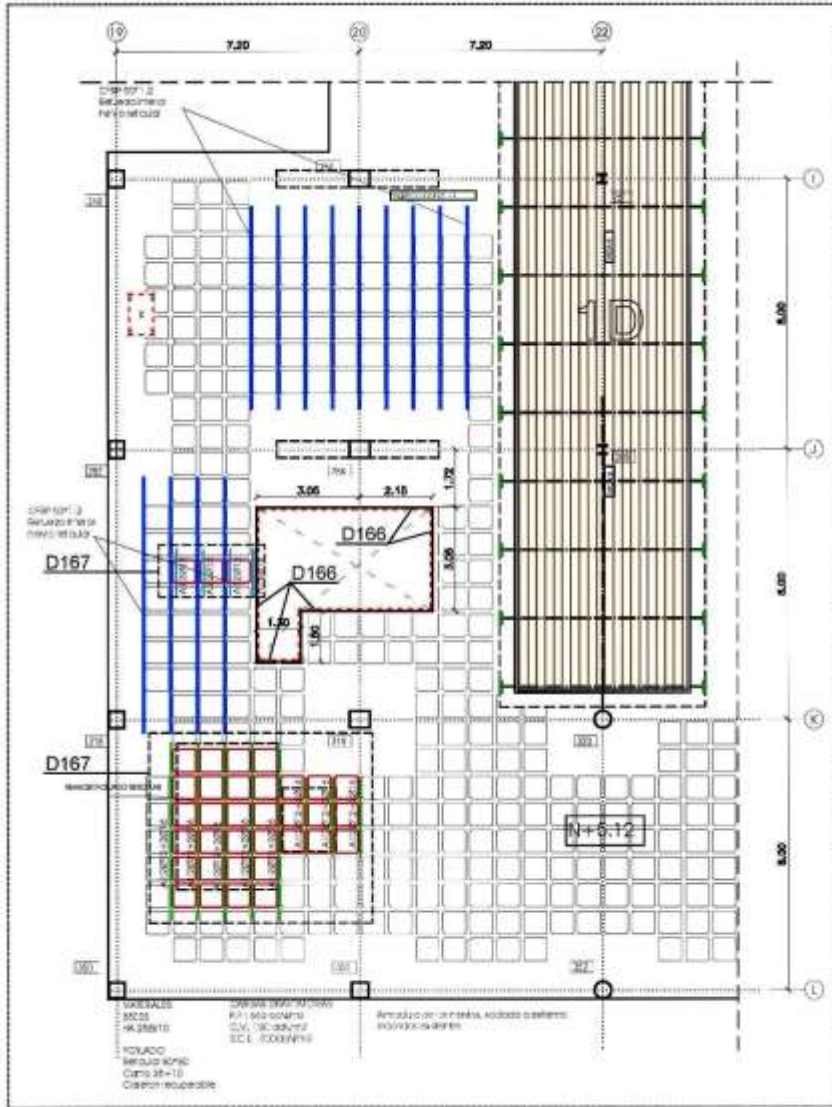
- De acuerdo con el objetivo previsto en el cálculo, constatamos que la resistencia del hormigón así confinado con CF, se ha incrementado en un 38,61%
- Supongamos que antes del refuerzo, ese pilar perteneciente a un pórtico unidireccional, con una resistencia característica del hormigón $F_{cd}=25$ N/mm², estaba sometido a un esfuerzo normal $N_{di}=1,06E3$ kN y a un momento $M_{di}=39,6$ m·kN. En primer lugar verificaríamos su aptitud para soportar esas solicitaciones. En este caso cumpliría. Seguiríamos con el proceso hasta determinar las características y capas del tejido CF para conseguir un determinado incremento de la capacidad resistente del hormigón. Con el incremento de la resistencia del hormigón confinado ($F_{cd}=34,65$ N/mm²) podría soportar unas solicitaciones más desfavorables, las "requeridas", como por ejemplo: $N_{di}=9,9E2$ kN y $M_{di}=68,6$ m·kN; o $N_{di}=1,39E3$ kN y $M_{di}=44,2$ m·kN, etc.
- Otra manera de proceder sería: fijar previamente la resistencia de hormigón requerida, y a partir de ese dato, modificar las características de la CF (geometría, capas, etc) hasta conseguir el valor deseado.
- Por otra parte, el pilar así confinado **incrementa su ductilidad**. Aunque en la presente guía no cuantifiquemos ni calculemos este aspecto, no cabe duda de que el hecho de conferir al pilar mayor capacidad de deformación, actuando a la vez el acero y la CF, incrementa la capacidad para absorber las posibles tracciones, especialmente en situación sísmica. Recordemos que tanto el acero como la CF pueden alcanzar sin llegar a rotura, trabajando a la vez, deformaciones del orden del 8%. El acero en situación de deformación plástica, y la CF en situación de deformación elástica. Esa ductilidad "adquirida" permitiría en caso de solicitaciones sísmicas una redistribución de esfuerzos, que favorecería la capacidad de respuesta estructural a dichas solicitaciones.

FULLS DE CÀLCUL DE CONFINAMENT PILARS

CENTRE COMERCIAL GLÒRIES (BCN): LOCAL HEMA

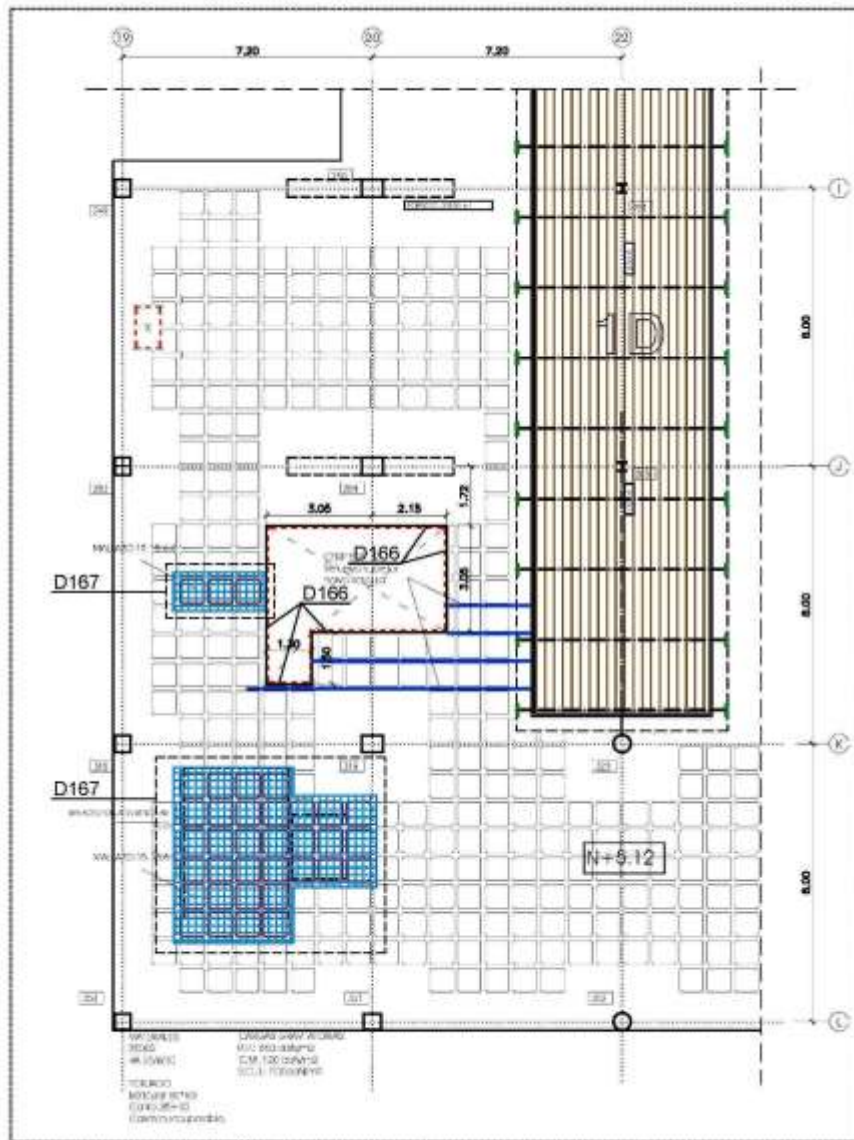


REFUERZO INFERIOR LONGITUDINAL
PLANTA +1 N +5,12 SECTOR 1D

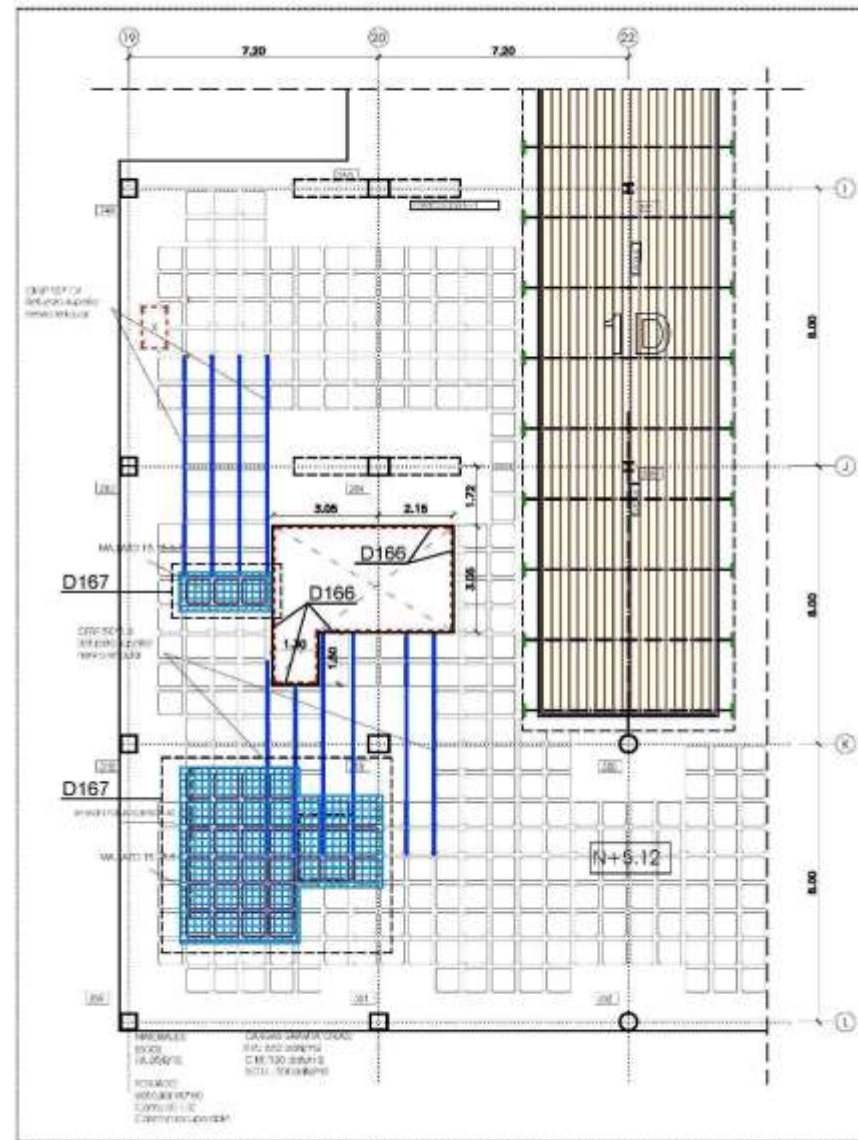


REFUERZO INFERIOR TRANSVERSAL
PLANTA +1 N +5.12 SECTOR 1D

CENTRE COMERCIAL GLÒRIES (BCN): LOCAL HEMA



REFUERZO SUPERIOR LONGITUDINAL
PLANTA +1 N+5.12 SECTOR 1D



REFUERZO SUPERIOR TRANSVERSAL
PLANTA +1 N+5.12 SECTOR 1D



CCG: HEMA

Reforç CFRP inferior



Assaig d'extracció



CCG: HEMA

Reforç superior
(protegit)



ENEMICS DE LA CFRP

- Escalfor $>45^{\circ}$
- Incendi
- Impactes i actes vandàlics



MOLTES GRÀCIES



JOSEP BAQUER

LA FIBRA DE CARBONI EN REFORÇ D'ESTRUCTURES DE FORMIGÓ