

Test pratico di validazione numerica della progettazione dei rinforzi in FRP

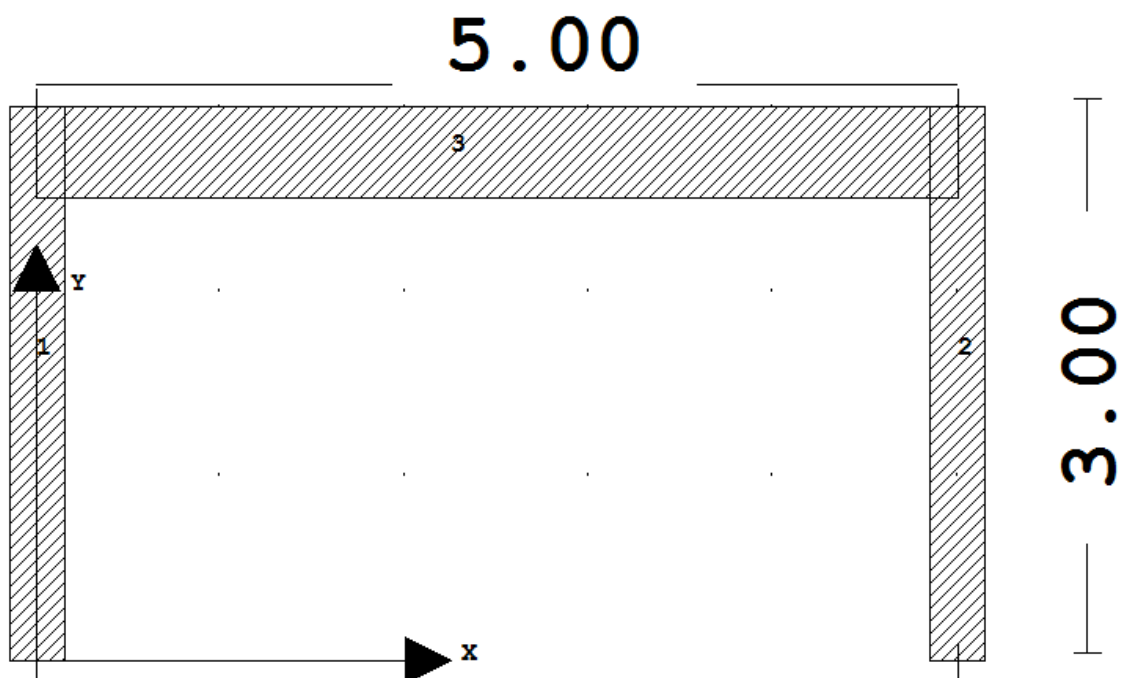
Premessa

Il calcolo dei rinforzi in FRP viene effettuata con riferimento al documento CNR DT 200 /2004 ed alle Linee Guida del C.S.LL.PP. per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p e murarie mediante FRP.

Modello

I test vengono svolti su un semplice portale in calcestruzzo armato valutando l'incremento di resistenza a taglio in corrispondenza di un estremo, del pannello di nodo trave-pilastro.

Un ulteriore test è stato svolto per valutare l'incremento di duttilità derivante dal confinamento della zona critica di un pilastro.



Test 1

Incremento di taglio resistente in corrispondenza di un estremo della trave.

Sezione rettangolare

B=30 cm

H=50 cm

c=20mm

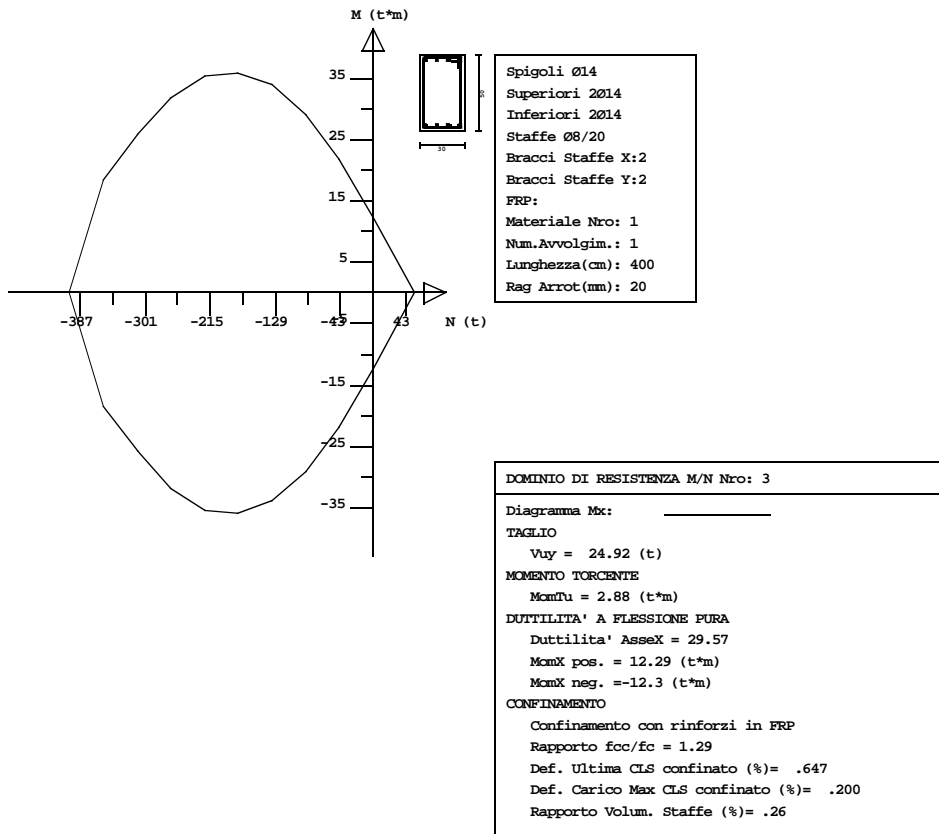
Calcestruzzo C20/25

Acciaio B450C

spessore solaio=20cm

FIBRE DI CARBONIO FRP

CARATTERISTICHE MECCANICHE	VALORI
tessuto monodirezionali in fibre di carbonio	
TIPO:	
Grammatura	300 g/ m ²
Massa volumica (kg/m³):	1820
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0.165
Area resistente per unità di larghezza (mm²/m):	165
Resistenza meccanica a trazione (N/mm²)	3000
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m)	495
Modulo elastico a trazione (N/mm²):	300.000
Allungamento a rottura (%) ϵ_{fk}	1.3%
η (tabella 3.4) CNR-DT 200/04	0.85
γ_{fd} rottura per delaminazione (tabella 3.2)	1.2
γ_{fd} Rottura fibra (tabella 3.2)	1.1
γ_{RD} Verifiche a taglio (tabella 3.3)	1.2



Dominio di resistenza calcolato dal programma

Calcolo del taglio resistente meccansimo a trazione utilizzando un inclinazione delle fessure pari all'inclinazione del traliccio utilizzato per il meccansimo con sole staffe:

Contributo staffe inclinazione del puntone $\cot\theta=2.5$:

$$V_{rdw} = 0.9 \cdot f_{ydw} \cdot A_{st} \cdot \frac{d}{p} \cdot \cot \vartheta = 0.9 \cdot 3913 \cdot 1.00 \cdot \frac{46.5}{20} \cdot 2.5 = 20570 \text{ kg}$$

Contributo FRP

$$f_d = E_f \cdot \epsilon_{fk} \cdot \eta / \gamma_{fd} = 300000 \cdot 0.013 \cdot 0.85 / 1.10 = 30136 \text{ kg / cmq}$$
 Resistenza massima di calcolo fibra

Meccansimo di delaminazione (Linee guida 3.1):

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}} = \sqrt{\frac{300000 \cdot 0.165}{2 \cdot 1.03}} = 155 \text{ mm}$$
 Unita' di misura N e mm

$K_b=1$ in sicurezza

$$f_{fd} = \frac{0.24}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \sqrt{\frac{E_f \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}}{t_f}} = \frac{0.24}{1.2 \cdot \sqrt{1.5}} \sqrt{\frac{300000 \cdot 1 \cdot \sqrt{20 \cdot 1.03}}{t_f}} = 469.2 \text{ N / mmq} = 4692 \text{ kg / cmq}$$

$$h_{\min} = 46.5 - 20 = 26.5 \text{ cm (caso con FRP ad U trave emergente)}$$

$$\phi_r = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b_w} = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{2}{30} = 0.306 \text{ Linee guida (3.25)}$$

$$f_{fed} = f_{df} \cdot \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_e}{h_{\min}}\right) = 4692 \cdot \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{15.5}{26.5}\right) = 3777 \text{ kg / cmq Linee guida (3.23)}$$

Per una fasciatura continua ed ortogonale all'asse la 3.21 si semplifica:

$$V_{Rdf} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \frac{w_f}{p_f} = \frac{1}{1.2} \cdot 0.9 \cdot 46.5 \cdot 3777 \cdot 2 \cdot 0.0165 \cdot 1 = 4347 \text{ kg}$$

Nell'ipotesi di considerare l'inclinazione delle fessure per il contributo FRP fissata a 45°:

$V_{rt} = (V_{Rdw} + V_{Rdf}) = (20570 + 4347) = 24917 \text{ kg} = 24.92 \text{ t}$ Valore identico a quello fornito dal software (cfr dominio di resistenza 3 valore V_{uy})

Test 2

Incremento di resistenza del pannello di nodo trave pilastro.

Sezione rettangolare trave

B=30 cm

H=50 cm

Sezione rettangolare pilastro

B=40 cm

H=30 cm

FIBRE DI CARBONIO FRP

CARATTERISTICHE MECCANICHE	VALORI
tessuto QUADRIASSIALE in fibre di carbonio	
TIPO:	
Grammatura	300 g/ m ²
Massa volumica (kg/m3):	1820
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0.165
Area resistente per unità di larghezza (mm2/m):	165
Resistenza meccanica a trazione (N/mm2)	3000
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m)	495
Modulo elastico a trazione (N/mm2):	300.000
Allungamento a rottura (%) ϵ_{fk}	1.3%
η (tabella 3.4) CNR-DT 200/04	0.85
γ_{fd} rottura per delaminazione (tabella 3.2)	1.2
γ_{fd} Rottura fibra (tabella 3.2)	1.1
γ_{RD} Verifiche a taglio (tabella 3.3)	1.2

Al fine di tenere in conto il contributo delle fibre si utilizza il meccanismo resistente dei nodi non fessurati previsto dalle NTC2008 al punto 7.4.10.

Questo modello non fessurato prevede la presenza di elementi resistenti a trazione in parallelo alla resistenza del calcestruzzo in modo tale da limitare le tensioni diagonali al valore f_{ctd} .

Riscrivendo opportunamente la 7.4.10 si ottiene :

$$\frac{[V_{jbd} / (b_j \cdot h_{je})]^2}{f_{ctd} + v \cdot f_{cd}} - \frac{A_{sh} \cdot f_{ywd}}{b_j \cdot h_{jw}} \leq f_{ctd}$$

Il secondo termine del primo membro rappresenta quindi la resistenza a trazione addizionale dovuta al presidio utilizzato dove A_{sh} è l'area complessiva delle staffe o del tessuto presente sul nodo di altezza h_{jw} :

Per cui nel caso di FRP quadriassiale $A_{sh} = h_{jw} \cdot (t_r + 2 \cdot t_f \cdot \cos(45^\circ))$

Il valore della resistenza f_{ywd} viene assunta pari alla resistenza della sistema FRP limitando la deformazione massima al 0.4% come previsto al punto **3.7.3.2.4 Nodi** delle linee guida C.S.LL.PP.

$$f_{ywd} = 0.004 \cdot 3000000 = 12000 \text{ kg/cmq}$$

$$A_{sh} \cdot f_{ywd} = 50 \cdot (0.0165 + 2 \cdot 0.0165 \cdot 0.71) \cdot 12000 = 23950 \text{ kg}$$

Questo equivale ad una resistenza a trazione aggiuntiva pari a :

$$A_{sh} \cdot f_{ywd} / (h_{jw} \cdot b_j) = 23950 / (50 \cdot 30) = 15.97 \text{ kg/cm}^2$$

RISULTATI VERIFICHE NODI CLS - PUSH N.ro: 5 - Fx(+) Massa										
IDENTIFICATIVO					DIREZIONE 'X'					
Filo N.ro	Q.In. (m)	Nodo3d N.ro	Nsup (t)	Coll Nodo	TaglSup (t)	Traz-Af (t)	SgmComp kg/cmq	SgmTraz kg/cmq	RcLim kg/cmq	RtLim kg/cmq
1	3,00	2	0,0	NO	0,0	0,0	0,0	0,0	66,7	11,0
2	3,00	4	0,0	NO	0,0	23,5	-19,6	3,7	66,7	11,0

Effettuando i calcoli manuali assumendo la trazione in assenza di rinforzo fornito dal software pari a 19,59 kg/cm² avremo :

$$\frac{[V_{jbd} / (b_j \cdot h_{jc})]^2}{f_{ctd} + v \cdot f_{cd}} - \frac{A_{sh} \cdot f_{ywd}}{b_j \cdot h_{jw}} = 19,59 - 15,9 = 3.69 \text{ kg/cm}^2 \text{ valore identico a quello fornito dal software.}$$

Test 3

Confinamento di resistenza del pannello di nodo trave pilastro.

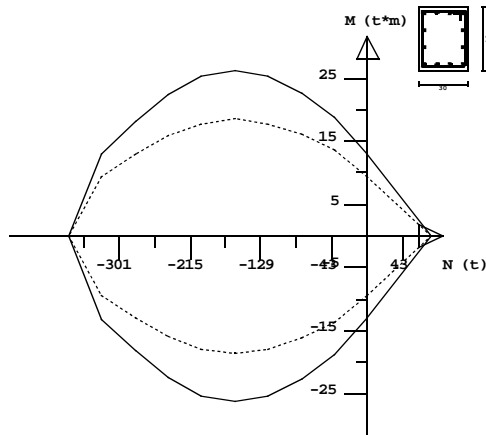
Sezione rettangolare pilastro

B=40 cm

H=30 cm

FIBRE DI CARBONIO FRP

CARATTERISTICHE MECCANICHE	VALORI
tessuto QUADRIASSIALE in fibre di carbonio	
TIPO:	
Grammatura	300 g/ m ²
Massa volumica (kg/m3):	1820
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0.165
Area resistente per unità di larghezza (mm2/m):	165
Resistenza meccanica a trazione (N/mm2)	3000
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m)	495
Modulo elastico a trazione (N/mm2):	300.000
Allungamento a rottura (%) ϵ_{fk}	1.3%
η (tabella 3.4) CNR-DT 200/04	0.85
γ_{fd} rottura per delaminazione (tabella 3.2)	1.2
γ_{fd} Rottura fibra (tabella 3.2)	1.1
γ_{RD} Verifiche a taglio (tabella 3.3)	1.2



Spigoli $\emptyset 14$
 Superiori $2\emptyset 14$
 Inferiori $2\emptyset 14$
 Parete $2\emptyset 12$
 Staffe $\emptyset 6/20$
 Bracci Staffe X:2
 Bracci Staffe Y:2
 FRP:
 Materiale Nro: 2
 Num. Avvolgim.: 1
 Lunghezza (cm): 100
 Rag Arrot (mm): 20

DOMINIO DI RESISTENZA M/N Nro: 1

Diagramma Mx: _____
 Diagramma My:

TAGLIO

V_{uy} = 14.33 (t)
 V_{ux} = 9.88 (t)

MOMENTO TORCENTE

Mom_{Tu} = 2.09 (t*m)

DUTTILITA' A FLESSIONE PURA

Duttilita' AsseX = 20.8
 MomX pos. = 13.02 (t*m)
 MomX neg. = -13.03 (t*m)
 Duttilita' AsseY = 13.68488
 MomY pos. = 9.41 (t*m)
 MomY neg. = -9.42 (t*m)

CONFINAMENTO

Confinamento con rinforzi in FRP
 Rapporto fcc/fc = 1.35
 Def. Ultima CLS confinato (%) = .689
 Def. Carico Max CLS confinato (%) = .200
 Rapporto Volum. Staffe (%) = .16

Per la valutazione del confinamento del composito si fa riferimento alle Linee Guida del C.S.LL.PP. capitolo 3.5 **CONFINAMENTO**.

$$\varepsilon_{fd,rid} = \min \left\{ \begin{array}{l} \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} = 0.95 \frac{0.013}{1.1} = 0.0112 \\ 0.6 \cdot \varepsilon_{fk} = 0.0078 \end{array} \right\} = 0.0078 \quad \text{Deformazione ridotta (cfr. Linee Guida 3.44)}$$

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot (b+h) \cdot b_f}{b \cdot h \cdot p_f} = \frac{2 \cdot 0.0165 \cdot (30+40)}{30 \cdot 40} = 0.001925; b_f = p_f - \text{fasciatura continua (cfr. Linee Guida 3.41)}$$

$$b' = b - 2 \cdot r_c = 30 - 2 \cdot 2 = 26 \text{ cm}$$

$$b' = h - 2 \cdot r_c = 40 - 2 \cdot 2 = 36$$

$$K_h = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3A_g} = 1 - \frac{26^2 + 36^2}{3 \cdot 30 \cdot 40} = 0.452 \quad \text{(cfr. Linee Guida 3.42)}$$

$$f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid} = \frac{1}{2} \cdot 0.001925 \cdot 3000000 \cdot 0.0078 = 22.52 \text{ kg / cmq} \quad \text{Pressione di confinamento (cfr. Linee}$$

Guida 3.34)

$$f_{leff} = f_l \cdot k_h \cdot k_v \cdot k_\alpha = 22.52 \cdot 0.452 \cdot 1 \cdot 1 = 10.185 \text{ kg / cmq} \quad \text{(cfr. Linee Guida 3.33 3.35)}$$

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{cu} + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{f_{leff}}{f_c}} = 0.0035 + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{10.185}{200}} = 0.0068 \quad \text{(cfr. Linee Guida 3.43)}$$

Valore identico a quello fornito dal software (cfr dominio di resistenza 1 valore **Def. Ultima cls confinato**)

Nell'applicazione della formula si è utilizzato il valore della resistenza del calcestruzzo senza ridurla del coefficiente parziale trattandosi di utilizzo della deformazione in un analisi non lineare.