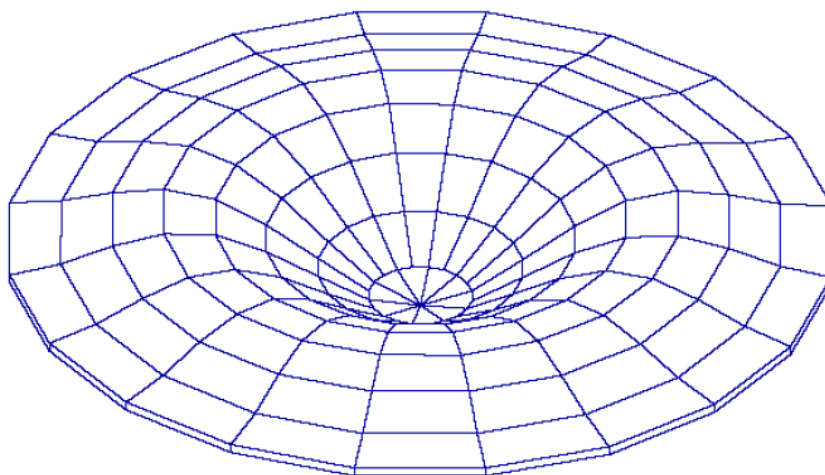


CDSWin per FRP

Release 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 e 2019

Validazione del codice di calcolo



Test pratico di validazione numerica della progettazione dei rinforzi in FRP

Premessa

Il calcolo dei rinforzi in FRP viene effettuato 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 muratura mediante FRP.

A causa delle modifiche apportate dalla Circolare Esplicativa 2019 rispetto alla precedente del 2009 riguardo la verifica di resistenza dei nodi trave-pilastro, si analizzano separatamente due casi:

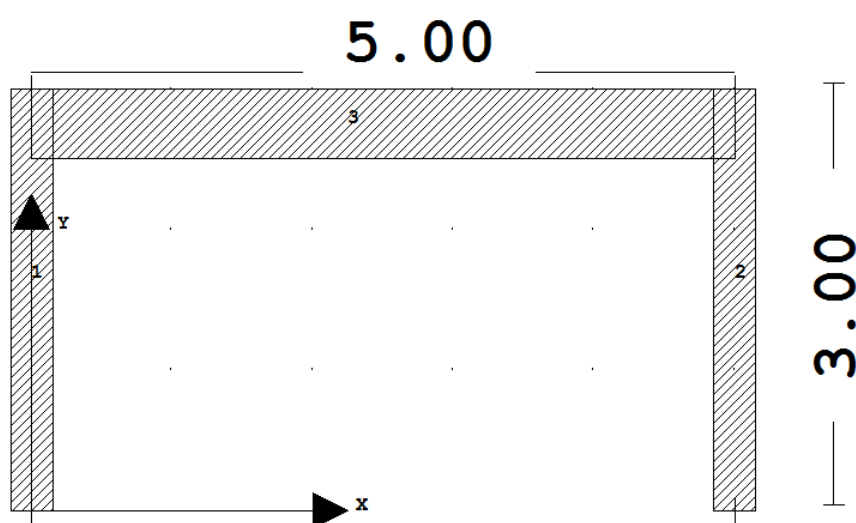
-calcolo con versioni precedenti alla release 2019 del *CDSWin* o con *CDSWin 2019* senza l'attivazione della voce *Parametri Circolare 2019*

-calcolo con *CDSWin 2019* e attivazione della voce *Parametri Circolare 2019*

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.



Sezioni rettangolari:

Trave: B=30 cm H=50 cm

Pilastro: B=40 cm H=30 cm

Copriferro c=20mm

Calcestruzzo C20/25

Acciaio B450C

Spessore solaio=20cm

FIBRE DI CARBONIO FRP TRAVE

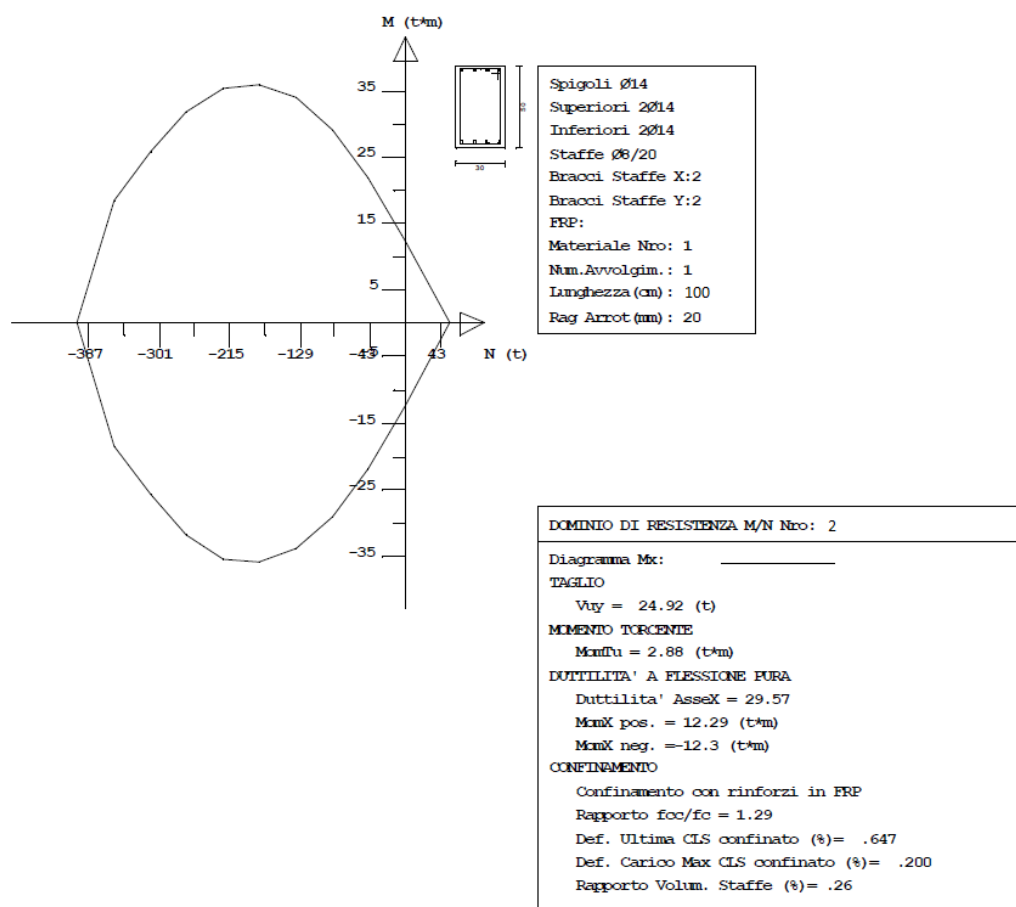
CARATTERISTICHE MECCANICHE	VALORI
TIPO	Tessuto MONODIREZIONALE in fibre di carbonio
Grammatura	300 g/ m ²
Massa volumica (kg/m³)	1820
Spessore equivalente di tessuto secco (mm)	0.165
Area resistente per unità di larghezza (mm²/m)	165
Resistenza meccanica a trazione (N/mm²)	3000
Carico massimo per unità 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

FIBRE DI CARBONIO FRP PILASTRO

CARATTERISTICHE MECCANICHE	VALORI
TIPO	Tessuto QUADRIASSIALE in fibre di carbonio
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

Test 1: Incremento del taglio resistente in corrispondenza di un estremo della trave (Circ2009 e Circ2019)

In funzione del singolo strato di FRP incollato sulla trave, il software fornisce il seguente dominio (valido a prescindere dalla Circolare Esplicativa considerata):



Domínio di resistenza calcolato dal programma

Il taglio resistente in corrispondenza di un estremo della trave vale quindi:

$$V_{uy} = 24.92 \text{ t}$$

Si calcola analiticamente il taglio resistente “meccanismo a trazione”, utilizzando un’inclinazione delle fessure diversa per il contributo delle fibre FRP e per il contributo delle 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 (Resistenza massima di calcolo fibra) $\cot(\theta) = 1$:

$$f_d = E_f \cdot \varepsilon_{fk} \cdot \eta / \gamma_{fd} = 300000 \cdot 0.013 \cdot 0.85 / 1.10 = 30136 \text{ kg/cmg}$$

Meccanismo di delaminazione (Linee guida 3.1):

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}} = \sqrt{\frac{300000 \cdot 0.165}{2 \cdot 1.03}} = 155 \text{ mm}$$

(unità di misura N e mm)

$K_b=1$ in sicurezza

$$f_{fd} = \frac{0.24}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \sqrt{\frac{E_f \cdot k_b \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}}{t_f}} = \frac{0.24}{1.2 \cdot \sqrt{1.5}} \sqrt{\frac{300000 \cdot 1 \cdot \sqrt{20} \cdot 1.03}{t_f}} = 469.2 \text{ N/mm}^2 = 4692 \text{ kg/cm}^2$$

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

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

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

Per una fasciatura continua ($w_f/p_f = 1$) e ortogonale all'asse ($\cotg\beta = 1$) si ottiene:

$$V_{Rdf} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \frac{w_f}{p_f} = \frac{1}{1.2} 0.9 \cdot 46.5 \cdot 3777 \cdot 2 \cdot 0.0165 \cdot 1 = 4347 \text{ kg Linee guida (3.21)}$$

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 2, valore V_{uy}).

Test 2: Incremento di resistenza del pannello di nodo trave-pilastro

Al fine di tenere conto del contributo delle fibre, si utilizza il meccanismo resistente dei nodi non fessurati previsto dalla Circolare Esplicativa 2009 e successivamente modificato nella Circolare Esplicativa 2019. Si riportano entrambi i casi.

Circolare Esplicativa 2009

Il modello utilizzato prevede la presenza di elementi resistenti a trazione in parallelo alla resistenza del calcestruzzo, in modo tale da limitare le tensioni diagonali al valore $0.3\sqrt{f_c}$.

Riscrivendo opportunamente la formula C8.7.2.2, si ottiene:

$$\left| \frac{N}{2A_g} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \right| - \frac{A_{sh} \cdot f_{ywd}}{b_j \cdot h_{jw}} \leq 0.3\sqrt{f_c}$$

Al primo membro, il primo termine è uguale alla resistenza a trazione del calcestruzzo, il secondo termine rappresenta la resistenza a trazione addizionale dovuta al presidio utilizzato, dove:

- A_g indica la sezione orizzontale del nodo, quindi l'area del pilastro $30 \times 40 = 1200 \text{ cm}^2$

- V_n indica il taglio totale agente sul nodo, dato dalla somma tra il taglio derivante dal pilastro superiore e quello dovuto alla sollecitazione di trazione nell'armatura longitudinale superiore della trave

- A_{sh} è l'area complessiva delle staffe o del tessuto presente sul nodo di altezza h_{jw} , per cui nel caso di FRP quadri assiale:

$$A_{sh} = h_{jw} \times (t_f + 2 \times t_f \times \cos(45^\circ))$$

-Il valore della resistenza f_{ywd} viene assunto pari alla resistenza del 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.

$$f_{ywd} = 0.004 \times 3000000 = 12000 \text{ kg/cm}^2$$

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

Questo equivale a una resistenza a trazione aggiuntiva pari a:

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

I valori forniti dal software si leggono nella seguente tabella:

RISULTATI VERIFICHE NODI CLS - PUSH N.ro: 5 - Fx(+) Prop.Massa																		
IDENTIFICATIVO			DIREZIONE 'X									DIREZIONE 'Y						
Filo N.ro	Quota (m)	Nod3d Nro	Nsup (t)	Coll Nodo	TaglSup (t)	TrazAf (t)	SgmCo	SgmTr	RcLim	RtLim	DeltRt	TaglSup (t)	TrazAf (t)	SgmCo	SgmTr	RcLim	RtLim	DeltRt
			kg/cmq									kg/cmq						
1	3,00	2	0,0	NO	0,0	0,0	0,0	0,0	66,7	11,0	15,9							
2	3,00	4	0,0	NO	0,0	23,5	-19,6	3,7	66,7	11,0	15,9							

Il contributo dei rinforzi vale 15.9 kg/cm^q (vedi nella tabella *DeltRt*), pari alla resistenza a trazione aggiuntiva calcolata manualmente.

Effettuando i calcoli manuali e assumendo la trazione in assenza di rinforzo pari a 19,6 kg/cm^q uguale alla compressione fornita dal software (vedi nella tabella *SgmCo*), si ottiene come sforzo di trazione sul calcestruzzo:

$$\left| \frac{N}{2A_g} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} - \frac{A_{sh} \cdot f_{ywd}}{b_j \cdot h_{jw}} \right| = 19,6 - 15,9 = 3,7 \text{ kg/cm}^q$$

valore identico a quello fornito dal software (vedi nella tabella *SgmTr*).

Circolare Esplicativa 2019

In questo caso si utilizza la formula C8.7.2.11:

$$\left| \frac{N}{2A_j} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_j}\right)^2 + \left(\frac{V_j}{A_j}\right)^2} - \frac{A_{sh} \cdot f_{ywd}}{b_j \cdot h_{jw}} \right| \leq 0,3 \sqrt{f_c}$$

All'apparenza uguale alla formula della precedente circolare ad eccezione del pedice j al primo termine, in tal caso aumenta il taglio agente e diminuisce l'area da considerare, infatti:

$$-A_j = b_j \cdot h_{jc} = 23 \cdot 40 = 920 \text{ cm}^q \text{ (cfr. §7.4.4.3.1 della norma)}$$

- V_j indica il taglio totale agente sul nodo, dato dalla somma tra il taglio derivante dal pilastro superiore e quello dovuto alle sollecitazioni sia di trazione sia di compressione nell'armatura longitudinale superiore della trave

In tal caso uno strato di FRP non è sufficiente per soddisfare la verifica, occorre quindi aggiungerne un secondo, ottenendo una resistenza a trazione aggiuntiva pari al doppio della precedente:

$$\frac{A_{sh} \cdot f_{ywd}}{b_j \cdot h_{jw}} = \frac{47900}{30 \cdot 50} = 31,94 \text{ kg/cm}^q$$

I valori forniti dal software si leggono nella seguente tabella:

RISULTATI VERIFICHE NODI CLS - PUSH N.ro: 5 - Fx(+) Prop.Massa																		
IDENTIFICATIVO			DIREZIONE 'X									DIREZIONE 'Y						
Filo N.ro	Quota (m)	Nod3d Nro	Nsup (t)	Coll Nodo	TaglSup (t)	TrazAf (t)	SgmCo	SgmTr	RcLim	RtLim	DeltRt	TaglSup (t)	TrazAf (t)	SgmCo	SgmTr	RcLim	RtLim	DeltRt
			kg/cmq									kg/cmq						
1	3,00	2	0,0	NO	0,0	29,3	-31,8	0,0	66,7	11,0	31,9							
2	3,00	4	0,0	NO	0,0	29,3	-31,9	0,0	66,7	11,0	31,9							

Il contributo dei rinforzi vale 31.9 kg/cm^q (vedi nella tabella *DeltRt*), pari alla resistenza a trazione aggiuntiva calcolata manualmente.

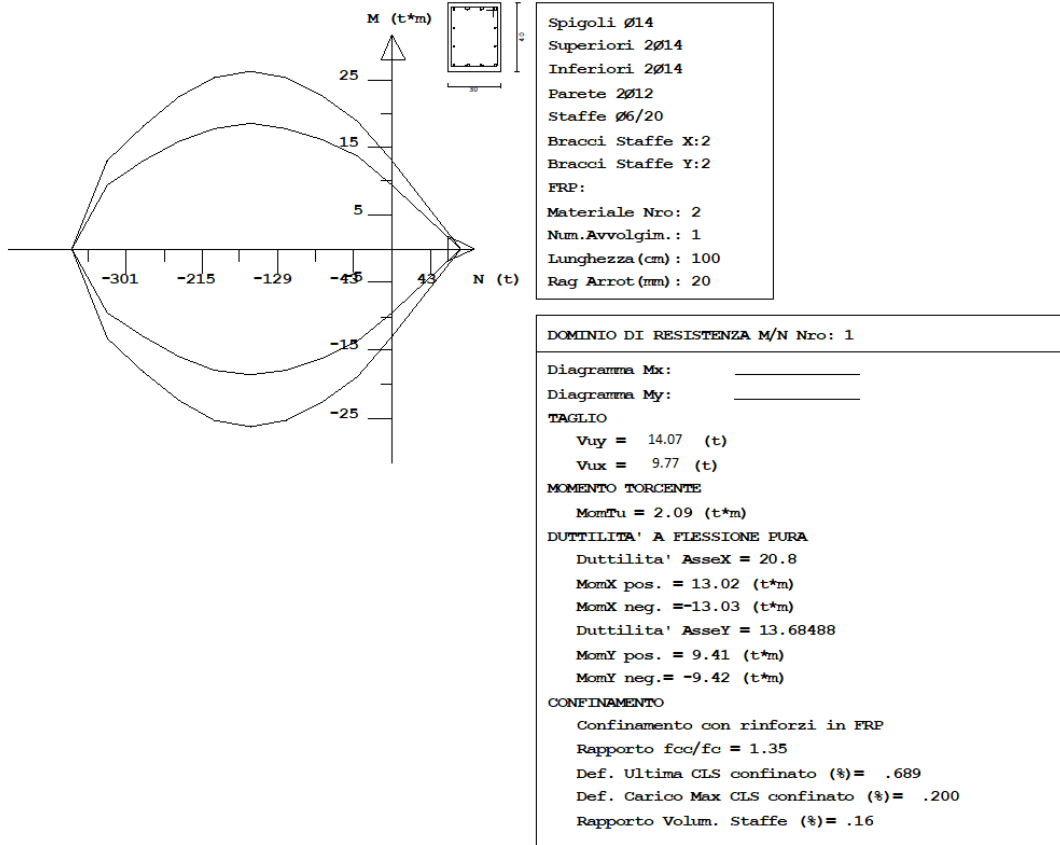
Effettuando i calcoli manuali e assumendo la trazione in assenza di rinforzo pari a 31,9 kg/cm^q uguale alla compressione fornita dal software (vedi nella tabella *SgmCo*), si ottiene, come calcolato dal software (vedi nella tabella *SgmTr*), lo sforzo di trazione nullo sul calcestruzzo:

$$\left| \frac{N}{2A_j} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_j}\right)^2 + \left(\frac{V_j}{A_j}\right)^2} - \frac{A_{sh} \cdot f_{ywd}}{b_j \cdot h_{jw}} \right| = 31,9 - 31,9 = 0 \text{ kg/cm}^q$$

Test 3: Incremento di duttilità per confinamento del pannello di nodo trave-pilastro

Circolare Esplicativa 2009

Avendo disposto un singolo strato di FRP alle estremità del pilastro per soddisfare la verifica del nodo del test 2, il software fornisce in questo caso dei risultati diversi:



La deformazione ultima del calcestruzzo vale:

$$\varepsilon_{ccu} = 0.68\%$$

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

Confinamento.

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

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

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

$$h' = h - 2 \cdot r_c = 40 - 2 \cdot 2 = 36 \text{ cm}$$

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

Pressione di confinamento (cfr. Linee Guida 3.34):

$$f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid} = \frac{1}{2} \cdot 0.001925 \cdot 3000000 \cdot 0.0078 = 22.523 \text{ kg/cm}^2$$

Cfr. Linee Guida 3.33 3.35:

$$f_{leff} = f_l \cdot k_h \cdot k_v \cdot k_\alpha = 22.523 \cdot 0.452 \cdot 1 \cdot 1 = 10.185 \text{ kg/cm}^2$$

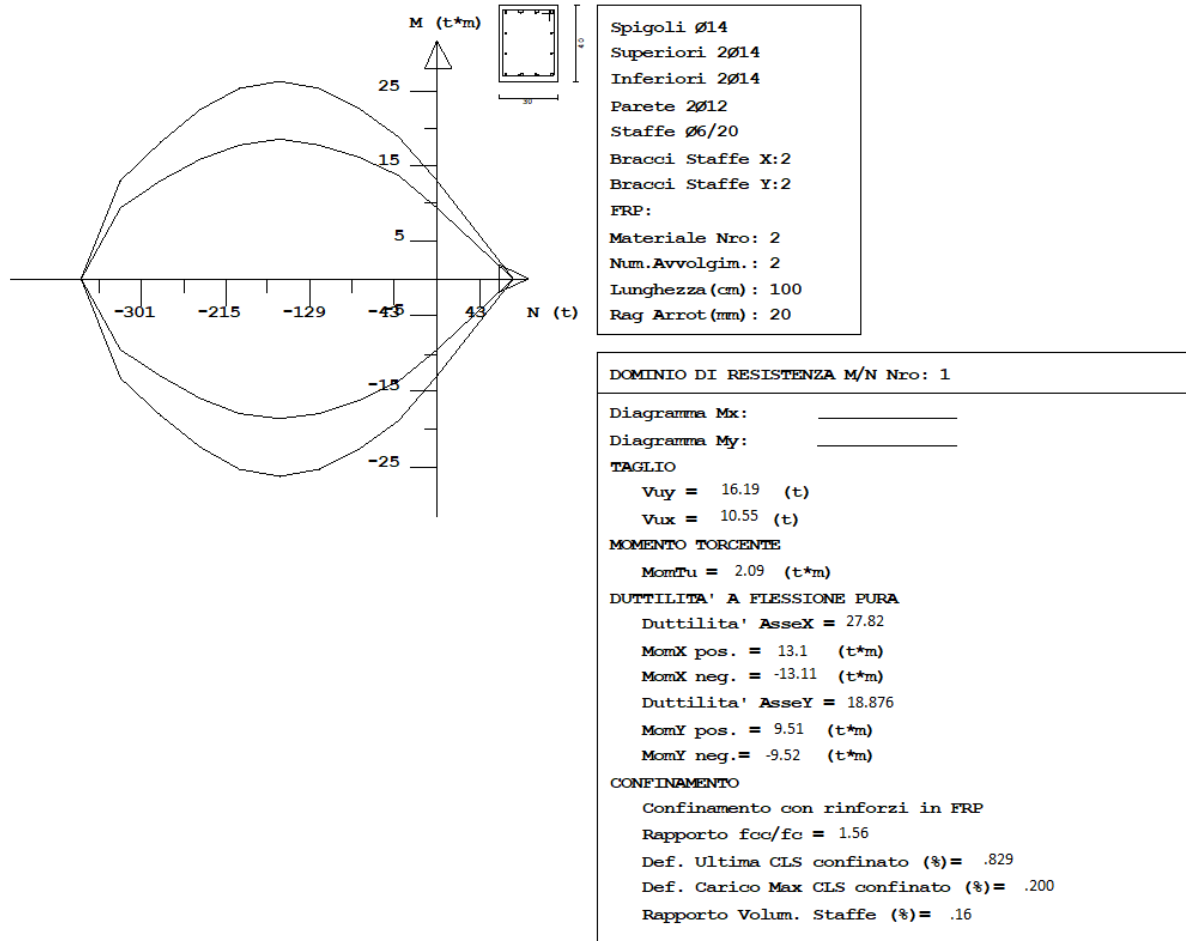
$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{cu} + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{f_{leff}}{f_c}} = 0.0035 + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{10.185}{200}} = 0.00689 \text{ (cfr. Linee Guida 3.43)}$$

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

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

Circolare Esplicativa 2009

Avendo disposto due strati di FRP alle estremità del pilastro per soddisfare la verifica del nodo del test 2, il software fornisce in questo caso dei risultati diversi:



Considerando quindi un valore dello spessore t_f pari al doppio del precedente ($0.0165 \times 2 = 0.033 \text{ mm}$), vanno modificati alcuni calcoli:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot 2t_f \cdot (b + h) \cdot b_f}{b \cdot h \cdot p_f} = \frac{2 \cdot 0.033 \cdot (30 + 40)}{30 \cdot 40} = 0.00385$$

$$f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{f,d,rid} = \frac{1}{2} \cdot 0.00385 \cdot 3000000 \cdot 0.0078 = 45.455 \text{ kg/cmq}$$

$$f_{l,eff} = f_l \cdot k_h \cdot k_v \cdot k_\alpha = 45.045 \cdot 0.452 \cdot 1 \cdot 1 = 20.370 \text{ kg/cmq}$$

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{cu} + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{f_{l,eff}}{f_c}} = 0.0035 + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{20.370}{200}} = 0.00829$$

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