

Rinforzo a pressoflessione di una PILASTRO con FRP

Normativa di riferimento:

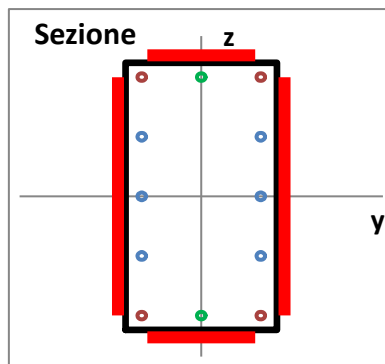
NTC2018 - D.M. 17/01/2018 - Norme Tecniche per le Costruzioni

Circolare n.7 del 21/1/2019 - Istruzioni per l'applicazione delle NTC

CNR-DT200 R1/2013 - Consolidamento statico mediante compositi fibrorinforzati

Dati geometrici della sezione

b =	28.00	cm	Base della sezione
h =	56.00	cm	Altezza sezione
d' =	3.00	cm	Copriferro
A _{s,spig} =	1	φ 16	Ferro di spigolo
A _{s,sup} =	1	φ 16	Ferri superiori (oltre i ferri di spig.)
A _{s,inf} =	1	φ 16	Ferri inferiori (oltre i ferri di spig.)
A _{s,lat} =	3	φ 16	Armatura lat. (oltre i ferri di spig.)

**Materiali****Calcestruzzo**

Tipo: Rck23

Acciaio

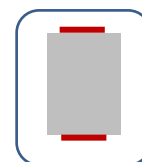
Classe: Aq60

E_s = 210'000 N/mm² modulo elastico dell'acciaio

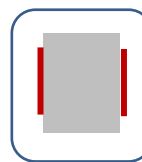
Livello di conoscenza LC2 - Conosc. Adeguata FC=1.2

Tessuto in FRPf_{fk} = 2'700 N/mm² Resis. Caratt. del tessuto in FRP nella direz. delle fibreE_f = 240'000 N/mm² modulo elastico dell'FRP**RINFORZO IN FRP****Dati geometrici del rinforzo per momento My**

b _{f,y} =	200	mm	larghezza dello strato di FRP
t _{f,y} =	0.170	mm	spessore equivalente dello strato di FRP
n _r =	10		numero di strati di FRP

**Dati geometrici del rinforzo per momento Mz**

b _{f,z} =	500	mm	larghezza dello strato di FRP
t _{f,z} =	0.170	mm	spessore equivalente dello strato di FRP
n _{f,z} =	6		numero di strati di FRP

**Applicazione, esposizione, tipo di composito**

Applicaz. Tipo A: certificati sia i materiali che il sistema completo

γ_f = 1.10 coefficiente parziale per rottura per strappoγ_{fd} = 1.20 coefficiente parziale per rottura per delaminazione

Esposiz.: Interna

fibra/res.: Carbonio/Epossidica

η_a = 0.95 fattore di conversione ambientale

Tipo: Compositi impregnati in situ

Carico: Altri casi

Altri parametri

Coefficienti parziali di sicurezza

$\alpha_{cc} =$	0.85	Coefficiente riduttivo del cls per resistenze di lunga durata
$\gamma_c =$	1.50	Coefficiente di sicurezza del cls
$\gamma_s =$	1.15	Coefficiente di sicurezza dell'acciaio

Confinamento in FRP

$\rho_f =$	50.00	cm	Passo delle fasce di tessuto
$b_f =$	50.00	cm	Altezza della striscia
$t_f =$	0.170	mm	Spessore del tessuto in FRP
$n_f =$	3		Numero di strati del confinamento
$\alpha_f =$	0.00	°	Inclinazione delle fibre rispetto all'asse verticale
$r =$	4.00	cm	Raggio di curvatura spigolo della sezione (min. 2 cm)

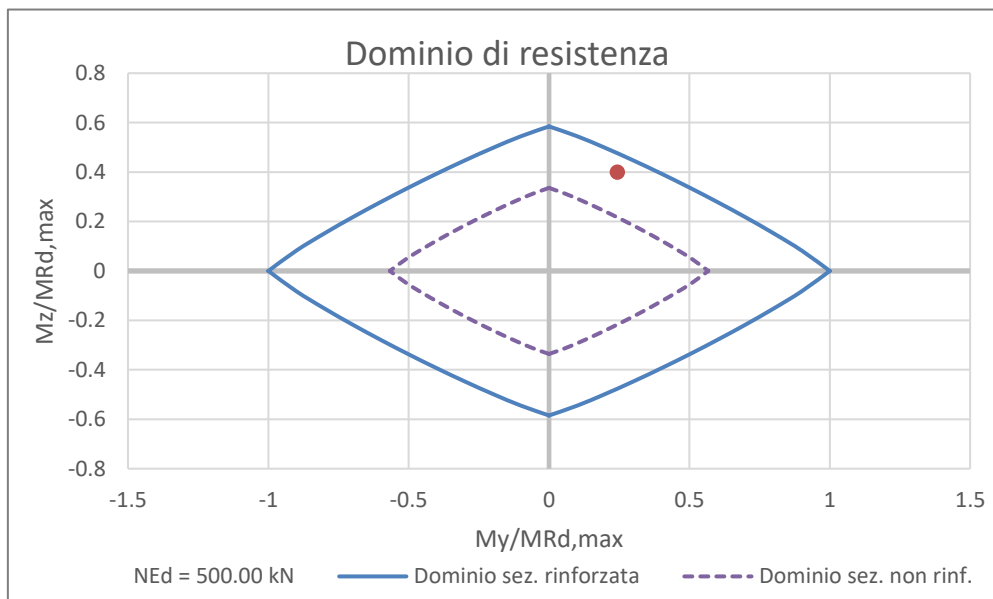
Sollecitazioni allo SLU

$N_{Ed} =$	500.00	kN	Sforzo normale sollecitante
$M_{Ed,y} =$	70.00	kNm	Momento sollecitante intorno all'asse y
$M_{Ed,z} =$	115.00	kNm	Momento sollecitante intorno all'asse z

Momenti resistenti

$M_{Rd,y}^{FRP} =$	288.10	kNm	Momento resist. Y sezione rinforzata
$M_{Rd,y} =$	163.37	kNm	Momento resist. Y sezione non rinforzata
$M_{Rd,z}^{FRP} =$	168.44	kNm	Momento resist. Z sezione rinforzata
$M_{Rd,z} =$	96.73	kNm	Momento resist. Z sezione non rinforzata

Verifica a pressoflessione deviata allo SLU					Esito
Pressoflessione senza finforzo	SF =	❌ 1.60	≤	1.00	Negativo
Pressoflessione con finforzo	SF ^{FRP} =	✅ 0.86	≤	1.00	Positivo



Altre verifiche						SF	Esito
Incremento di $M_{Rd,y}$	$\Delta M_{Rd,y} =$	76.3	>	50.0	%	❌ 1.53	Negativo
Incremento di $M_{Rd,z}$	$\Delta M_{Rd,z} =$	74.1	>	50.0	%	❌ 1.48	Negativo
FRP dopo snerv.	$\epsilon_{fd} =$	0.0	\geq	$\epsilon_{sy} =$	0.0010	✅ 0.10	Positivo

Controllo sull'eccentricità					SF	Esito
$e_y =$	1.40E+01	>	$d_{n,y}$ [cm]=	9.33	✅ 0.67	Grande eccentricità
$e_z =$	2.30E+01	>	$d_{n,z}$ [cm]=	4.67	✅ 0.20	Grande eccentricità

Efficacia del confinamento				SF	Esito	
$f_{l,eff}/f_{cd} =$	0.086	>		0.050	✅ 1.71	Confinamento efficace
$b/h =$	2.000	<		2.000	✅ 1.00	Confinamento efficace
$\max(b,h) =$	56.000	<	d_{max} [cm]=	90.000	✅ 1.61	Confinamento efficace

Sviluppo dei calcoli

Dati geometrici del rinforzo

Rinforzo per M_y

$b_{f,y} =$	200	mm	Larghezza dello strato di FRP
$t_{f,y} =$	0.170	mm	Spessore equivalente dello strato di FRP
$n_{f,y} =$	10		numero di strati di FRP

Rinforzo per M_z

$b_{f,z} =$	500	mm	Larghezza dello strato di FRP
$t_{f,z} =$	0.170	mm	Spessore equivalente dello strato di FRP
$n_{f,z} =$	6		numero di strati di FRP

Aree di armatura e area del rinforzo

$A_{s,sup} =$	201.06	mm ²	Armatura superiore
$A_{s,inf} =$	201.06	mm ²	Armatura inferiore
$A_{s,spig.} =$	201.06	mm ²	Armatura di spigolo
$A_{s,lat} =$	603.19	mm ²	Armatura laterale
$A_{f,y} =$	340.00	mm ²	Area del rinforzo in FRP per momento M_y
$A_{f,z} =$	510.00	mm ³	Area del rinforzo in FRP per momento M_z

Proprietà dei materiali

$\alpha_{cc} =$	0.85		Coefficiente riduttivo per resistenze di lunga durata
$\gamma_c =$	1.50		Coefficiente di sicurezza del cls
$\gamma_s =$	1.15		Coefficiente di sicurezza dell'acciaio
$f_{ck} =$	23.00	N/mm ²	resistenza caratteristica cilindrica del cls

Resistenza e deformazione ultima del calcestruzzo confinato con FRP

Nota: il confinamento è sempre necessario nel rinforzo a pressoflessione dei pilastri al fine di evitare il distacco

$p_f =$	50.00	cm	Passo delle fasce di tessuto
$p'_f =$	0.00	cm	Distanza netta fra le strisce di tessuto
$b_f =$	50.00	cm	Altezza della striscia
$t_{f,c} =$	0.510	mm	Spessore complessivo del confinamento in FRP
$d_{min} =$	28.00	cm	Dimensione minima della sezione
$k_v =$	1.00		Coeff. di efficacia verticale
$\alpha_f =$	0.00	°	Inclinazione delle fibre rispetto all'asse verticale
$k_\alpha =$	1.00		Coefficiente di efficienza per inclinazione delle fibre
$b =$	28.00	cm	Base della sezione
$h =$	56.00	cm	Altezza della sezione
$b' =$	20.00	cm	Dimensione depurata del raggio di curvatura
$h' =$	48.00	cm	Dimensione depurata del raggio di curvatura
$k_H =$	0.425		Coefficiente di efficacia orizzontale
$\rho_f =$	0.0055		Percentuale geometrica di rinforzo
$E_f =$	240'000	Mpa	Modulo elastico del tessuto in direzione delle fibre
$\varepsilon_{fd,rid} =$	0.0040		Deform. ridotta di calcolo a rottura dell'FRP per elem. p.infl.
$f_l =$	2.62	MPa	Pressione di confinamento
$k_{eff} =$	0.425		Coefficiente di efficienza

Rinforzo a pressoflessione

$f_{l,eff} =$	1.12	MPa	Pressione efficace di confinamento
$f_{l,eff} =$	111.52	N/cm ²	Pressione efficace di confinamento
$f_{cd} =$	13.03	MPa	Resistenza di progetto del calcestruzzo
$f_{l,eff}/f_{cd} =$	0.09		
$f_{ccd}/f_{cd} =$	1.01		Incremento di resistenza del cls confinato

Efficacia del confinamento (test per il calcolo)

$f_{ccd} =$	13.12	MPa	Resistenza di progetto del calcestruzzo confinato
$\epsilon_{cu} =$	0.0035		Deformazione ultima del calcestruzzo
$\epsilon_{ccu} =$	0.0079		Deformazione ultima del calcestruzzo confinato

Resistenze di progetto dei materiali

$f_{cd} =$	13.03	N/mm ²	resistenza di progetto cilindrica del cls
$f_{ctm} =$	2.43	N/mm ²	resistenza media a trazione semplice del cls
$f_{yk} =$	295.00	N/mm ²	tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio
$f_{yd} =$	256.52	N/mm ²	tensione di snervamento di progetto dell'acciaio
$f_{fk} =$	2'700.00	N/mm ²	Resistenza caratteristica del tessuto in FRP nella direz. delle fibre

Moduli elastici

$E_s =$	210'000	N/mm ²	modulo elastico dell'acciaio
$E_f =$	240'000	N/mm ²	modulo elastico dell'FRP

Resistenze ridotte (solo per strutture esistenti)

LC =	LC2 - Conosc. Adeguata	FC=1.2	
FC =	1.20		Fattore di confidenza
$f_{cd}/FC =$	10.86	N/mm ²	Resistenza del calcestruzzo ridotta
$f_{ccd}/FC =$	10.93	N/mm ²	Resistenza del calcestruzzo confinato ridotta
$f_{yd}/FC =$	213.77	N/mm ²	Resistenza dell'acciaio ridotta

Resistenza del composito in FRP

$b_f/b =$	0.714		Rapporto fra larghezza del rinforzo e larghezza della trave
$k_b =$	1.000		fattore geometrico
$k_G =$	0.037	mm	
$\gamma_{fd} =$	1.20		coefficiente parziale per rottura per delaminazione
$k_{cr} =$	3.00		coefficiente
$\Gamma_{Fd} =$	0.230	N/mm ²	Energia specifica di frattura
$k_q =$	1.000		Coefficiente per la condizione di carico
$k_{G,2} =$	0.100		Coefficiente sperimentale
$f_{fdd,1} =$	212.52	N/mm ²	Resistenza per distacco di estremità (modo 1)
$f_{fdd,2} =$	349.37	N/mm ²	Resistenza per distacco intermedio (modo 2)

Controllo sull'eccentricità*Flessione introrno all'asse Y*

$e_y =$	1.40E+01	cm	eccentricità per momento My (My/N)
$d_{n,y} =$	9.33E+00	cm	Lunghezza del nocciolo centrale d'inerzia

Flessione introrno all'asse Z

$e_z =$	2.30E+01	cm	eccentricità per momento Mz (My/N)
$d_{n,z} =$	4.67E+00	cm	Lunghezza del nocciolo centrale d'inerzia

Deformazioni limite dei materiali

Rinforzo a pressoflessione

ϵ_{cu} =	0.0035	deformazione ultima nel cls
ϵ_{ccu} =	0.0079	Deformazione ultima del calcestruzzo confinato
ϵ_{sy} =	0.0010	deformaz. al limite elastico dell'acciaio
η_a =	0.95	fattore di conversione ambientale
γ_f =	1.10	Coefficiente parziale per collasso per strappo
ϵ_{fk} =	0.0113	deformazione caratteristica a rottura del rinforzo
ϵ_0 =	0.0000	deformazione iniziale al lembo teso del cls per carichi agenti
$\eta_a \cdot \epsilon_{fk} / \gamma_f$ =	0.0097	Deformazione a rottura del rinforzo
ϵ_{fd} =	0.0097	deformazione massima di progetto nel rinforzo di FRP

Coefficienti di riduzione del cls (stress block)

ψ =	0.80	coeff. di riduz. di γ_c (stress block)
λ =	0.40	coeff. di riduz. di γ_c per il calcolo del braccio

Sezione rinforzata: Calcolo del momento resistente $M_{Rd,y}$ intorno ad y

$y_{c,lim}$ =	250.92	mm	Valore limite dell'asse neutro per rottura lato cls o lato FRP
b =	280.00	mm	Base della sezione
h =	560.00	mm	Altezza sezione
d' =	30.00	mm	Copriferro
y_c =	355.48	mm	Asse neutro

Deformazioni nei materiali

Rottura:	lato cls - zona 2		Tipo di rottura
ϵ_f =	-0.0045		deformazione nell'FRP
ϵ'_s =	0.0072		deformazione dell'armatura compressa
ϵ_s =	-0.0039		deformazione dell'armatura tesa
σ'_s =	213.77	N/mm ²	tensione nell'armatura compressa
σ_s =	-213.77	N/mm ²	tensione nell'armatura tesa
σ_f =	-1'089.17	N/mm ²	Tensione nel rinforzo in FRP
y'_c =	355.48	mm	Asse neutro per l'equilibrio alla traslazione (compreso fra 0 e h)
A'_s =	603.19	mm ²	Armatura compressa
A_s =	603.19	mm ²	Armatura tesa
A_f =	340.00	mm ²	Area del rinforzo in FRP
N'_s =	1.29E+05	N	Sforzo nell'armatura compressa
N_s =	-1.29E+05	N	Sforzo nell'armatura tesa
N_f =	-3.70E+05	N	Sforzo nell'FRP
N_c =	8.70E+05	N	Sforzo nel calcestruzzo compresso
N_{Ed} =	5.00E+05	N	Sforzo normale sollecitante
γ_{Rd} =	1.00		Coefficiente parziale per il modello di resistenza a flessione
$\Delta N(\gamma_c)$	-1.23E-05	N	equilibrio alla traslazione
$M_{Rd,y}^{FRP}$ =	288.10	kNm	momento resistente allo SLU

Sezione senza rinforzo: Calcolo del momento resistente $M_{Rd,y}$ intorno ad y

b =	280.00	mm	Base della sezione
-------	--------	----	--------------------

Rinforzo a pressoflessione

$h =$	560.00	mm	Altezza sezione
$d' =$	30.00	mm	Copriferro
$y_c =$	205.52	mm	Asse neutro

Deformazioni nei materiali

$\varepsilon'_s =$	0.0030		deformazione dell'armatura compressa
$\varepsilon_s =$	-0.0055		deformazione dell'armatura tesa
$\sigma'_s =$	213.77	N/mm ²	tensione nell'armatura compressa
$\sigma_s =$	-213.77	N/mm ²	tensione nell'armatura tesa
$y'_c =$	205.52	mm	Asse neutro per l'equilibrio alla traslazione (compreso fra 0 e h)
$A'_s =$	603.19	mm ²	Armatura compressa
$A_s =$	603.19	mm ²	Armatura tesa
$N'_s =$	1.29E+05	N	Sforzo nell'armatura compressa
$N_s =$	-1.29E+05	N	Sforzo nell'armatura tesa
$N_c =$	5.00E+05	N	Sforzo nel calcestruzzo compresso
$N_{Ed} =$	5.00E+05	N	Sforzo normale sollecitante
$\Delta N(y_c) =$	0.00E+00	N	equilibrio alla traslazione
$M_{Rd,y} =$	163.37	kNm	momento resistente allo SLU

Incremento del momento resistente

$\Delta M_{Rd,y} =$	76.35	%	Incremento del momento resistente intorno ad Y
---------------------	-------	---	--

Sezione rinforzata: Calcolo del momento resistente MRd,z intorno a z

$y_{c,lim} =$	125.46	mm	Valore limite dell'asse neutro per rottura lato cls o lato FRP
$b =$	280.00	mm	Base della sezione
$h =$	560.00	mm	Altezza sezione
$d' =$	30.00	mm	Copriferro
$y_c =$	192.19	mm	Asse neutro

Deformazioni nei materiali

Rottura:	lato cls - zona 2		Tipo di rottura
$\varepsilon_f =$	-0.0036		deformazione nell'FRP
$\varepsilon'_s =$	0.0067		deformazione dell'armatura compressa
$\varepsilon_s =$	-0.0024		deformazione dell'armatura tesa
$\sigma'_s =$	213.77	N/mm ²	tensione nell'armatura compressa
$\sigma_s =$	-213.77	N/mm ²	tensione nell'armatura tesa
$\sigma_f =$	-864.89	N/mm ²	Tensione nel rinforzo in FRP
$y'_c =$	192.19	mm	Asse neutro per l'equilibrio alla traslazione (compreso fra 0 e b)
$A'_s =$	1'005.31	mm ²	Armatura compressa
$A_s =$	1'005.31	mm ²	Armatura tesa
$A_f =$	510.00	mm ²	Area del rinforzo in FRP
$N'_s =$	2.15E+05	N	Sforzo nell'armatura compressa
$N_s =$	-2.15E+05	N	Sforzo nell'armatura tesa
$N_f =$	-4.41E+05	N	Sforzo nell'FRP
$N_c =$	9.41E+05	N	Sforzo nel calcestruzzo compresso

Rinforzo a pressoflessione

$N_{Ed} =$	5.00E+05	N	Sforzo normale sollecitante
$\gamma_{Rd} =$	1.00		Coeff. parziale per il modello di resistenza a fless./pressofless.
$\Delta N(\gamma_c)$	0.00	N	equilibrio alla traslazione
$M_{Rd,z}^{FRP} =$	168.44	kNm	momento resistente allo SLU

Sezione senza rinforzo: Calcolo del momento resistente $M_{Rd,z}$ intorno a z

$b =$	280.00	mm	Base della sezione
$h =$	560.00	mm	Altezza sezione
$d' =$	30.00	mm	Copriferro
$\gamma_c =$	102.76	mm	Asse neutro

Deformazioni nei materiali

$\epsilon'_s =$	0.0025		deformazione dell'armatura compressa
$\epsilon_s =$	-0.0050		deformazione dell'armatura tesa
$\sigma'_s =$	213.77	N/mm ²	tensione nell'armatura compressa
$\sigma_s =$	-213.77	N/mm ²	tensione nell'armatura tesa
$\gamma'_c =$	102.76	mm	Asse neutro per l'equilibrio alla traslazione (compreso fra 0 e h)
$A'_s =$	1'005.31	mm ²	Armatura compressa
$A_s =$	1'005.31	mm ²	Armatura tesa
$N'_s =$	2.15E+05	N	Sforzo nell'armatura compressa
$N_s =$	-2.15E+05	N	Sforzo nell'armatura tesa
$N_c =$	5.00E+05	N	Sforzo nel calcestruzzo compresso
$N_{Ed} =$	5.00E+05	N	Sforzo normale sollecitante
$\Delta N(\gamma_c)$	0.00E+00	N	equilibrio alla traslazione
$M_{Rd,z} =$	96.73	kNm	momento resistente allo SLU

Incremento del momento resistente

$\Delta M_{Rd,z} =$	74.14	%	Incremento del momento resistente intorno a Z
---------------------	-------	---	---

Verifica a pressoflessione deviata senza rinforzo

$$\left(\frac{M_{E_{yd}}}{M_{R_{yd}}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{E_{zd}}}{M_{R_{zd}}} \right)^\alpha \leq 1$$

$$\alpha = 1.12$$

$$M_{ed,y}/M_{Rd,y} = 0.43$$

$$M_{ed,z}/M_{Rd,z} = 1.19$$

$$SF = 1.601 \quad \text{Fattore di sicurezza per verifica a p.fless.}$$

Verifica			Esito
SF =	1.601	≤	1.00
			Negativo

Verifica a pressoflessione deviata con rinforzo in FRP

$$\left(\frac{M_{E_{yd}}}{M_{R_{yd}}} \right)^{\alpha} + \left(\frac{M_{E_{zd}}}{M_{R_{zd}}} \right)^{\alpha} \leq 1$$

$$\alpha = 1.12$$

$$M_{ed,y}/M_{Rd,y}^{FRP} = 0.24$$

$$M_{ed,z}/M_{Rd,z}^{FRP} = 0.68$$

$$SF = 0.857$$

Fattore di sicurezza per verifica a p.fless.

Verifica			Esito	
SF =	0.857	≤	1.00	Positivo