

CONSOLIDAMENTO E RINFORZO DEGLI EDIFICI IN CEMENTO ARMATO E MURATURA

Tecniche d'intervento e casi studio



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA



Laterlite

Materiali compositi: FRP, FRCM, CRM e FRC

- **Inquadramenti normativi e sperimentazioni**
- **Approcci al calcolo e all'applicazione:**
 - Interventi su elementi in muratura portante
 - Interventi su elementi in c.a.
 - Interventi su strutture voltate



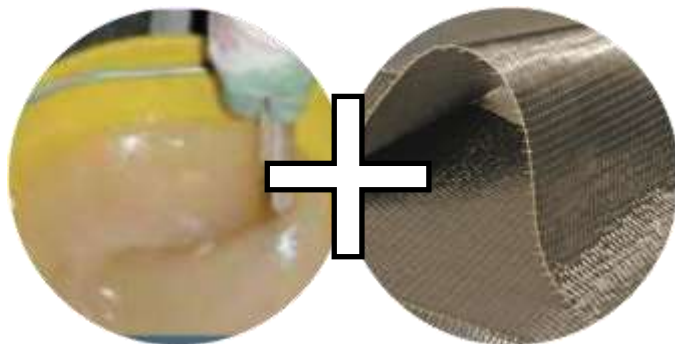
**ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA**



Laterlite



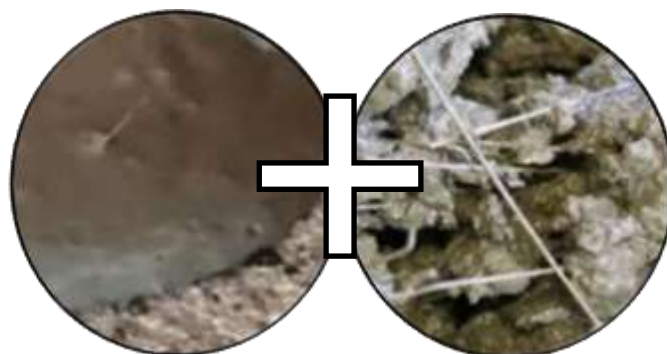
FRP



FRCM



FRC



CRM

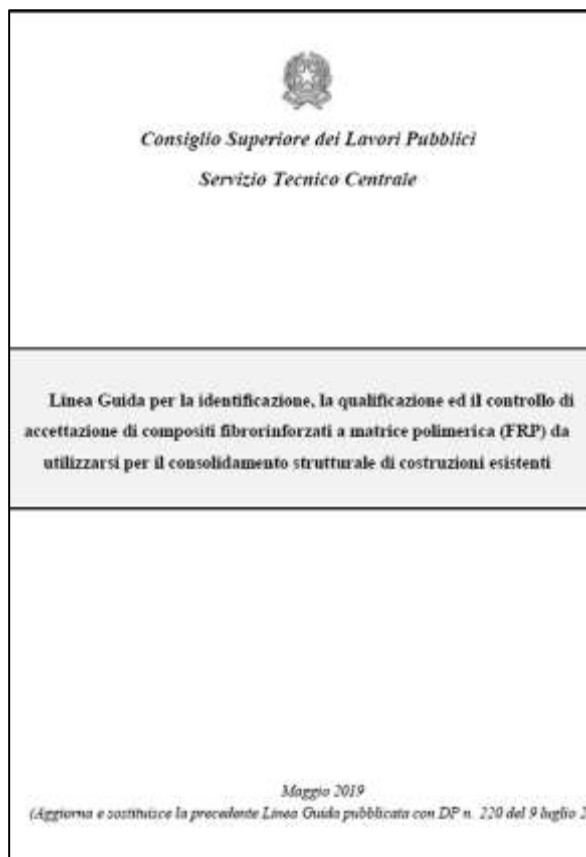


Inquadramento normativo

Progettazione – Qualificazione - Accettazione



FRCM



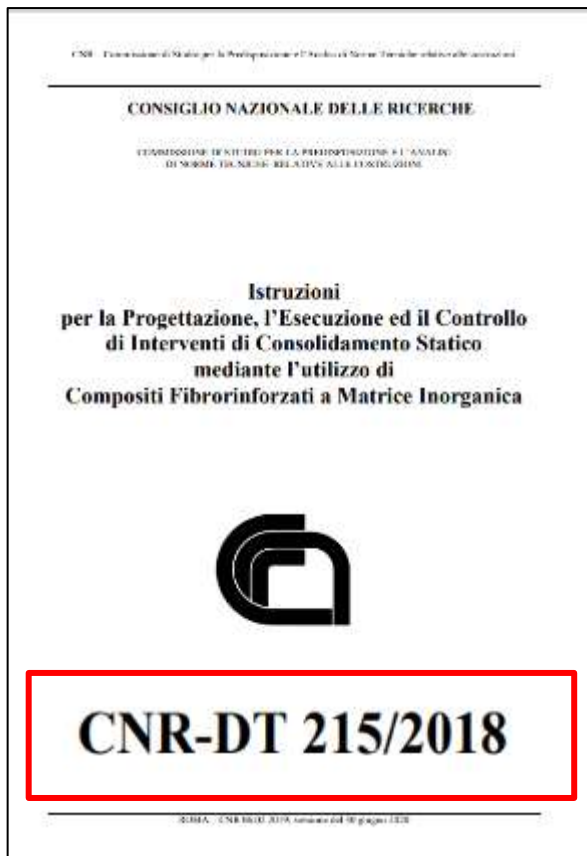
FRP



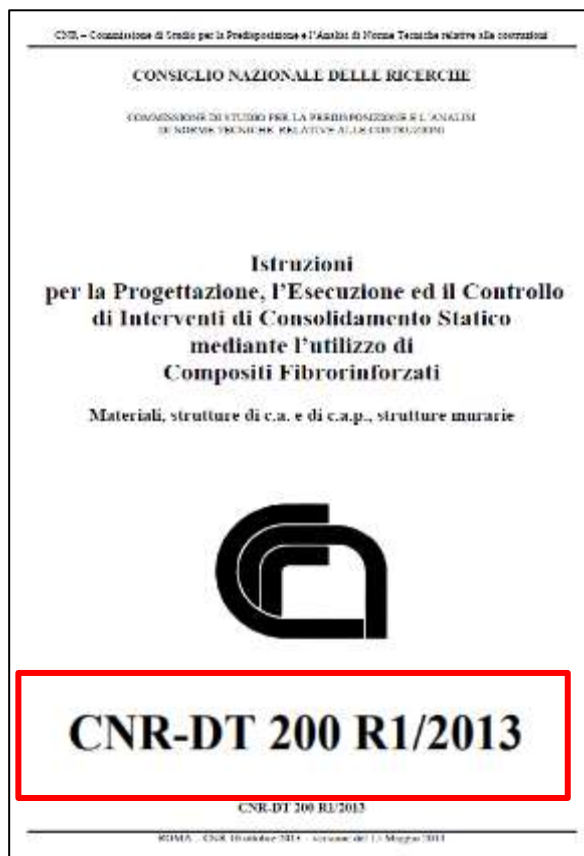
FRC



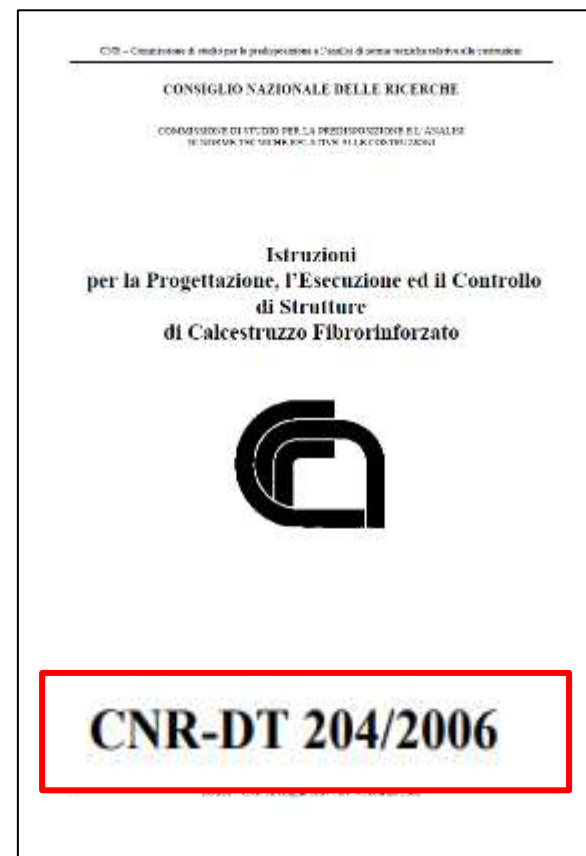
CRM



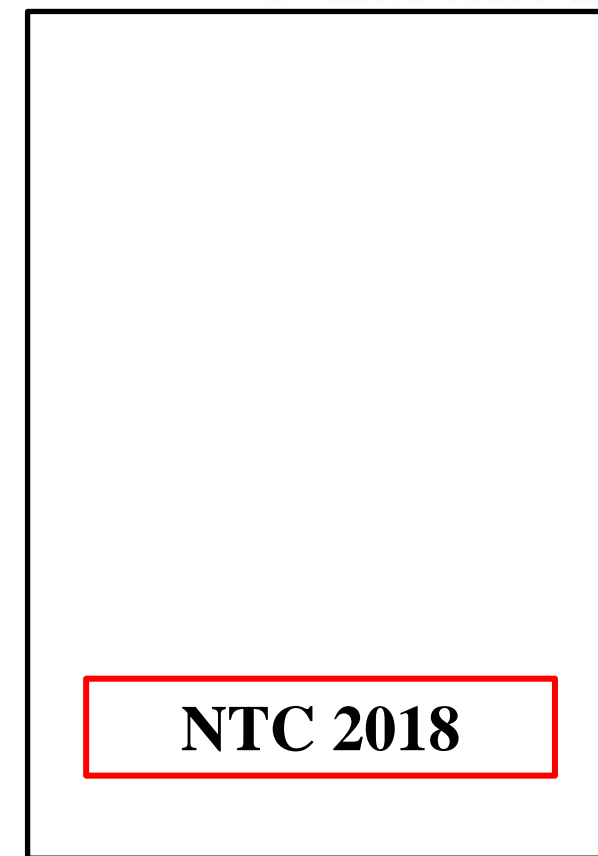
**PROGETTAZIONE
FRCM**



**PROGETTAZIONE
FRP**



**PROGETTAZIONE
FRC**

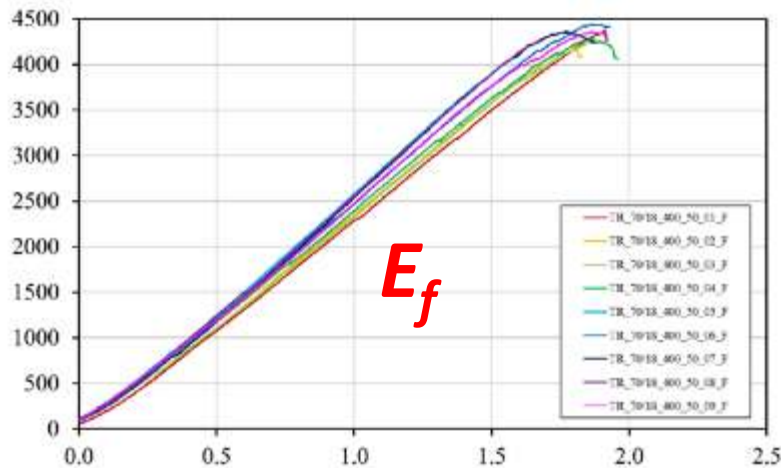


**VALUTAZIONE
CRM**

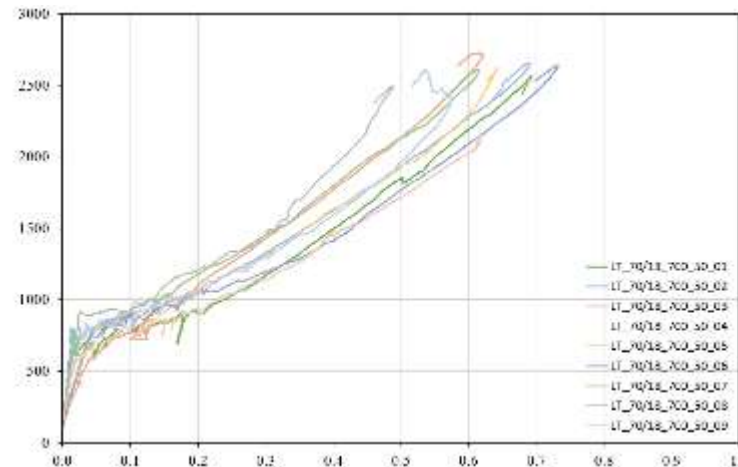
RIFERIMENTI NORMATIVI – PROGETTAZIONE FRCCM



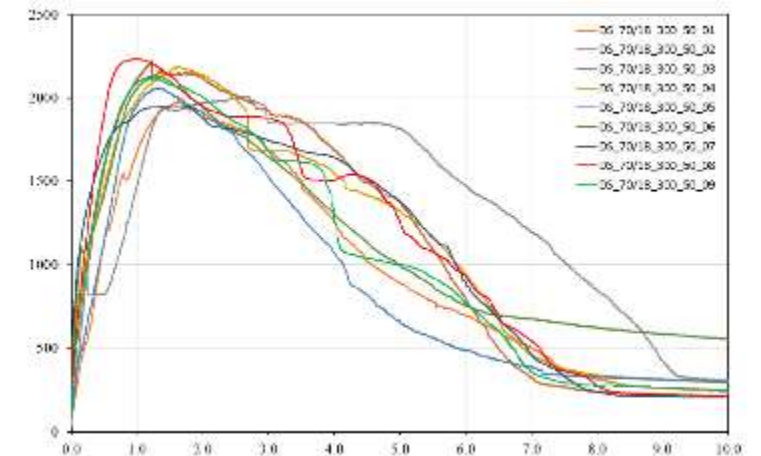
ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA



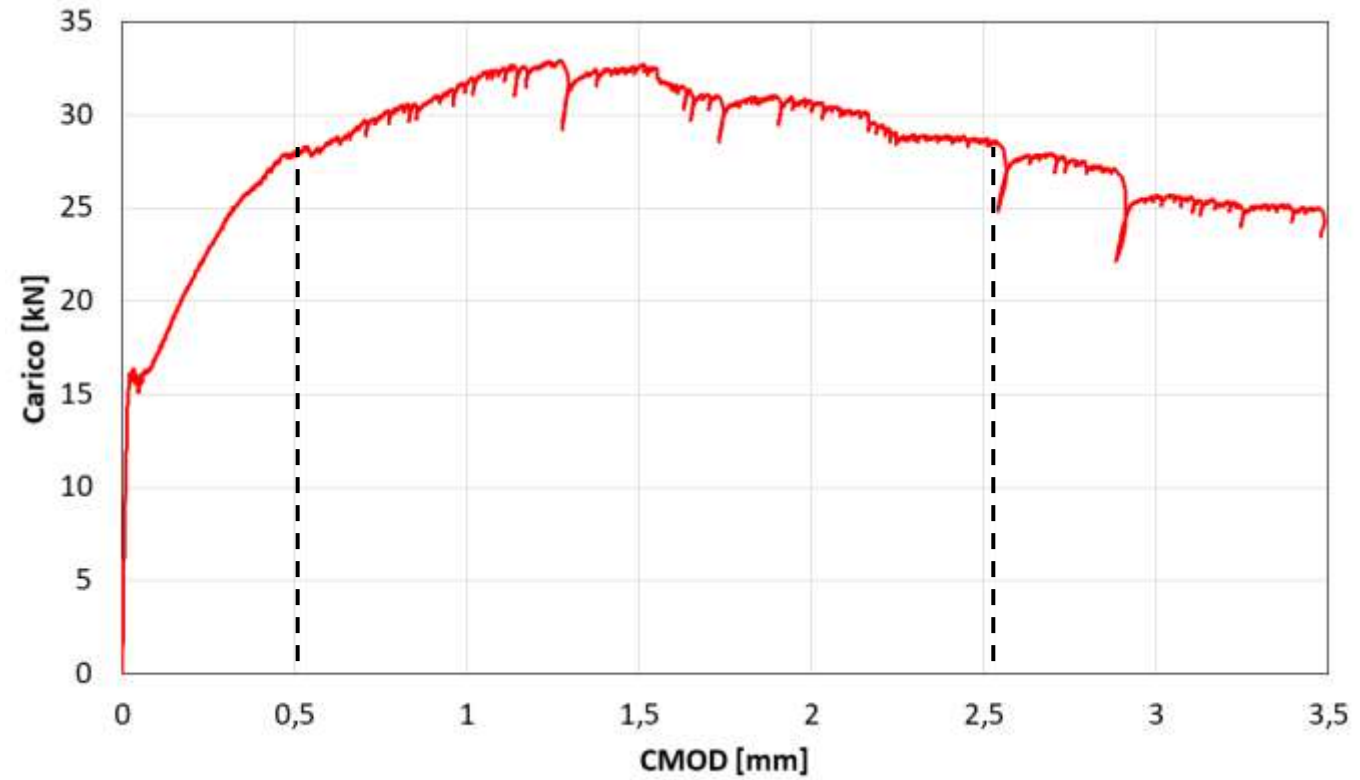
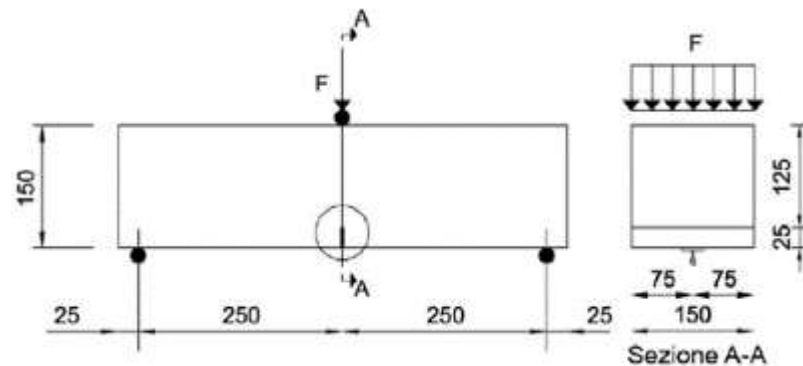
σ_{uf}
valore caratteristico dello
sforzo di trazione massimo
della RETE SECCA



σ_u
valore caratteristico dello sforzo di
trazione massimo del COMPOSITO

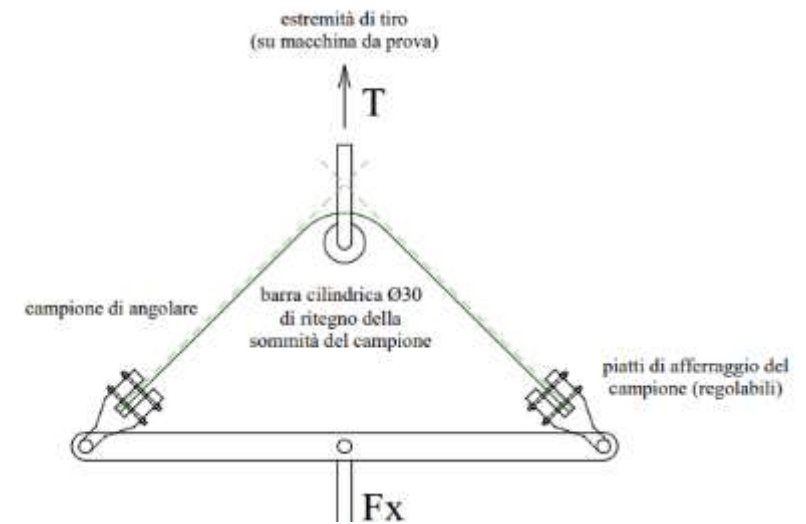
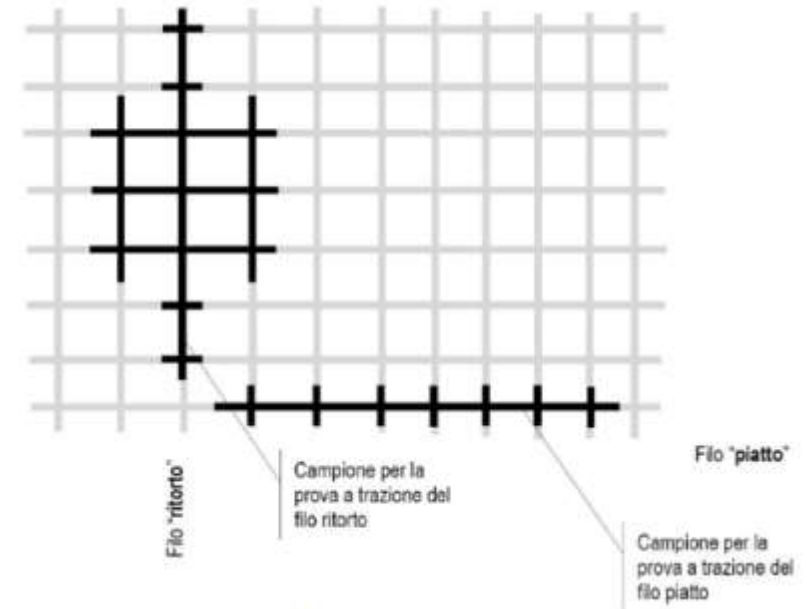


$\sigma_{lim,conv}$
valore caratteristico della tensione
limite convenzionale



$f_{R1,k}$

$f_{R3,k}$





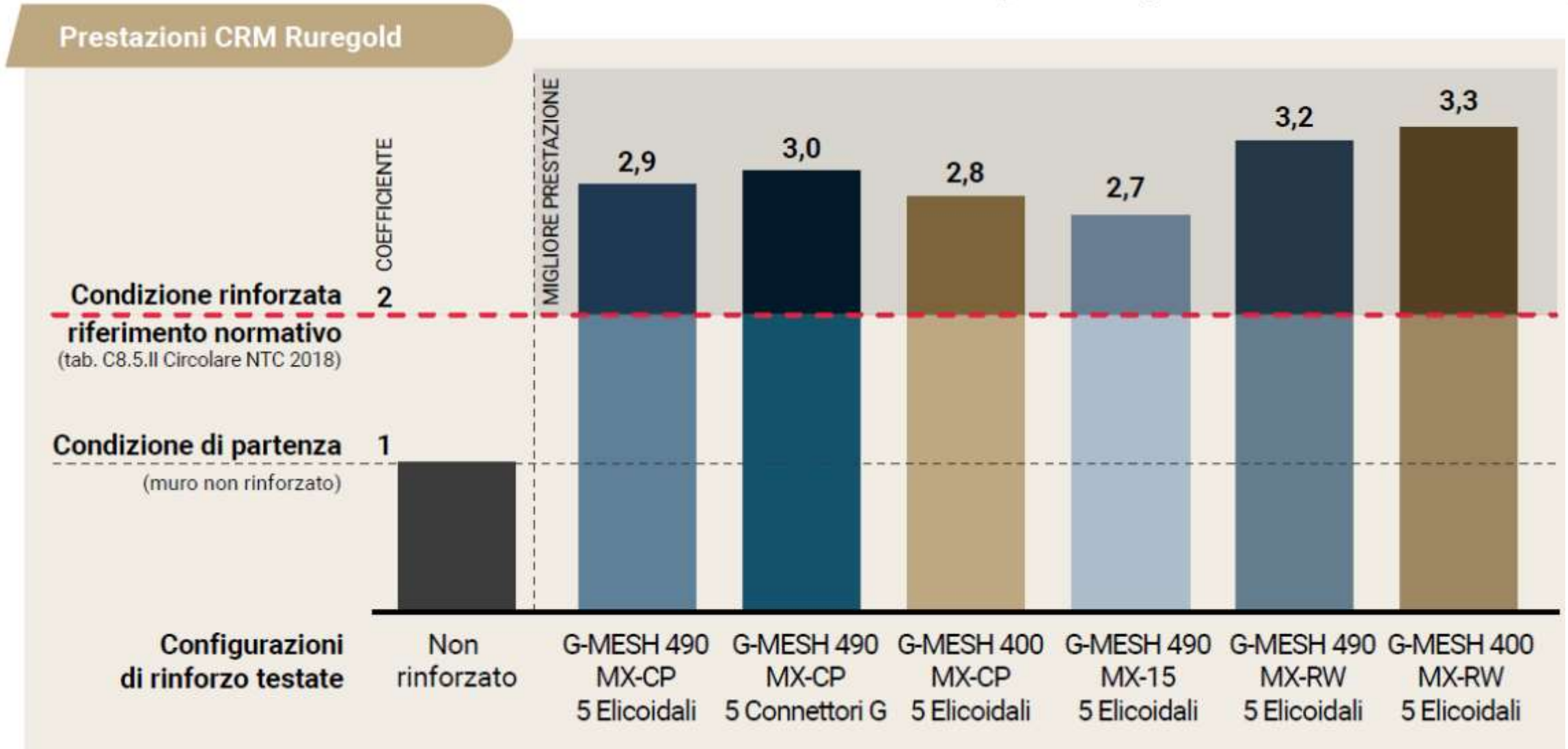
Consolidamento con intonaco armato

L'effetto di questa tipologia di consolidamento può essere stimato attraverso opportune valutazioni che considerino gli spessori della parete e dell'intonaco armato, oltre che i relativi parametri meccanici.

In assenza di queste è possibile adottare il coefficiente indicato in tabella, diversificato per le varie tipologie, applicabile ai valori sia dei parametri di resistenza (f , τ_{0e} f_{v0}), sia dei moduli elastici (E e G).



Tipologia di muratura	Stato di fatto			Interventi di consolidamento			
	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezione di miscele leganti (*)	Intonacoarmato (**)	Ristilatura armata con connessione dei parametri (**)	Massimo coefficiente complessivo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5	1,6	3,5
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo	1,4	1,2	1,5	1,7	2,0	1,5	3,0
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5	1,4	2,4
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,5	1,2	1,3	1,4	1,7	1,1	2,0
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,6	-	1,2	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	-	1,2	1,2	1,2	-	1,4
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	(***)	-	1,3 (****)	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	1,2	-	-	-	1,3	-	1,3



Esempio 1

Rinforzo di un pannello murario

Valutazione dell'intervento e applicazione

Rinforzo a taglio

La resistenza a taglio della parete rinforzata ($V_{t,R}$) è calcolata come somma del contributo della muratura non rinforzata (V_t), valutato in accordo con la Normativa vigente per le pareti non rinforzate che vanno in crisi per taglio trazione, e di quello del rinforzo ($V_{t,f}$).

Quest'ultimo è valutato con la relazione seguente:

$$V_{t,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot n_f \cdot l_{vf} \cdot \ell_f \cdot \alpha_f \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f \quad (4.1a)$$

Rinforzo a pressoflessione

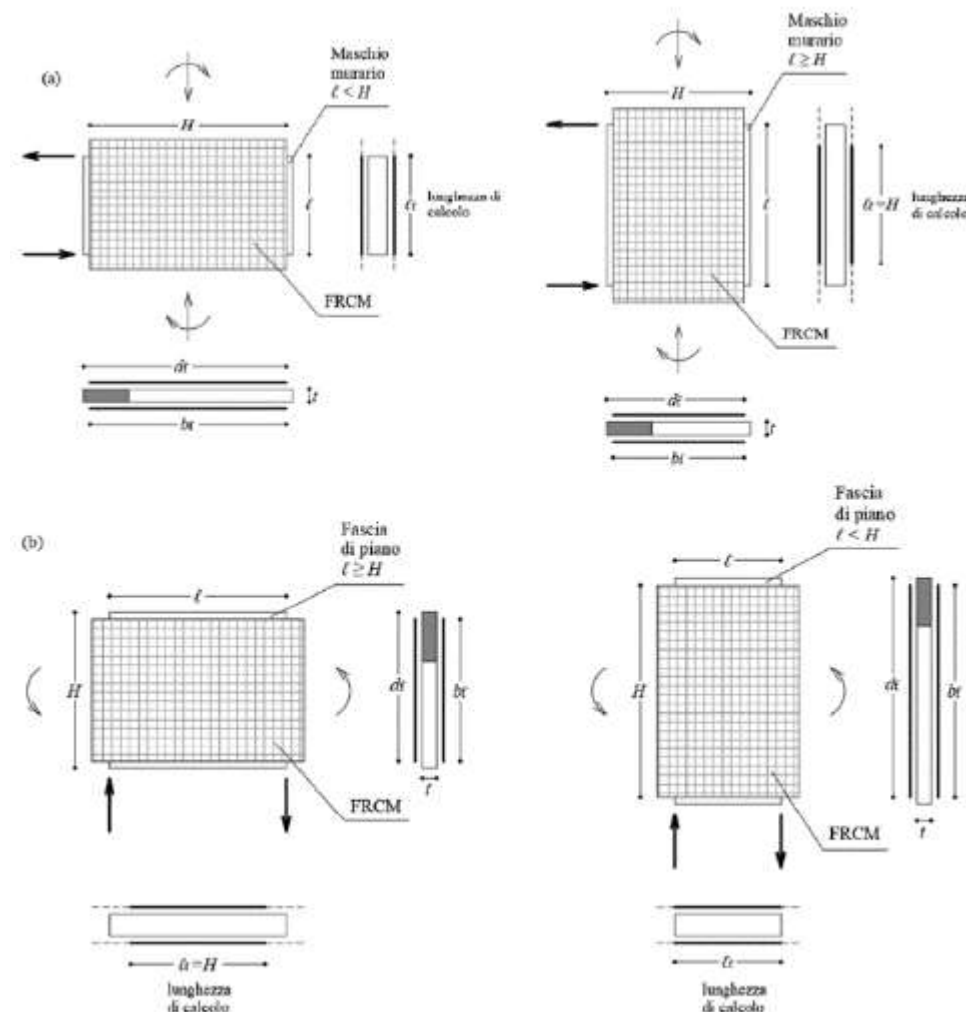
Il momento resistente associato ad un assegnato sforzo normale N_{sd} di compressione, $M_{Rd}(N_{sd})$, può essere calcolato assumendo come valide le seguenti ipotesi:

- conservazione della planarità delle sezioni rette;
- perfetta aderenza tra rinforzo FRCM e supporto.

Il legame costitutivo $\sigma-\varepsilon$ della muratura per stati tensionali monoassiali può essere schematizzato come segue:

- trazione: resistenza nulla;
- compressione: comportamento lineare fino alla resistenza di progetto, f_{md} , cui compete il valore $\bar{\varepsilon}_m$ della deformazione; tensione nulla per deformazioni maggiori a quella ultima, $\varepsilon_{m,u}$; tensione costante, pari a f_{md} , per deformazioni comprese nell'intervallo $\bar{\varepsilon}_m \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{m,u}$.

In assenza di dati sperimentali la deformazione ultima di progetto, $\varepsilon_{m,u}$, può essere assunta pari a 3.5‰.



RINFORZO A PRESSOFLESSIONE NEL PIANO DI UN PANNELLO

Pannello in muratura a conci sbozzati

-	Altezza pannello	h	350	cm
-	Larghezza pannello	b	150	cm
-	Spessore pannello	s	40	cm
-	Azione assiale	N_{Sd}	65	kN
-	Momento nel piano	M_{Sd}	50	kNm
-	Livello di conoscenza	LC1	-	-
-	Fattore di confidenza	FC	1.35	-
-	Coefficiente di sicurezza	γ_m	2.00	-
-	Resistenza a compressione	f_m	2.00	MPa
-	Modulo elastico	E_m	1230	MPa

$$f_{md} = \frac{f_m}{\gamma_M \cdot FC} = \frac{2.00 \text{ MPa}}{2.00 \cdot 1.35}$$

$$f_{md} = 0.74 \text{ MPa}$$

Esempio 1 – Rinforzo pannello murario



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA

PROPRIETÀ DEL SISTEMA DI RINFORZO FRCM PBO-MESH 44 + MX-PBO Muratura

Certificazione in accordo alla “Linea Guida FRCM 03/2022” - Progettazione in accordo al “CNR-DT215/2018”

Tensione limite convenzionale (valore caratteristico)	$\sigma_{lim,conv}$	Laterizio	1880 MPa
		Tufo	1836 MPa
Deformazione limite convenzionale (valore caratteristico)	$\varepsilon_{lim,conv}$	Laterizio	0,67 %
		Tufo	0,66 %
Tensione ultima del composito FRCM a rottura per trazione (valore caratteristico)	σ_u	2435 MPa	
Tensione ultima del tessuto secco a rottura per trazione (valore caratteristico)	$\sigma_{u,f}$	2810 MPa	
Modulo Elastico del tessuto secco (valore medio)	E_f	280 GPa	
Resistenza a compressione della matrice (valore caratteristico)	$f_{c,mat}$	20 MPa	
Spessore equivalente della rete in ordito	t_f	0,028 mm	
Meccanismo di crisi del sistema	-	Tipo F	
Intervallo di temperatura in esercizio	$T_{min} - T_{max}$	Da -18 °C a +100 °C	
Spessore di applicazione della matrice MX-PBO Muratura	-	3-5 mm per strato	
Reazione al fuoco (EN 13501-1)	-	B-s1, d0	
Certificazione		CVT n. 285 del 28/06/2023	

PBO

Sistemi per murature in direzione orizzontale MX-PBO

CAMPI D'USO

- Adeguamento statico
- Rinforzo di edifici esistenti
- Rinforzo di edifici nuovi
- Rinforzo di edifici storici
- Rinforzo di edifici industriali
- Rinforzo di edifici agricoli
- Rinforzo di edifici civili
- Rinforzo di edifici religiosi
- Rinforzo di edifici pubblici
- Rinforzo di edifici privati

MODALITÀ

- Preparazione del supporto
- Preparazione del composito
- Applicazione del composito
- Esecuzione delle opere
- Assistenza tecnica
- Assistenza operativa
- Assistenza post-vendita

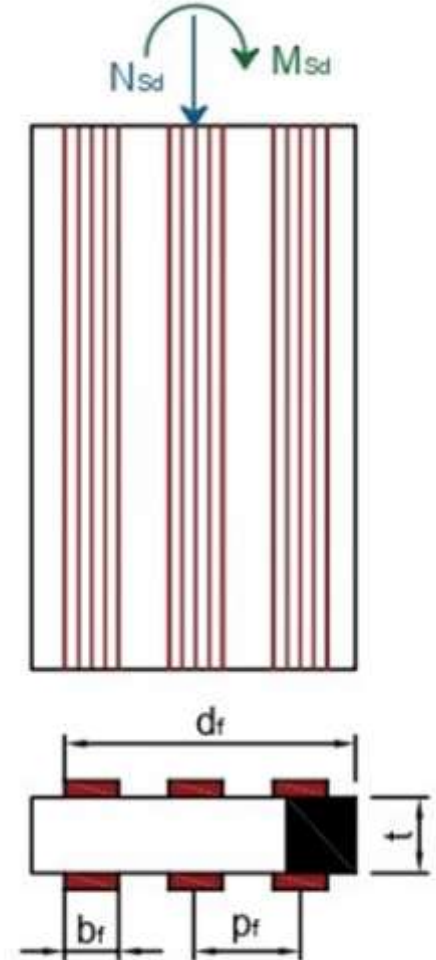
In caso di guasto procedete con...

Esempio 1 – Rinforzo pannello murario



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA

- Tipologia di tessuto scelto	PBO-MESH 44		
- Numero Strati	1		
- Lati da rinforzare	2 (Interno ed Esterno)		
- Larghezza del rinforzo (singola striscia)	b_f	250	mm
- Passo strisce	p_f	500	mm
- Spessore equivalente	t_f	0.028	mm
- Modulo elastico del tessuto secco	E_f	280000	MPa
- Condizioni di esposizione	ESTERNA		
- Fattore di conversione ambientale	η_a	0.8	-
- Fattore parziale per sistema FRCM	γ_m	1.5	-
- Tensione di progetto	σ_{fd}	1002	MPa
- Deformazione di progetto	ϵ_{fd}	0.0046	-

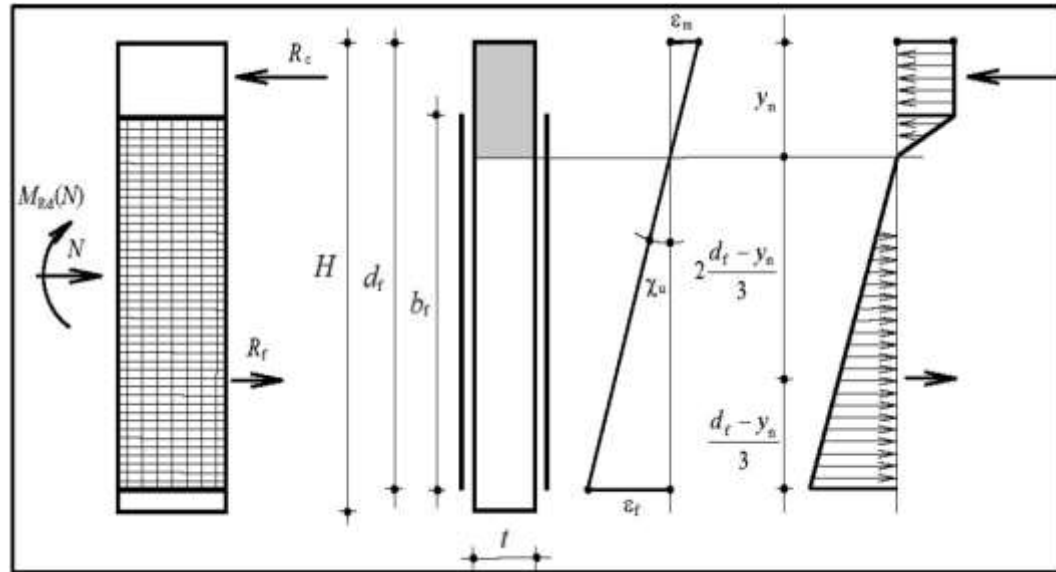


$$\sigma_{fd} = \frac{\eta_a \cdot \sigma_{lim,conv}}{\gamma_m}$$

Esempio 1 – Rinforzo pannello murario



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA



Momento sollecitante per $N_{Sd} = 65.0 \text{ kN}$

$$M_{Sd} = 50.00 \text{ kNm}$$

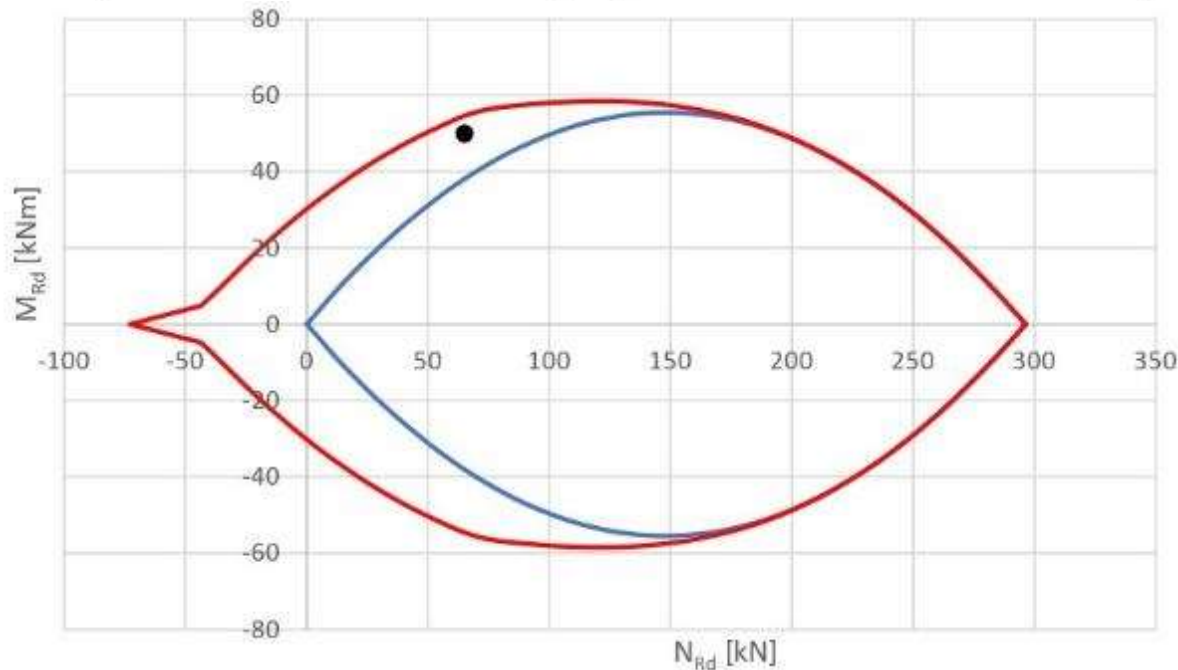
Resistente ante-operam

$$M_{Rd}^{AO} = 41.60 \text{ kNm}$$

Resistente con sistema FRCCM

$$M_{Rd}^{PO} = 54.07 \text{ kNm}$$

+ 29.97 %



RINFORZO A TAGLIO

$$V_t = H \cdot t \cdot \frac{1.5\tau_{0d}}{p} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5\tau_{0d}}}$$

Capacità a taglio **muratura non rinforzata**

$$V_{t,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot n_f \cdot t_{vf} \cdot \ell_f \cdot \alpha_t \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f$$

Contributo a taglio del **rinforzo FRCCM**

$$V_{t,c} = 0.25 \cdot f_{md} \cdot t \cdot d_f$$

Verifica dello **schacciamento diagonale**

RIEPILOGO RISULTATI

Taglio sollecitante

$$V_{sd} = 35.00 \text{ kN}$$

Resistente ante-operam

$$V_{Rd}^{AO} = 19.94 \text{ kN}$$

Contributo solo sistema FRCCM

$$V_{Rd}^f = 21.82 \text{ kN}$$

Resistente con sistema FRCCM

$$V_{Rd}^{PO} = 41.76 \text{ kN}$$



Esempio 1 – Applicazione rinforzo



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA



Nell'ambito della **progettazione** in accordo al documento **CNR DT215** è possibile effettuare il rinforzo di elementi in muratura, nel dettaglio:

- *Rinforzo di pareti nel piano*
rinforzo a taglio e rinforzo a pressoflessione
- *Rinforzo di pareti fuori dal piano*

Realizzazione di cordolature
(effetto tirante)

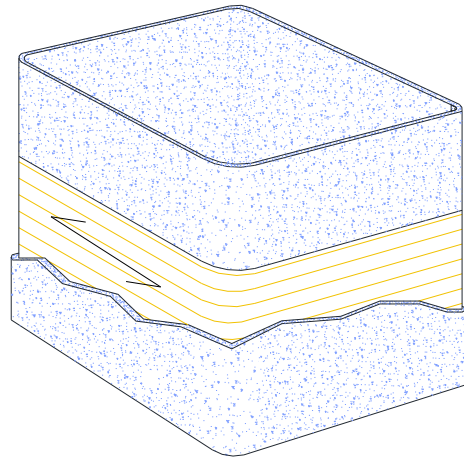


Esempio 2

Rinforzo a taglio di un pilastro in c.a.
Progettazione dell'intervento e applicazione

La resistenza nei confronti del taglio dell'elemento rinforzato viene valutata come:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,c}, V_{Rd,s} + V_{Rd,f}\}$$



$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_M} 0,9 d f_{td} 2 t_f (\cot \theta + \cot \beta) \frac{b_t}{p_t} \sin^2 \beta$$

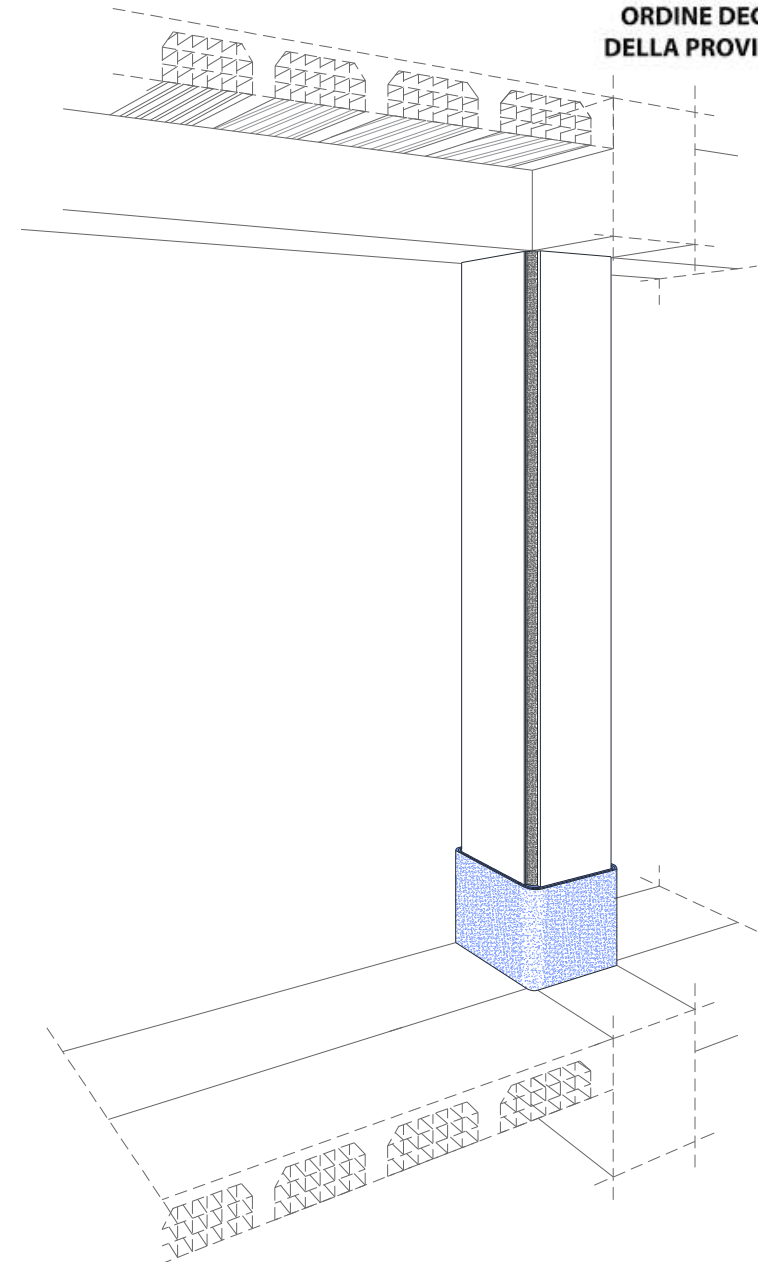
Esempio 2 – Rinforzo a Taglio di un pilastro in c.a.



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA

Pilastro in c.a. esistente

Dimensioni:	<i>35x50 cm</i>
Materiali:	<i>C20/25 LC2</i> <i>FeB38k LC3</i>
Armature longitudinali:	<i>2Φ16 superiori/inferiori</i> <i>1Φ16 di parete</i>
Staffe:	<i>6/250 due bracci</i>
Azione Assiale N:	<i>100kN</i>
Tagli Agenti:	<i>60kN (Vy)</i> <i>80kN (Vz)</i>



Esempio 2 – Rinforzo a Taglio di un pilastro in c.a.



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA

Rinforzo

Materiali:

PBO MESH 105

Dimensioni:

Fasce da 25cm con passo 50cm

Rinforzo FRCM e condizioni di esposizione

CARATTERISTICHE DEL MATERIALE DI RINFORZO

Materiale

Materiale di rinforzo:

Geometria

bf [mm]:

pf [mm]:

β [°]:

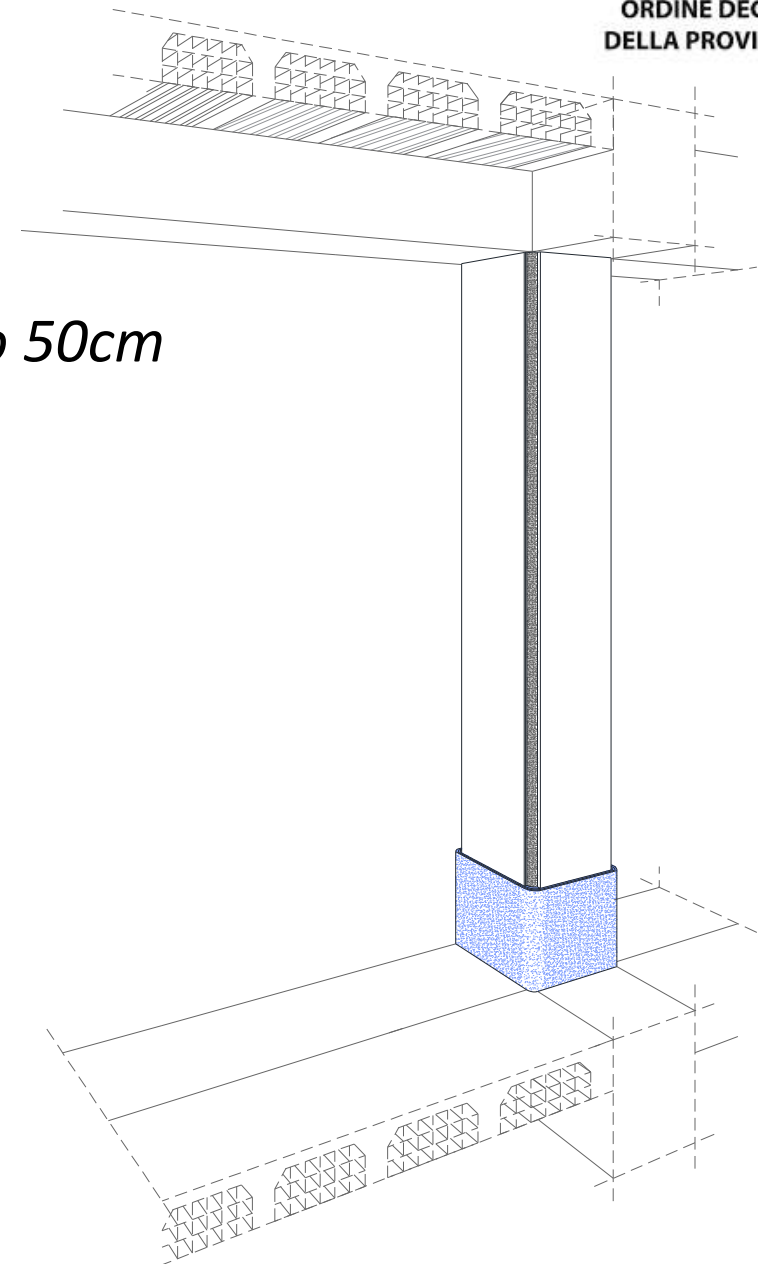


 Larghezze standard disponibili per PBO MESH 105: 100, 250 mm.
È comunque possibile tagliare il tessuto per ottenere la larghezza di progetto.

CONDIZIONI DI ESPOSIZIONE

Esposizione:

γ_m :



Esempio 2 – Rinforzo a Taglio di un pilastro in c.a.



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA

RIEPILOGO RISULTATI

Tagli Agenti:

60kN (V_y)

80kN (V_z)

Taglio resistente AO_y

$$V_{Rdy}^{AO} = 53,13 \text{ kNm}$$

Taglio resistente AO_z

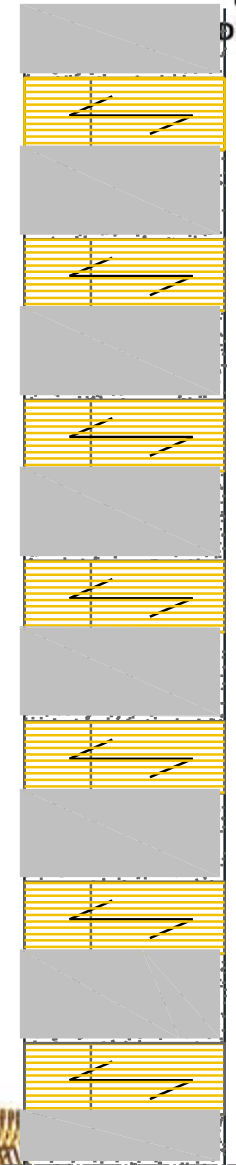
$$V_{Rdz}^{AO} = 78,37 \text{ kNm}$$

Taglio resistente PO_y

$$V_{Rdy}^{PO} = 74,96 \text{ kNm}$$

Taglio resistente PO_z

$$V_{Rdz}^{PO} = 116,15 \text{ kNm}$$



APPLICAZIONE – Rinforzo a Taglio



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA



Esempio 3

Ringrosso di un pilastro in c.a.

Progettazione dell'intervento e applicazione

Esempio 3 – Ringrosso di un pilastro



Pilastro in c.a. esistente

Dimensioni:

30x60 cm

Materiali:

C20/25 LC2

FeB38k LC2

Armature longitudinali:

5 Φ 16 superiori/inferiori

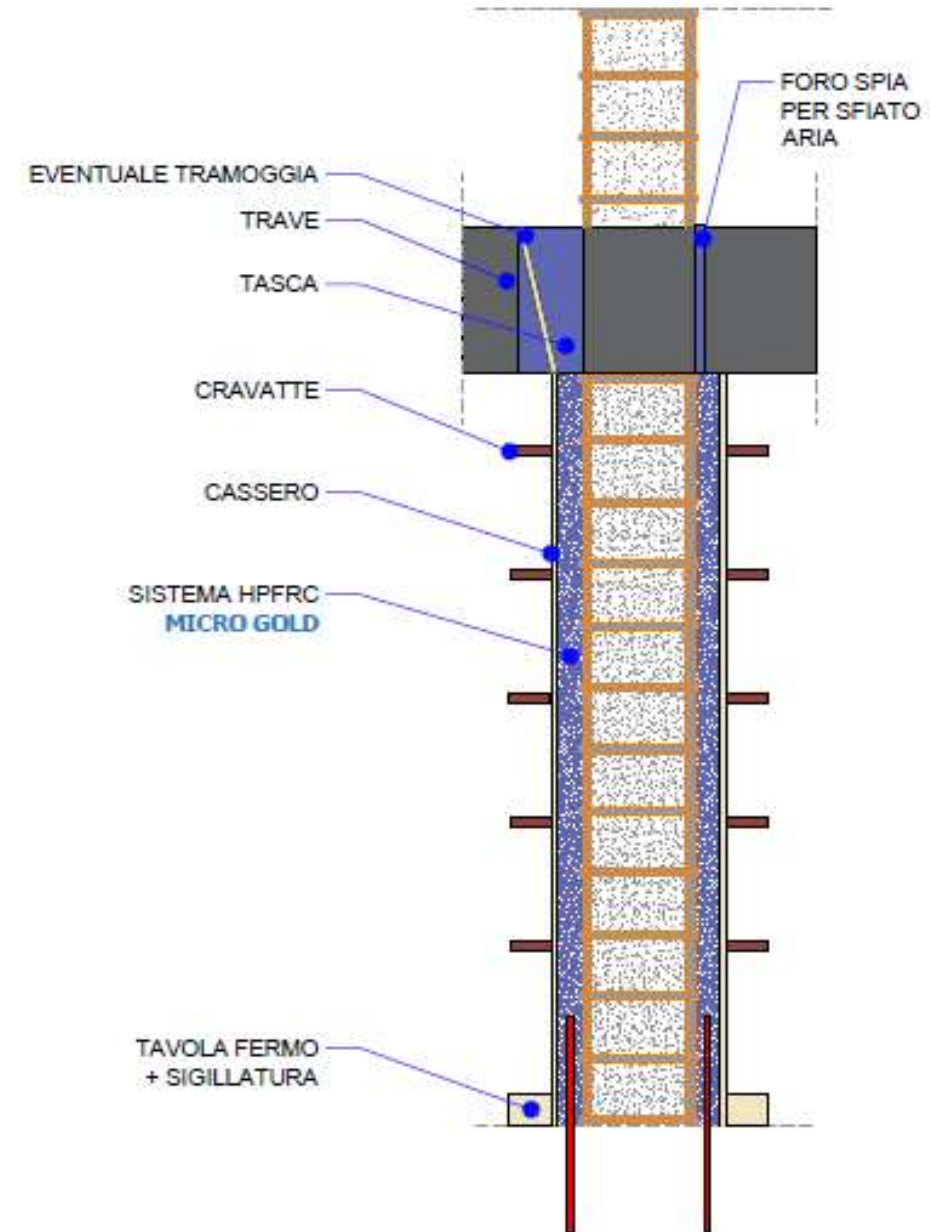
4 Φ 16 di parete

Staffe:

Φ 8/250 a due bracci

Esposizione:

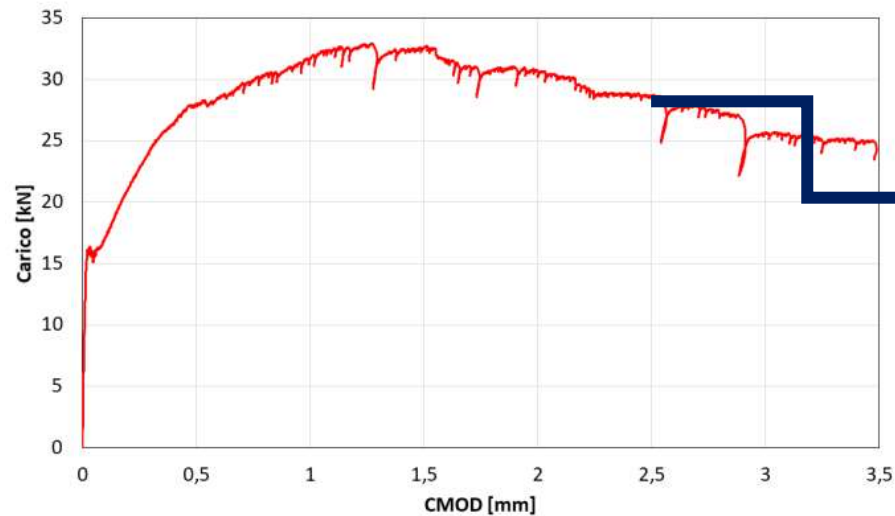
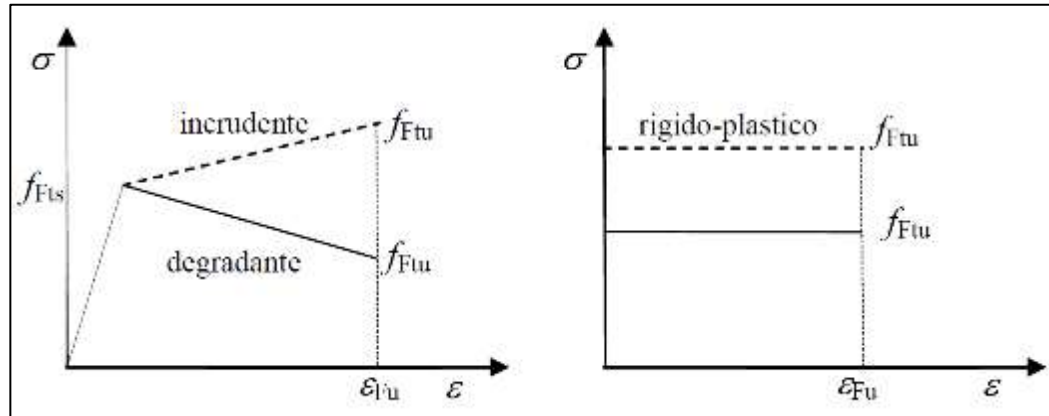
Esterna (0,8)



Esempio 3 – Ringrosso di un pilastro



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA



$$f_{R3,k} = 7,8 \text{ MPa}$$

$$f_{Ftu} = \frac{f_{R3,k}}{3 \gamma_{frc}} = 1,73 \text{ MPa}$$

Pilastro in c.a. rinforzato

Incamicatura in c.a. con COMPAT

Dimensioni: *8 cm*

Materiali: *Calcestruzzo C32/40 + Acciaio B450C*

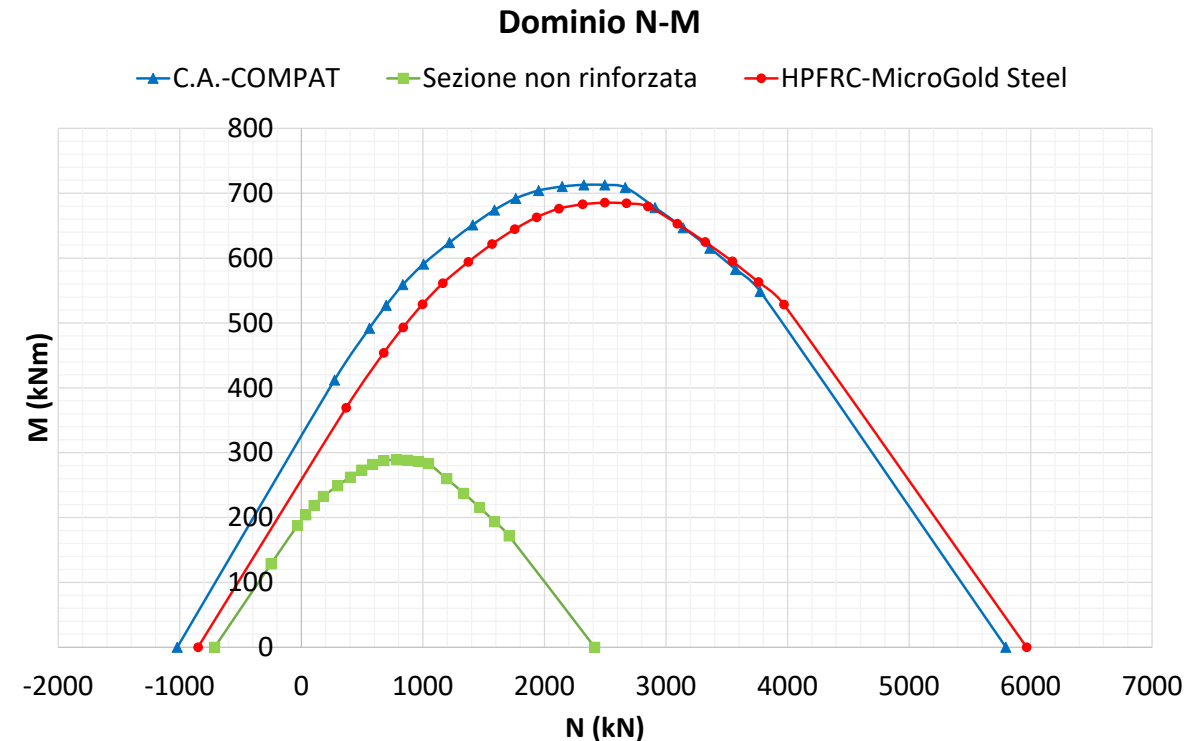
Armature longitudinali: *10 Φ 10*

Incamicatura in HPFRC con MicroGold Steel

Dimensioni: *4 cm*

Materiali: *C80/95*

$$f_{R3,k} = 7.8 \text{ MPa}$$



Pilastro in c.a. rinforzato

Incamicatura in c.a. con COMPAT

Dimensioni: *8 cm*

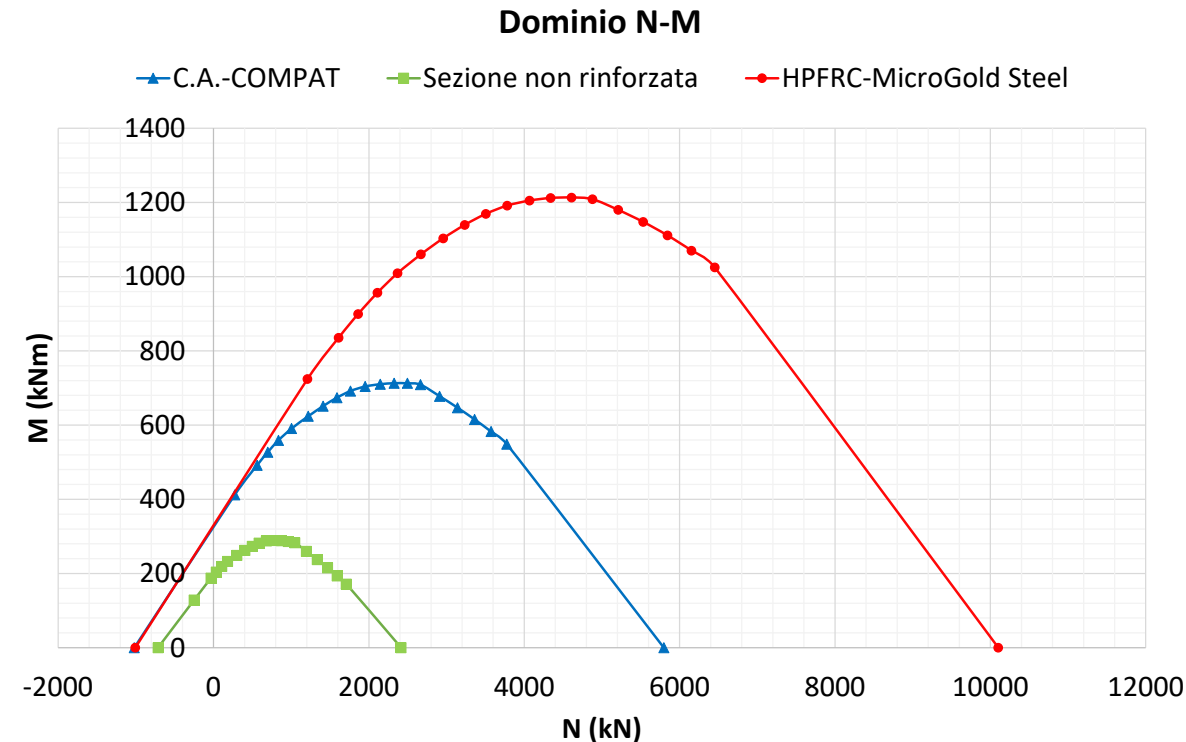
Materiali: *Calcestruzzo C32/40 + Acciaio B450C*

Armature longitudinali: *10 Φ 10*

Incamicatura in HPFRC con MicroGold Steel

Dimensioni: *8 cm*

Materiali: *C80/95*
 $f_{R3,k} = 7.8 \text{ MPa}$



Preparazione Micro Gold Steel



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA



Esempio 4

Rinforzo di una Volta

Esempio 4 – Rinforzo di elemento voltato



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA

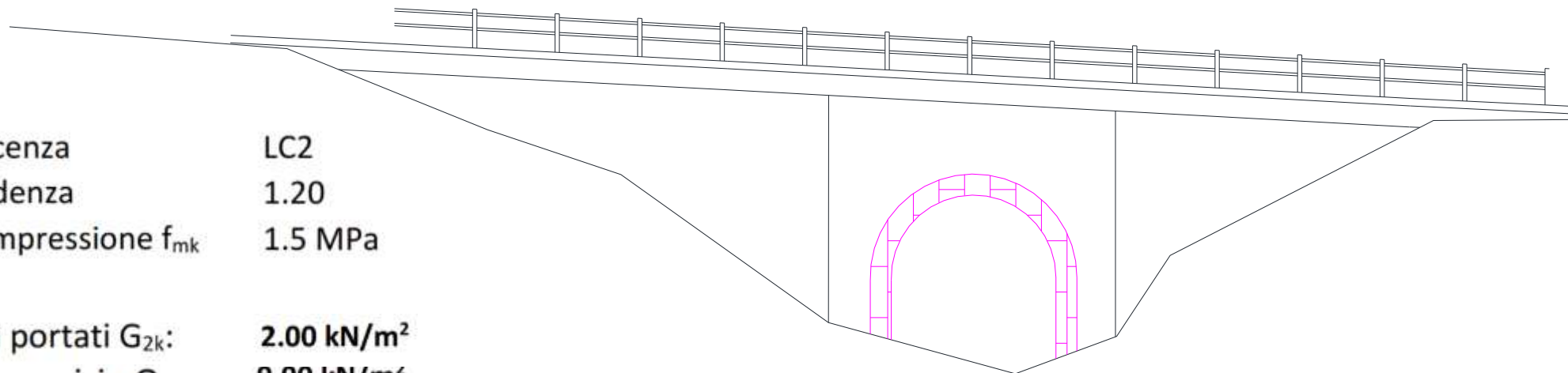
VOLTA A BOTTE

Essendo una volta semplice, si analizza uno sviluppo di 1 m di profondità.

○ Sezione (b x h)	1 m x 0.50 m
○ Luce	4.00 m
○ Altezza	2.00 m
○ Altezza rinfianco	1.0 m
○ Spessore riempimento in chiave	1.70 m
○ Spessore soletta	1.20 m

○ Livello di conoscenza	LC2
○ Fattore di confidenza	1.20
○ Resistenza a compressione f_{mk}	1.5 MPa

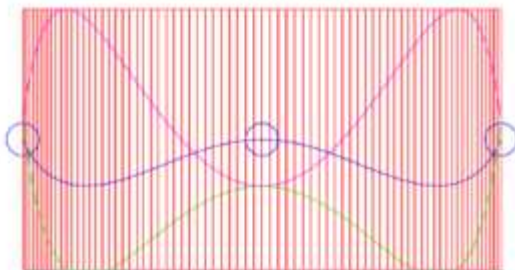
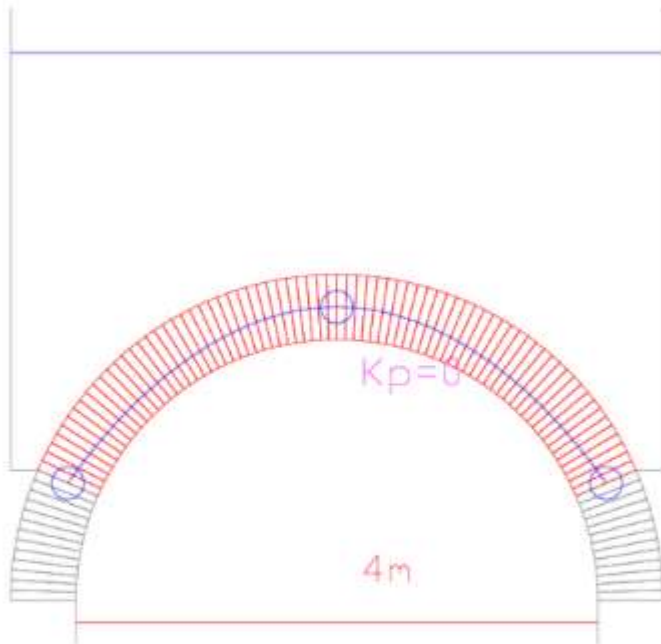
carichi permanenti portati G_{2k} :	2.00 kN/m²
carichi variabili di esercizio Q_k :	9.00 kN/m²



Esempio 4 – Rinforzo di elemento voltato

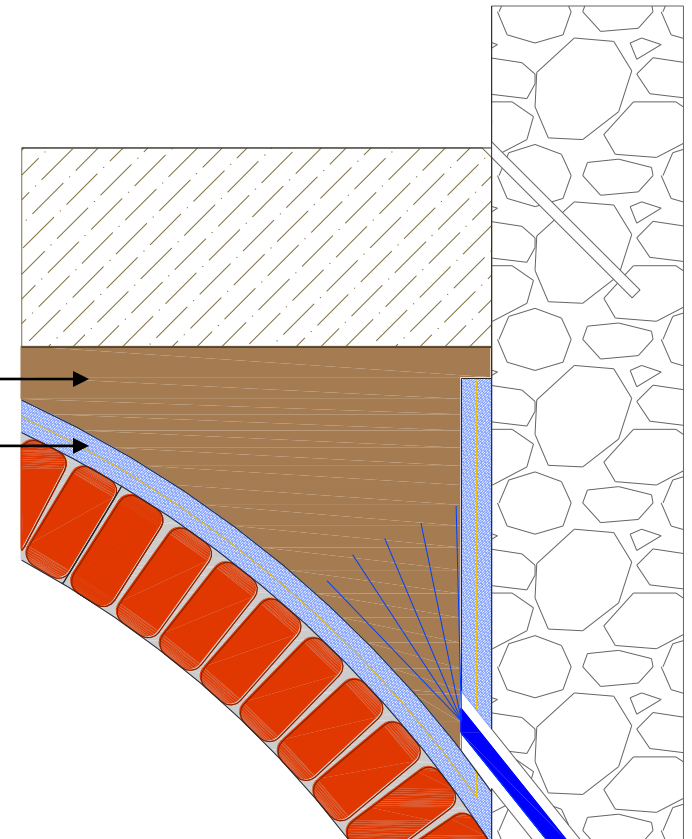


ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA



$$M_{Rd0} = 11.40 \text{ kNm} < M_{Sd} = 12.40 \text{ kNm}$$

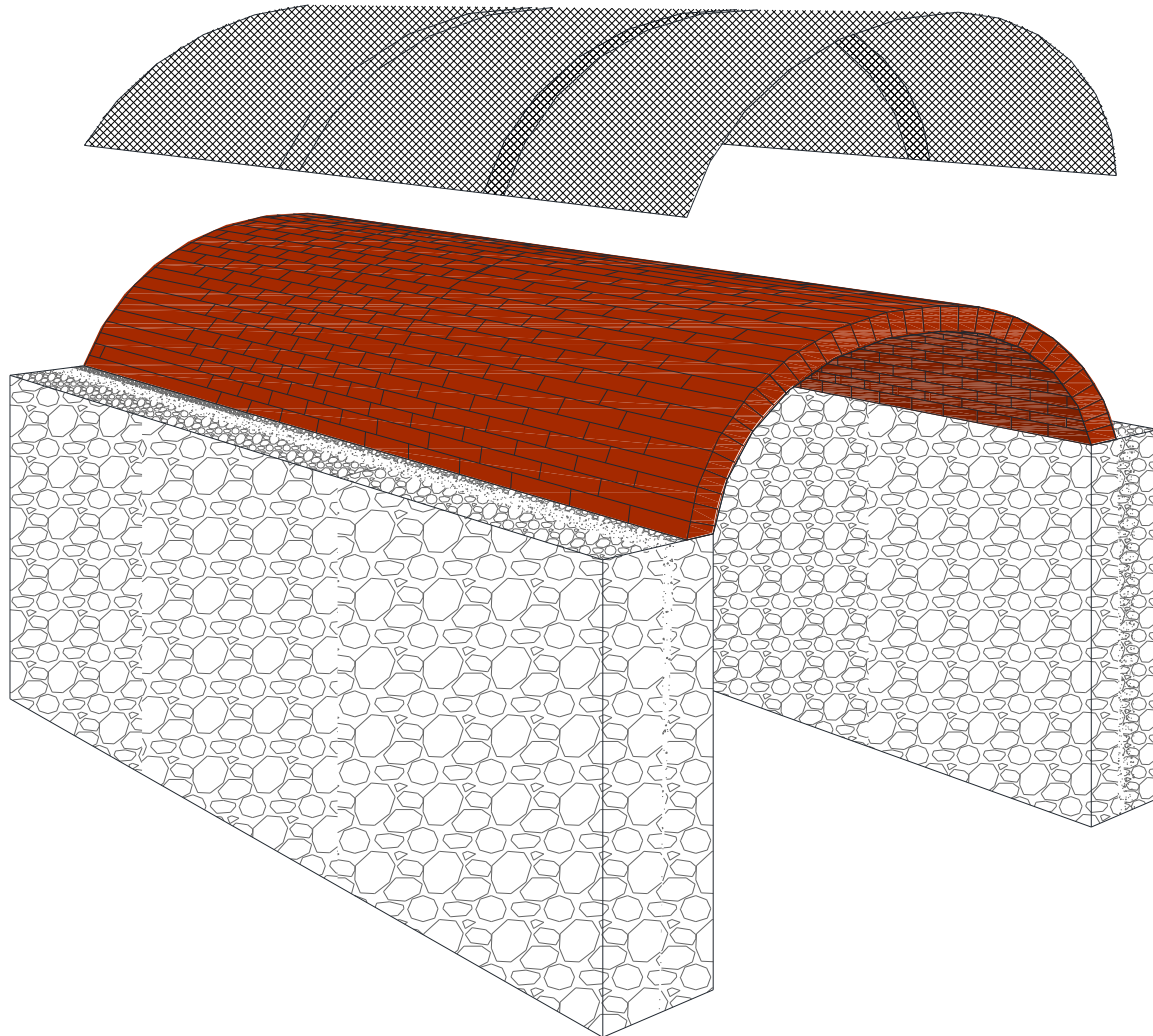
Impiego di sottofondo alleggerito
Rinforzo con sistema FRCM in
carbonio



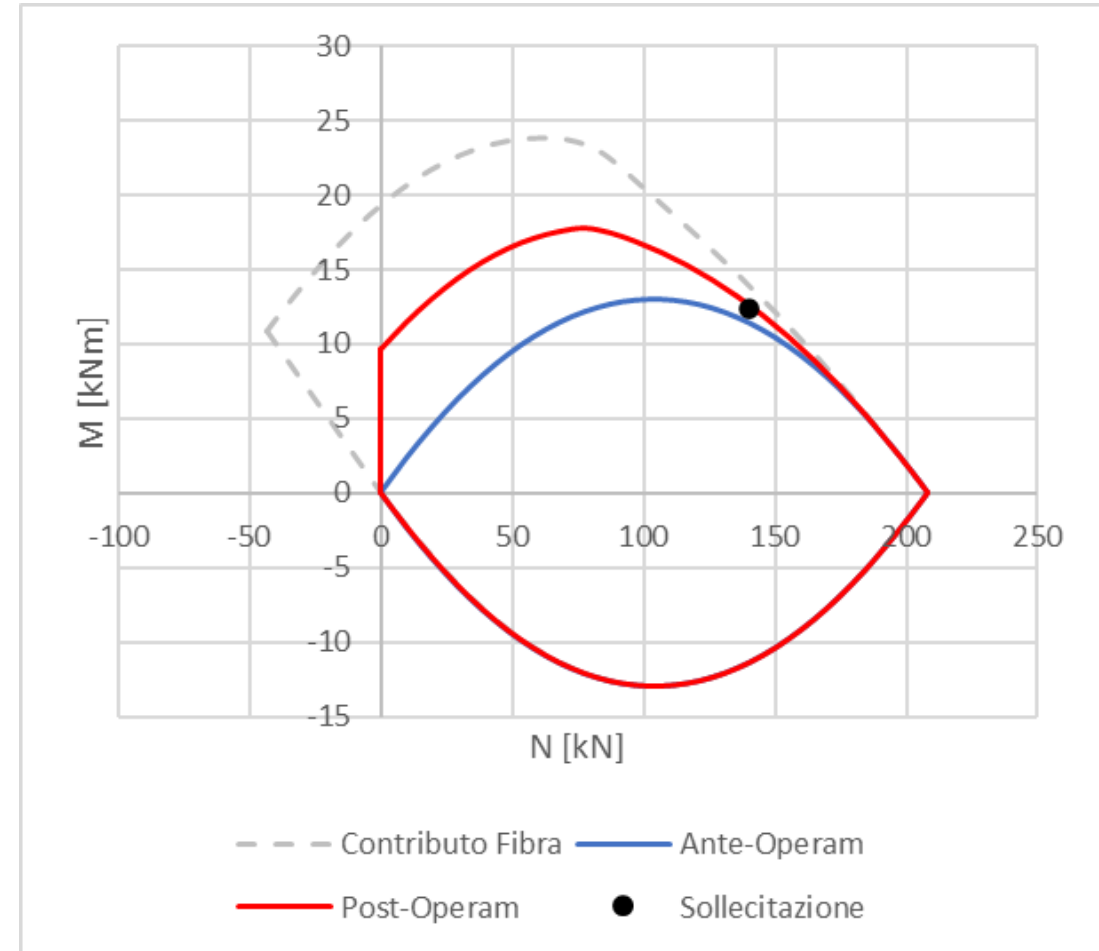
Esempio 4 – Rinforzo di elemento voltato



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA



$$M_{Rd,POST} = 12,64 \text{ kNm} > M_{Sd} = 12.40 \text{ kNm}$$



GRAZIE PER L'ATTENZIONE!

Ing. Andrea Bruggi

a.bruggi@laterlite.it

calcolo.strutturale@laterlite.it



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA



Laterlite

Via Correggio n.3
20149 Milano
Tel: +39.02.48011962