

JOINT FRP v.1.0

Software per la progettazione del rinforzo di nodi trave-pilastro con FRP

release Novembre 2021

Ciro Del Vecchio¹⁾, Marco Di Ludovico²⁾, Alberto Balsamo³⁾, Andrea Prota⁴⁾

- 1) Dipartimento d'Ingegneria, Università degli studi del Sannio, Benevento, cdelvecchio@unisannio.it;
- 2) Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli studi di Napoli Federico II, diludovi@unina.it;
- 3) Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli studi di Napoli Federico II, albalsam@unina.it;
- 4) Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli studi di Napoli Federico II, aprota@unina.it;

Manuale d'uso

CREDITS

Il software ed il manuale d'uso ad esso correlato sono stati sviluppati e realizzati nell'ambito delle attività di ricerca condotte nel progetto DPC-ReLUIIS 2019-2021, WP5 "Interventi di rapida esecuzione a basso impatto ed integrati".

Si ringrazia l'Ing. Fabio Palladino per il contributo alla stesura del manuale e alla fase di testing del software.

Licenza:

Questo software è destinato al libero utilizzo ed è vietata la vendita e l'uso a fini commerciali

Note legali:

Gli autori, gli istituti universitari ed il consorzio ReLUIIS coinvolti nello sviluppo del software si sollevano da ogni responsabilità derivante da un uso improprio di questo strumento. Esso è stato sviluppato ai fini di supporto scientifico e, si specifica, che gli utenti sono tenuti a controllarne l'affidabilità e l'attendibilità dei risultati, unitamente all'idoneità di applicazione al caso specifico in accordo con quanto prescritto al §10.2 delle NTC 2018.

Sommario

CREDITS.....	2
INSTALLAZIONE.....	4
INTRODUZIONE.....	5
1. APPROCCI PROGETTUALI.....	8
2. TIPOLOGIA NODO.....	8
3. GEOMETRIA.....	9
4. DETTAGLI DI ARMATURA.....	12
5. PROPRIETA' DEI MATERIALI.....	15
6. SOLLECITAZIONI DA ANALISI.....	16
7. VERIFICHE DI RESISTENZA.....	18
8. PROGETTO RINFORZO FRP.....	24
9. VERIFICA DI RESISTENZA FRP.....	29
10. PROGETTO DEGLI ANCORAGGI MECCANICI.....	31
11. PROGETTO DEI FIOCCHI.....	32
12. INTERAZIONE TAMPONATURA.....	36
13. TAMPONATURA.....	37
14. FUNZIONALITA' DI STAMPA.....	40

INSTALLAZIONE

Requisiti minimi:

- Microsoft Windows 7 o superiore
- .NET Framework 4.5 o superiore

Esecuzione:

- Lanciare l'eseguibile JointFRP.exe presente nella cartella v0.1

Note:

- Se il software non si avviasse o restituisse un messaggio di errore, potrebbe mancare il .NET framework nel sistema operativo.

È possibile installarlo utilizzando l'eseguibile dotNetFx45_Full_setup.exe, presente nella cartella ext

- Si raccomanda di impostare la dimensione dei caratteri dello schermo al 100%.

INTRODUZIONE

JOINT FRP è un software destinato alla progettazione del rinforzo dei nodi trave-pilastro di edifici esistenti in cemento armato (c.a.) con materiali compositi fibrorinforzati (FRP). L'approccio di calcolo utilizzato è quello proposto dal recente *fib bulletin* 90 (2019) che tratta il rinforzo di strutture esistenti con FRP. L'approccio impiegato risulta in accordo con le vigenti norme tecniche D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni" (NTC2018) e con le formulazioni di verifica dei nodi esistenti riportate nella relativa Circolare n.7 del 21 gennaio 2019 "Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018" (Circolare 2019).

I recenti eventi sismici hanno mostrato l'elevata vulnerabilità degli edifici esistenti in c.a. Tra le maggiori criticità riscontrate vi è senza dubbio la carenza di armatura trasversale all'interno del pannello di nodo che spesso può portare ad una prematura crisi fragile a taglio (Figura 0-1). Tali crisi, nella maggior parte dei casi, compromettono significativamente la capacità sismica dell'intero sistema strutturale, risultando in indici di sicurezza allo stato limite di salvaguardia della vita molto inferiori all'unità (ovvero a quanto richiesto, in accordo alle vigenti norme, ad un edificio di nuova progettazione).



Figura 0-1: Crisi dei nodi trave-pilastro in c.a. a seguito dei recenti eventi sismici

Come ampiamente dimostrato da studi sperimentali e teorici disponibili in letteratura (Del Vecchio *et al.*, 2014, Frascadore *et al.*, 2015), il rinforzo di nodi trave-pilastro non interamente confinati con FRP (Fiber Reinforced Polymers) risulta una tecnica di rinforzo sismico di particolare efficacia che permette di incrementare la capacità sismica locale del sub-assemblaggio nodo trave-pilastro e, in molti casi, la capacità sismica dell'intero edificio. Tale tecnica consente di perseguire tali obiettivi senza modificare significativamente massa e rigidezza del sistema strutturale, e, pertanto, risulta pienamente in linea con quanto previsto nel caso di interventi di rinforzo locale ai sensi delle NTC (2018).

Nonostante ciò, la carenza di comprovate soluzioni di rinforzo sismico applicabili completamente dal solo esterno e che possano essere di minimo disturbo per gli occupanti, continuano a rappresentare un freno alla diffusione di interventi di rafforzamento sismico e alla fruizione dei relativi benefici fiscali. Di recente, nell'ambito delle attività svolte all'interno del progetto di ricerca DPC-ReLUIs 2019-2021 "WP5 Interventi di rapida esecuzione a basso impatto ed integrati" che mira allo sviluppo di soluzioni tecniche per la realizzazione di interventi integrati di rinforzo sismico ed efficientamento energetico che siano di rapida applicazione sugli edifici esistenti, è stata condotta una campagna di prove sperimentali su telai tamponati multipiano in c.a. estratti da un edificio esistente. I telai sono stati riprodotti nel nuovo laboratorio per prove pseudo-dinamiche del CeSMA dell'Università degli studi di Napoli Federico II e testati con protocolli di carico pseudo-dinamici in configurazione *as-built* e rinforzato con una soluzione innovativa che prevede l'impiego di materiali compositi FRP applicabile dal solo esterno (Del Vecchio *et al.*, 2021) attraverso l'impiego di ancoraggi meccanici di estremità per evitare la delaminazione del rinforzo. Le prove sperimentali hanno mostrato l'efficacia del sistema di rinforzo proposto nel ridurre il danno alla tamponatura per basse intensità sismiche e, simultaneamente, nel migliorare la sicurezza del sistema strutturale per intensità pari, o superiori, a quelle utilizzate oggi per la progettazione di nuove costruzioni nei riguardi dello stato limite di salvaguardia della vita.

In questo contesto, il software **JOINT FRP**, permette il progetto del rinforzo con FRP del pannello di nodo e dell'estremità superiore del pilastro per migliorarne le prestazioni sismiche e resistere alla spinta della tamponatura. È possibile progettare il rinforzo di nodi d'angolo e nodi di parete in ottica di rinforzo locale o globale ed utilizzando soluzioni classiche che prevedono un minimo disturbo agli occupanti o soluzioni di minimo impatto ed applicabili dal solo esterno.

Il software si basa su validazioni sperimentali ottenute in laboratorio applicando soluzioni di rinforzo con FRP su nodi trave-pilastro di strutture in cemento armato o interi sistemi strutturali in scala reale (Del Vecchio *et al.*, 2014 (1)), (De Risi *et al.*, 2020 (2)), (Del Vecchio *et al.*, 2021(3)).

Il software si compone di 13 sezioni, descritte nel dettaglio di seguito, che permettono:

- Verifica locale dei nodi;
- Verifica basata su sollecitazioni scelte dal progettista;
- Progetto del rinforzo mediante sistemi in FRP (con fibre di qualsiasi materiale e con generico orientamento);
- Possibilità di valutare l'azione di spinta che la tamponatura esercita sull'estremità superiore del pilastro e di progettare un eventuale rinforzo nei riguardi di tale azione.

Tutte le scelte progettuali si possono effettuare nella schermata principale del software (Figura 0-2).

Software per la progettazione del rinforzo di nodi trave-pilastro con FRP

© Ciro Del Vecchio¹, Marco Di Ludovico², Alberto Balsamo², Andrea Prota²
¹Dipartimento d'Ingegneria, Università degli Studi del Sannio, Benevento
²Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II

1. Approccio progettuale
☐ Rinforzo locale (§8.4.1, NTC 2018)
☒ Basato su valori scelti delle sollecitazioni

2. Tipologia nodo
☐ Nodo d'angolo
☒ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)	400	400
b_c (mm)	400	400
h_b (mm)	550	550
b_b (mm)	400	400
luce campata (mm)	4100	4100
altezza interpiano (mm)	3100	3100

4. Dettagli armatura (se disponibili)

	Pilastro sup. d_i (mm)	Pilastro inf. d_i (mm)
A_{s1} (mm ²)	603	40
A_{s2} (mm ²)	402	200
A_{s3} (mm ²)	603	360

5. Proprietà dei materiali

	Calcestruzzo	Acciaio
f_{cm} (MPa)	18.8	f_{ym} (MPa) 535.32
F.C.	1	
γ_c (fragili)	1.5	γ_{Rd} 1.2

6. Sollecitazioni da analisi

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N_{Ed} (kN)	340	350
V_{Ed} (kN)	88.3	
M_{Ed} (kNm)	180	0

7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)
 $0.3 \sqrt{f_{cd}} \geq \sigma_{jt}$ (MPa)
 Capacità 1.06 < 1.4 Domanda max
 Esito **Crisi a taglio trazione del nodo**

8. Progetto rinforzo FRP
 Tipologia tessuto: Quadrassiale (0°, ±45°)
☐ Nodo pre-danneggiato
 t_r (mm) 0.106 t_{r1} (mm) 0
 E_r (MPa) 230000 β_1 (°) 0
 ϵ_{Rk} 0.014 t_{r2} (mm) 0
 η_a 0.85 β_2 (°) 0
 γ_r 1.1 t_{r3} (mm) 0
 η_b 1 β_3 (°) 0
 η_c 3 t_{r4} (mm) 0
 $\epsilon_{r,d}$ 0.00168 β_4 (°) 0

9. Verifica di resistenza nodo rinforzato
 $0.3 \sqrt{f_{cd}} + \sigma_{jt,FRP} \geq \sigma_{jt}$ (MPa)
 Resistenza a capacità 1.97 ≥ 1.39 Domanda max
 Incremento di capacità resistente nodo 85%
 Esito **Verifica soddisfatta**

10. Ancoraggi meccanici
☐ Fasciatura ad U estremità travi
☒ Fiocchi (solo esterno)

11. Progetto fiocchi

	Trave	Pilastro
Φ_{fiocco} (mm)	15	15
Linghiaggio (mm)	150	150
$L_{sflocco}$ (mm)	100	100
$\alpha_{sflocco}$ (°)	90	90
Φ_{foro} (mm)	19	19
V_{resina} (MPa)	12	12
F_{Rd} (MPa)	4800	4800
V_{fibre} (%)	67	67
N° ancoraggi su ogni trave	6	
N° ancoraggi su ogni pilastro		3

12. Interazione Tamponatura
☐ Nessuna interazione
☒ Rinforzo per spinta tamponatura

13. Tamponatura

f_k (MPa)	2.6
f_{yk0} (MPa)	0.3
Luca netta campata (mm)	3720
Altezza netta interpiano (mm)	2550
Spessore tamponatura (mm)	200
γ (°)	45
f_{Rd} (MPa)	3136.36
t_r (mm)	0.164
Verifica geometrica	282.55 ≤ 282.84
Esito	Verifica soddisfatta

Figura 0-2: Schermata principale del software.

Nella schermata principale è possibile inserire il *Titolo del progetto* ed i riferimenti del *Progettista*, nonché il *Nodo* di riferimento cliccando sull'icona dell'ingranaggio in alto a destra.

1. APPROCCI PROGETTUALI

Il software permette di scegliere tra due differenti tipologie di approccio progettuale: “Rinforzo locale” (§8.4.1 delle NTC2018) e “Basato su valori scelti delle sollecitazioni” (§C8.7.2.3.5 della Circolare 2019).

Per *rinforzo o intervento locale* si intende un intervento che riguarda singole parti e/o elementi della struttura e che non modifica il comportamento globale di quest'ultima (i.e. non vi sono alterazioni di massa e rigidezza strutturale). Ciò consente al progettista di poter prescindere da un'analisi globale della struttura da effettuarsi mediante l'uso di un modello strutturale e la determinazione delle azioni trasmesse al pannello di nodo dagli elementi convergenti in esso viene effettuato tramite analisi sezionale locale e considerazioni di equilibrio sul sub-assemblaggio travi-pilastri-pannello di nodo. Nel caso specifico, come in seguito mostrato, per progettare un rinforzo del nodo è sufficiente conoscerne la geometria, le proprietà meccaniche dei materiali e lo sforzo normale agente su di esso (che può essere ricavato per aree di influenza).

L'opzione *approccio basato su valori scelti delle sollecitazioni*, invece, permette sia di progettare interventi locali secondo §8.4.1 delle NTC2018, sia di progettare interventi globali secondo §8.4.2 delle NTC2018 (interventi estesi a tutte le parti della struttura potenzialmente interessate da modifiche di comportamento, nonché alla struttura nel suo insieme). Le azioni vanno calcolate dal progettista o sulla base di un'analisi locale o un'analisi globale della struttura atta a determinare le principali carenze strutturali e le sollecitazioni che agiscono su ogni elemento strutturale. In questo ultimo caso sarà necessario conoscere, oltre alla geometria del nodo e alle proprietà meccaniche dei materiali, anche le sollecitazioni di sforzo normale, momento flettente e taglio agenti su travi e pilastri convergenti nel pannello di nodo.

Per entrambi gli approcci al § 7 vengono illustrate nel dettaglio le formulazioni e gli approcci di calcolo delle sollecitazioni nel pannello di nodo necessarie alla verifica ed al dimensionamento del sistema di rinforzo.

2. TIPOLOGIA NODO

Il software permette di progettare il sistema di rinforzo in FRP di nodi in c.a. non interamente confinati con specifico riferimento ai nodi d'angolo e nodi di parete:

- Nodo d'angolo: si tratta di un nodo nel quale, oltre alla presenza dei pilastri, converge nel pannello di nodo una sola trave in direzione x. Nel caso di telaio bidirezionali, potrebbe anche esserci la presenza di una trave convergente nel nodo in direzione y. Un tipico esempio di nodo d'angolo è illustrato in Figura 2-3.

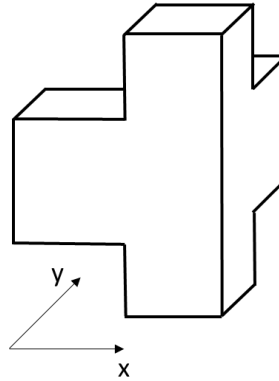


Figura 2-3: Nodo d'angolo.

- Nodo di parete: si tratta di un nodo nel quale, oltre alla presenza dei pilastri, convergono nel pannello di nodo due travi nella direzione x. Nella direzione y ortogonale a quella di sviluppo nel nodo da analizzare, vi è al più una sola trave. Un tipico esempio di nodo di parete è illustrato in .

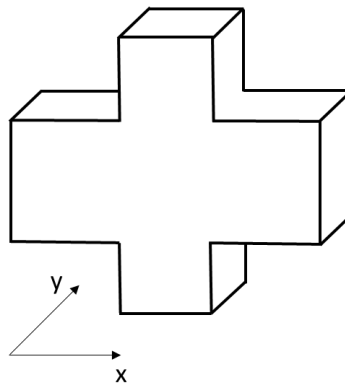


Figura 2-4: Nodo di parete.

Si raccomanda di eseguire il progetto del sistema di rinforzo considerando l'azione sismica proveniente da entrambe le direzioni (x ed y).

3. GEOMETRIA

In questa sezione è necessario definire le dimensioni geometriche di travi e pilastri convergenti nel nodo e le dimensioni geometriche delle campate adiacenti al nodo oggetto di verifica. A titolo di esempio si riporta la definizione dell'intera geometria di un nodo di parete; per il nodo d'angolo i dati di input sono gli stessi a meno della trave mancante.

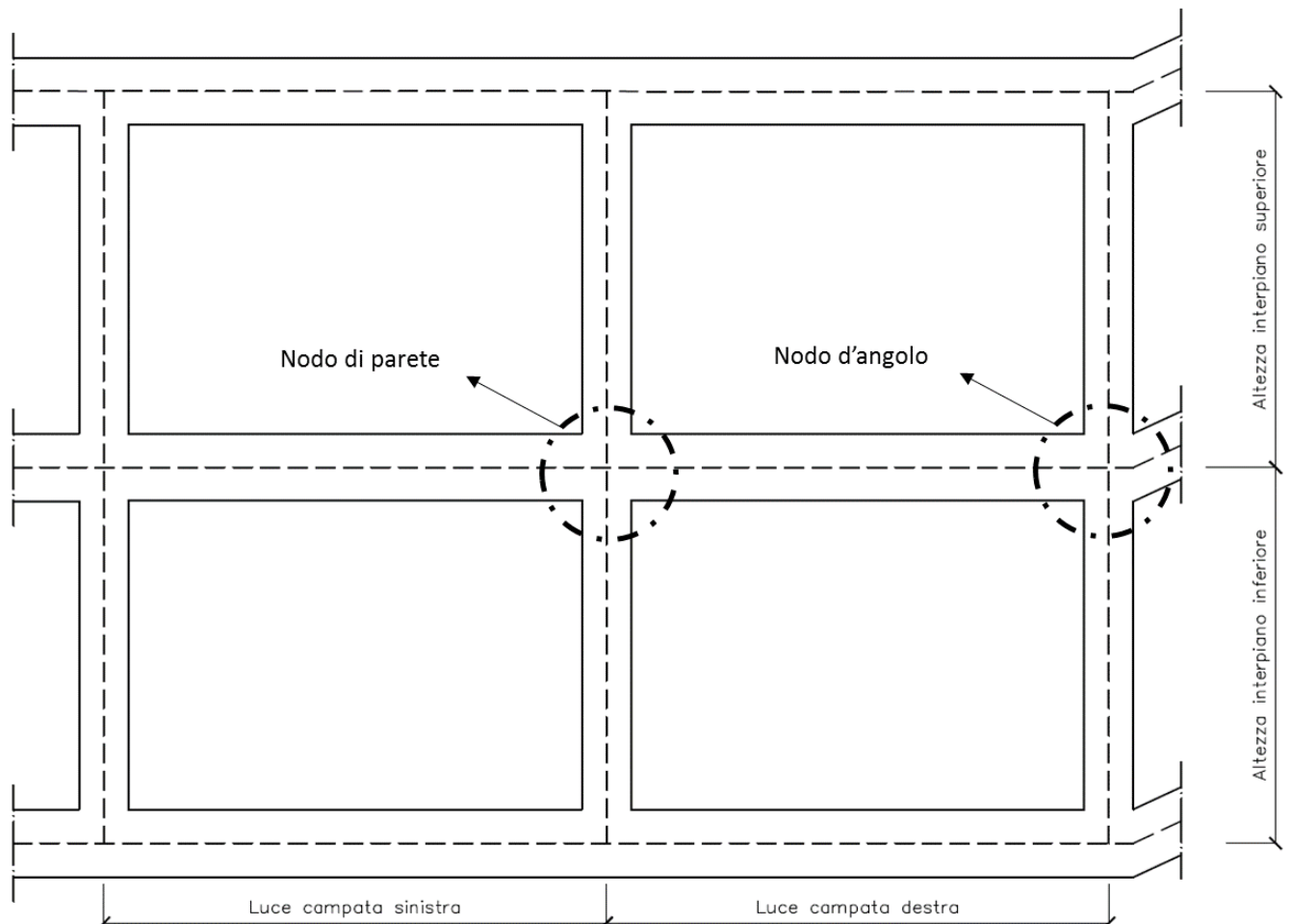


Figura 3-5: Individuazione dei nodi non-confinati in un telaio in c.a.

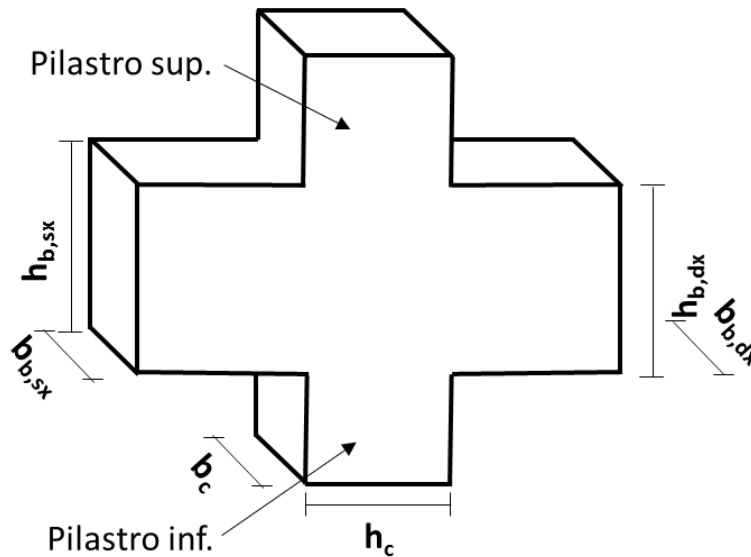


Figura 3-6: Geometria del nodo di parete.

Con riferimento alle Figura 3-5 e alla Figura 3-6 figure 3-1 e 3-2, le dimensioni richieste come input (Figura 3-7) sono le seguenti:

- $b_{b,sx}$ = base della sezione trasversale della trave a sinistra del nodo in mm;
- $h_{b,sx}$ = altezza della sezione trasversale della trave a sinistra del nodo in mm;
- $b_{b,dx}$ = base della sezione trasversale della trave a destra del nodo;
- $h_{b,dx}$ = altezza della sezione trasversale della trave a destra del nodo;
- b_c = base della sezione trasversale del pilastro convergente nel nodo (direzione ortogonale alla direzione di verifica del nodo);
- h_c = altezza della sezione trasversale del pilastro convergente nel nodo (direzione parallela alla direzione di verifica del nodo).
- *Luce campata sinistra* = distanza di interasse tra i pilastri della campata a sinistra del nodo;
- *Luce campata destra* = distanza di interasse tra i pilastri della campata a destra del nodo;
- *Altezza interpiano superiore* = distanza di interasse tra le travi del piano al di sopra del nodo;
- *Altezza interpiano inferiori* = distanza di interasse tra le travi del piano al di sotto del nodo.

Si riporta, di seguito, la schermata della sezione 3 del software relativa alla definizione della geometria degli elementi convergenti nel nodo.

3. Geometria		
	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)		
b_c (mm)		
	Trave Sinistra	Trave destra
h_b (mm)		
b_b (mm)		
	Sinistra	Destra
luce campata (mm)		
	Superiore	Inferiore
altezza interpiano (mm)		

Figura 3-7: Schermata della sezione 3 di inserimento dati input sulla geometria.

4. DETTAGLI DI ARMATURA

Nella sezione 4 riportata in Figura 4-8 è possibile inserire i vari registri di armatura per ciascuno dei pilastri e delle travi convergenti nel nodo.

4. Dettagli armatura				
	Pilastro sup. d_i (mm)		Pilastro inf. d_i (mm)	
A_{s1} (mm ²)				
A_{s2} (mm ²)				
A_{s3} (mm ²)				
	Trave sinistra		Trave destra	
A_{s1} (mm ²)				
A_{s2} (mm ²)				
copriferro (mm)				

Figura 4-8: Schermata della sezione 4 di inserimento dati input sui registri di armatura.

Per la definizione delle aree (A_{si}) e delle distanze (d_i) si rimanda alle figure successive.

- PILASTRO

Per ogni registro di armatura è necessario definire due parametri:

- $A_{s,i}$: area dell'i-esimo registro di armatura;
- d_i : distanza dell'i-esimo registro di armatura dal bordo superiore della sezione.

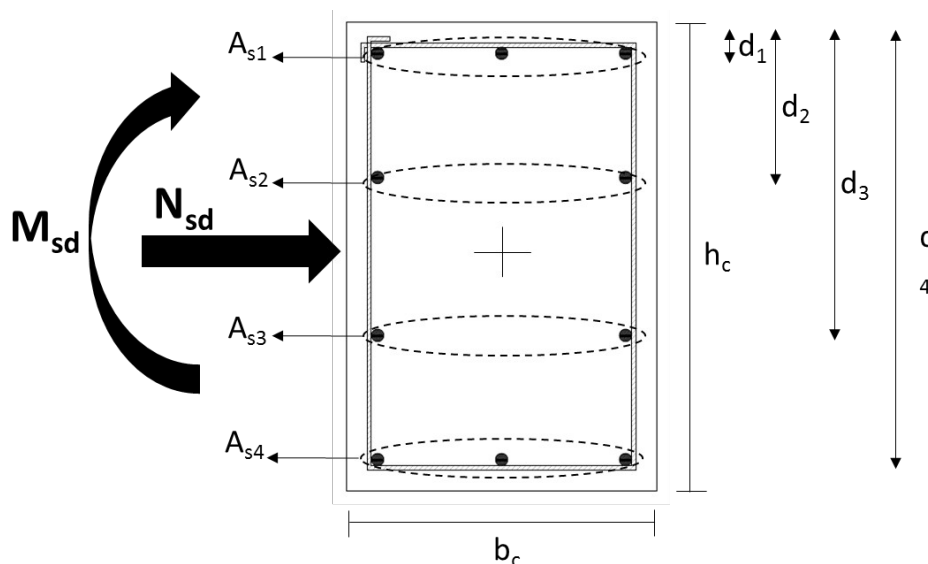


Figura 4-9: Definizione registri di armatura per i pilastri.

Se per esempio si assume che il pilastro in esame sia quello di Figura 4-9 con momento sollecitante M_{Ed} nella direzione dell'asse forte del pilastro (direzione x di Figura 2-3 e Figura 2-4), assumendo che i ferri longitudinali di armatura abbiano un diametro di 16 mm, A_{s1} sarà pari a 602.9 mm^2 , $A_{s2}=A_{s3}$ sarà pari a 401.9 mm^2 , mentre A_{s4} sarà pari a 602.9 mm^2 .

Si ricorda che i nodi trave pilastro vanno verificati considerando le sollecitazioni agenti in entrambe le direzioni (x ed y). Nel caso si considerino le sollecitazioni agenti in direzione y in questo caso, con riferimento sempre al pilastro di Figura 4-9 armato con barre del diametro di 16 mm, in tal caso A_{s1} sarà pari a 803.8 mm^2 , A_{s2} sarà pari a 401.9 mm^2 , mentre A_{s3} sarà pari a 803.8 mm^2 .

- TRAVE

Per le travi è possibile inserire i registri di armatura superiore, A_{s1} , ed inferiore, A_{s2} ed il copriferro, c , espresso in mm. Nel caso di nodo di parete è necessario specificare le armature sia per la trave di destra che di sinistra.

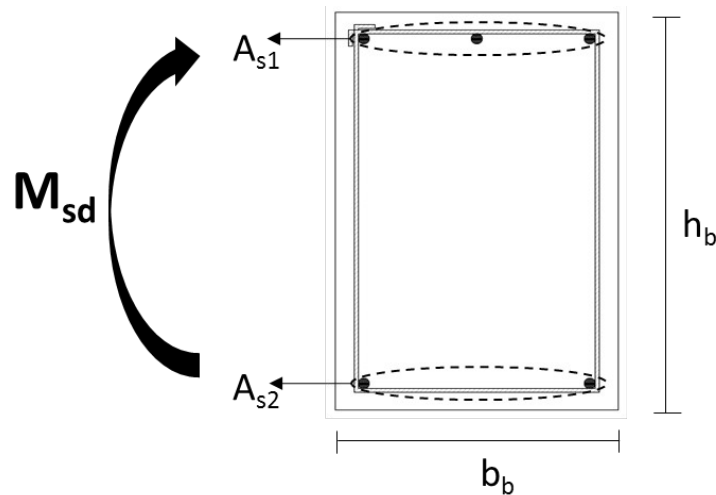


Figura 4-10: Definizione registri di armatura per le travi

È bene precisare che l'inserimento dei dettagli di armatura è facoltativo. Nel caso di rinforzo locale infatti è possibile calcolare l'incremento di tensione principale nel pannello di nodo per effetto dell'FRP anche senza conoscere la domanda di taglio massima trasmissibile al nodo e collegata allo snervamento delle armature degli elementi (travi o pilastri) in esso convergenti. Tuttavia, nel caso si volessero raggiungere incrementi di resistenza significativi, è raccomandato procedere all'inserimento delle armature al fine di verificare che le resistenze massime non siano limitate superiormente dall'attingimento dello snervamento delle armature longitudinali degli elementi convergenti nel nodo.

Nel caso si utilizzi l'approccio "Approccio basato su valori scelti delle sollecitazioni" l'inserimento dei dettagli di armatura è facoltativo in quanto, in quest'ultimo caso, vengono richieste dal software le sollecitazioni derivanti dall'analisi sismica globale (si veda la sezione 6) e che dovrebbero già tener in conto delle sollecitazioni massime trasmissibili al pannello di nodo in funzione dello snervamento delle armature longitudinali di travi e pilastri. All'interno dell'approccio di calcolo secondo il Approccio basato su valori scelti delle sollecitazioni, nel caso in cui il progettista decidesse di inserire i dettagli di armatura, nella sezione 6 il software effettua un controllo che le sollecitazioni da analisi non generino un taglio di nodo superiore al massimo trasmissibile e collegato allo snervamento delle armature longitudinali di travi o pilastri in esso convergenti. In caso contrario il software procede al calcolo, ma restituisce un messaggio di errore.

5. PROPRIETA' DEI MATERIALI

Una volta definite le caratteristiche delle sezioni ed i dettagli di armatura, è necessario definire le proprietà meccaniche dei materiali del nodo in esame. In accordo con la normativa vigente in materia di valutazione capacità di edifici esistenti (Capitolo 8, NTC2018) è necessario definire le resistenze medie dei materiali utilizzati: calcestruzzo e acciaio, qualora vengano specificate le armature longitudinali secondo quanto descritto nella sezione 4. La caratterizzazione dei materiali, la definizione dei livelli di conoscenza e dei fattori di confidenza segue le prescrizioni delle normative vigenti (§8.5.4 NTC 2018 e C8.5.4.2 e Circolare del 2019).

In sintesi, i dati da inserire sono i seguenti:

- f_{cm} : resistenza media cilindrica a compressione del calcestruzzo;
- f_{ym} : tensione media di snervamento dell'acciaio;
- F.C. : fattore di confidenza associato al livello di conoscenza raggiunto (C8.5.4.2 Circolare 2019);
- γ_c : è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo (pari a 1.5) il cui uso è suggerito al C8.7.2.3.5 della circolare (Circolare 2019) per la valutazione della capacità a taglio di elementi sismici primari per verifiche fragili;
- γ_{Rd} : è il fattore di sovrarresistenza da scegliere in accordo con i valori suggeriti in Tab. 7.2.I dell' NTC 2018.

5. Proprietà dei materiali	
Calcestruzzo	Acciaio
f_{cm} (MPa)	f_{ym} (MPa)
F.C.	
γ_c (fragili)	γ_{Rd}

Figura 5-11: Schermata della sezione 5 di inserimento dati input delle proprietà meccaniche dei materiali.

Il coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio non è richiesto in quanto nel calcolo della domanda, a vantaggio di sicurezza, le resistenze non vengono divise per i coefficienti parziali.

6. SOLLECITAZIONI DA ANALISI

La tipologia di sollecitazioni da inserire all'interno del software varia a seconda dell'approccio di progetto scelto. Di seguito, si elencano, al variare dell'approccio utilizzato, le sollecitazioni da inserire:

- **RINFORZO LOCALE**

Per questo approccio è necessario conoscere solo lo sforzo assiale sollecitante N_{Ed} agente alla base del pilastro superiore convergente nodo. Nel caso in cui vengano specificati i dettagli di armatura è necessario inserire anche lo sforzo assiale sollecitante in testa al pilastro inferiore per permettere in calcolo del momento di snervamento in regime di presso-flessione. Trattandosi di un approccio locale, e dunque, di una metodologia rapida che permette di non effettuare l'analisi globale della struttura mediante modelli FEM, lo sforzo normale N_{Ed} relativo ai pilastri può essere ricavato per aree di influenza, in base ai carichi agenti sulla struttura determinati in accordo con le vigenti normative.

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N _{Ed} (kN)		
V _{Ed} (kN)		
M _{Ed} (kNm)		

Figura 6-12: Schermata della sezione 6 di inserimento dati input delle sollecitazioni da inserire per l'approccio "rinforzo locale".

- **APPROCCIO BASATO SU VALORI SCELTI DELLE SOLLECITAZIONI**

In questo caso è necessario inserire tutte le sollecitazioni presenti sugli elementi convergenti nel nodo. Esso possono essere calcolate sulla base di una analisi locale o ricavate dall'analisi sismica globale eseguita con riferimento all'intensità sismica di progetto. In particolare, per il calcolo della taglio totale agente nel nodo (V_j) secondo la formula [7.4.6] delle NTC 2018 necessario a definire la domanda in termini di tensione principale di trazione nel nodo valutata in accordo alla formulazione C8.7.2.11 riportata nella Circolare (2019), è necessario inserire il momento flettente M_{Ed} agente alle estremità delle due travi convergenti nel nodo e lo sforzo normale N_{Ed} agente alla base del pilastro superiore. Inoltre, è necessario inserire anche lo sforzo di taglio, V_{Ed} , agente alla base del pilastro superiore. Nel caso in cui vengano specificati i dettagli di armatura è necessario inserire anche lo sforzo assiale sollecitante in testa al pilastro inferiore per permettere il calcolo del momento di snervamento in regime di presso-flessione. In figura 6-2 si riporta un esempio di distribuzione delle caratteristiche interne della sollecitazione di un telaio multipiano in c.a. soggetto ad azioni sismiche.

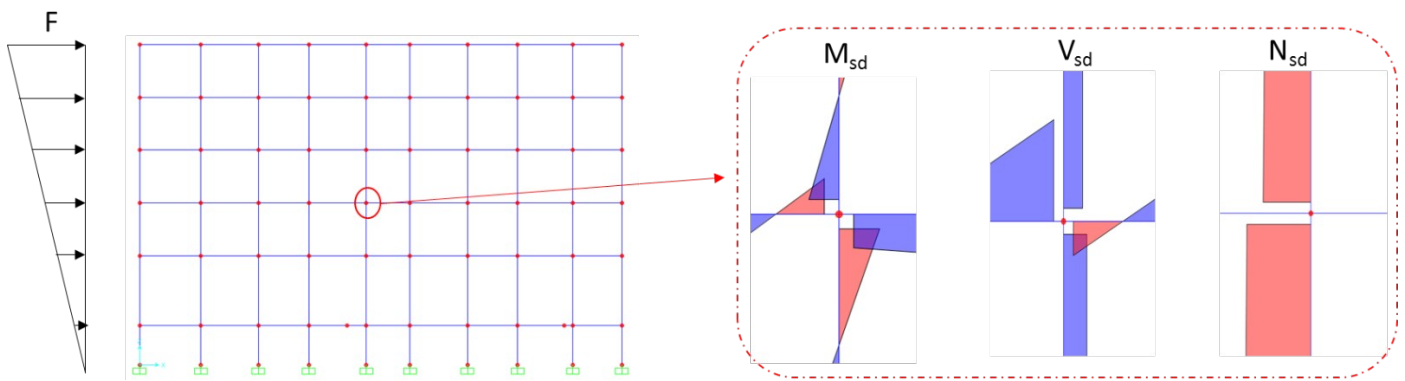


Figura 6-13: Esempio di sollecitazioni lette da analisi globale effettuata su modello FEM della struttura.

Le sollecitazioni da inserire nella sezione 6 sono schematizzate in Figura 6-14.

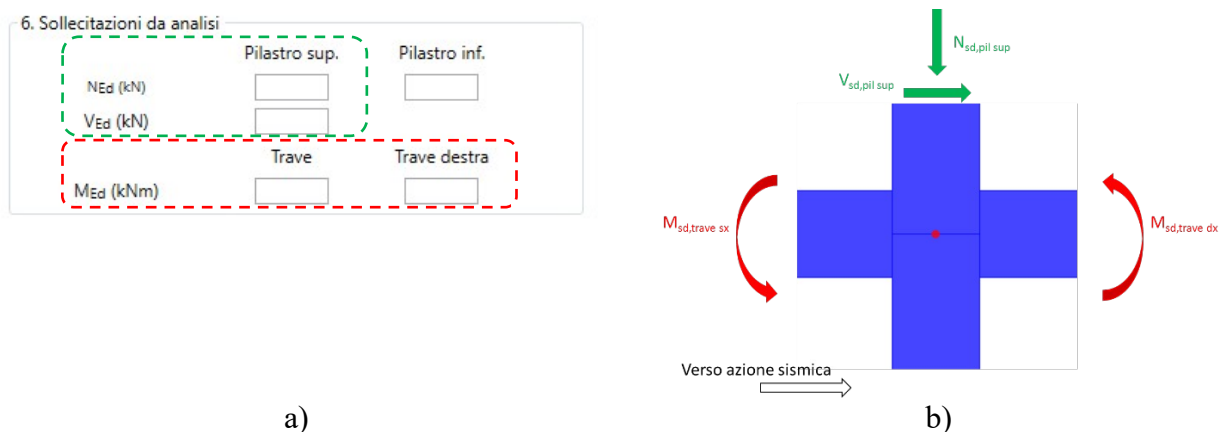


Figura 6-14: Schermata della sezione 6 di inserimento dati input delle sollecitazioni per approccio "Basato su valori scelti delle sollecitazioni" a), sollecitazioni agenti nel nodo oggetto di verifica (b).

Si ricorda, che in accordo con le normative vigenti, le verifiche vanno effettuate considerando entrambi i versi dell'azione sismica. Nel caso in cui le sollecitazioni siano di verso opposto a quelle riportate in Figura 6-13 e in Figura 6-14, esse vanno riportate sempre con segno positivo.

Nel caso in cui in sezione 4 vengano specificate comunque le armature degli elementi convergenti nel nodo, il software esegue un controllo mirato a valutare se le somma delle sollecitazioni massime in termini di momento flettente inserite, superino il valore della somma dei momenti di snervamento degli elementi convergenti. In tal caso apparirà un messaggio di *warning* “*Momento sollecitante maggiore del momento di snervamento*” come riportato in Figura 6-4. Tuttavia, lo scopo di questo messaggio è solo quello di rendere consapevole l'utente che le sollecitazioni inserite risultano maggiori di quelle massime trasmissibili al nodo; in ogni caso, tale messaggio non preclude la possibilità di procedere con le successive fasi progettuali.

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
NEd (kN)	300	300
VED (kN)	88.3	88.3
Momento sollecitante maggiore del momento di snervamento	237	237

Figura 6-15: Schermata della sezione 6 relativa al messaggio di warning riportato.

7. VERIFICHE DI RESISTENZA

Le verifiche di resistenza sono effettuate in accordo a quanto prescritto nella Circolare n.7 del 2019, di cui si riporta un estratto.

“La verifica di resistenza deve essere eseguita solo per i nodi non interamente confinati come definiti al §7.4.4.3 delle NTC. Deve essere verificata sia la resistenza a trazione diagonale che quella a compressione diagonale. Per la verifica si possono adottare le seguenti espressioni:”

- per la resistenza a trazione:

$$\sigma_{jt} = \left| \frac{N}{2A_j} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_j} \right)^2 + \left(\frac{V_j}{A_j} \right)^2} \right| \leq 0.3 \sqrt{f_c} \quad (f_c \in \text{MPa}) \quad (1)$$

In accordo con quanto prescritto nella Circolare la capacità resistente del pannello di nodo viene fissata all'attingimento di una tensione principale di trazione pari a $0,3\sqrt{f_c}$. La domanda viene calcolata in funzione del taglio di nodo, V_j , e dello sforzo normale agente alla base del pilastro superiore.

7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)				
	$0.3\sqrt{f_{cd}}$ (MPa)	$\geq$	σ_{jt} (MPa)	
Capacità	-	-	-	!
Esito	-			

Figura 7-16: Schermata della sezione 7 del software relativa alla verifica di resistenza a trazione secondo Circolare 2019.

La verifica può dare i seguenti esiti:

- **Crisi a taglio trazione del nodo** = è necessario rinforzare il nodo con FRP per sostenere l'intera domanda di taglio o parte di essa;
- **Verifica soddisfatta** = non è necessario rinforzare il nodo, in quanto il contributo offerto dalla resistenza a trazione del calcestruzzo è sufficiente a sostenere l'intera domanda di taglio.

Di seguito, per ciascuno dei due approcci e delle due tipologie di nodo, si riporta la procedura di calcolo della domanda di taglio di nodo e le relative formule di calcolo implementate nel software.

APPROCCIO LOCALE

In questo paragrafo viene illustrato il calcolo della domanda di tensione principale di trazione valutando il taglio di nodo attraverso considerazioni sulle massime sollecitazioni trasmissibili dagli elementi in esso convergenti (travi e pilastri). Questo in ottica di utilizzare un approccio di calcolo locale che non preveda una analisi sismica globale dell'intera struttura. Ovviamente, ciò presuppone che siano state definite le armature nella sezione 4 del software. Il calcolo verrà illustrato con riferimento ad un nodo non-confinato di parete, ovvero avente due travi convergenti nel pannello di nodo (Figura 3 -6).

La formula relativa alla verifica di resistenza del nodo è quella di norma riportata in Eq. (1).

- TENSIONE TANGENZIALE AGENTE NEL NODO

$$v_{jh}^d = \frac{V_{jh,d}}{b_j * h_j} \quad (2)$$

dove:

- $V_{jh,d}$ = taglio agente nel nodo;
- b_j = base della sezione del nodo [§7.4.4.3.1 NTC2018]
- h_j = altezza della sezione del nodo [§7.4.4.3.1 NTC2018]

- TENSIONE NORMALE AGENTE NEL NODO

$$f_a = \frac{N_{Ed}}{b_j * h_j} \quad (3)$$

dove:

- N_{Ed} = sforzo normale alla base del pilastro superiore convergente nel nodo;
- b_j = base della sezione del nodo [§7.4.4.3.1 NTC2018]
- h_j = altezza della sezione del nodo [§7.4.4.3.1 NTC2018]

- TAGLIO AGENTE NEL NODO

Citando le vigenti norme tecniche delle costruzioni §7.4.4.3.1 delle NTC (2018) , la domanda a taglio in direzione orizzontale deve essere calcolata tenendo conto delle sollecitazioni più gravose che, per effetto dell'azione sismica, si possono verificare negli elementi che vi confluiscono.

Nel caso di gerarchia trave debole-pilastro forte, in cui i primi elementi a snervare sono le travi, a domanda di taglio nel nodo può essere stimata attraverso l'equazione [7.4.6] proposta dalle NTC 018:

$$V_j = V_{jbd} = \gamma_{Rd} (A_{s1} + A_{s2}) \cdot f_{yd} - V_c \quad (4)$$

dove:

- A_{s1} = armatura superiore della sezione della trave di sinistra convergente nel nodo;
- A_{s2} = armatura inferiore della sezione superiore della trave di destra convergente nel nodo;
- b_j = base della sezione del nodo [§7.4.4.3.1 NTC2018]
- h_j = altezza della sezione del nodo [§7.4.4.3.1 NTC2018]
- γ_{Rd} = fattore di sovrarresistenza in accordo con i valori proposti in Tab. 7.2.I delle NTC 2018.

Si precisa che, in questo software si utilizzano i valori di f_{ym} e non f_{yd} poiché tali resistenze sono utilizzate per il calcolo della domanda. Nel caso si volesse usare f_{yd} il valore può essere inserito come input al posto di f_{ym} .

- V_c è la forza di taglio nel pilastro al di sopra del nodo. Tale forza, nell'approccio di progetto di un rinforzo locale, viene valutata attraverso equazioni di equilibrio del subassemblaggio nodale in accordo con studi di letteratura (Del Vecchio *et al.*, 2014) e normative internazionali (NZSEE 2017). Nello specifico si assume che il punto di nullo della sollecitazione flettente sia a metà dell'altezza di interpiano per i pilastri e ad 1/3 della luce della campata per le travi.

Il software in automatico prende la massima sollecitazione di taglio derivante dal calcolo eseguito alternando A_{s1} e A_{s2} prese rispettivamente una volta come l'armatura superiore della trave di sinistra e quella inferiore della trave di destra e viceversa.

Nel caso di gerarchia trave forte-pilastro debole, condizione abbastanza frequente negli edifici esistenti progettati senza rispettare la corretta gerarchia delle resistenze, potrebbe accadere che i pilastri snervino prima delle travi (come accade ad esempio in edifici che mostrano meccanismi di piano debole). In tal caso la domanda massima di taglio calcolata ipotizzando lo snervamento delle armature longitudinali delle travi non potrà mai essere raggiunta. Per calcolare la corretta domanda di taglio, bisogna valutare le tensioni realmente agenti nelle barre d'armatura delle travi (A_{s1} e A_{s2}), che saranno sicuramente inferiori alla tensione f_{yd} .

In tal caso l'Eq. (4) può essere generalizzata come:

$$V_{jh,d,max} = V_{jh,d} = \frac{M_{yd}}{0,9 * (h_b - c)} - \frac{M_{yd}}{\left(\frac{L_b}{3} - \frac{h_c}{2}\right)} * \left(\frac{\frac{L_b}{3} * 1}{2} * 2\right) \frac{1}{h_{f,media}} \quad (5)$$

dove:

- M_{yd} = momento di snervamento di progetto del nodo (si veda Eq. 6);
- h_b = media delle altezze delle sezioni delle travi convergenti nel nodo;
- h_c = altezza della sezione del pilastro convergente nel nodo;
- c = copriferro della trave;
- L_b = lunghezza media delle campate convergenti nel nodo;
- $h_{int,media}$ = altezza media di interpiano lorda.

- MOMENTO DI SNERVAMENTO DI PROGETTO DEL NODO

$$M_{yd} = \frac{\min(M_{yc}; M_{yb})}{\left(\frac{L_{b,sx} + L_{b,dx}}{2 \cdot 3}\right)} * \left(\left(\frac{L_{b,sx} + L_{b,dx}}{2 \cdot 3}\right) - \left(\frac{h_c}{2}\right)\right) \quad (6)$$

dove:

- M_{yc} = somma dei momenti di snervamento dei pilastri traslata nel nodo;
- M_{yb} = somma dei momenti di snervamento delle travi traslata nel nodo
- $L_{b,sx}$ = luce lorda della campata di cui fa parte la trave sinistra convergente nel nodo;
- $L_{b,dx}$ = luce lorda della campata di cui fa parte la trave destra convergente nel nodo;
- h_c = altezza della sezione del pilastro convergente nel nodo.

Il software valuta automaticamente la reale gerarchia delle resistenze, confrontando la sommatoria dei momenti di snervamento delle travi con la sommatoria dei momenti di snervamento dei pilastri (valutati in regime di pressoflessione) ed entrambi traslati nel centro del pannello di nodo.

Nel caso di nodo d'angolo (Figura 2 -3) valgono le stesse considerazioni e formulazioni mostrate in precedenza, considerando però che vi è la mancanza di una trave, per cui, ci saranno alcune celle all'interno del software che saranno disabilitate.

2. Tipologia nodo

☒ Nodo d'angolo ☐ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)		
b_c (mm)		
	Trave	Trave destra
h_b (mm)		
b_b (mm)		
	Sinistra	Destra
luce campata (mm)		
	Superiore	Inferiore
altezza interpiano (mm)		

4. Dettagli armatura (se disponibili)

	Pilastro sup. di (mm)	Pilastro inf. di (mm)
A_{s1} (mm ²)		
A_{s2} (mm ²)		
A_{s3} (mm ²)		
	Trave sinistra	Trave destra
A_{s1} (mm ²)		
A_{s2} (mm ²)		
copriferro (mm)		

5. Proprietà dei materiali

Calcestruzzo	Acciaio
f_{cm} (MPa)	f_{ym} (MPa)
F.C.	
γ_c (fragili)	γ_{Rd}

6. Sollecitazioni

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N_{Ed} (kN)		
V_{Ed} (kN)		
	Trave sinistra	Trave destra
M_{Ed} (kNm)		

Figura 7-17: Schermata delle sezioni del software in cui sono disabilitate alcune celle nel caso di nodo d'angolo.

APPROCCIO BASATO SU VALORI SCELTI DELLE SOLLECITAZIONI

In questo paragrafo viene illustrato il calcolo della domanda di tensione principale di trazione valutando il taglio di nodo attraverso le sollecitazioni che si hanno dall'analisi globale della struttura effettuato mediante altro software di calcolo. Il calcolo verrà illustrato con riferimento ad un nodo non-confinato di parete, ovvero avente due travi convergenti nel pannello di nodo (Figura 3 -6).

La formula relativa alla verifica di resistenza del nodo e alla tensione tangenziale e normale agente su di esso, sono quelle riportate in precedenza (1), (2), (3).

- TAGLIO AGENTE NEL NODO

$$V_{jh,d,max} = V_{jh,d} = \frac{M_{Ed,sx}}{0,9*(h_{b,sx}-c)} + \frac{M_{Ed,dx}}{0,9*(h_{b,dx}-c)} - V_{Ed} \quad (7)$$

dove:

- $M_{Ed,sx}$ = momento flettente agente nella trave sinistra convergente nel nodo;
- $h_{b,sx}$ = altezza della sezione della trave sinistra convergente nel nodo;
- c = copriferro della trave;
- $M_{Ed,dx}$ = momento flettente agente nella trave destra convergente nel nodo;
- $h_{b,dx}$ = altezza della sezione della trave destra convergente nel nodo;
- V_{Ed} = taglio agente alla base del pilastro superiore convergente nel nodo.

Nel caso di nodo d'angolo (Figura 2 -3) valgono le stesse considerazioni e formulazioni mostrate in precedenza, considerando però che vi è la mancanza di una trave, per cui, ci saranno alcune celle all'interno del software che saranno disabilitate.

8. PROGETTO RINFORZO FRP

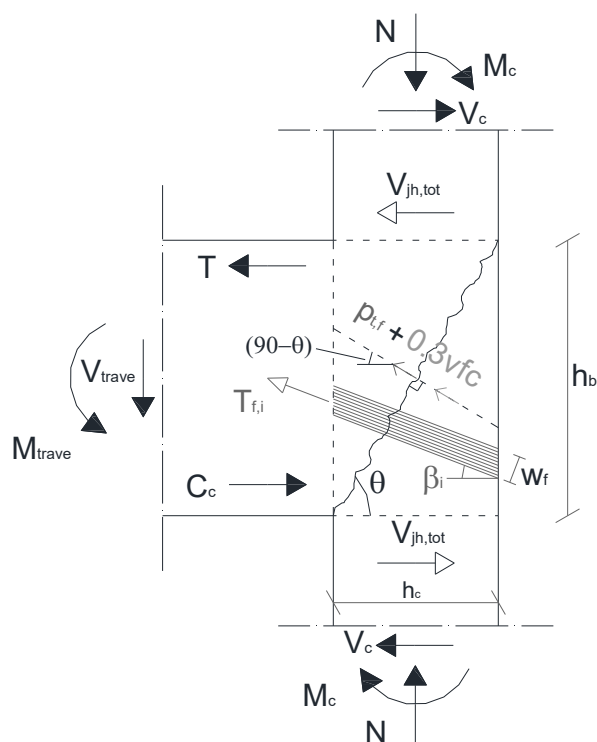
Il progetto del rinforzo mediante FRP consiste nel determinare il numero di strati di materiale composito da applicare al nodo per incrementarne la resistenza in termini di tensione principale di trazione in accordo con il C8.7.4.3 della Circolare n. 7 del 2019. L'approccio progettuale implementato nel software è l'Approccio 2 del *fib Bulletin 90* (2019), la cui procedura di calibrazione, effettuata su un database di prove sperimentali di nodi non-confinati rinforzati con FRP, è riportata in dettaglio in (Del Vecchio *et al.*, 2015).

Tale approccio, definito lo schema di rinforzo, il materiale, la tipologia di tessuto, le caratteristiche geometriche e meccaniche ed il numero di strati, consente di valutare l'incremento di tensione principale di trazione nel pannello di nodo dovuto al rinforzo in FRP, $\sigma_{jt,FRP}$, che va ad aggiungersi alla resistenza del solo calcestruzzo assunta pari a $0.3\sqrt{f_c}$ secondo quanto mostrato in precedenza (Figura 8-1).

La tensione principale di trazione che il rinforzo in FRP può sostenere è calcolabile attraverso l'equazione (8).



(a)



(b)

Figura 8-1: Schema tipo del rinforzo di un nodo d'angolo con FRP (a), modello analitico del rinforzo in FRP (b).

$$\sigma_{jt,FRP} = \frac{\varepsilon_{f,d} * E_f * A_f}{\left(\frac{b_c * h_c}{\sin \theta} \right)} \quad (8)$$

dove:

- $\varepsilon_{f,d}$ è la deformazione di progetto del composito che può essere calcolata attraverso la formula (9)

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}; 34 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{A_f E_f} \right)^{0.6} \right\} \quad (9)$$

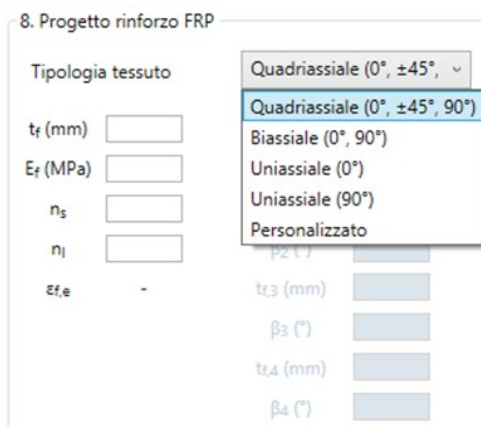
dove:

- f_{cm} valore della resistenza cilindrica media a compressione del calcestruzzo preesistente. Si specifica che tale formula è stata calibrata su prove sperimentali considerando le diverse incertezza e rispettando i requisiti di sicurezza suggeriti dall' Eurocodice 0 (1992) . I coefficienti di sicurezza sono già inclusi nel coefficiente di modello e non necessita dell'uso di ulteriori

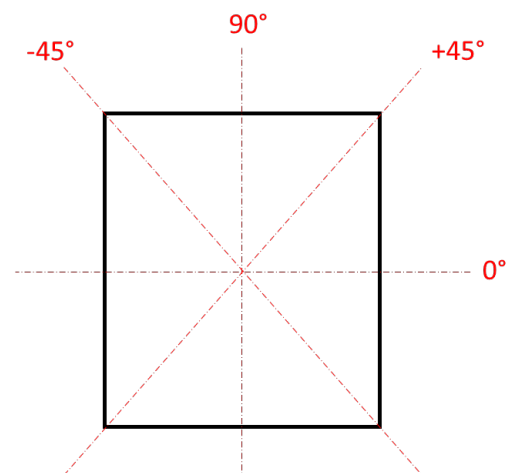
coefficienti parziali o fattori di confidenza;

- ε_{fk} deformazione caratteristica a rottura del composito;
- η_a fattore di conversione ambientale secondo quanto riportato in Tabella 3-2 delle CNR DT-200 (2008);
- γ_f coefficiente parziale secondo quanto riportato in Tabella 3-1 delle CNR DT-200 (2008);
- E_f = modulo elastico del tessuti in FRP;
- A_f = area equivalente del rinforzo in FRP, da valutarsi come di seguito riportato.

Nel caso di rinforzo applicato su un pannello di nodo danneggiato e riparato, si consiglia di assumere come deformazione di progetto da utilizzare $0.8\varepsilon_{fd}$ secondo quanto riportato in *fib bulletin 90* (2019) per tale motivo, all'interno della sezione 8 del software vi è la possibilità di spuntare l'opzione relativa ad un nodo pre-danneggiato.



(a)



(b)

Figura 8-18: Schermata della sezione 8 del software di inserimento proprietà e caratteristiche del rinforzo FRP(a), inclinazione delle fibre di FRP (b).

Come si può vedere, il software permette di scegliere tra cinque tipologie differenti di tessuto in FRP da applicare sul pannello di nodo, che si differenziano in base alla disposizione delle fibre di tessuto rispetto all'asse orizzontale del nodo:

- Quadriassiale;
- Biassiale;
- Uniassiale 0° (fibre disposte parallelamente all'asse orizzontale del nodo);

- Uniassiale 90° (fibre disposte ortogonalmente all'asse orizzontale del nodo);
- Personalizzato (fibre con disposizione differente dalle prime quattro).

Nel caso si dovesse selezionare, come tipologia di tessuto, l'opzione *Personalizzato*, comparirà una nuova sezione che permetterà di inserire i dati relativi allo spessore e all'inclinazione delle fibre secondo quattro direzioni.

8. Progetto rinforzo FRP

Tipologia tessuto: Personalizzato

☐ Nodo pre-danneggiato

t_f (mm)		$t_{f,1}$ (mm)	
E_f (MPa)		β_1 (°)	
ε_{fk}		$t_{f,2}$ (mm)	
η_a		β_2 (°)	
γ_f		$t_{f,3}$ (mm)	
n_s		β_3 (°)	
n_l		$t_{f,4}$ (mm)	
$\varepsilon_{f,d}$	-	β_4 (°)	

Figura 8-19: Schermata della sezione 8 del software relativa all'inserimento dei dati in caso di scelta di tessuto personalizzato.

Di seguito, si riportano le formule per il calcolo dell'area di tessuto di rinforzo e per il calcolo della resistenza offerta dal rinforzo, secondo quanto riportato nel *fib bulletin 90* (2019).

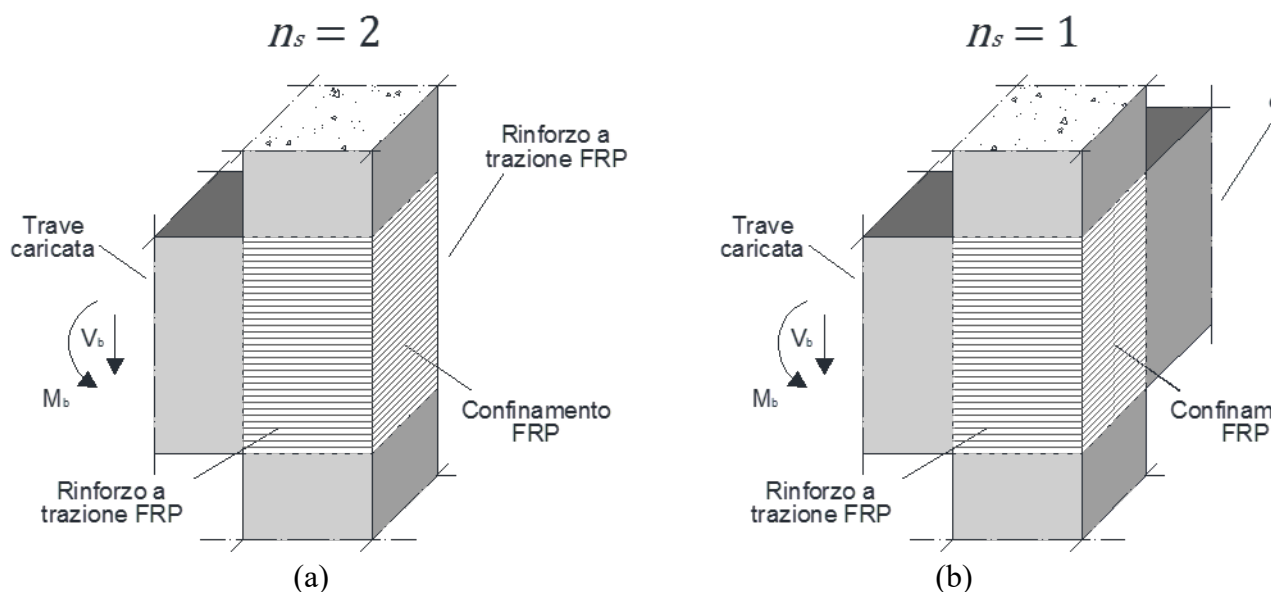


Figura 8-20: Rinforzo di nodi a trazione in FRP: (a) due facce ($n_s = 2$), (b) una faccia ($n_s = 1$).

- AREA DEL RINFORZO (TESSUTO QUADRIASSIALE CON FIBRE INCLINATE A 0° , $\pm 45^\circ$, 90° RISPETTO ALL'ORIZZONTALE)

$$A_f = n_s * n_l * t_f * h_c * \cos \theta * (1 + \tan \theta + 2 * (\tan \theta)^2) \quad (10)$$

- AREA DEL RINFORZO (TESSUTO BIASSIALE CON FIBRE INCLINATE A 0° , 90° RISPETTO ALL'ORIZZONTALE)

$$A_f = n_s * n_l * t_f * h_c * \cos \theta * (1 + (\tan \theta)^2) \quad (11)$$

- AREA DEL RINFORZO (TESSUTO UNIASSIALE CON FIBRE INCLINATE A 0° RISPETTO ALL'ORIZZONTALE)

$$A_f = n_s * n_l * t_f * h_c * \sin \theta \quad (12)$$

- AREA DEL RINFORZO (TESSUTO UNIASSIALE CON FIBRE INCLINATE A 90° RISPETTO ALL'ORIZZONTALE)

$$A_f = n_s * n_l * t_f * h_c * \cos \theta \quad (13)$$

- AREA DEL RINFORZO (PERSONALIZZATO)

$$A_f = A_{f,1} + A_{f,2} + A_{f,3} + A_{f,4} \quad (14)$$

dove le aree (da considerarsi nella somma solo se positive) possono essere calcolate come:

$$A_{f,1} = \frac{n_s * n_l * t_{f,1} * h_b}{\cos \beta_1} * \sin(\theta + \beta_1) \quad (15.a) \quad (\text{se } \beta_1 < \theta)$$

$$A_{f,1} = \frac{n_s * n_l * t_{f,1} * h_c}{\sin \beta_1} * \sin(\theta + \beta_1) \quad (15.b) \quad (\text{se } \beta_1 \geq \theta)$$

$$A_{f,2} = \frac{n_s * n_l * t_{f,2} * h_b}{\cos \beta_2} * \sin(\theta + \beta_2) \quad (16.a) \quad (\text{se } \beta_2 < \theta)$$

$$A_{f,2} = \frac{n_s * n_l * t_{f,2} * h_c}{\sin \beta_2} * \sin(\theta + \beta_2) \quad (16.b) \quad (\text{se } \beta_2 \geq \theta)$$

$$A_{f,3} = \frac{n_s * n_l * t_{f,3} * h_b}{\cos \beta_3} * \sin(\theta + \beta_3) \quad (17.a) \quad (\text{se } \beta_3 < \theta)$$

$$A_{f,3} = \frac{n_s * n_l * t_{f,3} * h_c}{\sin \beta_3} * \sin(\theta + \beta_3) \quad (17.b) \quad (\text{se } \beta_3 \geq \theta)$$

$$A_{f,4} = \frac{n_s * n_l * t_{f,4} * h_b}{\cos \beta_4} * \sin(\theta + \beta_4) \quad (18.a) \quad (\text{se } \beta_4 < \theta)$$

$$A_{f,4} = \frac{n_s * n_l * t_{f,4} * h_c}{\sin \beta_4} * \sin(\theta + \beta_4) \quad (18.b) \quad (\text{se } \beta_4 \geq \theta)$$

dove:

- n_s = numero di lati del pannello di nodo rinforzati a taglio (si veda Figura 8-3);
- n_l = numero di strati di rinforzo;
- t_f = spessore equivalente del tessuto secco in FRP;
- h_c = altezza della sezione del pilastro;
- $\theta = \arctan(h_b/h_c)$;
- h_b = altezza della sezione della trave convergente nel nodo;
- h_j = altezza della sezione del nodo.
- $A_{f,1}$ = area di tessuto nella direzione 1 delle fibre;
- $t_{f,1}$ = spessore del tessuto nella direzione 1 delle fibre;
- $A_{f,2}$ = area di tessuto nella direzione 2 delle fibre;
- $t_{f,2}$ = spessore del tessuto nella direzione 2 delle fibre;
- $A_{f,3}$ = area di tessuto nella direzione 3 delle fibre;
- $t_{f,3}$ = spessore del tessuto nella direzione 3 delle fibre;
- $A_{f,4}$ = area di tessuto nella direzione 4 delle fibre;
- $t_{f,4}$ = spessore del tessuto nella direzione 4 delle fibre;
- β_i = inclinazione rispetto all'orizzontale della fibra lungo la i-esima direzione.

9. VERIFICA DI RESISTENZA FRP

La verifica di resistenza del sistema rinforzato con FRP è condotta considerando la capacità come la somma della capacità a trazione offerta dal calcestruzzo e di quella offerta dal rinforzo (Eq. 19); la domanda viene calcolata specificato nella sezione 7.

9. Verifica di resistenza nodo rinforzato

$$0.3\sqrt{f_{cd}} + \sigma_{jt,FRP} \text{ (MPa)} \geq \sigma_{jt} \text{ (MPa)}$$

Capacità resistente	-	-	-	!
Incremento di capacità resistente nodo	-	-	-	-
Esito	-	-	-	-

Figura 9-21: Schermata relativa alla verifica di resistenza del nodo rinforzato.

$$\sigma_{jt,tot} = 0.3 * \sqrt{f_{cd}} + \sigma_{jt,FRP} \geq \sigma_{jt} \quad (19)$$

La verifica può dare i seguenti esiti:

- *E' possibile incrementare il numero di strati* = il numero di strati di FRP adottati per rinforzare il nodo non è sufficiente al soddisfacimento della verifica, pertanto è possibile aumentare in sezione 8 il numero di strati per incrementare la capacità resistente offerta dal rinforzo; tuttavia, al fine di ricordare all'utente che l'efficacia di sistemi di rinforzo in FRP decresce significativamente all'aumentare del numero di strati e che la corretta messa in opera del rinforzo può essere influenzata dal numero di strati adottati, qualora venga inserito dall'utente un numero di strati superiore a 3, il software restituisce il seguente messaggio di *warning*: “E' consigliabile non utilizzare un numero di strati superiore a 3”;
- *Verifica soddisfatta* = la capacità del nodo rinforzato con FRP è superiore alla domanda.

Il programma consente anche di valutare l'incremento percentuale di capacità resistente del nodo (molto utile nel caso di rinforzi locali per i quali è richiesto nella relazione illustrativa di riportare “la valutazione della variazione del livello locale di sicurezza”, Circolare §C.8.4.1) a seguito del rinforzo, attraverso la seguente formula:

$$\text{Incremento di capacità resistente nodo} = \frac{\sigma_{jt,tot} - 0.3 * \sqrt{f_{cd}}}{0.3 * \sqrt{f_{cd}}} * 100 \quad (20)$$

Nel caso di “Rinforzo locale”, oltre all'esito della verifica, viene effettuato un controllo sul possibile snervamento delle travi e dei pilastri convergenti nel nodo; questo poiché la domanda

massima è calcolata considerando la massima sollecitazione di taglio trasmissibile al nodo, collegata allo snervamento delle armature degli elementi (travi o pilastri) in esso convergenti.

Per cui, il software restituirà una tra le seguenti opzioni:

- *Nessuno snervamento*: pur avendo incrementato, in termini di resistenza, la capacità del nodo, non si è attinta una capacità pari alla massima domanda corrispondente all'attingimento dello snervamento delle travi o dei pilastri convergenti nel nodo.
- *Snervamento trave*: la capacità del nodo rinforzato è superiore alla massima domanda trasmissibile al nodo stesso e le armature delle relative travi convergenti risultano snervate.
- *Snervamento pilastro*: la capacità del nodo rinforzato è superiore alla massima domanda trasmissibile al nodo stesso e le armature dei relativi pilastri convergenti risultano snervate.

10. PROGETTO DEGLI ANCORAGGI MECCANICI

Per ancorare il rinforzo in FRP dei nodi il software prevede due modalità:

- Fasciatura ad U applicata all'estremità delle travi

Nel caso in cui si selezioni tale opzione il processo di calcolo all'interno del software termina e si possono seguire le indicazioni fornite dal manuale ReLUIIS per il calcolo dei rinforzi strutturali (2011) per definire le dimensioni geometriche delle fasciature. Un estratto è riportato in Figura 10-1.

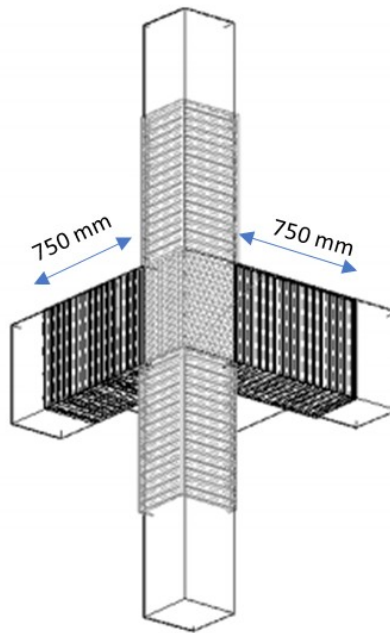


Figura 10-22: Fasciatura delle travi con tessuto FRP unidirezionale secondo manuale Reluis (3).

Come si può vedere dall'immagine, l'ancoraggio del rinforzo di nodo in FRP viene effettuato applicando sulle travi che vi convergono, una fasciatura ad U in fibra di carbonio uniassiale per una lunghezza di 750 mm a partire dal bordo della trave.

Questa tipologia di ancoraggio, per la sua conformazione richiede, però, la demolizione parziale della tamponatura al di sotto della trave, comportando, pertanto, un minimo grado di disturbo agli occupanti.

- FIOCCHI

Si tratta di elementi fibrorinforzati alloggiati in appositi fori all'interno delle travi che garantiscono l'ancoraggio del rinforzo sul nodo operando dal solo esterno e senza dover demolire alcuna porzione di tamponatura.

Spuntando questa opzione, all'interno del software si attiva una sezione della schermata di calcolo relativa alle caratteristiche dei fiocchi di ancoraggio da utilizzare.

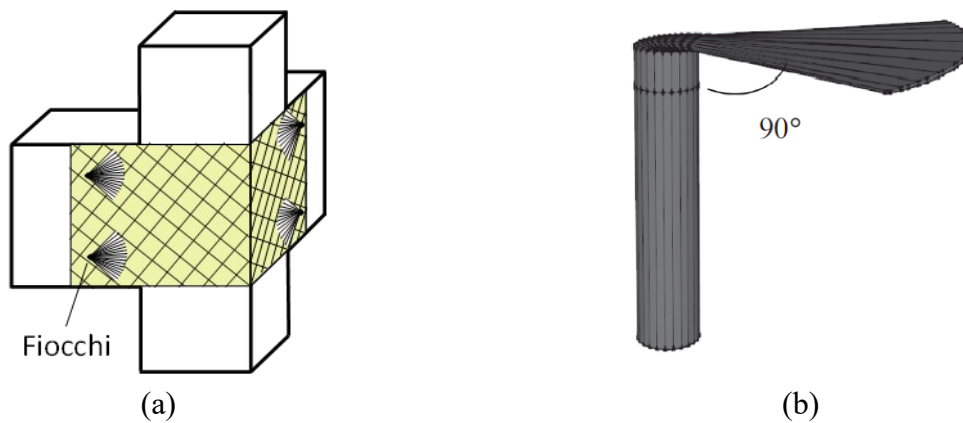


Figura 10-23: Fiocchi di ancoraggio in FRP (a), immagine tridimensionale di un singolo fiocco (b).

11. PROGETTO DEI FIOCCHI

Le formule seguenti si basano sullo studio effettuato da del Rey Castillo *et al.*, 2019 che considera diversi possibili meccanismi di crisi dell'ancoraggio (Figura 11 -24).

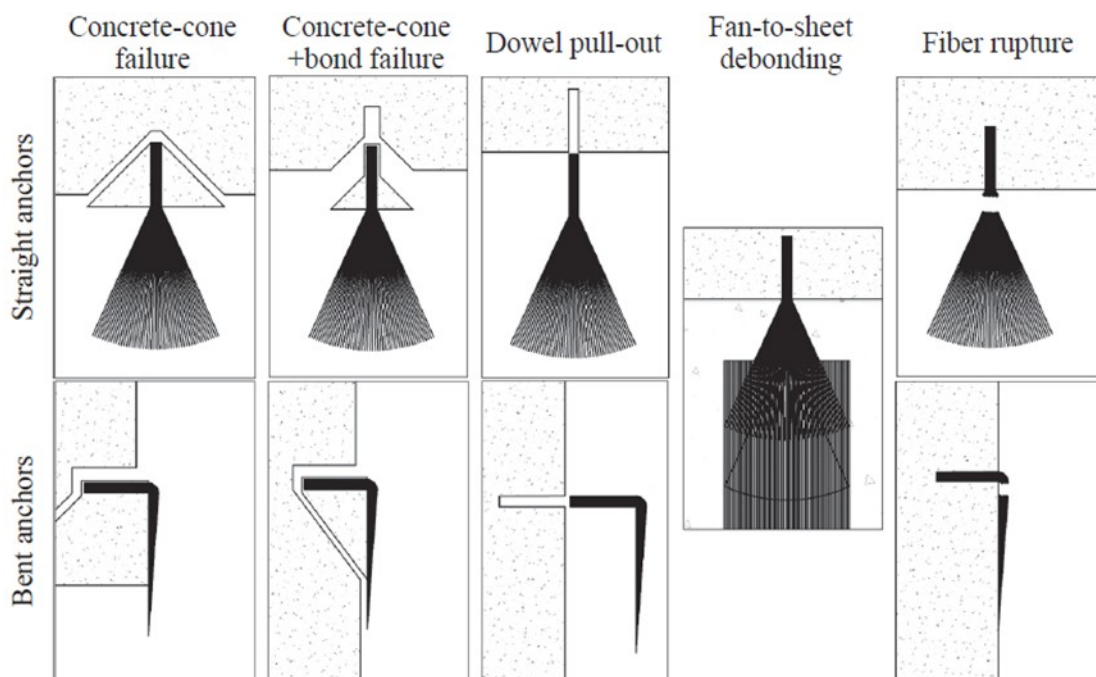


Figura 11-24: Possibili meccanismi di rottura del sistema di ancoraggio mediante fiocchi in FRP

In particolare, in accordo con i meccanismi di crisi comunemente riscontrabili negli ancoraggi in materiali lapidei, vengono contemplate le seguenti modalità di crisi:

- per distacco del cono di calcestruzzo (N_{cc});

- mista per distacco del cono di calcestruzzo e per aderenza (N_{cb});
- sfilamento dell'ancoraggio (N_{po});
- delaminazione di interfaccia tra fiocco e tessuto in FRP (N_{sd});
- tranciamento delle fibre del fiocco (V_{fr});

per il calcolo di queste resistenze vengono richiesti i dati di input mostrati in Figura 11-25.

11. Progetto fiocchi

	Trave	Pilastro
Φ_{fiocco} (mm)		
$L_{inghisaggio}$ (mm)		
$L_{sfiocco}$ (mm)		
$\alpha_{sfiocco}$ (°)		
Φ_{foro} (mm)		
V_{resina} (MPa)		
F_{fu} (MPa)		
V_{fibre} (%)		
N° ancoraggi su ogni trave	-	-
N° ancoraggi su ogni pilastro	-	-
☐ Fisso num. ancoraggi trave		

Figura 11-25: Schermata della sezione 11 del software relativa al progetto dei fiocchi di ancoraggio.

La resistenza dell'ancoraggio è la minima tra le resistenze sopra elencate (Eq. 21)

$$N_{min} = \min(N_{cc}, N_{cb}, N_{po}, N_{sd}, V_{fr}) \quad (21)$$

Di seguito si riportano le formulazioni per il calcolo di tali resistenze:

- la resistenza dell'ancoraggio per distaccamento del cono di calcestruzzo può essere valutata come:

$$N_{cc} = 9.68 * L_{inghisaggio}^{1.5} * \sqrt{f_{cm}} \quad (24)$$

dove:

- $L_{inghisaggio}$ = lunghezza di inghisaggio del fiocco all'interno del supporto di calcestruzzo;
- f_{cm} = resistenza media a compressione del calcestruzzo.

- La resistenza dell'ancoraggio nei confronti della rottura mista può essere calcolate come:

$$N_{cb} = 4.62 * \pi * \phi_{fiocco} * L_{inghisaggio} \quad (25) \quad (\text{se } f_{cm} < 20 \text{ MPa})$$

$$N_{cb} = 9.07 * \pi * \phi_{fiocco} * L_{inghisaggio} \quad (26) \quad (\text{se } f_{cm} \geq 20 \text{ MPa})$$

dove:

- ϕ_{fiocco} = diametro del fiocco;

- La resistenza dell'ancoraggio allo sfilamento può essere valutata come:

$$N_{po} = 0.7 * L_{inghisaggio} - 18 \quad (27)$$

- La resistenza dell'ancoraggio per delaminazione intermedia tra fiocco e tessuto in FRP può essere calcolata come:

$$N_{sd} = 0.35 * V_{resina} * A_{fan} \quad (28)$$

dove:

- V_{resina} = resistenza a taglio della resina;

- A_{fan} = area del fiocco di ancoraggio calcolabile attraverso l'Eq. (23)

$$A_{fan} = \frac{\pi * L_{sfiocco}^2 * \alpha_{sfiocco}}{360^\circ} \quad (23)$$

dove:

- $L_{sfiocco}$ = lunghezza di sfiocco dell'ancoraggio come indicata in Figura 11 -25.

- $\alpha_{sfiocco}$ = angolo di sfiocco dell'ancoraggio nel piano orizzontale come indicata in Figura 11 -25.

- Il calcolo della resistenza del fiocco per tranciamento delle fibre del fiocco in materiale composito può essere valutata attraverso la formulazione proposta da Mahrenholtz et al. (2018) e valutata attraverso prove sperimentali su fiocchi in CFRP sollecitati ortogonalmente all'asse di inghisaggio del fiocco:

$$V_{fr} = 0.06 * f_{fu} * V_{fibre} * \left(\pi * \left(\frac{\phi_{fiocco}^2}{4} \right) \right) \quad (29)$$

dove:

- f_{fu} è la tensione ultima di rottura delle fibre del fiocco;
- V_{fibre} è la frazione volumetrica di fibre del fiocco;

Una volta nota la resistenza del singolo fiocco, il software procede al calcolo del numero di ancoraggi da disporre sulla trave e necessari a trasmettere la tensione effettiva di lavoro del composito evitando la crisi per delaminazione d'estremità del sistema di rinforzo in FRP attraverso l'Eq (29):

$$N^{\circ} \text{ ancoraggi su ogni trave} = \frac{V_{max}}{N_{min}} \quad (29)$$

dove:

$$V_{max} = A_{eq} * E_f * \varepsilon_{f,d} \quad (30)$$

dove:

- $A_{eq} = A_f$ = area del rinforzo di nodo in FRP

$$\varepsilon_{f,d} = 34 * \left(\frac{f_{cd}^{\frac{2}{3}}}{A_f * E_f} \right)^{0.6}$$

- E_f = modulo elastico del FRP

Il numero di ancoraggi da posizionare sui pilastri è stato assunto uguale a quello da posizionare sulla trave, da ripartirsi per il numero di pilastri convergenti nel nodo.

$$N^{\circ} \text{ ancoraggi pilastro} = \frac{V_{max}}{N_{min,pil}} * 0.5 \quad (31)$$

dove V_{max} è lo stesso valutato per la trave, mentre $N_{min,pil}$ è la resistenza minima del singolo ancoraggio posizionato sul pilastro, se di caratteristiche diverse da quelli della trave.

Si specifica che nel caso di nodo di sommità sul pilastro va posizionato lo stesso numero di ancoraggi della trave.

Il software permette inoltre di fissare il numero di ancoraggi da disporre sulla trave al fine di individuarne un numero più congruo alle reali esigenze di incremento di capacità da voler

raggiungere. Spuntando tale opzione il software calcola a ritroso l'incremento di resistenza raggiungibile fissato il numero di fiocchi da disporre su travi e pilastri. Nel caso il numero fissato sia inferiore a quello calcolato automaticamente dal software compare un messaggio di warning che invita l'utente a controllare il reale incremento di resistenza raggiungibile in sezione 9.

12. INTERAZIONE TAMPONATURA

Il software permette, inoltre, di progettare un adeguato rinforzo per contrastare l'azione di taglio esercitata dalla tamponatura sul pilastro adiacente ad essa nel caso si spunti l'opzione “*Rinforzo per spinta tamponatura*” (Figura 12 -26). In caso contrario, il calcolo del programma termina.



Figura 12-26: Schermata della sezione 12 del software relativa all'interazione della tamponatura.

13. TAMPONATURA

L'osservazione dei danni post-terremoto conferma che tale azione di taglio può determinare danni significativi al nodo e all'estremità superiore del pilastro che, in funzione anche delle originarie modalità di realizzazione e della sezione di ripresa di getto, può presentare una fessura diagonale sul pannello di nodo, ovvero una lesione pseudo-orizzontale in corrispondenza della sezione di attacco pilastro – pannello di nodo, o ancora la rottura per lesione diagonale alla testa del pilastro (Figura 13 -27).

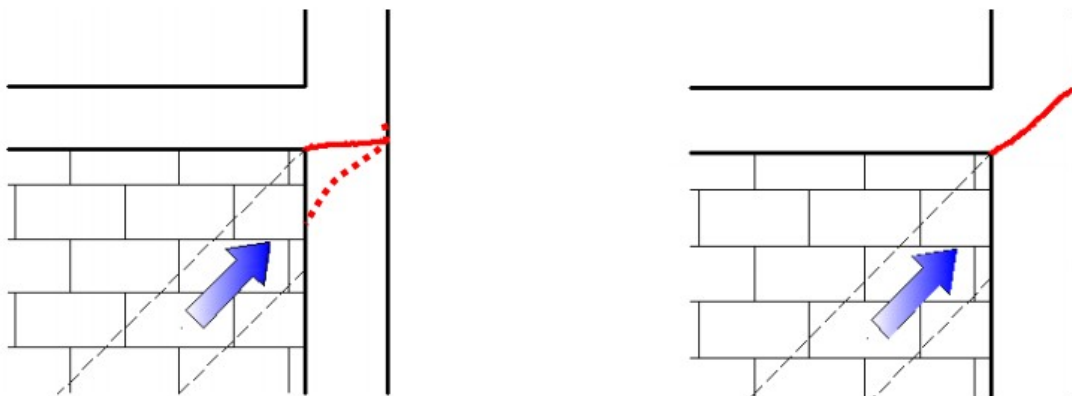
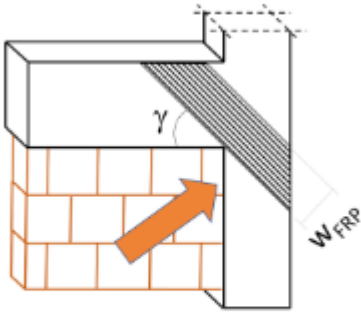


Figura 13-27: Lesioni causate dall'interazione con la tamponatura (3).

Il progetto del rinforzo è effettuato secondo la procedura riportata nel *manuale Reluis* (2011).

13. Tamponatura

f_k (MPa)	
f_{vk0} (MPa)	
Luce netta campata (mm)	
Altezza netta interpiano (mm)	
Spessore tamponatura (mm)	
γ (°)	
f_{fd} (MPa)	
t_f (mm)	



Verifica geometrica

Esito

$W_{FRP} \leq W_{MAX}$

- - - !

Figura 13-28: Schermata software relativa al calcolo del rinforzo per spinta tamponatura.

Di seguito, si riportano le formule utili al calcolo della sollecitazione tagliante trasmessa dalla tamponatura al pilastro e del conseguente rinforzo.

- SOLLECITAZIONE TAGLIANTE CAUSATA DALLA TAMPONATURA SUL PILASTRO

L'azione orizzontale, H_0 , che corrisponde alla crisi della tamponatura (rottura diagonale per trazione ovvero rottura per schiacciamento locale degli spigoli) rappresenta la massima azione addizionale che può gravare sul pilastro e può essere calcolata come:

$$H_0 = \min \left(\left(\frac{f_{vk0} * L_c * t}{0.6 * \phi} \right); \frac{0.8 * f_k}{\phi} * (\cos \theta)^2 * \sqrt[4]{\frac{E_c}{E_m} * I * h * t^3} \right) \quad (32)$$

dove:

- f_{vk0} = resistenza caratteristica a taglio della muratura in assenza di tensioni normali (Tabella 11.10.VII delle NTC 2018);
- ϕ = fattore di riduzione delle tensioni da porre pari ad 1 per verifiche agli stati limite;
- L = luce netta della campata;
- h = altezza interpiano netta;
- t = spessore della tamponatura;

- f_k = resistenza caratteristica a compressione della muratura (Tabelle 11.10.V e 11.10.VI delle NTC 2018);
- $\theta = \arctan (h/L)$;
- E_c = modulo elastico del calcestruzzo;
- $E_m = 1000 * f_k$ = modulo elastico della muratura;
- I = momento d'inerzia della sezione trasversale del pilastro rispetto all'asse ortogonale al piano della tamponatura.

- SOLLECITAZIONE TAGLIANTE DI PROGETTO TRASFERITA DALLA TAMPONATURA AL PILASTRO

$$H = \max \left(\frac{H_0}{2}; H_0 - 0.4 * N_{Ed} \right) \quad (33)$$

dove:

- N_{Ed} = sforzo normale agente sul pilastro superiore convergente nel nodo.

- AREA DEL RINFORZO

L'area di tessuto da applicare sulla testa del pilastro secondo lo schema riportato in Figura 13 -28 è calcolabile come:

$$A_f = \frac{\frac{H}{\cos \gamma} * 1}{f_{fd}} \quad (34)$$

dove:

- H = azione tagliante di progetto causata dalla tamponatura sul pilastro;
- γ = inclinazione delle fibre di rinforzo rispetto all'asse orizzontale;
- f_{fd} = tensione di progetto del rinforzo, calcolabile come $\eta_a \frac{f_{fk}}{\gamma_f}$
- f_{fk} = resistenza caratteristica del tessuto di rinforzo.

- VERIFICA GEOMETRICA DEL RINFORZO

Bisogna inoltre verificare che lo spessore calcolato attraverso l'Eq (35) sia realmente applicabile nello spessore disponibile sul supporto di calcestruzzo:

$$w_{FRP} = \frac{A_f}{t_f} \leq w_{max} = h_c * \cos(90^\circ - \gamma) \quad (35)$$

dove:

- A_f = area del rinforzo;
- t_f = spessore del rinforzo;
- w_{FRP} = larghezza di progetto del rinforzo;
- w_{max} = larghezza massima del sistema di rinforzo.

14. FUNZIONALITA' DI STAMPA

Nel presente software, a valle delle verifiche e del progetto di rinforzo, è possibile stampare i risultati ottenuti; essi saranno contenuti in documento di sintesi, in formato pdf, utile ai progettisti per avere un rapido riepilogo di quanto progettato. Attraverso il comando "*File* → *Stampa*" si potrà stampare fisicamente o virtualmente (in pdf) tale documento.

Nel caso in cui la stampa fisica mostri problemi di formattazione, è consigliabile salvare prima il documento in formato .pdf tramite una stampante virtuale (facendo attenzione che le dimensioni di layout del foglio siano impostate come A4), e successivamente procedere alla stampa vera fisica.

Bibliografia

- CNR (2008) 'CNR-DT 200/2004 Istruzioni per la Progettazione , l ' Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l ' utilizzo di Compositi Fibrorinforzati', *CNR: Consiglio Nazionale delle Ricerche*.
- Consigli dei lavori pubblici (2019) 'Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”»', *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 35, pp. 1–337.
- European Committee for Standardization (2002) 'EN1990:2002 Eurocode—basis of structural design, vol. 3. Brussels'.
- 'Externally applied FRP reinforcement for concrete structures' (2019) *FIB BULLETIN NO. 90*, p. 229. doi: doi.org/10.35789/fib.BULL.0090.
- Frascadore, R. *et al.* (2015) 'Local strengthening of reinforced concrete structures as a strategy for seismic risk mitigation at regional scaleTitle', *Earthquake Spectra*, 31(2). doi: 10.1193/122912EQS361M.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018) 'Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni” (in Italian)', pp. 1–198.
- NZSEE/MBIE (2017) 'The Seismic Assessment of Existing Buildings: Technical Guidelines for Engineering Assessments. Part C—Detailed Seismic Assessment'.
- Reluis (2011) 'Linee guida per la riparazione e il rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni', *ReLUIS*, p. 196.
- del Rey Castillo, E. *et al.* (2019) 'Strengthening RC structures using FRP spike anchors in combination with EBR systems', *Composite Structures*, 209(January 2019), pp. 668–685. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.10.093.
- De Risi, M. T. *et al.* (2020) 'Light FRP Strengthening of Poorly Detailed Reinforced Concrete Exterior Beam–Column Joints', *Journal of Composites for Construction*, 24(3), p. 04020014. doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001022.
- Del Vecchio, C. *et al.* (2014) 'Experimental Investigation of Exterior RC Beam-Column Joints Retrofitted with FRP Systems', *Journal of Composites for Construction*, 18(4), p. 04014002. doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000459.
- Del Vecchio, C. *et al.* (2015) 'Analytical model and design approach for FRP strengthening of non-conforming RC corner beam-column joints', *Engineering Structures*, 87, pp. 8–20. doi: 10.1016/j.engstruct.2015.01.013.
- Del Vecchio, C. *et al.* (2021) 'La riduzione diffusa della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti in cemento armato - Interventi leggeri e a basso impatto basati su materiali compositi', *Structural*, 235. doi: 10.12917/STRU235.14.