

[...]

14 ESEMPI DI PROGETTAZIONE DI RINFORZI CFRP SU STRUTTURE MURARIE

L'esempio è articolato nei seguenti punti:

- geometria, caratteristiche dei materiali e sollecitazioni;
- verifica a pressoflessione dei maschi murari preesistenti;
- dimensionamento del sistema di rinforzo FRP a pressoflessione;
- verifica a taglio dei maschi murari preesistenti;
- dimensionamento del sistema di rinforzo FRP a taglio.

14.1 GEOMETRIA, CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E SOLLECITAZIONI

La parete è costituita da due maschi di riva, di lunghezza pari a 2.0 m, e due maschi di spina, di lunghezza pari a 3.0 m. Lo spessore dei maschi varia lungo l'altezza e risulta pari a 500 mm al primo piano, 375 mm al secondo piano e 250 mm all'ultimo piano. L'altezza dei maschi, valutata con riferimento all'interasse delle fasce di piano, è costante lungo l'altezza dell'edificio e pari a 3.0 m (Figura 14-1).

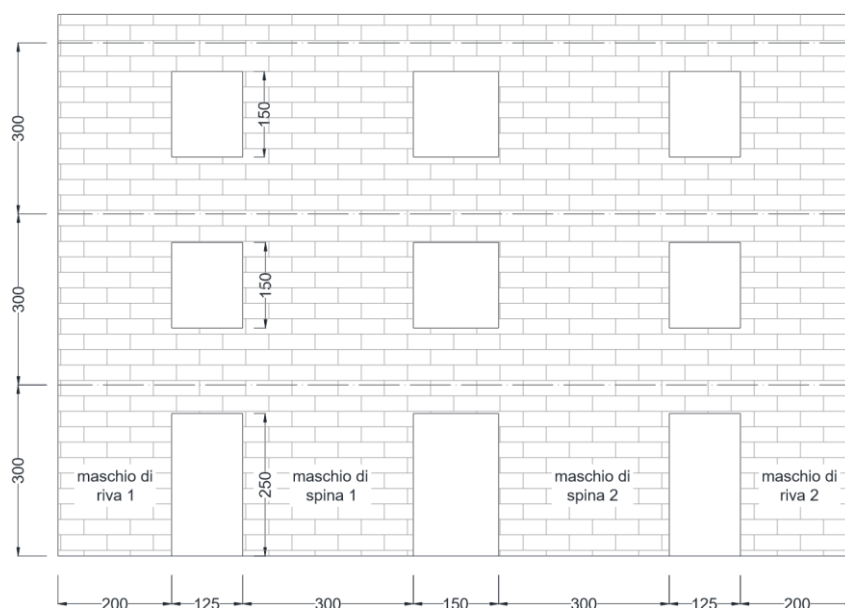


Figura 14-1 – Geometria della parete oggetto di studio (dimensioni in cm).

In Tabella 14-1 sono esposte le proprietà meccaniche della muratura di laterizio e i valori dei coefficienti parziali adottati. Il legame costitutivo assunto per la muratura corrisponde a quello indicato nel § 5.2.3(8), con $\bar{\varepsilon}_m = 2\text{‰}$ e $\varepsilon_{mu} = 3.5\text{‰}$.

Tabella 14-1 - Parametri relativi alla muratura.

| | | |
|--|--------------------------------|------|
| Modulo di elasticità normale | E [N/mm ²] | 4000 |
| Modulo di elasticità tangenziale | G [N/mm ²] | 1000 |
| Peso specifico | γ [kN/m ³] | 18.0 |
| Fattore di confidenza | FC | 1.0 |
| Coefficiente parziale | γ_M | 2 |
| Resistenza a compressione normale ai giunti di malta | | |
| Valore caratteristico | f_{mk} [N/mm ²] | 8.0 |
| Valore di progetto | f_{md} [N/mm ²] | 4.0 |
| Resistenza a taglio | | |
| Resistenza caratteristica in assenza di sforzo normale | f_{vk0} [N/mm ²] | 0.8 |
| Resistenza dei blocchi | | |
| Resistenza media a compressione | f_{bm} [N/mm ²] | 38 |
| Resistenza media a trazione | f_{btm} [N/mm ²] | 3.8 |

Il sistema di rinforzo utilizzato nell'esempio qui proposto è del tipo impregnato *in situ* ed è costituito da un solo strato di tessuto CFRP con fibre unidirezionali, ad eccezione dell'intervento nei confronti del ribaltamento fuori piano di cui al successivo § 14.6. I competenti parametri geometrici e meccanici sono riportati in Tabella 14-2. In Tabella 14-3, sempre con riferimento al sistema di rinforzo, sono invece esposti i valori dei coefficienti parziali e di progetto delle quantità utilizzate nelle verifiche.

Tabella 14-2–Proprietà geometriche e meccaniche del rinforzo FRP.

| | | |
|--|--------------------|--------|
| Spessore | t_f [mm] | 0.165 |
| Larghezza | b_f [mm] | 100 |
| Modulo di elasticità normale nella direzione delle fibre | E_f [GPa] | 230 |
| Deformazione caratteristica a rottura per trazione | ε_{fk} | 0.0175 |
| Passo del rinforzo a taglio | p_f [mm] | 500 |

Tabella 14-3–Coefficienti parziali e valori di progetto del sistema di rinforzo FRP.

| | | |
|--|--|--------|
| Coefficiente parziale nei riguardi del distacco dal supporto | γ_{fd} (§ 3.4.1) | 1.2 |
| Coefficiente parziale nei riguardi degli SLU | γ_f (§ 3.4.1) | 1.1 |
| Fattore di conversione ambientale | η_a (§ 3.5.1) | 0.95 |
| Deformazione a rottura per trazione | $\eta_a \cdot \varepsilon_{fk} / \gamma_f$ (§ 5.2.3) | 0.0151 |
| Larghezza zona di diffusione | b_d [mm] (§ 5.3.2) | 250 |
| Coefficiente correttivo geometrico | k_b (§ 5.3.2) | 1.363 |
| Scorrimento ultimo | s_u [mm] (§ 5.3.2) | 0.4 |
| Coefficiente correttivo | k_G [mm] (§ 5.3.2) | 0.031 |
| Energia specifica di frattura | Γ_{Fd} [N/mm] (§ 5.3.2) | 0.5077 |
| Lunghezza ottimale di ancoraggio | l_{ed} [mm] (§ 5.3.2) | 150 |
| Tensione di distacco di estremità | f_{idd} [N/mm ²] (§ 5.3.2) | 991 |
| Tensione di distacco intermedia | $f_{idd,2} = 2.0 \cdot f_{idd}$ [N/mm ²] (§ 5.3.3) | 1982 |
| Tensione tangenziale di aderenza | f_{bd} [N/mm ²] (§ 5.3.2) | 2.5 |
| Deformazione ultima di distacco intermedio | ε_{idd} (§ 5.3.3) | 0.0086 |
| Deformazione di progetto del sistema FRP | ε_{id} (§ 5.2.3) | 0.0086 |
| Coefficiente parziale per pressoflessione | γ_{Rd} (§ 3.4.2) | 1.00 |
| Coefficiente parziale per taglio | γ_{Rd} (§ 3.4.2) | 1.20 |

La parete è stata schematizzata come un telaio (Figura 14-2), sul quale agiscono sia carichi verticali che forze orizzontali concentrate nei nodi. Il calcolo delle sollecitazioni è stato effettuato ipotizzando un comportamento elastico lineare degli elementi strutturali. I risultati dell'analisi sono riportati sotto forma di diagrammi in Figura 14-3; i competenti valori sono esposti in Tabella 14-4 per il maschio di riva 1, in Tabella 14-5 per il maschio di riva 2, in Tabella 14-6 per il maschio di spina 1 ed in Tabella 14-7 per il maschio di spina 2. Le quote si intendono misurate a partire dall'incastro al piede.

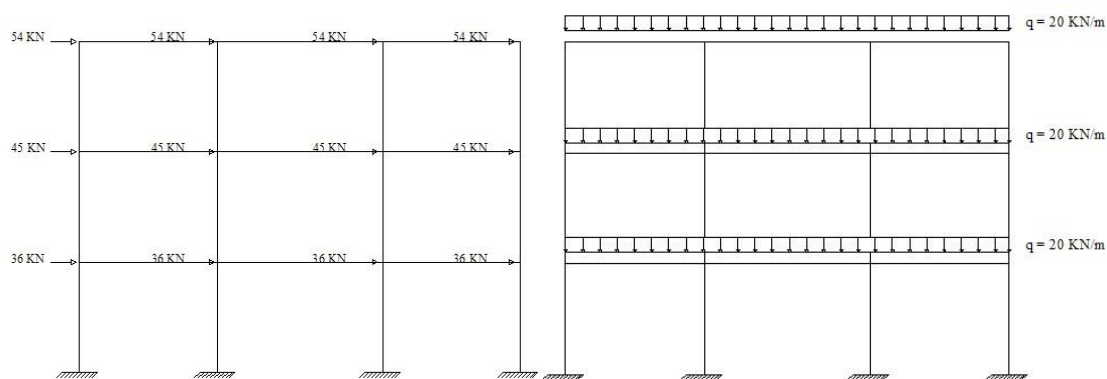


Figura 14-2 – Modellazione a telaio e azioni di progetto.

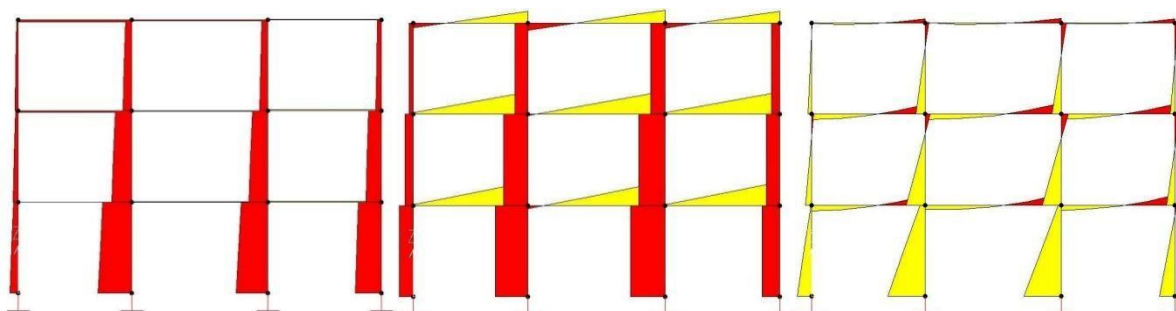


Figura 14-3 – Diagrammi delle sollecitazioni di progetto: sforzo normale, taglio, momento flettente.

Tabella 14-4 - Sollecitazioni di progetto maschi murari: maschio di riva 1.

| Quota sezione [m] | Lunghezza pannello L [m] | Spessore pannello t [m] | Sforzo normale di progetto N_{sd} [kN] | Momento flettente di progetto M_{sd} [kNm] | Taglio di progetto V_{sd} [kN] |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|--|--|----------------------------------|
| 0 | 2 | 0.5 | 133.38 | 240.98 | 76.58 |
| 1 | 2 | 0.5 | 115.73 | 164.4 | 76.58 |
| 2 | 2 | 0.5 | 98.07 | 87.82 | 76.58 |
| 3 | 2 | 0.5 | 80.41 | 11.23 | 76.58 |
| 3 | 2 | 0.375 | 84.04 | 103.39 | 46.48 |
| 4 | 2 | 0.375 | 70.8 | 56.92 | 46.48 |
| 5 | 2 | 0.375 | 57.56 | 10.44 | 46.48 |
| 6 | 2 | 0.375 | 44.31 | 36.04 | 46.48 |
| 6 | 2 | 0.25 | 52.72 | 55.5 | 21.85 |
| 7 | 2 | 0.25 | 43.89 | 33.65 | 21.85 |
| 8 | 2 | 0.25 | 35.06 | 11.81 | 21.85 |
| 9 | 2 | 0.25 | 26.23 | 10.04 | 21.85 |

Tabella 14-5 –Sollecitazioni di progetto maschi murari: maschio di riva 2.

| Quota sezione [m] | Lunghezza pannello L [m] | Spessore pannello t [m] | Sforzo normale di progetto N_{Sd} [kN] | Momento flettente di progetto M_{Sd} [kN m] | Taglio di progetto V_{Sd} [kN] |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|--|---|----------------------------------|
| 0 | 2 | 0.5 | 434.71 | 250.51 | 95.43 |
| 1 | 2 | 0.5 | 417.05 | 155.08 | 95.43 |
| 2 | 2 | 0.5 | 399.39 | 59.65 | 95.43 |
| 3 | 2 | 0.5 | 381.74 | 35.78 | 95.43 |
| 3 | 2 | 0.375 | 252.33 | 131.73 | 72.51 |
| 4 | 2 | 0.375 | 239.09 | 59.21 | 72.51 |
| 5 | 2 | 0.375 | 225.84 | 13.3 | 72.51 |
| 6 | 2 | 0.375 | 212.6 | 85.81 | 72.51 |
| 6 | 2 | 0.25 | 90.5 | 72.98 | 45.1 |
| 7 | 2 | 0.25 | 81.67 | 27.89 | 45.1 |
| 8 | 2 | 0.25 | 72.84 | 17.21 | 45.1 |
| 9 | 2 | 0.25 | 64.01 | 62.3 | 45.1 |

Tabella 14-6 – Sollecitazioni di progetto maschi murari: maschio di spina 1.

| Quota sezione [m] | Lunghezza pannello L [m] | Spessore pannello t [m] | Sforzo normale di progetto N_{Sd} [kN] | Momento flettente di progetto M_{Sd} [kN m] | Taglio di progetto V_{Sd} [kN] |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|--|---|----------------------------------|
| 0 | 3 | 0.5 | 557.52 | 619.07 | 178.52 |
| 1 | 3 | 0.5 | 531.03 | 440.55 | 178.52 |
| 2 | 3 | 0.5 | 504.55 | 262.04 | 178.52 |
| 3 | 3 | 0.5 | 478.06 | 83.52 | 178.52 |
| 3 | 3 | 0.375 | 331.42 | 311.06 | 131.92 |
| 4 | 3 | 0.375 | 311.55 | 179.14 | 131.92 |
| 5 | 3 | 0.375 | 291.69 | 47.22 | 131.92 |
| 6 | 3 | 0.375 | 271.82 | 84.7 | 131.92 |
| 6 | 3 | 0.25 | 143.71 | 152.28 | 70.56 |
| 7 | 3 | 0.25 | 130.47 | 81.72 | 70.56 |
| 8 | 3 | 0.25 | 117.22 | 11.16 | 70.56 |
| 9 | 3 | 0.25 | 103.98 | 59.4 | 70.56 |

Tabella 14-7 –Sollecitazioni di progetto maschi murari: maschio di spina 2.

| Quota sezione [m] | Lunghezza pannello L [m] | Spessore pannello t [m] | Sforzo normale di progetto N_{Sd} [kN] | Momento flettente di progetto M_{Sd} [kN m] | Taglio di progetto V_{Sd} [kN] |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|--|---|----------------------------------|
| 0 | 3 | 0.5 | 521.43 | 618.68 | 189.47 |
| 1 | 3 | 0.5 | 494.94 | 429.21 | 189.47 |
| 2 | 3 | 0.5 | 468.46 | 239.74 | 189.47 |
| 3 | 3 | 0.5 | 441.97 | 50.27 | 189.47 |
| 3 | 3 | 0.375 | 315.46 | 316.02 | 145.09 |
| 4 | 3 | 0.375 | 295.59 | 170.93 | 145.09 |
| 5 | 3 | 0.375 | 275.73 | 25.83 | 145.09 |
| 6 | 3 | 0.375 | 255.86 | 119.26 | 145.09 |
| 6 | 3 | 0.25 | 138.48 | 152.36 | 78.5 |
| 7 | 3 | 0.25 | 125.24 | 73.86 | 78.5 |
| 8 | 3 | 0.25 | 111.99 | 4.64 | 78.5 |
| 9 | 3 | 0.25 | 98.75 | 83.13 | 78.5 |

14.2 VERIFICA A PRESSOFLESSIONE DEI MASCHI MURARI PREESISTENTI

La verifica a pressoflessione dei maschi murari preesistenti è stata eseguita utilizzando il legame costitutivo ipotizzato nel § 14.1. In analogia a quanto indicato nel § 4.2.2.4 per le strutture di conglomerato cementizio armato, si è proceduto a valutare il momento resistente, $M_{Rd}(N_{Sd})$, corrispondente allo sforzo normale di progetto, N_{Sd} . A tal scopo sono state utilizzate le due equazioni di equilibrio, alla traslazione nella direzione dell'asse dell'elemento ed alla rotazione intorno al baricentro geometrico della sezione retta di quest'ultimo, tenendo altresì conto della linearità del diagramma delle deformazioni.

I competenti risultati sono esposti in Tabella 14-8 per il maschio di riva 1, in Tabella 14-9 per il maschio di riva 2, in Tabella 14-10 per il maschio di spina 1 ed in Tabella 14-11 per il maschio di spina 2. Inoltre, nella Figura 14-4 è istituito un confronto tra il diagramma del momento flettente di progetto con quello resistente. Si evince che la verifica a pressoflessione non è soddisfatta solo in alcune sezioni dei maschi di riva.

Alla luce di tali risultati si ritiene di intervenire inserendo rinforzi FRP lungo tutta l'altezza dei maschi di riva, disposti alle estremità di questi ultimi con una distanza dal bordo, misurata rispetto all'interasse del rinforzo, pari a 10 cm.

Tabella 14-8– Verifica a pressoflessione maschi murari: maschio di riva 1.

| Quota sezione [m] | $M_{Rd}(N_{Sd})$ [kN m] | Esito verifica $M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd}$ |
|----------------------|----------------------------|--|
| 0 | 128.93 | non soddisfatta |
| 1 | 112.38 | non soddisfatta |
| 2 | 95.67 | soddisfatta |
| 3 | 78.79 | soddisfatta |
| 3 | 81.69 | non soddisfatta |
| 4 | 69.13 | soddisfatta |
| 5 | 56.46 | soddisfatta |
| 6 | 43.66 | soddisfatta |
| 6 | 51.33 | non soddisfatta |
| 7 | 42.93 | soddisfatta |
| 8 | 34.45 | soddisfatta |
| 9 | 25.89 | soddisfatta |

Tabella 14-9 –Verifica a pressoflessione maschi murari: maschio di riva 2.

| Quota sezione [m] | $M_{Rd}(N_{Sd})$ [kN m] | Esito verifica $M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd}$ |
|----------------------|----------------------------|--|
| 0 | 387.47 | soddisfatta |
| 1 | 373.57 | soddisfatta |
| 2 | 359.51 | soddisfatta |
| 3 | 345.31 | soddisfatta |
| 3 | 231.11 | soddisfatta |
| 4 | 220.04 | soddisfatta |
| 5 | 208.84 | soddisfatta |
| 6 | 197.53 | soddisfatta |
| 6 | 86.40 | soddisfatta |
| 7 | 78.34 | soddisfatta |
| 8 | 70.19 | soddisfatta |
| 9 | 61.96 | non soddisfatta |

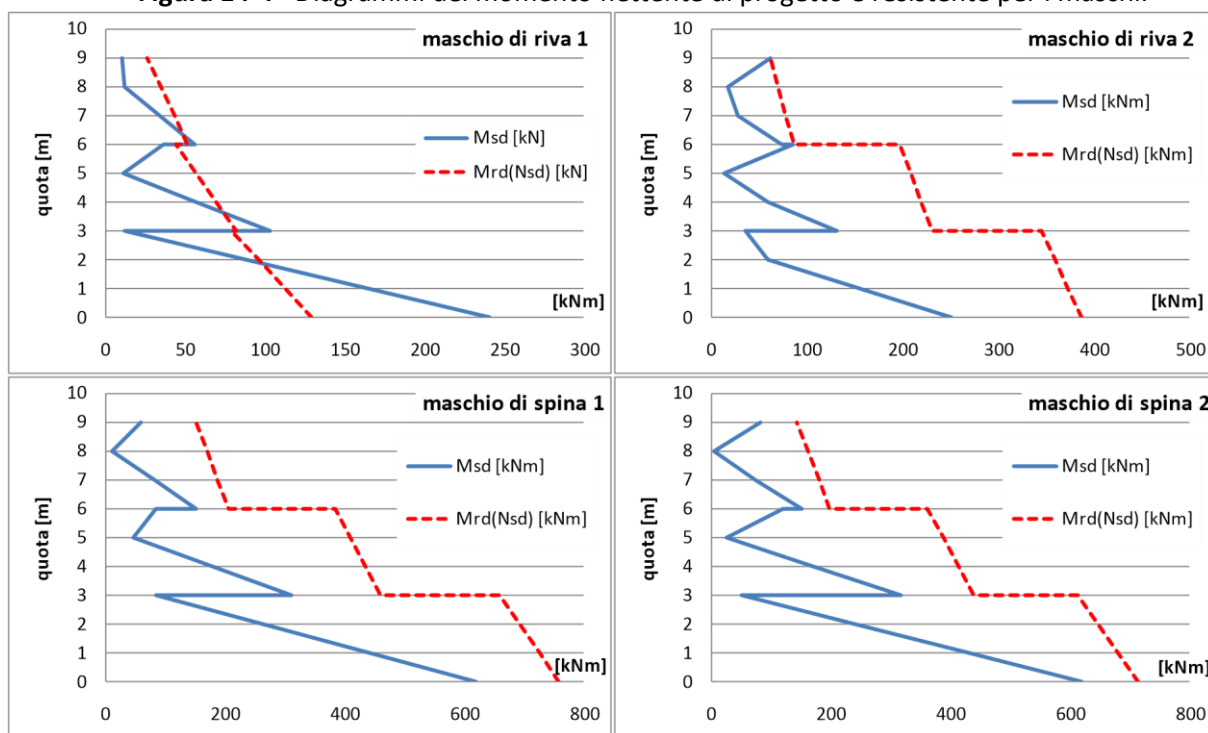
Tabella 14-10 – Verifica a pressoflessione maschi murari: maschio di spina 1.

| Quota sezione [m] | $M_{Rd}(N_{Sd})$ [kN m] | Esito verifica $M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd}$ |
|-------------------|-------------------------|---|
| 0 | 758.57 | soddisfatta |
| 1 | 726.05 | soddisfatta |
| 2 | 693.18 | soddisfatta |
| 3 | 659.95 | soddisfatta |
| 3 | 460.52 | soddisfatta |
| 4 | 434.97 | soddisfatta |
| 5 | 409.17 | soddisfatta |
| 6 | 383.10 | soddisfatta |
| 6 | 205.24 | soddisfatta |
| 7 | 187.19 | soddisfatta |
| 8 | 168.96 | soddisfatta |
| 9 | 150.56 | soddisfatta |

Tabella 14-11 – Verifica a pressoflessione maschi murari: maschio di spina 2.

| Quota sezione [m] | $M_{Rd}(N_{Sd})$ [kN m] | Esito verifica $M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd}$ |
|-------------------|-------------------------|---|
| 0 | 714.17 | soddisfatta |
| 1 | 681.17 | soddisfatta |
| 2 | 647.83 | soddisfatta |
| 3 | 614.12 | soddisfatta |
| 3 | 440.02 | soddisfatta |
| 4 | 414.26 | soddisfatta |
| 5 | 388.25 | soddisfatta |
| 6 | 361.97 | soddisfatta |
| 6 | 198.13 | soddisfatta |
| 7 | 180.02 | soddisfatta |
| 8 | 161.71 | soddisfatta |
| 9 | 143.25 | soddisfatta |

Figura 14-4– Diagrammi del momento flettente di progetto e resistente per i maschi.



14.3 DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI RINFORZO E VERIFICA DEGLI ELEMENTI RINFORZATI A PRESSOFLESSIONE

Si adotta il sistema di rinforzo di cui al § 14.1, che per semplicità si suppone applicato con continuità dall'estremità inferiore dei maschi murari (quota 0.0 m) all'estremità superiore (quota +9.0 m), sia sulla parete esterna che su quella interna.

In particolare, si ipotizza che l'ancoraggio del rinforzo al piede sia realizzato con un sistema di tipo meccanico. Inoltre, per il diagramma delle tensioni di compressione allo SLU, si adotta l'ipotesi semplificativa di *stress-block* esteso ad una porzione di sezione profonda $0.8 \cdot x$ (x = distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso).

L'esito delle verifiche a pressoflessione dei maschi rinforzati con FRP è riportato in Tabella 14-12 per il maschio di riva 1 e in Tabella 14-13 per il maschio di riva 2.

Tabella 14-12 –Verifica a pressoflessione maschi murari rinforzati: maschio di riva 1.

| Quota sezione [m] | Collasso del composito | ε_{fd} | $M_{Rd}(N_{Sd})$ [kN m] | Esito verifica |
|-------------------|------------------------|--------------------|-------------------------|----------------|
| 0 | rottura | 0.0151 | 335.8 | soddisfatta |
| 1 | distacco intermedio | 0.0086 | 231.6 | soddisfatta |
| 2 | distacco intermedio | 0.0086 | 215.4 | soddisfatta |
| 3 | distacco intermedio | 0.0086 | 199.1 | soddisfatta |
| 3 | distacco intermedio | 0.0086 | 200.6 | soddisfatta |
| 4 | distacco intermedio | 0.0086 | 188.6 | soddisfatta |
| 5 | distacco intermedio | 0.0086 | 176.6 | soddisfatta |
| 6 | distacco intermedio | 0.0086 | 164.3 | soddisfatta |
| 6 | distacco intermedio | 0.0086 | 169.8 | soddisfatta |
| 7 | distacco intermedio | 0.0086 | 162.0 | soddisfatta |
| 8 | distacco intermedio | 0.0086 | 154.0 | soddisfatta |
| 9 | distacco estremità | 0.0043 | 86.5 | soddisfatta |

Tabella 14-13 –Verifica a pressoflessione maschi murari rinforzati: maschio di riva 2.

| Quota sezione [m] | Collasso del composito | ε_{fd} | $M_{Rd}(N_{Sd})$ [kN m] | Esito verifica |
|-------------------|------------------------|--------------------|-------------------------|----------------|
| 0 | rottura | 0.0151 | 577.0 | soddisfatta |
| 1 | distacco intermedio | 0.0086 | 482.9 | soddisfatta |
| 2 | distacco intermedio | 0.0086 | 469.4 | soddisfatta |
| 3 | distacco intermedio | 0.0086 | 455.8 | soddisfatta |
| 3 | distacco intermedio | 0.0086 | 342.7 | soddisfatta |
| 4 | distacco intermedio | 0.0086 | 332.2 | soddisfatta |
| 5 | distacco intermedio | 0.0086 | 321.6 | soddisfatta |
| 6 | distacco intermedio | 0.0086 | 310.9 | soddisfatta |
| 6 | distacco intermedio | 0.0086 | 202.4 | soddisfatta |
| 7 | distacco intermedio | 0.0086 | 194.9 | soddisfatta |
| 8 | distacco intermedio | 0.0086 | 187.3 | soddisfatta |
| 9 | distacco estremità | 0.0043 | 121.3 | soddisfatta |

14.4 VERIFICA A TAGLIO DEI MASCHI PREESISTENTI

In Tabella 14-14 ed in Tabella 14-15 sono riportati i risultati della verifica a taglio eseguita, innanzitutto, sui maschi di spina 1 e 2, non oggetto di rinforzo a pressoflessione. Inoltre, per questi due stessi maschi murari, nella Figura 14-5 è istituito un confronto tra lo sforzo di taglio di progetto e quello resistente. Si evince il soddisfacimento della verifica a taglio in corrispondenza di tutte le sezioni di tali elementi strutturali. Conseguentemente essi non necessitano di alcun rinforzo a taglio.

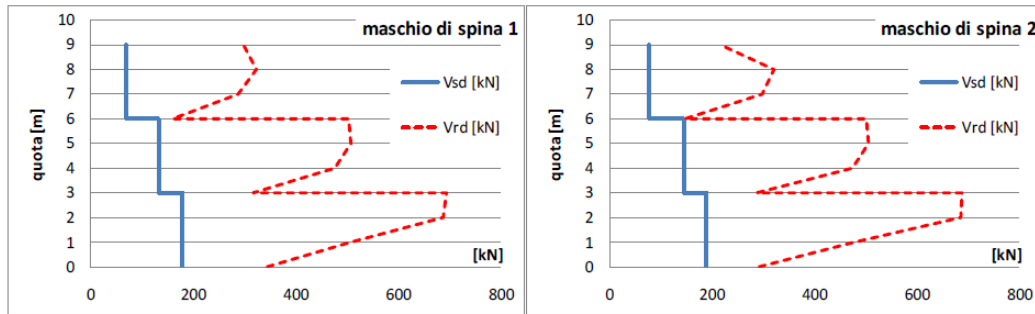


Figura 14-5 – Diagrammi del taglio di progetto e del taglio resistente per i maschi non rinforzati a flessione.

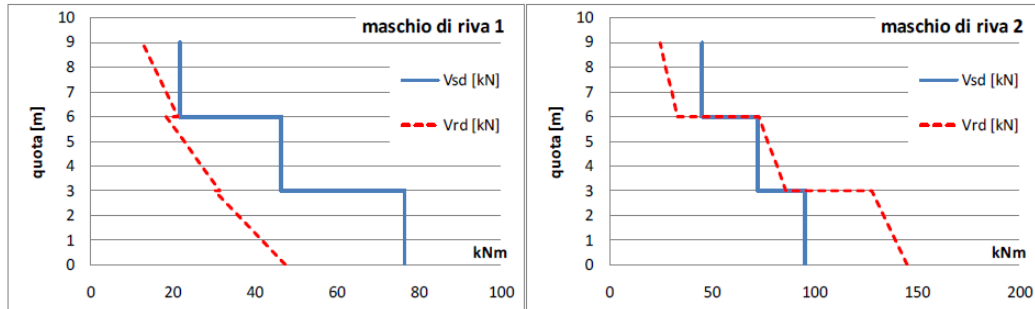


Figura 14-6 – Diagrammi del taglio di progetto e del taglio resistente per i maschi rinforzati a flessione.

Tabella 14-14 –Verifica a taglio maschi murari non rinforzati a flessione: maschio di spina 1.

| Quota sezione [m] | Taglio di progetto V_{sd} [kN] | Eccentricità e [m] | Lunghezza efficace l_c [m] | Tensione caratteristica f_{vk} [kN/m ²] | Taglio resistente V_{Rd} [kN] | Esito verifica $V_{Rd} \geq V_{sd}$ |
|-------------------|----------------------------------|----------------------|------------------------------|---|---------------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 178.52 | 1.11 | 1.17 | 1181.60 | 345.26 | soddisfatta |
| 1 | 178.52 | 0.83 | 2.01 | 1011.2 | 508.4 | soddisfatta |
| 2 | 178.52 | 0.52 | 2.94 | 937.2 | 689.3 | soddisfatta |
| 3 | 178.52 | 0.17 | 3.00 | 927.5 | 695.6 | soddisfatta |
| 3 | 131.92 | 0.94 | 1.68 | 1009.9 | 318.9 | soddisfatta |
| 4 | 131.92 | 0.57 | 2.78 | 919.8 | 478.6 | soddisfatta |
| 5 | 131.92 | 0.16 | 3.00 | 903.7 | 508.3 | soddisfatta |
| 6 | 131.92 | 0.31 | 3.00 | 896.6 | 504.4 | soddisfatta |
| 6 | 70.56 | 1.06 | 1.32 | 974.0 | 160.9 | soddisfatta |
| 7 | 70.56 | 0.63 | 2.62 | 879.6 | 288.2 | soddisfatta |
| 8 | 70.56 | 0.10 | 3.00 | 862.5 | 323.4 | soddisfatta |
| 9 | 70.56 | 0.57 | 2.79 | 859.7 | 299.4 | soddisfatta |

Tabella 14-15 –Verifica a taglio maschi murari non rinforzati a flessione: maschio di spina 2.

| Quota sezione [m] | Taglio di progetto V_{sd} [kN] | Eccentricità e [m] | Lunghezza efficace l_c [m] | Tensione caratteristica f_{vk} [kN/m ²] | Taglio resistente V_{Rd} [kN] | Esito verifica $V_{Rd} \geq V_{sd}$ |
|-------------------|----------------------------------|----------------------|------------------------------|---|---------------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 189.47 | 1.19 | 0.94 | 1243.54 | 292.38 | soddisfatta |
| 1 | 189.47 | 0.87 | 1.90 | 1008.6 | 478.7 | soddisfatta |
| 2 | 189.47 | 0.51 | 2.96 | 926.4 | 686.6 | soddisfatta |
| 3 | 189.47 | 0.11 | 3.00 | 917.9 | 688.4 | soddisfatta |
| 3 | 145.09 | 1.00 | 1.49 | 1025.1 | 287.3 | soddisfatta |
| 4 | 145.09 | 0.58 | 2.77 | 914.0 | 473.9 | soddisfatta |
| 5 | 145.09 | 0.09 | 3.00 | 898.0 | 505.1 | soddisfatta |
| 6 | 145.09 | 0.47 | 3.00 | 891.0 | 501.2 | soddisfatta |
| 6 | 78.5 | 1.10 | 1.20 | 984.7 | 147.6 | soddisfatta |
| 7 | 78.5 | 0.59 | 2.73 | 873.4 | 298.1 | soddisfatta |
| 8 | 78.5 | 0.04 | 3.00 | 859.7 | 322.4 | soddisfatta |
| 9 | 78.5 | 0.84 | 1.97 | 880.0 | 217.2 | soddisfatta |

Quanto già detto per i due maschi di spina viene ripetuto per i maschi di riva 1 e 2, oggetto di rinforzo a pressoflessione.

I risultati delle verifiche sono riportati nella Tabella 14-16 per il maschio di riva 1 ed in Tabella 14-17 per il maschio di riva 2.

Tabella 14-16 –Verifica a taglio maschi murari rinforzati a flessione: maschio di riva 1.

| Quota sezione [m] | Taglio di progetto V_{sd} [kN] | Asse neutro x [m] | Tensione caratteristica f_{vk} [kN/m ²] | Taglio resistente V_{Rd} [kN] | Esito verifica $V_{Rd} \geq V_{sd}$ |
|-------------------|----------------------------------|---------------------|---|---------------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 76.58 | 0.15 | 1488.4 | 57.7 | non soddisfatta |
| 1 | 76.58 | 0.11 | 1618.4 | 45.8 | non soddisfatta |
| 2 | 76.58 | 0.10 | 1568.5 | 40.0 | non soddisfatta |
| 3 | 76.58 | 0.09 | 1506.5 | 34.3 | non soddisfatta |
| 3 | 46.48 | 0.12 | 1520.4 | 35.5 | non soddisfatta |
| 4 | 46.48 | 0.11 | 1466.0 | 31.2 | non soddisfatta |
| 5 | 46.48 | 0.10 | 1399.8 | 26.9 | non soddisfatta |
| 6 | 46.48 | 0.09 | 1317.6 | 22.6 | non soddisfatta |
| 6 | 21.85 | 0.15 | 1371.9 | 25.3 | soddisfatta |
| 7 | 21.85 | 0.14 | 1314.6 | 22.4 | soddisfatta |
| 8 | 21.85 | 0.13 | 1247.3 | 19.6 | non soddisfatta |
| 9 | 21.85 | 0.07 | 1370.3 | 12.6 | non soddisfatta |

Tabella 14-17 –Verifica a taglio maschi murari rinforzati a flessione: maschio di riva 2.

| Quota sezione [m] | Taglio di progetto V_{sd} [kN] | Asse neutro x [m] | Tensione caratteristica f_{vk} [kN/m ²] | Taglio resistente V_{Rd} [kN] | Esito verifica $V_{Rd} \geq V_{sd}$ |
|-------------------|----------------------------------|---------------------|---|---------------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 95.43 | 0.34 | 1812.9 | 155.6 | soddisfatta |
| 1 | 95.43 | 0.30 | 1906.8 | 143.7 | soddisfatta |
| 2 | 95.43 | 0.29 | 1900.2 | 138.0 | soddisfatta |
| 3 | 95.43 | 0.28 | 1893.1 | 132.2 | soddisfatta |
| 3 | 72.51 | 0.26 | 1816.9 | 90.2 | soddisfatta |
| 4 | 72.51 | 0.25 | 1805.5 | 85.9 | soddisfatta |
| 5 | 72.51 | 0.24 | 1793.0 | 81.6 | soddisfatta |
| 6 | 72.51 | 0.23 | 1779.3 | 77.3 | soddisfatta |
| 6 | 45.1 | 0.19 | 1543.6 | 37.6 | non soddisfatta |
| 7 | 45.1 | 0.18 | 1511.4 | 34.7 | non soddisfatta |
| 8 | 45.1 | 0.17 | 1475.1 | 31.8 | non soddisfatta |
| 9 | 45.1 | 0.12 | 1647.8 | 24.9 | non soddisfatta |

14.5 DIMENSIONAMENTO DEL RINFORZO A TAGLIO

Si conviene di disporre lungo l'altezza dei maschi di riva un sistema di rinforzo a taglio costituito da strisce orizzontali aventi le stesse caratteristiche geometriche e meccaniche di quello adottato per il rinforzo a pressoflessione. In particolare, si ipotizza un passo p_f delle strisce di tessuto pari a 50 cm. I risultati delle verifiche, condotte secondo le regole di applicazione del § 5.4.1.2.2, sono esposti in Tabella 14-18 per il maschio di riva 1 ed in Tabella 14-19 per il maschio di riva 2. Si ha conferma che il passo ipotizzato è sufficiente a garantire il soddisfacimento delle verifiche allo SLU per taglio nei maschi di riva.

Tabella 14-18– Verifica a taglio in presenza di rinforzi a taglio: maschio di riva 1.

| Quota sezione [m] | Taglio di progetto V_{Sd} [kN] | Contributo muratura $V_{Rd,m}$ [kN] | Contributo FRP $V_{Rd,f}$ [kN] | Resistenza bielle $V_{Rd,max}$ [kN] | Taglio resistente V_{Rd} [kN] | Esito verifica $V_{Rd} \geq V_{Sd}$ | Stato limite |
|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| 0 | 76.58 | 57.7 | 124.02 | 1140 | 181.7 | soddisfatta | crisi FRP |
| 1 | 76.58 | 45.8 | 124.02 | 1140 | 169.8 | soddisfatta | crisi FRP |
| 2 | 76.58 | 40.0 | 124.02 | 1140 | 164.1 | soddisfatta | crisi FRP |
| 3 | 76.58 | 34.3 | 124.02 | 1140 | 158.3 | soddisfatta | crisi FRP |
| 3 | 46.48 | 35.5 | 124.02 | 855 | 159.5 | soddisfatta | crisi FRP |
| 4 | 46.48 | 31.2 | 124.02 | 855 | 155.2 | soddisfatta | crisi FRP |
| 5 | 46.48 | 26.9 | 124.02 | 855 | 150.9 | soddisfatta | crisi FRP |
| 6 | 46.48 | 22.6 | 124.02 | 855 | 146.6 | soddisfatta | crisi FRP |
| 6 | 21.85 | 25.3 | 124.02 | 570 | 149.3 | soddisfatta | crisi FRP |
| 7 | 21.85 | 22.4 | 124.02 | 570 | 146.4 | soddisfatta | crisi FRP |
| 8 | 21.85 | 19.6 | 124.02 | 570 | 143.6 | soddisfatta | crisi FRP |
| 9 | 21.85 | 12.6 | 124.02 | 570 | 136.6 | soddisfatta | crisi FRP |

Tabella 14-19 –Verifica a taglio in presenza di rinforzi a taglio: maschio di riva 2.

| Quota sezione [m] | Taglio di progetto V_{Sd} [kN] | Contributo muratura $V_{Rd,m}$ [kN] | Contributo FRP $V_{Rd,f}$ [kN] | Resistenza bielle $V_{Rd,max}$ [kN] | Taglio resistente V_{Rd} [kN] | Esito verifica $V_{Rd} \geq V_{Sd}$ | Stato limite |
|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| 0 | 95.43 | 155.61 | 124.02 | 1140.0 | 279.6 | soddisfatta | crisi FRP |
| 1 | 95.43 | 143.70 | 124.02 | 1140.0 | 267.7 | soddisfatta | crisi FRP |
| 2 | 95.43 | 137.96 | 124.02 | 1140.0 | 262.0 | soddisfatta | crisi FRP |
| 3 | 95.43 | 132.22 | 124.02 | 1140.0 | 256.2 | soddisfatta | crisi FRP |
| 3 | 72.51 | 90.17 | 124.02 | 855.0 | 214.2 | soddisfatta | crisi FRP |
| 4 | 72.51 | 85.86 | 124.02 | 855.0 | 209.9 | soddisfatta | crisi FRP |
| 5 | 72.51 | 81.56 | 124.02 | 855.0 | 205.6 | soddisfatta | crisi FRP |
| 6 | 72.51 | 77.25 | 124.02 | 855.0 | 201.3 | soddisfatta | crisi FRP |
| 6 | 45.1 | 37.57 | 124.02 | 570.0 | 161.6 | soddisfatta | crisi FRP |
| 7 | 45.1 | 34.70 | 124.02 | 570.0 | 158.7 | soddisfatta | crisi FRP |
| 8 | 45.1 | 31.83 | 124.02 | 570.0 | 155.9 | soddisfatta | crisi FRP |
| 9 | 45.1 | 24.88 | 124.02 | 570.0 | 148.9 | soddisfatta | crisi FRP |

Infine, nella Figura 14-7 è rappresentata schematicamente la disposizione sulla parete oggetto dell'intervento dei sistemi di rinforzo FRP nei riguardi della pressoflessione e del taglio nel piano.

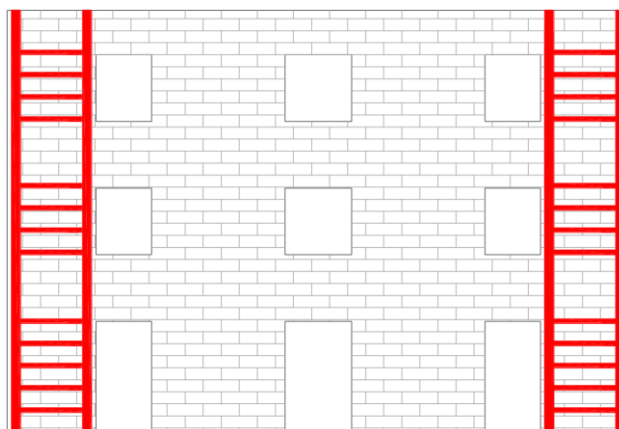


Figura 14-7 – schema della disposizione del sistema di rinforzo FRP per la parete oggetto di studio.

14.6 VERIFICA NEI CONFRONTI DEL RIBALTAMENTO SEMPLICE

Tenendo conto delle indicazioni riportate nel §5.4.1.1, è di seguito esposta la verifica del sistema di rinforzo da adottare sulla parete oggetto di studio nei confronti del ribaltamento semplice (Figura 14-8). Al riguardo, è ipotizzata una cerchiatura completa della fabbrica muraria in corrispondenza dei tre impalcati. Essa è realizzata con strisce orizzontali aventi gli stessi spessori e le stesse caratteristiche meccaniche di quelle adottate per il rinforzo a pressoflessione (Figura 14-9). Il solo rinforzo del terzo

livello è realizzato sovrapponendo due di tali strati per cui il competente spessore è pari a 0.33 mm. La larghezza delle strisce è invece pari a 350 mm al terzo ed al secondo livello ed a 200 mm al primo livello.

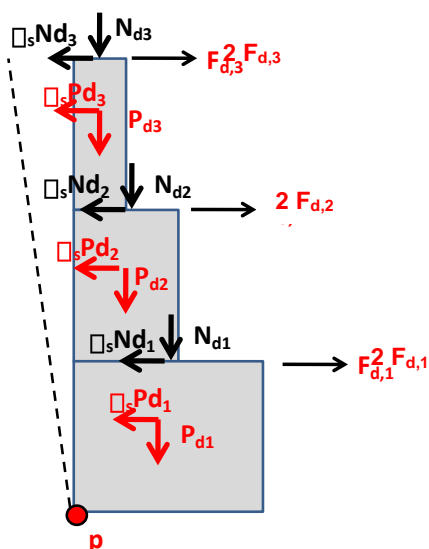


Figura 14-8 –Schema per la verifica a ribaltamento semplice.

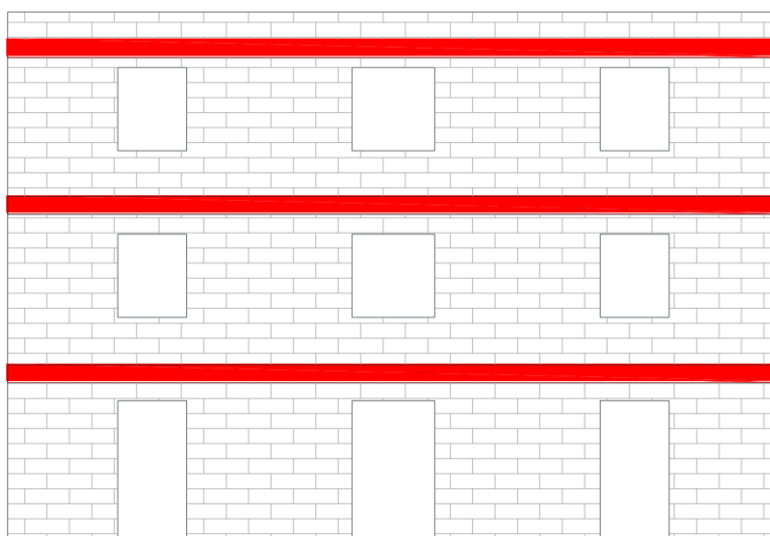


Figura 14-9 – Disposizione del rinforzo progettato per la verifica a ribaltamento semplice.

Si suppone che le azioni di interesse per la verifica nei confronti del ribaltamento semplice abbiamo i valori di seguito riportati:

- $P_{d1}=288$ kN, $P_{d2}=243$ kN, $P_{d3}=162$ kN; $N_{d1}=155$ kN, $N_{d2}=155$ kN, $N_{d3}=155$ kN;
- $\gamma_s=1.5$.

È agevole verificare che il ritegno esercitato a ciascun piano dalla cerchiatura di FRP ha la seguente intensità:

- $2 \cdot F_{d,1} = 188 \text{ kN}$,
- $2 \cdot F_{d,2} = 377 \text{ kN}$,
- $2 \cdot F_{d,3} = 566 \text{ kN}$,

essendo $F_{d,k}$ lo sforzo che compete al rinforzo di FRP ubicato in corrispondenza dell'impalcato k esimo ($k = 1, 2, 3$).

Nel caso in esame, supponendo che la cerchiatura completa sia assicurata da una sovrapposizione adeguatamente estesa delle strisce di FRP ovvero mediante un dispositivo di tipo meccanico, l'azione di ritegno esercitata dal composito FRP è garantito se è soddisfatta la verifica a trazione di quest'ultimo nei riguardi dello stato limite ultimo per rottura. Risulta:

$$F_{d,1} \leq (230000 \cdot 200 \cdot 0.165 \cdot 10^{-3} \cdot 0.0151) \text{ kN} = 115 \text{ kN};$$

$$F_{d,2} \leq (230000 \cdot 350 \cdot 0.165 \cdot 10^{-3} \cdot 0.0151) \text{ kN} = 201 \text{ kN};$$

$$F_{d,3} \leq (230000 \cdot 350 \cdot 0.330 \cdot 10^{-3} \cdot 0.0151) \text{ kN} = 401 \text{ kN}.$$

Le suddette disequazioni dimostrano che il dimensionamento adottato per le tre cerchiature è adeguato.