



Regione Lombardia

Est Ticino Villoresi



Consorzio di Bonifica

D.G.R. XI/4337 del 22.02.2021 - CONVENZIONE PER MANUTENZIONE STRAORDINARIA DELLA ROGGIA CARONA IN COMUNE DI LACCHIARELLA (MI), DEL NAVIGLIACCIO, VERNAVOLA E VERNAVOLINO IN COMUNE DI PAVIA (PV) E DEL TICINELLO MENDOSIO IN COMUNE DI BINASCO (MI)

LAVORI DI DIFESA E SOSTEGNO SPONDALE MEDIANTE RISAGOMATURA E FORMAZIONE DI SCOGLIERE"

CUP C97H21002240002

PROGETTO DEFINITIVO

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

geom. Andrea Ferrari

ELABORATO

**R.02-CAR**

IL PROGETTISTA

ing. Alessandro Di Leo

DESCRIZIONE

**RELAZIONE DI CALCOLO**  
Roggia Carona

SCALA

DATA  
GENNAIO 2022

REV.

DATA

DESCRIZIONE MODIFICA

REDATTO

CONTROLL.

APPROVATO

Est Ticino Villoresi



Consorzio di Bonifica

CONSORZIO DI BONIFICA EST TICINO VILLORESI

Via Ludovico Ariosto, 30

20145 - Milano

tel. 02 48561301

e.mail: [info@etvilloresi.it](mailto:info@etvilloresi.it) - PEC: [etvilloresi@pec.it](mailto:etvilloresi@pec.it)

## PREMESSA

La presente relazione riguarda gli aspetti geotecnici e strutturali del muro di sostegno a "L" da addossare alla sponda sinistra della roggia Carona, appena a valle del ponte ferroviario.

Sul piano geotecnico, il campo delle sollecitazioni verrà indagato facendo riferimento alla teoria di Rankine, tenuto conto di un carico di esercizio funzionale al transito dei mezzi d'opera.

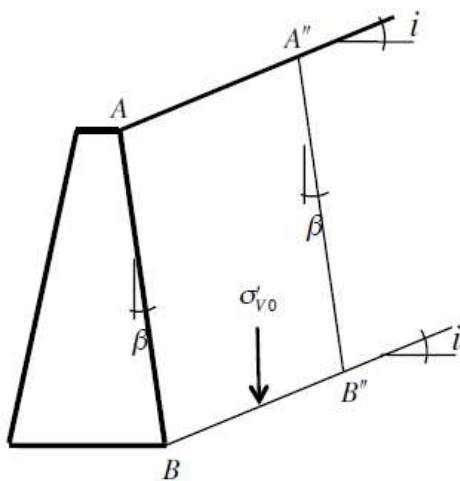
Gli aspetti strutturali saranno trattati agli Stati Limite Ultimi e agli Stati Limite di Esercizio con particolare attenzione agli effetti fessurativi.

Le condizioni di carico sismiche sono state affrontate sommariamente in quanto risultate nettamente inferiori alle condizioni statiche.

La normativa di riferimento per la presente relazione è:

"Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 - Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni".

## ANALISI GEOTECNICA



$$\gamma := 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\varphi' := 24 \quad \bullet$$

$$c' := 0 \text{ kPa}$$

$$i_p := 0$$

$$\beta := 0 \quad \bullet$$

$$H := 1.5 \text{ m} \quad b := 20 \text{ cm}$$

$$B := 2.2 \text{ m} \quad sp := 30 \text{ cm}$$

$$Y_G := 1.3$$

$$Y_{Gc1s} := 1$$

$$Y_O := 1.5$$

$$q_o := 20 \text{ kPa}$$

$$q_G := \gamma \cdot 0.5 \text{ m}$$

$$Y_{cls} := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Y_{cls} := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad W_{cls} := Y_{Gcls} \cdot (H \cdot b + B \cdot sp) \cdot Y_{cls} = 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

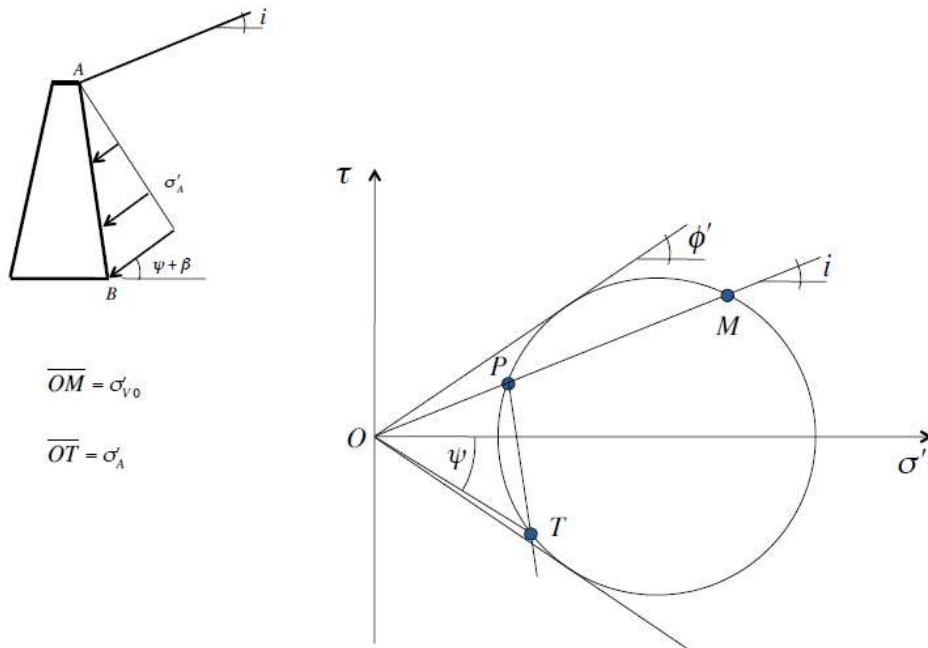
$$X_{G.cls} := \frac{0.5 \cdot H \cdot b^2 + 0.5 \cdot B \cdot sp^2}{H \cdot b + B \cdot sp} = 0.134 \text{ m}$$

$$z := H + H \cdot \tan(\beta) \cdot \tan\left(\frac{i_p}{2}\right) = 1.5 \text{ m}$$

$$\sigma'_{v0} := \gamma \cdot z \cdot \cos \left( i_p \right) = 30 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_A := k_A \cdot \sigma'_{v0}$$

$$BA := \frac{H}{\cos(\beta)} = 1.5 \text{ m}$$



$$\sigma := \sigma'_{v0} \cdot \cos(i_p) = 30 \text{ kPa}$$

$$\tau := \sigma'_{v0} \cdot \sin(i_p) = 0 \text{ kPa}$$

$$M_- := \left[ \frac{\sigma}{\tau} \right] \cdot \frac{1}{1 \text{ kPa}}$$

$$R_{min} := \frac{\left( \frac{\sigma}{\sin(\varphi')} - \sqrt{\left( \frac{\sigma}{\sin(\varphi')} \right)^2 - \left( \frac{1}{(\sin(\varphi'))^2} - 1 \right) \cdot (\sigma^2 + \tau^2)} \right)}{\frac{1}{(\sin(\varphi'))^2} - 1} = 8.674 \text{ kPa}$$

$$R_{max} := \frac{\left( \frac{\sigma}{\sin(\varphi')} + \sqrt{\left( \frac{\sigma}{\sin(\varphi')} \right)^2 - \left( \frac{1}{(\sin(\varphi'))^2} - 1 \right) \cdot (\sigma^2 + \tau^2)} \right)}{\frac{1}{(\sin(\varphi'))^2} - 1} = 20.568 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{1min} := \frac{R_{min}}{\sin(\varphi')} - R_{min} = 12.7 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{2min} := \left( \frac{R_{min}}{\sin(\varphi')} + R_{min} \right) = 30 \text{ kPa}$$

Tensioni principali

$$R_- := \frac{R_{min}}{1 \text{ kPa}}$$

$$f1(\sigma_-, \tau_-) := \left( \sigma_- - \frac{R_-}{\sin(\varphi')} \right)^2 + \tau_-^2 - R_-^2$$

Cerchio di Mohr

$$f2(\sigma_-, \tau_-) := \sigma_- \cdot \tan(i_p) - \tau_-$$

Retta parallela al pendio

$$P_- := \text{roots} \left( \left[ \begin{array}{c} f1(\sigma_-, \tau_-) \\ f2(\sigma_-, \tau_-) \end{array} \right], \left[ \begin{array}{c} \sigma_- \\ \tau_- \end{array} \right], \left[ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \right] \right) = \left[ \begin{array}{c} 12.7 \\ 0 \end{array} \right]$$

Coordinate del punto P

$$f3(\sigma_-, \tau_-) := (\sigma_- - p_{-1}) - \cot\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \cdot (\tau_- - p_{-2})$$

Retta passante per P e parallela al paramento interno

$$\text{if } i_p > 0$$

$$T_- := \text{roots} \left( \left[ \begin{array}{c} f1(\sigma_-, \tau_-) \\ f3(\sigma_-, \tau_-) \end{array} \right], \left[ \begin{array}{c} \sigma_- \\ \tau_- \end{array} \right], \left[ \begin{array}{c} M_{-1} \\ -p_{-2} \end{array} \right] \right)$$

$$\text{else}$$

$$T_- := M_- - \left[ \begin{array}{c} 2 \cdot \frac{R_{min}}{1 \text{ kPa}} \\ 0 \end{array} \right]$$

$$T := 1 \text{ kPa} \cdot T_- = \left[ \begin{array}{c} 12.652 \\ 0 \end{array} \right] \text{ kPa}$$

Coordinate del punto T

$$\sigma'_A := \sqrt{(T_1)^2 + (T_2)^2} = 12.652 \text{ kPa}$$

$$\psi := \text{atan}\left(\frac{-T_2}{T_1}\right) = 0^\circ$$

$$k_A := \frac{\sigma'_A}{\sigma'_{v0}} = 0.422$$

$$\alpha := \beta + \psi = 0^\circ$$

$$\sigma'_{A,max} := \gamma_G \cdot \sigma'_A - 2 \cdot c' \cdot \sqrt{k_A} + \gamma_G \cdot q_G \cdot k_A + \gamma_Q \cdot q_Q \cdot k_A = 34.6 \text{ kPa}$$

Tensione attiva al piede muro

$$\sigma'_{A,min} := \gamma_G \cdot q_G \cdot k_A + \gamma_Q \cdot q_Q \cdot k_A - 2 \cdot c' \cdot \sqrt{k_A} = 18.134 \text{ kPa}$$

Tensione attiva in testa muro

$$\text{if } \sigma'_{A,min} < 0$$

$$BA_A := BA \cdot \frac{\sigma'_{A,max}}{\sigma'_{A,max} - \sigma'_{A,min}}$$

$$\text{else}$$

$$BA_A := BA$$

$$BA_A = 1.5 \text{ m}$$

Altezza del paramento su cui agisce la tensione attiva

$$\text{if } \sigma'_{A,min} < 0$$

$$P_A := \frac{1}{2} \cdot BA_A \cdot \sigma'_{A,max}$$

$$\text{else}$$

$$P_A := \frac{BA_A}{2} \cdot (\sigma'_{A,max} + \sigma'_{A,min})$$

$$P_A = 39.537 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Spinta attiva sul muro inclinata di  $\psi$

$$P_{A.vett} := \begin{bmatrix} P_A \cdot \cos(\alpha) \\ P_A \cdot \sin(\alpha) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 39.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \text{in forma vettoriale}$$

$$\text{if } \sigma'_{A.min} < 0$$

$$b_P := \frac{BA_A}{3}$$

else

$$b_P := \frac{(\sigma'_{A.max} - \sigma'_{A.min}) \cdot BA_A^2 \cdot \frac{2}{3} + \sigma'_{A.min} \cdot BA_A^2}{(\sigma'_{A.max} + \sigma'_{A.min}) \cdot BA_A}$$

$$b_P = 0.828 \text{ m}$$

Punto di applicazione della spinta attiva sul paramento

$$b_{P.vett} := \begin{bmatrix} b_P \cdot \sin(\beta) \\ b_P \cdot \cos(\beta) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.828 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ m} \quad \text{in forma vettoriale}$$

### VERIFICA A RIBALTAMENTO

$$Y_{R.rib} := 1.15$$

$$S_v := Y_{Gcls} \cdot W_{cls} + P_A \cdot \sin(\alpha) = 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Componente verticale della spinta totale (spinta attiva e peso muro)

$$S_h := P_A \cdot \cos(\alpha) = 39.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Componente orizzontale della spinta totale (spinta attiva e peso muro)

$$\lambda := \text{atan}\left(\frac{S_v}{S_h}\right) = 31.3^\circ$$

Inclinazione del vettore spinta totale

$$M_{rib} := Y_{R.rib} \cdot \left( P_{A.vett_1} \cdot b_{P.vett_2} - P_{A.vett_2} \cdot b_{P.vett_1} \right) = 37.6 \text{ kN}$$

calcolato rispetto al punto B

$$M_{stab.cls} := W_{cls} \cdot X_{G.cls} = 3.22 \text{ kN}$$

calcolato rispetto al punto B

$$M_{stab.reaz} := M_{rib} - M_{stab.cls} = 34.4 \text{ kN}$$

La reazione del terreno deve essere tale da bilanciare

$$M_{stab.reaz} = 34.4 \text{ kN}$$

Nell'ipotesi di diagramma delle tensioni trapezio:

$$\sigma_1 := \frac{S_v}{B} = 10.9 \text{ kPa} \quad \sigma_2 := \frac{6 \cdot M_{stab.reaz}}{B^2} - 3 \cdot \sigma_1 = 9.95 \text{ kPa} \quad \text{con } \sigma_2 > 0 \text{ necessariamente}$$

Oss : Nel caso di  $\sigma_2 < 0$ , la larghezza di base può essere ridotta in quanto eccessivamente estesa per le sollecitazioni in campo; nel caso di  $B_e < B$  occorre verificare l'equilibrio del sistema in condizioni di deformazioni plastiche.

$$\text{if } \sigma_2 \leq \sigma_1 \quad R := \begin{bmatrix} \sigma_1 - \sigma_2 \\ \sigma_1 + \sigma_2 \\ B \end{bmatrix}$$

$$\text{else} \quad R := \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \cdot S_v^2 \\ 3 \cdot (B \cdot S_v - M_{stab.reaz}) \\ 3 \cdot (B \cdot S_v - M_{stab.reaz}) \\ S_v \end{bmatrix}$$

$$\sigma_{t.min} := R_1 = 0.964 \text{ kPa} \quad \sigma_{t.max} := R_2 = 20.9 \text{ kPa} \quad B_e := R_3 = 2.2 \text{ m}$$

Nel caso di  $\sigma_{t.max}$  maggiore della tensione ammissibile del terreno, si considerano le deformazioni plastiche per l'equilibrio del sistema.

$$\text{if } \sigma_2 \leq \sigma_1 \quad M_{stab} := M_{stab.cls} + B^2 \cdot \left( \frac{\sigma_2}{6} + \frac{\sigma_1}{2} \right)$$

$$\text{else} \quad M_{stab} := M_{stab.cls} + \sigma_{t.max} \cdot \frac{B_e}{2} \cdot \left( B - \frac{B_e}{3} \right)$$

$$M_{stab} = 37.6 \text{ kN}$$

### VERIFICA A SCORRIMENTO

$$\gamma_{R.scor} := 1.10$$

$$H_{stab} := \frac{S_v \cdot \tan(\varphi')}{\gamma_{R.scor}} = 9.71 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\frac{H_{stab}}{S_h} = 0.246$$

La verifica a scorrimento è insoddisfatta per cui occorre prolungare la larghezza di base del muro di sostegno fino a ottenere un contrasto sulla sponda opposta.

### VERIFICA CAPACITA' PORTANTE DEL TERRENO

$$\gamma_{R,port} := 1.40$$

$$L := 160 \text{ m} \text{ lunghezza del muro}$$

$$\omega := 0^\circ \text{ inclinazione fondazione}$$

$$H_{sd} := 0 \text{ forze orizzontali equilibrate dal contrasto sulla sponda opposta}$$

$$N_{sd} := S_v$$

$$e_c := \frac{M_{stab} - M_{rib}}{S_v} = -1.498 \cdot 10^{-13} \text{ cm} \quad B_r := B_e - 2 \cdot e_c = 220 \text{ cm}$$

$$\gamma_R := 1.4$$

$$N_q := \frac{1 + \sin(\varphi')}{1 - \sin(\varphi')} \cdot e^{\mathbf{n} \cdot \tan(\varphi')} = 9.603$$

$$N_c := (N_q - 1) \cdot \cot(\varphi') = 19.324$$

$$N_y := 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan(\varphi') = 9.442$$

$$s_y := 1 + 0.1 \cdot \frac{1 + \sin(\varphi')}{1 - \sin(\varphi')} \cdot \frac{B_r}{L} = 1.003$$

$$s_q := s_y$$

$$s_c := 1 + 0.2 \cdot \frac{1 + \sin(\varphi')}{1 - \sin(\varphi')} \cdot \frac{B_r}{L} = 1.007$$

$$\mu := \frac{2 + \frac{B_r}{L}}{1 + \frac{B_r}{L}} = 1.986$$

$$i_y := \left( 1 - \frac{H_{sd}}{N_{sd} + B_r \cdot L \cdot c' \cdot \cot(\varphi')} \right)^{\mu + 1} = 1$$

$$i_q := \left( 1 - \frac{H_{sd}}{(N_{sd} + B_r \cdot L \cdot c' \cdot \cot(\varphi'))} \right)^{\mu} = 1$$

$$i_c := i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan(\varphi')} = 1$$

$$b_y := (1 - \omega \cdot \tan(\varphi'))^2 = 1$$

$$b_q := b_y$$

$$b_c := b_q - \frac{1 - b_q}{N_c \cdot \tan(\varphi')} = 1$$

$$g_y := (1 - \tan(\lambda))^2 = 0.154$$

$$g_q := g_y$$

$$g_c := g_q - \frac{1 - g_q}{N_c \cdot \tan(\varphi')} = 0.056$$

$$\text{if } sp < B_r \quad \text{coefficienti correttivi cautelativamente da trascurare}$$

$$d_q := 1 + 2 \cdot \tan(\varphi') \cdot (1 - \sin(\varphi'))^2 \cdot \frac{sp}{B_r}$$

else

$$d_q := 1 + 2 \cdot \tan(\varphi') \cdot (1 - \sin(\varphi'))^2 \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{sp}{B_r}\right)$$

$$d_q = 1.043$$

$$d_c := d_q - \frac{1 - d_q}{N_c \cdot \tan(\varphi')} = 1.048$$

$$q_{lim} := \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B_r \cdot N_y \cdot s_y \cdot i_y \cdot b_y \cdot g_y + c' \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot b_c \cdot g_c + (0) \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot b_q \cdot g_q = 32.1831 \text{ kPa}$$

$$N_{Rd} := \frac{q_{lim} \cdot B_r}{\gamma_{R.port}} = 50.574 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{Rd} := \frac{q_{lim}}{\gamma_{R.port}} = 23 \text{ kPa}$$

$$N_{sd} = 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \sigma_{t.max} = 20.9 \text{ kPa}$$

Il carico limite e la tensione limite sul terreno sono superiori al carico e alla tensione agli SLU, pur rimanendo in campo elastico.

## VERIFICHE IN CONDIZIONI SISMICHE



Il sito in cui inserire le opere in progetto è stato caratterizzato dal punto di vista sismico e le risultanze mostrano che i seguenti valori per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV):

$$a_{MAX} := 0.086 \quad \beta_s := 0.38$$

$$k_h := \beta_s \cdot a_{MAX} = 0.0327$$

$$k_v := 0.5 \cdot k_h = 0.0163$$

$$\eta := \operatorname{atan}\left(\frac{k_h}{1 + k_v}\right)$$

$$k_{AE} := \frac{\cos(\varphi' - \tau)^2}{\cos(\eta)^2 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi') \cdot \sin(\varphi' - \eta)}{\cos(\eta)}}\right)} = 0.6 \quad k_A = 0.422$$

I parametri sopra esposti, unitamente ai coefficienti di partecipazione della combinazione sismica, porgono i seguenti valori di riferimento:

$$\psi_{21} := 0.6$$

$$\sigma'_{A,max,E} := 1 \cdot \sigma'_A - 2 \cdot c' \cdot \sqrt{k_{AE}} + 1 \cdot q_G \cdot k_{AE} + \psi_{21} \cdot q_Q \cdot k_A = 23.7 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{A,min,E} := 1 \cdot q_G \cdot k_{AE} + 0 \cdot q_Q \cdot k_{AE} - 2 \cdot c' \cdot \sqrt{k_{AE}} = 6.003 \text{ kPa}$$

$$\text{if } \sigma'_{A,min,E} < 0$$

$$BA_{AE} := BA \cdot \frac{\sigma'_{A,max,E}}{\sigma'_{A,max,E} - \sigma'_{A,min,E}}$$

else

$$BA_{AE} := BA$$

$$BA_{AE} = 1.5 \text{ m}$$

$$\text{if } \sigma'_{A,min,E} < 0$$

$$P_{AE} := \frac{1}{2} \cdot BA_{AE} \cdot \sigma'_{A,max,E}$$

else

$$P_{AE} := \frac{BA_{AE}}{2} \cdot (\sigma'_{A,max,E} + \sigma'_{A,min,E})$$

$$P_A = 39.537 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \text{spinta attiva STATICA totale agli SLU}$$

$$P_{AE} = 22.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \text{spinta attiva SISMICA totale agli SLV}$$

Dal confronto del valore della spinta attiva emerge che la combinazione di carico sismica è molto meno gravosa della combinazione di carico statica per cui vengono omesse tutte le possibili combinazioni sismiche, senza derogare sulla stabilità dell'opera.

## DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE

$$\gamma_{G1} := 1.3$$

$$\gamma_Q := 1.5$$

$$\alpha_{cc} := 0.85$$

$$\gamma_c := 1.5$$

$$\gamma_s := 1.15$$

Calcestruzzo impiegato C35/45, XC4, classe di consistenza S3, dimensione massima aggregato D32mm, copriferro minimo 4 cm; acciaio impiegato B450C.

$$f_{yk} := 450 \text{ MPa}$$

$$f_{ck} := 35 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 391.3043 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19.8333 \text{ MPa}$$

$$c_f := 5 \text{ cm}$$

$$\phi_f := 16 \text{ mm}$$

$$b = 20 \text{ cm}$$

$$p_f := 25 \text{ cm}$$

$$b_f := 100 \text{ cm}$$

$$A_s := \frac{1}{p_f} \cdot \frac{\phi_f^2}{4} \cdot \pi = 8.042 \text{ cm}^2$$

$$A'_s := A_s$$

$$\rho := \frac{A_s + A'_s}{b \cdot b_f} = 0.804 \%$$

$$\rho_{min} := 0.2 \%$$

$$M_{x.Sd} := \frac{M_{rib}}{\gamma_{R.rib}} = 32.737 \text{ kN}$$

**Titolo :** \_\_\_\_\_

**N° strati barre**  **Zoom**

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	20

N°	As [cm²]	d [cm]
1	8.04	5
2	8.04	15

**Sollecitazioni**

S.L.U. ☐ Metodo n ☐

N<sub>Ed</sub>  kN

M<sub>xEd</sub>  kNm

M<sub>yEd</sub>  kNm

**Materiali**

**B450C** **C35/45**

$\epsilon_{su}$   ‰  $\epsilon_{c2}$   ‰

$f_{yd}$   N/mm²  $\epsilon_{cu}$   ‰

$E_s$   N/mm²  $f_{cd}$   MPa

$E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   [?]

$\epsilon_{syd}$   ‰  $\sigma_{c,adm}$   MPa

$\sigma_{s,adm}$   N/mm²  $\tau_{co}$   MPa

$\tau_{cl}$   MPa

**Tipo rottura**

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

M<sub>xRd</sub>  kNm

$\sigma_c$   N/mm²

$\sigma_s$   N/mm²

$\epsilon_c$   ‰

$\epsilon_s$   ‰

d  cm

x  x/d   $\delta$

**Tipo Sezione**

☒ Rettan.re ☐ Trapezi

☐ a T ☐ Circolare

☐ Rettangoli ☐ Coord.

**Metodo di calcolo**

☒ S.L.U. + ☐ S.L.U. -

☐ Metodo n

**Tipo flessione**

☒ Retta ☐ Deviata

N° rett.

Calcola MRd

o  cm

☐ Precompresso

$$M_{x.Rd} := 51.32 \text{ kN}$$

$$M_{x.Sd} < M_{x.Rd} = 1 \quad \text{Verifica a flessione}$$

$$\cot \theta := 1 \quad \alpha_c := 1 \quad \nu := 0.5$$

$$b = 20 \text{ cm} \quad b_t := 1 \text{ m} \quad p_t := 25 \text{ cm} \quad c_f := 5 \text{ cm} \quad \Phi_t := 12 \text{ mm}$$

$$A_{st} := \frac{1 \text{ m}}{p_t} \cdot \frac{\Phi_t^2}{4} \cdot \pi = 4.5239 \text{ cm}^2$$

$$d := b - c_f = 15 \text{ cm} \quad b_w := b_t = 1 \text{ m}$$

$$\text{if } \left( 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}} \right) < 2$$

$$k := 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}} = 2.1547$$

else

$$k := 2$$

$$\nu_{min} := 0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}} \text{ MPa} = 0.5857 \text{ MPa}$$

$$\rho_1 := \frac{2 \cdot A_{st}}{b_w \cdot d} = 0.6032 \% \quad \rho_1 < 0.02 = 1$$

$$\sigma_{cp} := H \cdot \gamma_{cls} = 37.5 \text{ kPa} \quad \sigma_{cp} < 0.2 \cdot f_{cd} = 1$$

**Resistenza a taglio senza armature:**

$$V_{Rd.c} := \text{Max} \left( \left( \frac{0.18 \cdot k \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \rho_1 \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}}} \text{ MPa}}{\gamma_c} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right) \cdot b_w \cdot d, \left( \nu_{min} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right) \cdot b_w \cdot d \right) = 100.3405 \text{ kN}$$

$$\text{Inclinazione dei puntoni (variabile 1.0-2.5):} \quad \cot \theta := 1.20$$

$$\text{Inclinazione delle staffe:} \quad \alpha_{st} := 90^\circ$$

$$\text{Coefficiente maggiorativo:} \quad \alpha_c := 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} = 1.0019 \quad \sigma_{cp} < 0.25 \cdot f_{cd} = 1$$

$$V_{Rsd} := 0.9 \cdot (b - c_f) \cdot \frac{2 \cdot A_{st}}{p_t} \cdot f_{yd} \cdot (\cot(\alpha_{st}) + \cot \theta) \cdot \sin(\alpha_{st}) = 191.184 \text{ kN}$$

$$V_{Rcd} := 0.9 \cdot (b - c_f) \cdot b_t \cdot \alpha_c \cdot \nu \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot(\alpha_{st}) + \cot \theta}{1 + \cot \theta^2} = 670.641 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} := \text{Min}(V_{Rsd}, V_{Rcd}) = 191.184 \text{ kN} \quad V_{Sd} := S_h \cdot 1 \text{ m} = 39.537 \text{ m} \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$V_{Sd} < V_{Rd} = 1 \quad \text{Verifica a taglio}$$

$$\psi_{02} := 0.7$$

$$\gamma_{G1} := 1.0$$

$$\gamma_{Q1} := 1.0$$

$$n := 15$$

$$\sigma'_{A,max.1} := \gamma_{G1} \cdot \sigma'_A - 2 \cdot c' \cdot \sqrt{k_A} + \gamma_{G1} \cdot q_G \cdot k_A + \gamma_{Q1} \cdot q_Q \cdot k_A = 25.3 \text{ kPa} \quad \text{Tensione attiva al piede muro}$$

$$\sigma'_{A,min.1} := \gamma_{G1} \cdot q_G \cdot k_A + \gamma_{Q1} \cdot q_Q \cdot k_A - 2 \cdot c' \cdot \sqrt{k_A} = 12.652 \text{ kPa} \quad \text{Tensione attiva in testa muro}$$

$$\text{if } \sigma'_{A,min} < 0$$

$$BA_{A1} := BA \cdot \frac{\sigma'_{A,max}}{\sigma'_{A,max} - \sigma'_{A,min}}$$

$$\text{else}$$

$$BA_{A1} := BA$$

$$BA_A = 1.5 \text{ m}$$

Altezza del paramento su cui agisce la tensione attiva

$$\text{if } \sigma'_{A,min} < 0$$

$$P_{A1} := \frac{1}{2} \cdot BA_{A1} \cdot \sigma'_{A,max.1}$$

$$\text{else}$$

$$P_{A1} := \frac{BA_{A1}}{2} \cdot (\sigma'_{A,max.1} + \sigma'_{A,min.1})$$

$$P_{A1} = 28.467 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Spinta attiva sul muro inclinata di  $\psi$

$$P_{A,vett.1} := \begin{bmatrix} P_{A1} \cdot \cos(\alpha) \\ P_{A1} \cdot \sin(\alpha) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 28.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \text{in forma vettoriale}$$

$$\text{if } \sigma'_{A,min} < 0$$

$$b_{P1} := \frac{BA_{A1}}{3}$$

$$\text{else}$$

$$b_{P1} := \frac{(\sigma'_{A,max.1} - \sigma'_{A,min.1}) \cdot BA_{A1}^2 \cdot \frac{2}{3} + \sigma'_{A,min.1} \cdot BA_{A1}^2}{(\sigma'_{A,max.1} + \sigma'_{A,min.1}) \cdot BA_{A1}}$$

$$b_{P1} = 0.833 \text{ m}$$

Punto di applicazione della spinta attiva sul paramento

$$b_{P,vett.1} := \begin{bmatrix} b_{P1} \cdot \sin(\beta) \\ b_{P1} \cdot \cos(\beta) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.833 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ m} \quad \text{in forma vettoriale}$$

$$M_{rib.1} := P_{A,vett.1} \cdot b_{P,vett.1} - P_{A,vett.1} \cdot b_{P,vett.1} = 23.7 \text{ kN}$$

$$M_{w.Sd} := M_{rib.1}$$

Posizione asse neutro per inflessione semplice

$$x_n := \frac{n \cdot (A_s + A'_s)}{b_f} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b_f \cdot (A_s \cdot (b - c_f) + A'_s \cdot c_f)}{n \cdot (A_s + A'_s)^2}} \right) = 4.941 \text{ cm}$$

$$I_n := \frac{b_f \cdot x_n^3}{3} + n \cdot A'_s \cdot (x_n - c_f)^2 + n \cdot A_s \cdot (b - c_f - x_n)^2$$

$$\sigma_{c,max} := \frac{M_{w.Sd}}{I_n} \cdot x_n = 7.223 \frac{\text{MPa}}{\text{m}}$$

$$\sigma_{s,max} := \text{Max} \left( n \cdot \frac{M_{w.Sd}}{I_n} \cdot (b - c_f - x_n), n \cdot \frac{M_{w.Sd}}{I_n} \cdot (x_n - c_f) \right) = 220.57 \frac{\text{MPa}}{\text{m}}$$

$$0.6 \cdot f_{ck} = 21 \text{ MPa} \quad \sigma_{c,max} \cdot 1 \text{ m} < 0.6 \cdot f_{ck} = 1 \quad [\text{par. 4.1.2.2.5.1}\equiv]$$

Verifica fessurazione

$$0.8 \cdot f_{yk} = 360 \text{ MPa} \quad \sigma_{s,max} \cdot 1 \text{ m} < 0.8 \cdot f_{yk} = 1 \quad [\text{par. 4.1.2.2.5.2}\equiv]$$

## CONCLUSIONI

La verifica strutturale del muro di sostegno risulta soddisfatta adottando queste caratteristiche:

- muro in elevazione di altezza 1.5 m, spessore 20 cm;
- ciabatta di fondazione di larghezza non inferiore a 2.2 m e comunque a contrasto sulla sponda opposta;
- Calcestruzzo di classe di resistenza C35/40, classe di consistenza S3, dimensione massima degli aggregati D32 mm, copriferro minimo 4 cm;
- acciaio strutturale per cemento armato B450C;
- armatura verticale  $\varnothing 16\text{mm}/25\text{cm}$ , ripartitori orizzontali  $\varnothing 12\text{mm}/25\text{cm}$ .