



Regione Lombardia

Est Ticino Villoresi



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
LUGLIO 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 - PEC: 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.

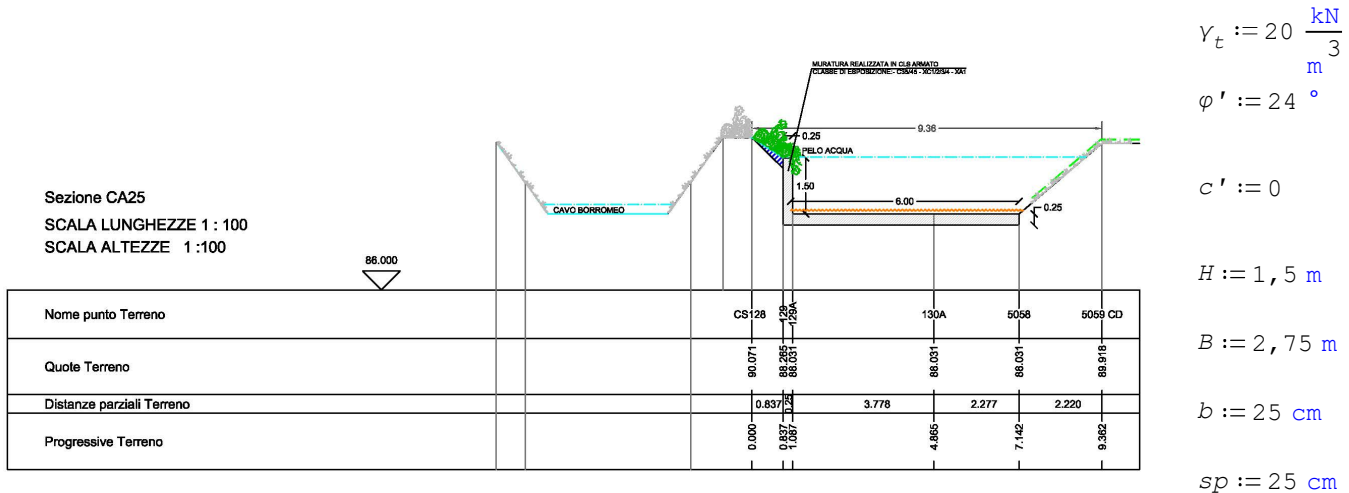
Gli aspetti strutturali saranno trattati agli Stati Limite Ultimi.

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



$$\gamma_G := 1,3$$

$$\gamma_Q := 1,5$$

$$\gamma_{rib} := 1,15$$

$$\gamma_{cls} := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

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

$$q_G := \gamma_t \cdot 0,5 \text{ m}$$

Il polo di calcolo dei momenti è il punto O, a destra della sezione.

$$W_{cls} := 1 \cdot (H \cdot b + B \cdot sp) \cdot \gamma_{cls} = 26,6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{cls} := 1 \cdot B \cdot sp \cdot \frac{B}{2} \cdot \gamma_{cls} + 1 \cdot b \cdot H \cdot \left(B - \frac{b}{2} \right) \cdot \gamma_{cls} = 48,2 \text{ kN}$$

$$X_{G,cls} := \frac{M_{cls}}{W_{cls}} = 1,82 \text{ m}$$

$$k_A := \frac{1 - \sin(\varphi')}{1 + \sin(\varphi')} = 0,422$$

Teoria Rankine

$$\sigma'_{V,min} := (q_G + q_Q) \cdot \gamma_Q \quad \text{Tensione verticale in testa muro}$$

$$\sigma'_{V,max} := \sigma'_{V,min} + (H + sp) \cdot \gamma_t \cdot \gamma_G \quad \text{Tensione verticale al piede muro}$$

$$\sigma'_{H,min} := \sigma'_{V,min} \cdot k_A \quad \text{Tensione attiva in testa muro}$$

$$\sigma'_{H,max} := \sigma'_{V,max} \cdot k_A \quad \text{Tensione attiva al piede muro}$$

$$P_A := \frac{\sigma'_{H,min} + \sigma'_{H,max}}{2} \cdot (H + sp) = 50 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$b_A := \frac{2 \cdot \sigma'_{H,min} + \sigma'_{H,max}}{\sigma'_{H,min} + \sigma'_{H,max}} \cdot \frac{H + sp}{3} = 0,777 \text{ m}$$

$$M_{rib} := P_A \cdot b_A = 38,9 \text{ kN}$$

$$M_{stab} := \frac{M_{cls}}{\gamma_{rib}} = 41,9 \text{ kN}$$

$$\frac{M_{stab}}{M_{rib}} = 1,08$$

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.

$$M_G := M_{rib} - b \cdot H \cdot \frac{B-b}{2} \cdot \gamma_t \cdot \gamma_G = 26,7 \text{ kN}$$

Il polo di calcolo G coincide col baricentro della base di appoggio.

$$e_c := \frac{M_G}{\gamma_G \cdot \bar{W}_{cls}} = 0,772 \text{ m}$$

$$B_r := B - 2 \cdot e_c = 1,21 \text{ m}$$

$$\lambda := 0^\circ$$

Spinte orizzontali contrastate da sponda opposta

VERIFICA CAPACITA' PORTANTE DEL TERRENO

$$\gamma_{R,port} := 1,40$$

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

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

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

$$N_{sd} := \gamma_G \cdot \bar{W}_{cls}$$

$$\gamma_R := 1,4$$

$$N_q := \frac{1 + \sin(\varphi')}{1 - \sin(\varphi')} \cdot e^{\mathbf{n} \cdot \tan(\varphi')} = 9,603$$

$$N_c := (N_q - 1) \cdot \cot(\varphi') = 19,324$$

$$N_\gamma := 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan(\varphi') = 9,442$$

$$s_\gamma := 1 + 0,1 \cdot \frac{1 + \sin(\varphi')}{1 - \sin(\varphi')} \cdot \frac{B_r}{L} = 1,002$$

$$s_q := s_\gamma$$

$$s_c := 1 + 0,2 \cdot \frac{1 + \sin(\varphi')}{1 - \sin(\varphi')} \cdot \frac{B_r}{L} = 1,004$$

$$\mu := \frac{2 + \frac{B_r}{L}}{1 + \frac{B_r}{L}} = 1,993$$

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

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

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

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

$$b_q := b_Y$$

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

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

$$g_q := g_Y$$

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

$$\text{if } sp < B_r$$



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

else

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

$$d_q = 1,065$$

$$d_c := d_q - \frac{1 - d_q}{N_c \cdot \tan(\varphi')} = 1,073$$

$$q_{lim} := \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot B_r \cdot N_Y \cdot s_Y \cdot i_Y \cdot b_Y \cdot g_Y + c' \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot b_c \cdot g_c + (0) \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot b_q \cdot g_q = 114,026 \text{ kPa}$$

$$N_{Rd} := \frac{q_{lim} \cdot B_r}{\gamma_{R,port}} = 98,185 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{sd} = 34,531 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Il carico limite sul terreno è superiore al carico sollecitante agli SLU.

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):

$$a_{MAX} := 0,086 \quad \beta_s := 0,38$$

$$k_h := \beta_s \cdot a_{MAX} = 0,0327$$

$$k_v := 0,5 \cdot k_h = 0,0163$$

$$\eta := \operatorname{atan}\left(\frac{k_h}{1 + k_v}\right) \quad \tau := 0^\circ$$

$$k_{AE} := \frac{\cos(\varphi' - \tau)^2}{\cos(\eta)^2 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi') \cdot \sin(\varphi' - \eta)}{\cos(\eta)}}\right)} = 0,6 \quad k_A = 0,422$$

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

$$\psi_{21} := 0,6$$

$$\sigma'_{A,max,E} := 1 \cdot (H + sp) \cdot \gamma_t \cdot k_A - 2 \cdot c' \cdot \sqrt{k_{AE}} + 1 \cdot q_G \cdot k_{AE} + \psi_{21} \cdot q_Q \cdot k_A = 25,8 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{A,min,E} := 1 \cdot q_G \cdot k_{AE} + 0 \cdot q_Q \cdot k_{AE} - 2 \cdot c' \cdot \sqrt{k_{AE}} = 6,003 \text{ kPa}$$

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

$$P_A = 50,001 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \text{spinta attiva STATICA totale agli SLU}$$

$$P_{AE} = 27,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \text{spinta attiva SISMICA totale agli SLV}$$

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

$$\gamma_{G1} := 1,3 \quad \gamma_Q := 1,5 \quad \alpha_{cc} := 0,85 \quad \gamma_c := 1,5 \quad \gamma_s := 1,15$$

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

$$f_{yk} := 450 \text{ MPa} \quad f_{ck} := 35 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 391,3043 \text{ MPa} \quad f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19,8333 \text{ MPa}$$

$$c_f := 5 \text{ cm} \quad \Phi_f := 16 \text{ mm} \quad b = 25 \text{ cm} \quad p_f := 20 \text{ cm} \quad b_f := 100 \text{ cm}$$

$$A_s := \frac{1}{p_f} \cdot \frac{\Phi_f^2}{4} \cdot \pi = 10,053 \text{ cm}^2 \quad A'_s := A_s$$

$$\rho := \frac{A_s + A'_s}{b \cdot b_f} = 0,804 \% \quad \rho_{min} := 0,2 \%$$

$$M_{x, sd} := M_{rib} = 38,854 \text{ kN}$$

Titolo : _____

N° strati barre **Zoom**

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	25

N°	As [cm²]	d [cm]
1	10.05	5
2	10.05	20

Sollecitazioni
☒ S.L.U. ☐ Metodo n
N_{Ed} **kN**
M_{xEd} **kNm**
M_{yEd} **kNm**

P.to applicazione N
☒ Centro ☐ Baricentro cls
☐ Coord.[cm] xN yN

Tipo rottura
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Materiali
B450C **C35/45**
 ϵ_{su} ‰ ϵ_{c2} ‰
 f_{yd} N/mm² ϵ_{cu} ‰
 E_s N/mm² f_{cd} N/mm²
 E_s/E_c f_{cc}/f_{cd} ?
 ϵ_{syd} ‰ $\sigma_{c,adm}$ N/mm²
 $\sigma_{s,adm}$ N/mm² τ_{co} τ_{c1}

M_{xRd} kN m
 σ_c N/mm²
 σ_s N/mm²
 ϵ_c ‰
 ϵ_s ‰
 d cm
 x x/d
 δ

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 **Dominio M-N**
L₀ cm **Col. modello**
☐ Precompresso

$$M_{x,Rd} := 79,88 \text{ kN}$$

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

$$\cot \theta := 1 \quad \alpha_c := 1 \quad \nu := 0,5$$

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

$$A_{st} := \frac{1 \text{ m}}{p_t} \cdot \frac{\phi_t^2}{4} \cdot \pi = 4,5239 \text{ cm}^2$$

$$d := b - c_f = 20 \text{ cm} \quad b_w := b_t = 1 \text{ m}$$

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

$$k := 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}} = 2,1547$$

$$\text{else}$$

$$k := 2$$

$$\nu_{min} := 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}} \text{ MPa} = 0,5857 \text{ MPa}$$

$$\rho_1 := \frac{2 \cdot A_{st}}{b_w \cdot d} = 0,4524 \% \quad \rho_1 < 0,02 = 1$$

$$\sigma_{cp} := H \cdot \gamma_{cls} = 37,5 \text{ kPa} \quad \sigma_{cp} < 0,2 \cdot f_{cd} = 1$$



$$V_{Rd,c} := \text{Max} \left(\left(\frac{0,18 \cdot k \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}}}}{\gamma_c} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right) \cdot b_w \cdot d; \left(v_{min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right) \cdot b_w \cdot d \right) = \blacksquare \text{ kN}$$



$$\cot \theta := 1,20$$



$$\alpha_{st} := 90^\circ$$



$$\alpha_c := 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} = 1,0019 \quad \sigma_{cp} < 0,25 \cdot f_{cd} = 1$$

$$V_{Rsd} := 0,9 \cdot (b - c_f) \cdot \frac{2 \cdot A_{st}}{p_t} \cdot f_{yd} \cdot (\cot(\alpha_{st}) + \cot \theta) \cdot \sin(\alpha_{st}) = 254,912 \text{ kN}$$

$$V_{Rcd} := 0,9 \cdot (b - c_f) \cdot b_t \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot(\alpha_{st}) + \cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} = 894,188 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} := \text{Min} (V_{Rsd}; V_{Rcd}) = \blacksquare \text{ kN}$$

$$V_{Sd} := P_A \cdot 1 \text{ m} = 50,001 \text{ m} \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$V_{Sd} < V_{Rd} = \blacksquare$$

Verifica a taglio

CONCLUSIONI

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

- muro in elevazione di altezza 1.5 m, spessore 25 cm;

- ciabatta di fondazione di spessore 25 cm, larghezza non inferiore a 2.75 m e comunque a contrasto sulla sponda opposta;

- Calcestruzzo di classe di resistenza C35/45, classe di consistenza S3, dimensione massima degli aggregati D32 mm, copriferro minimo 4.2 cm;

- acciaio strutturale per cemento armato B450C;

- armatura verticale $\varnothing 16\text{mm}/20\text{cm}$, ripartitori orizzontali $\varnothing 12\text{mm}/25\text{cm}$.