

REGIONE
LOMBARDIA



COMUNE DI
INCUDINE



COMUNE DI
EDOLO



COMUNE DI
MONNO

PROGETTO ESECUTIVO

OPERE DI REGIMAZIONE IDRAULICA NEL TRATTO DI CONFLUENZA DEL TORRENTE VAL FINALE NEL FIUME OGLIO E REALIZZAZIONE DI AREE DI ACCUMULO/LAMINAZIONE SUL TORRENTE VAL FINALE, NEI COMUNI DI MONNO, INCUDINE E EDOLO. - CUP: G92B22000990002 -



RELAZIONE DI CALCOLO DELLA STRUTTURA SELETTIVA IN MASSI ANNEGATI NEL CALCESTRUZZO

Aggiornamento	DATA	OGGETTO	Elaborato n. T5
	Febbraio 2024	Prima stesura	

Il Progettista; D.L., C.S.P. e C.S.E.:
Ing. Girolamo Landrini



Il Responsabile del Procedimento:
Geom. Fabio Albertoni

Elaborazione dati e stesura progetto: STUDIO LANDRINI
Via Carlo Tassara n.4, 25043 Breno (BS) Tel. 0364 21076
e-mail: landrini@LANDRINIGEROLAMO.191.it

SOMMARIO

IPOTESI D'INTERAZIONE DELLA COLATA CON LA BRIGLIA.....	3
VERIFICA DELLA SPALLA (SINISTRA) DELLA BRIGLIA.....	6
LE AZIONI APPLICATE ALLA STRUTTURA.....	7
AZIONI PERMANENTI.....	7
SPINTA DELLA COLATA DETRITICA CON LA FORMULA “MISTA” (Hubl e Holzinger)	7
IPOTESI DI VERIFICA- modello idrostatico.....	12

PREMESSA

CLASSIFICAZIONE DEL FENOMENO

Il fenomeno di debris flow, da considerare, si può classificare in diversi modi ed in base al volume di materiale spostato (circa 100.000 mc), secondo Fell (1994) è classificabile di grandezza media ($5 \cdot 10^4$ mc ÷ $2,5 \cdot 10^6$ mc).

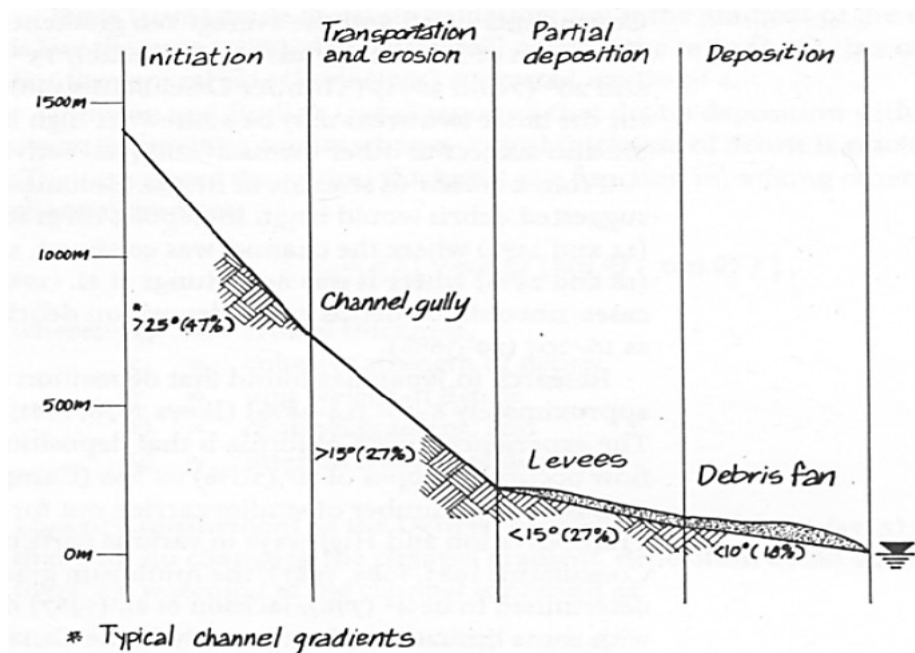
Il materiale movimentato è prettamente detritico (debris) con scarsa presenza di terreno humus e/o parte vegetale.

Il movimento del materiale lungo il corso d'acqua si può definire una colata o flusso (flow) simile a quella di fluidi viscosi incanalati.

Una caratteristica importante del movimento è la sua velocità, in base alla quale deriva il potenziale distruttivo della "lava" torrentizia in esame.

Le colate di detrito assumono velocità più alte di quelle in terra. Il movimento può avvenire con velocità estremamente rapida (> 5 m/s), specialmente quando il materiale è saturo d'acqua e viene, praticamente, annullato l'attrito tra i vari elementi rocciosi con mancanza assoluta di coesione, con indice di plasticità di gran lunga inferiore al 5% (colata di detrito).

L'alta pendenza dell'area che caratterizza la sommità del bacino, rappresenta la condizione più favorevole, oltre ovviamente alla presenza di una sufficiente quantità d'acqua, per l'innesco della frana detritica, e per imprimere alla stessa una significativa velocità (inclinazione $> 25^\circ$, pendenza attorno al 47%).



Si tenga conto che l'innesco è favorito da:

- abbondante presenza di detrito;
- pendenza elevata;
- mancanza di vegetazione;
- apporto sufficiente d'acqua.

La briglia in progetto è una misura di mitigazione attiva – passiva.

Rappresenta una vera e propria opera di difesa strutturale, mirata al controllo del movimento franoso ad innesco già avvenuto.

È un'opera difensiva interposta tra la frana e gli elementi esposti più a valle.

Generalmente i bacini di deposito dovrebbero contenere almeno il 40% ÷ 50% del volume solido della colata di progetto.

Non si nascondono le difficoltà per costruire un modello che rispecchi le caratteristiche geometriche – fisiche – meccaniche della struttura “briglia” che si vuole verificare per: la sua geometria che si sviluppa in sinistra al torrente, praticamente indipendente dalla sponda rocciosa destra; la sua forma non regolare; la sua costituzione eterogenea; la determinazione della forza d'impatto sul paramento a monte della briglia non di semplice determinazione.

IPOTESI D'INTERAZIONE DELLA COLATA CON LA BRIGLIA

Non esiste, per ora, in Italia una normativa alla quale riferirsi per la progettazione delle strutture in presenza di colate detritiche. Si utilizzano, di solito, approcci semplificati che derivano dalle teorie dell'idraulica con l'ausilio di fattori correttivi che tengono conto dell'elevata concentrazione solida e della dinamicità delle colate.

I fattori correttivi sono empirici e derivano dall'osservazione di fenomeni avvenuti, calibrati anche con prove di laboratorio che, purtroppo, sono, generalmente, su piccola scala.

Si possono utilizzare modelli idrostatici nei quali la pressione massima d'impatto è assunta proporzionale alla pressione statica sulla struttura e, dunque, dipendente dall'altezza della colata (schema delle pressioni triangolare), oppure modelli idrodinamici nei quali la pressione è assunta proporzionale ad un'altezza caratteristica fondamentale del flusso con la sua velocità elevata al quadrato (schema delle pressioni rettangolare).

Questi due modelli possono essere assunti in combinazione mista, considerando un contributo idrostatico ed uno idrodinamico nella valutazione della pressione di calcolo sulla struttura.

È evidente che alla semplicità dei due metodi si contrappone una difficile valutazione del fattore empirico per tener conto delle differenze tra fluido puro e colata detritica.

Il Modello idrostatico

Modelli idrostatici tipici sono quelli descritti da Armanini (1997) e Lichtenhahn (1973).

Questi modelli considerano una distribuzione di pressione triangolare lungo l'altezza della struttura che viene incrementata tramite un fattore empirico k per considerare la componente dinamica. La pressione massima viene espressa come:

$$p_{max} = k \cdot \rho_d \cdot g \cdot h_d$$

in cui:

k = fattore empirico (per considerare la componente dinamica);

ρ_d = densità della colata detritica;

g = accelerazione di gravità;

h_d = altezza della colata detritica (in fase di progettazione non si conosce tale parametro, pertanto si utilizza l'altezza del paramento della briglia in via cautelativa).

Nota la distribuzione di pressioni a forma triangolare è possibile valutare la forza globale di impatto F_d agente sulla struttura come:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot p_{max} \cdot h_d = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \rho_d \cdot g \cdot h_d^2$$

Applicata ad un terzo dell'altezza della barriera.

Il Modello idrodinamico

Questo modello assume una distribuzione di pressioni sulla barriera uniforme, espressa dalla seguente relazione:

$$p_d = \alpha \cdot \rho_d \cdot v_d^2$$

in cui:

v_d = velocità della colata detritica;

α = coefficiente di amplificazione empirico;

ρ_d = densità della colata detritica.

Nota la distribuzione di pressione di forma rettangolare è possibile valutare la forza di impatto F_d , agente a metà dell'altezza del flusso, come:

$$F_d = p_d \cdot h_d = \alpha \cdot \rho_d \cdot v_d^2 \cdot h_d$$

in cui:

h_d = altezza della colata detritica = altezza della barriera;

Formulazioni miste (utilizzate in questo progetto)

Considerano sia il contributo idrostatico, legato all'altezza della colata, che idrodinamico, legato alla velocità della stessa.

Un'ulteriore formulazione derivante da un approccio idrodinamico, ma considerabile come "mista", è quella ricavata da **Hubl e Holzinger (2003)**:

$$p_d = 4,5 \cdot \rho_d \cdot v_d^{0,8} \cdot (g \cdot h_d)^{0,6}$$

Si tratta di una formulazione che permette di considerare sia il contributo legato all'altezza della massa impattante (idrostatico) che quello relativo alla velocità del flusso (idrodinamico); per questo motivo supera in una certa misura le limitazioni legate alla modellazione idrostatica e idrodinamica.

Tale formulazione è quella utilizzata per questo progetto.

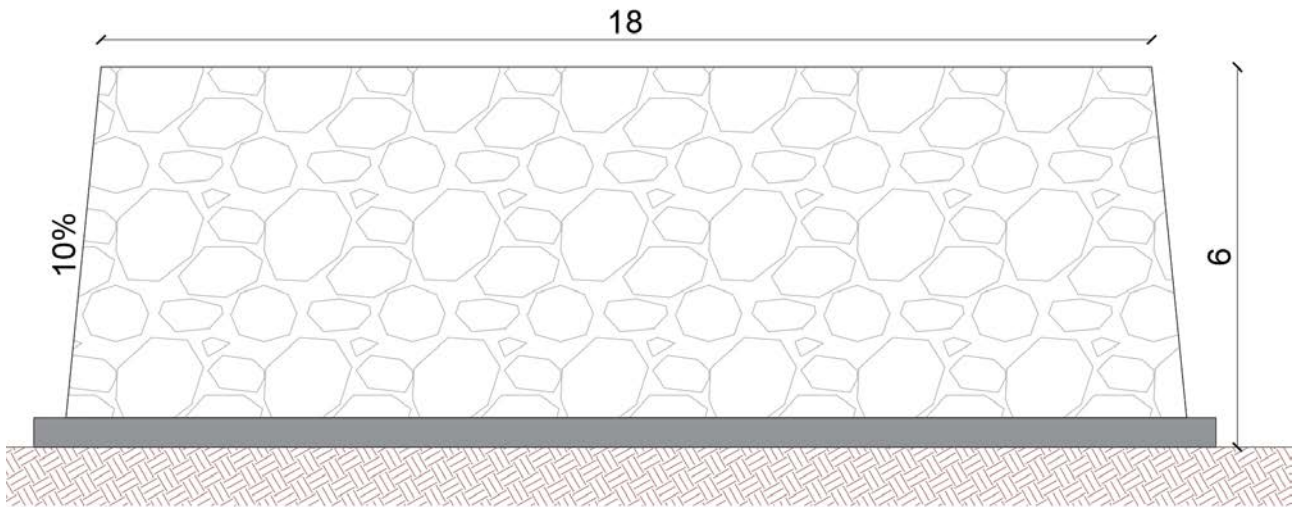
Confrontando le diverse formulazioni si può affermare che i modelli idrostatici sono più rappresentativi dei fenomeni con basse velocità del flusso per i quali le spinte dipendono in modo prevalente dall'altezza della massa detritica; mentre il modello idrodinamico rappresenta meglio le colate aventi alta velocità e spessori contenuti.

Considerando però che:

durante un fenomeno di colata, forze statiche che dinamiche si verificano allo stesso tempo, ne consegue che l'uso del metodo misto che considera entrambi i contributi, potrebbe essere un adeguato compromesso per la valutazione delle pressioni in gioco. Ad esempio con la formulazione proposta da Hubl e Holzinger (2003), evidenziata in precedenza ed utilizzata per questo progetto.

VERIFICA DELLA SPALLA (SINISTRA) DELLA BRIGLIA

Sezione tipica (media) della spalla sinistra della briglia.



Schema del corpo della briglia

$H = 6,00$ m che è pari all'altezza della briglia.

Scarpa a monte = scarpa a valle = 10%;

Peso specifico medio del materiale (massi annegati nel calcestruzzo) costituente il muro:

$$\gamma_{\text{muro}} = 0,60 \times 2700 + 0,40 \times 2400 = 2600 \text{ kg/mc}$$

Si è considerato che il muro sia composto dal 60% da massi di granito (2700kg/mc) e dal 40% di calcestruzzo (2400kg/mc).

La verifica è eseguita considerando una "fetta" di un metro di spessore della struttura.

Questa struttura è assimilata ad un muro di sostegno a gravità formato in pietrame e malta.

Le verifiche (di tipo eccezionale) sono prodotte per alcune altezze.

La pressione della colata detritica è considerata costante per tutta l'altezza, calcolata come anzidetto, con la formula "mista" di Hubl e Holzinger (2003) che associa la valutazione idrostatica alla idrodinamica.

La pressione è diretta perpendicolarmente al paramento investito. A favore di sicurezza nelle verifiche si trascura la componente verticale della pressione.

LE AZIONI APPLICATE ALLA STRUTTURA

Le azioni applicate al modello strutturale per la sua verifica (come descritto in precedenza) sono le seguenti:

AZIONI PERMANENTI

- (g1) peso specifico del corpo della briglia 2600 kg/mc
- (g2) peso specifico della colata detritica (debris flow) 2300 kg/mc
- (g2) peso specifico di un masso 2700 kg/mc

Di seguito viene evidenziato il calcolo di ciascuna delle azioni sollecitanti agenti.

SPINTA DELLA COLATA DETRITICA CON LA FORMULA “MISTA” (Hubl e Holzinger)

Il calcolo da cui si è ricavato il valore della pressione di progetto della colata detritica, associata alla formula di **Hubl e Holzinger (2003)** descritta in precedenza, è il seguente:

$$p_d = 4,5 \cdot \rho_d \cdot v_d^{0,8} \cdot (g \cdot h_d)^{0,6}$$

In cui sono stati scelti i seguenti parametri di progetto:

$v_d = 5$ m/s (velocità della colata detritica);

$g = 9,81$ m/s (accelerazione di gravità);

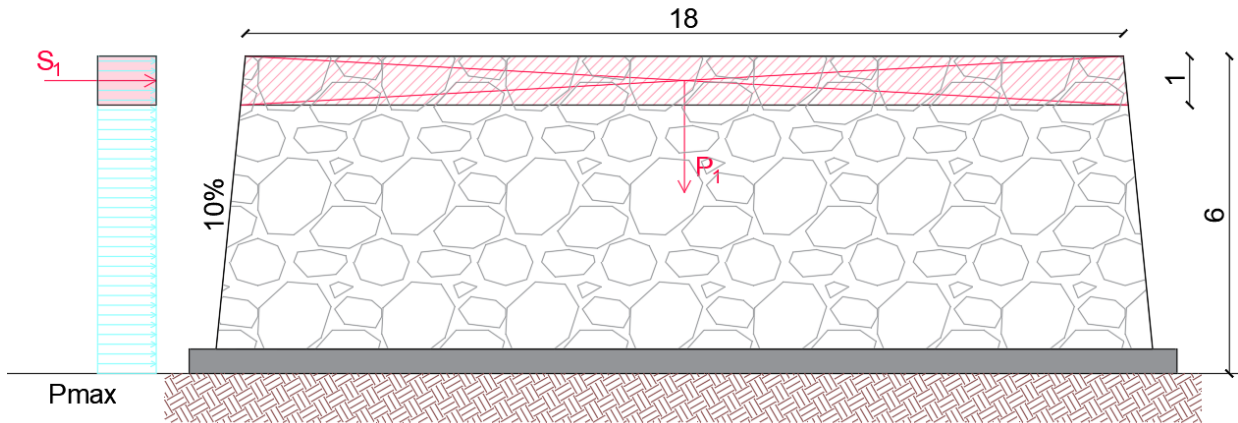
$\rho_d = 2300$ kg/mc densità della colata detritica.

$h_d = 6,00$ m (altezza della briglia, lato monte)

si è ricavato il seguente valore di pressione:

$$p_d = 4,5 \cdot 2300 \cdot 5^{0,8} \cdot (9,81 \cdot 6)^{0,6} = 432460,00 \frac{N}{m^2} = 43.246,00 \frac{kg}{m^2} \approx 43.250,00 \frac{kg}{m^2}$$

Nel modello tale pressione è stata applicata direttamente sul paramento come un carico uniformemente distribuito, su un metro di lunghezza della briglia.



Schema del corpo della briglia- h di calcolo 1m

Il calcolo verrà eseguito considerando un concio di altezza pari a un metro.

$$P_1 = 18,10 \cdot 1,00 \cdot 2600 = 47.060,00 \text{ kg}$$

$$\sigma_{media} = \frac{47.060}{1820 \cdot 100} = 0,26 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

La tensione tangenziale ammissibile dipende da σ_0 in assenza di carico verticale (0,32 kg/cm²) incrementata da 4 $\sigma_{verticale}$.

$$\tau_{amm} = 0,32 + 4 \cdot 0,26 = 1,36 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Calcolo il valore della spinta al metro:

$$S_1 = 43250,00 \cdot 1,00 = 43.250,00 \text{ kg}$$

Il momento ribaltante è:

$$M = 43.250,00 \cdot 0,50 = 21.625,00 \text{ kgm}$$

Il valore delle tensioni di compressione è pari a:

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{47.060}{1820 \cdot 100} \pm \frac{2162500 \cdot 6}{100 \cdot 1820^2} = 0,26 \pm 0,04 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

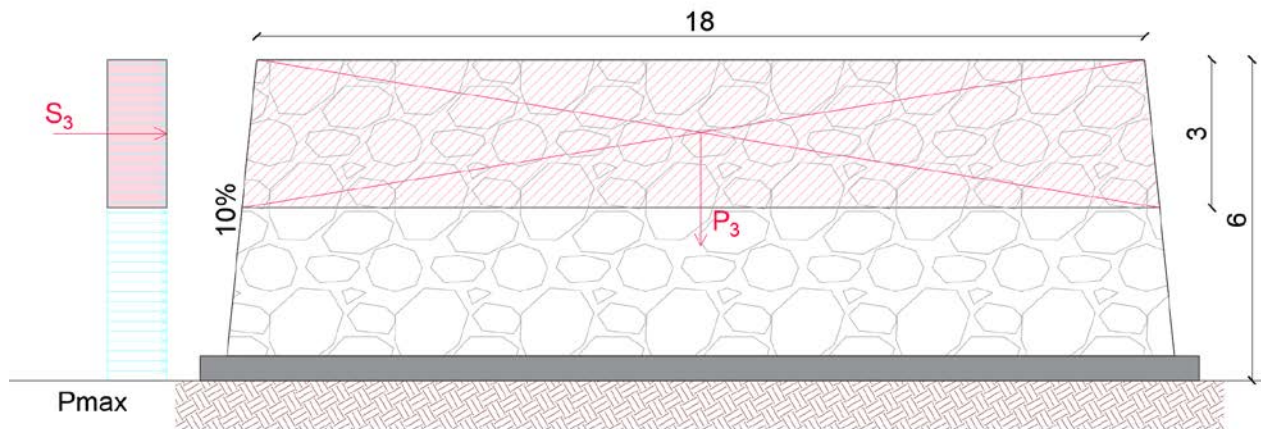
Risulta:

$$\sigma_{max} = 0,30 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{min} = 0,22 \frac{kg}{cm^2}$$

Il valore delle tensioni tangenziali è pari a:

$$\tau = \frac{43.250}{1820 \cdot 100} = 0,24 \frac{kg}{cm^2}$$



Schema del corpo della briglia- h di calcolo 3m

Si considera ora un concio di altezza pari a 3 metri.

$$P = 18,30 \cdot 3,00 \cdot 2600 = 142.740,00 \text{ kg}$$

$$\sigma_{media} = \frac{142.740}{1860 \cdot 100} = 0,77 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\tau_{amm} = 0,32 + 4 \cdot 0,77 = 3,40 \frac{kg}{cm^2}$$

Calcolo il valore della spinta al metro:

$$S_3 = 43250,00 \cdot 3,00 = 129.750,00 \text{ kg}$$

Il momento ribaltante è:

$$M = 129.750,00 \cdot 1,50 = 194.625,00 \text{ kgm}$$

Il valore delle tensioni di compressione è pari a:

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{142.740,00}{1860 \cdot 100} \pm \frac{19462500 \cdot 6}{100 \cdot 1860^2} = 0,77 \pm 0,340 \frac{kg}{cm^2}$$

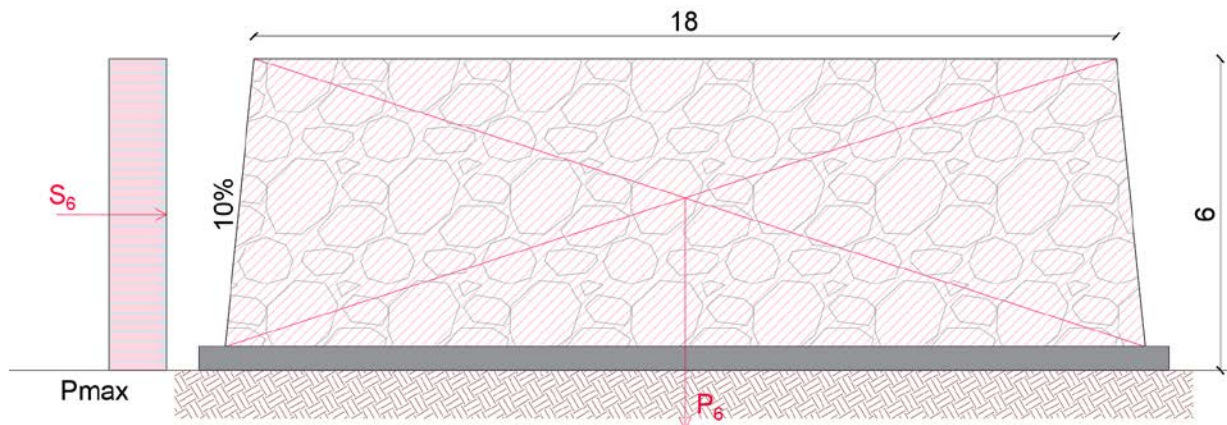
Risulta:

$$\sigma_{max} = 1,11 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\sigma_{min} = 0,43 \frac{kg}{cm^2}$$

Il valore delle tensioni tangenziali è pari a:

$$\tau = \frac{129.750}{1860 \cdot 100} = 0,70 \frac{kg}{cm^2}$$



Schema del corpo della briglia- h di calcolo 6m

Si considera ora un concio di altezza pari a 6 metri.

$$P = 18,60 \cdot 6,00 \cdot 2600 = 290.160,00 \text{ kg}$$

$$\sigma_{media} = \frac{290.160,00}{1920 \cdot 100} = 1,51 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\tau_{amm} = 0,32 + 4 \cdot 1,51 = 6,36 \frac{kg}{cm^2}$$

Calcolo il valore della spinta al metro:

$$S_6 = 43250,00 \cdot 6,00 = 259.500,00 \frac{kg}{m}$$

Il momento ribaltante è:

$$M = 259.500,00 \cdot 3,00 = 778.500,00 \text{ kgm}$$

Il valore delle tensioni di compressione è pari a:

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{290160,00}{1920 \cdot 100} \pm \frac{77850000 \cdot 6}{100 \cdot 1920^2} = 1,51 \pm 1,27 \frac{kg}{cm^2}$$

Risulta:

$$\sigma_{max} = 2,78 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\sigma_{min} = 0,24 \frac{kg}{cm^2}$$

Il valore delle tensioni tangenziali è pari a:

$$\tau = \frac{259500}{1920 \cdot 100} = 1,35 \frac{kg}{cm^2}$$

Si considera una platea di fondazione in calcestruzzo alta 50 cm lunga 21,50 m.

La tensione massima sul terreno risulta:

$$P = 290.160 + 0,50 \cdot 21,20 \cdot 2450 = 316.130,00 \text{ kg}$$

$$M = 259.500,00 \cdot 3,25 = 843.375,00 \text{ kgm}$$

Il valore delle tensioni di compressione è pari a:

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{316.130}{2.120 \cdot 100} \pm \frac{84.337.500 \cdot 6}{100 \cdot 2.120^2} = 1,49 \pm 1,13 \frac{kg}{cm^2}$$

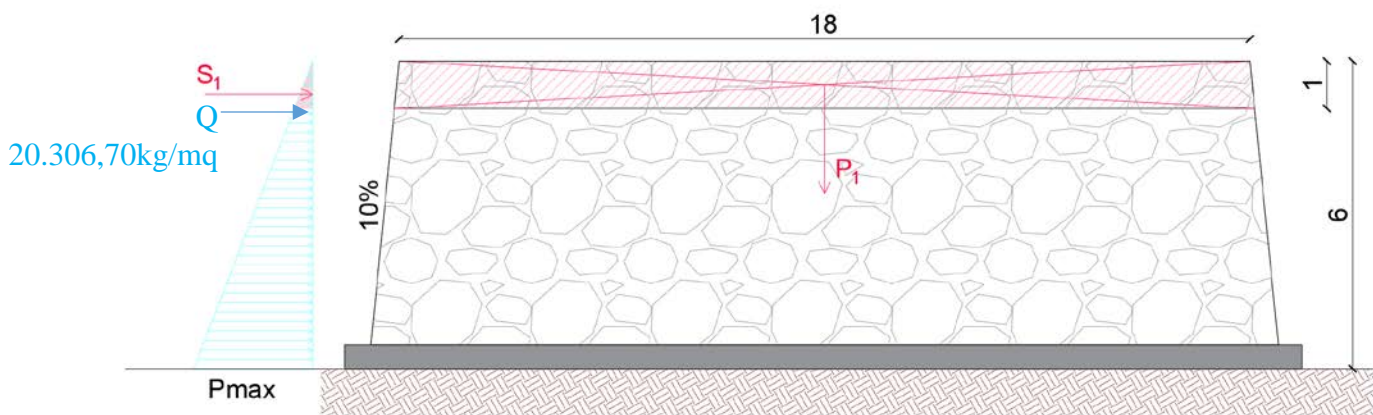
Risulta:

$$\sigma_{max} = 2,62 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\sigma_{min} = 0,36 \frac{kg}{cm^2}$$

IPOTESI DI VERIFICA col modello idrostatico (Diagramma triangolare)

Si effettuano le stesse verifiche fatte in precedenza considerando però un modello idrostatico per le spinte.



Schema del corpo della briglia- h di calcolo 1m

Si assume il valore del coefficiente k uguale a 9.

$$P_{MAX} = 9 \cdot 2300 \cdot 9,81 \cdot 6 = 1.218.402 \frac{N}{mq} \sim 121.840,20 \frac{kg}{mq}$$

Sezione ad un metro di altezza.

$$Q = \frac{121.840,20}{6} \cdot 1 = 20.306,70 \frac{kg}{mq}$$

$$S_1 = 20.306,70 \cdot \frac{1}{2} = 10.153,35 kg$$

$$P_1 = \frac{18,20 + 18,00}{2} \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 2600 = 47.060,00 kg$$

Il valore delle tensioni di compressione medie è pari a:

$$\sigma_{media} = \frac{47.060,00}{1820 \cdot 100} = 0,26 \frac{kg}{cm^2}$$

Si riporta il calcolo del momento:

$$M = 10.153,35 \cdot \frac{1}{3} = 3.384,45 \text{ } kgm$$

Le tensioni tangenziali ammissibili:

$$\tau_{amm} = 0,32 + 4 \cdot 0,26 = 1,36 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\tau = \frac{10.153,35}{1820 \cdot 100} = 0,06 \frac{kg}{cm^2}$$

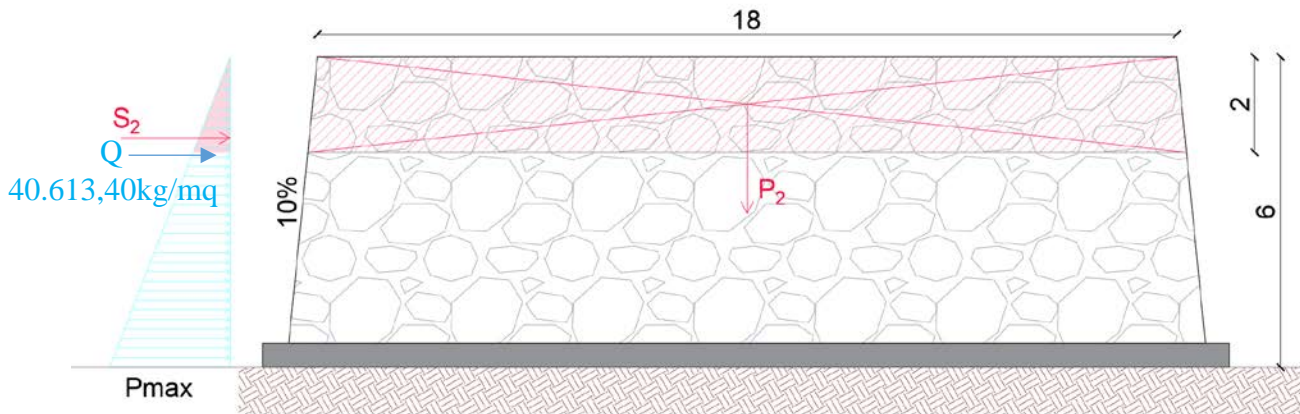
Il valore delle tensioni di compressione è pari a:

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{47.060}{1820 \cdot 100} \pm \frac{338.445 \cdot 6}{100 \cdot 1820^2} = 0,26 \pm 0,006 \frac{kg}{cm^2}$$

Risulta:

$$\sigma_{max} = 0,266 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\sigma_{min} = 0,254 \frac{kg}{cm^2}$$



Schema del corpo della briglia- h di calcolo 2m

Si riporta la stessa verifica per una sezione avente altezza pari a 2,00 m.

$$P_{MAX} = 9 \cdot 2300 \cdot 9,81 \cdot 6 = 1.218.402 \frac{N}{mq} = 121.840,20 \frac{kg}{mq}$$

Si calcola il valore della spinta considerando un'altezza del concio pari a due metro.

$$Q = \frac{121.840,20}{6} \cdot 2 = 40.613,40 \frac{kg}{mq}$$

$$S_2 = 40.613,40 \cdot \frac{2}{2} = 40.613,40 \text{ kg}$$

$$P_2 = \frac{18,40 + 18,00}{2} \cdot 1,00 \cdot 2,00 \cdot 2600 = 94.640,00 \text{ kg}$$

Il valore delle tensioni di compressione medie è pari a:

$$\sigma_{media} = \frac{94.640,00 \text{ kg}}{1840 \cdot 100} = 0,51 \frac{kg}{cm^2}$$

Si riporta il calcolo del momento:

$$M = 40.613,40 \cdot \frac{2}{3} = 27.075,60 \text{ kgm}$$

Le tensioni tangenziali ammissibili sono così determinate:

$$\tau_{amm} = 0,32 + 4 \cdot 0,51 = 2,36 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\tau = \frac{40.613,40}{1840 \cdot 100} = 0,22 \frac{kg}{cm^2}$$

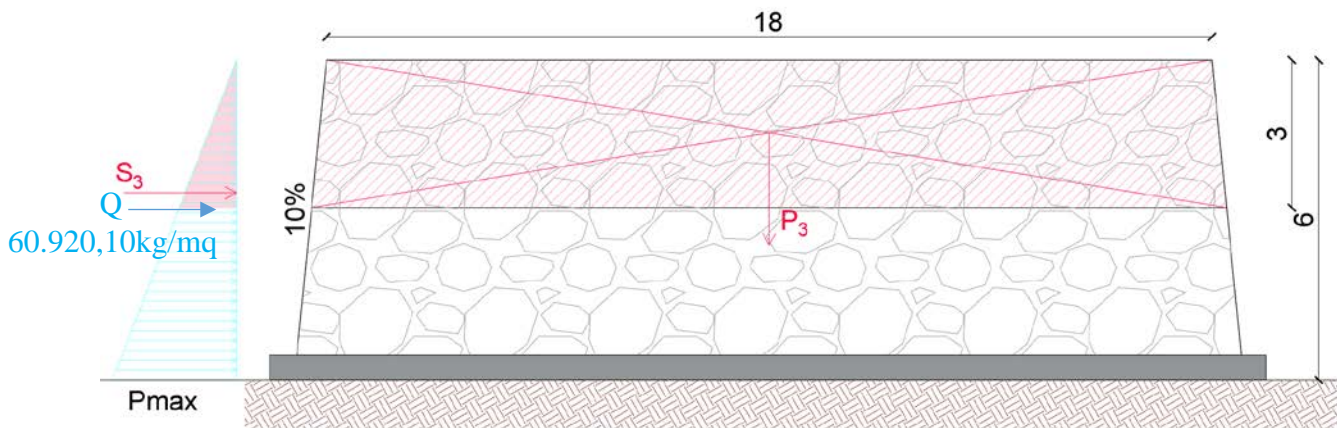
Il valore delle tensioni di compressione è pari a:

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{94.640}{1840 \cdot 100} \pm \frac{2.707.560 \cdot 6}{100 \cdot 1840^2} = 0,51 \pm 0,05 \frac{kg}{cm^2}$$

Risulta:

$$\sigma_{max} = 0,56 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\sigma_{min} = 0,46 \frac{kg}{cm^2}$$



Schema del corpo della briglia- h di calcolo 3m

Si riporta la stessa verifica ad un'altezza pari a 3 m.

$$P_{MAX} = 9 \cdot 2300 \cdot 9,81 \cdot 6 = 1.218.402 \frac{N}{mq} = 121840,20 \frac{kg}{mq}$$

Si calcola il valore della spinta considerando un'altezza del concio pari a due metro.

$$Q = \frac{121.840,20}{6} \cdot 3 = 60.920,10 \frac{kg}{mq}$$

$$S_3 = 60.920,10 \cdot \frac{3}{2} = 91.380,15 kg$$

$$P_3 = \frac{18,60 + 18,00}{2} \cdot 1,00 \cdot 3,00 \cdot 2600 = 142.740,00 \text{ kg}$$

Il valore delle tensioni di compressione medie è pari a:

$$\sigma_{media} = \frac{142.740,00 \text{ kg}}{1860 \cdot 100} = 0,77 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Si riporta il calcolo del momento:

$$M = 91.380,15 \cdot \frac{3}{3} = 91.380,15 \text{ kgm}$$

Le tensioni tangenziali sono così determinate:

$$\tau_d = 0,32 + 4 \cdot 0,77 = 3,40 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\tau = \frac{91.380,15}{1860 \cdot 100} = 0,49 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Il valore delle tensioni di compressione è pari a:

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{142.740}{1860 \cdot 100} \pm \frac{9.138.015 \cdot 6}{100 \cdot 1860^2} = 0,77 \pm 0,16 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Risulta:

$$\sigma_{max} = 0,93 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{min} = 0,61 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$