

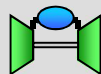


ORDINE REGIONALE DEI GEOLOGI DEL PIEMONTE

PROGETTAZIONE GEOTECNICA DELLE OPERE DI SOSTEGNO NON STRUTTURALI SECONDO LE NTC 2018 E GLI EUROCODICI

Ing. Geol. Piergiuseppe Frolidi

Corso FAD 16 Marzo 2022



Ing. Geol. Piergiuseppe Frolidi
16/03/2022

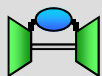


Le norme: Le **NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI**

Le **Norme Tecniche per le Costruzioni** ed. 2018 **[1]** (al seguito brevemente NTC 2018) recentemente entrate in vigore, nel Capitolo 6 dell'omonimo titolo trattano la Progettazione Geotecnica, ovvero le modalità con le quali progettare, controllare e collaudare le opere interagenti con il terreno; questa sezione delle norme deriva strettamente dall'Eurocodice 7 **[2]** di cui è una sintesi.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni definiscono i principi per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, nei riguardi delle prestazioni loro richieste in termini di requisiti essenziali di resistenza meccanica e stabilità, anche in caso di incendio, e di durabilità.

Esse forniscono quindi i criteri generali di sicurezza, precisano le azioni che devono essere utilizzate nel progetto, definiscono le caratteristiche dei materiali e dei prodotti e, più in generale, trattano gli aspetti attinenti alla sicurezza strutturale delle opere.





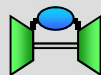
Le norme: La PROGETTAZIONE GEOTECNICA

Il paragrafo 6.5 - Opere di sostegno, determina il campo di applicazione delle norme, ovvero si applicano **“a tutte le opere geotecniche e agli interventi atti a sostenere in sicurezza un corpo di terreno o di materiale con comportamento simile”**.

Le norme delimitano il campo di applicazione alle seguenti opere di sostegno:

- 1) MURI
- 2) PARATIE
- 3) STRUTTURE MISTE

Il corpo di terreno che deve essere sostenuto dall'opera di sostegno può a sua volta costituire la fondazione di un'altra opera edile o infrastrutturale.





Le norme: La **PROGETTAZIONE GEOTECNICA**

1) **MURI**

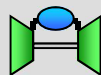
per i quali la funzione di sostegno è affidata al peso proprio del muro e a quello del terreno direttamente agente su di esso (ed esempio muri a gravità, muri a mensola, muri a contrafforti);

2) **PARATIE**

per le quali la funzione di sostegno è assicurata principalmente dalla resistenza del volume di terreno posto innanzi l'opera e da eventuali ancoraggi e puntoni;

3) **STRUTTURE MISTE**

che esplicano la funzione di sostegno anche per effetto di trattamenti di miglioramento per la presenza di particolari elementi di rinforzo e collegamento (ad esempio, ture, terra rinforzata, muri cellulari).

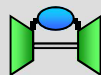


La Circolare MLLPP 617/2009 : le OPERE DI SOSTEGNO

Tipologie di opere di sostegno

Per la Circolare MLLP 617/2009 oggi sostituita dalla omonima Circ. 7/2019 [3] esplicativa e di approfondimento delle NTC 2018, i più **comuni muri di sostegno** potevano essere suddivisi, dal punto di vista costruttivo, in:

- 1) muri in pietrame a secco eventualmente sistemato in gabbioni
- 2) muri in muratura ordinaria o in conglomerato cementizio
- 3) muri in conglomerato cementizio armato
- 4) speciali muri in terra costituiti da associazione di materiale granulare e elementi di rinforzo, con paramento rigido o deformabile:
 - muri in terra armata
 - muri in terra rinforzata
 - muri cellulari.



Le OPERE STRUTTURALI DI SOSTEGNO

Il concetto di struttura

In linea di principio, nel campo delle costruzioni, una struttura può essere definita un insieme di **elementi** di vario tipo e natura giustapposti secondo una logica e **legami** atti a conferire al sistema una funzione statica.

Pertanto una struttura permette il trasferimento di un carico/azione da una parte ad un'altra del sistema fisico analizzato.

L'insieme delle azioni sollecitanti e di quelle resistenti all'esterno della struttura può essere denominato **campo di tensioni esterne**.

Il trasferimento del carico avviene originando nella struttura, a livello di singoli elementi e di legami meccanici reciproci, un **campo di tensioni interne** che sollecitano i singoli elementi strutturali e/o i legami reciproci.

Il campo di tensioni interne così generato deve essere confrontato con la resistenza dei singoli elementi e dei singoli legami reciproci attraverso un'**analisi/verifica strutturale**.



Le OPERE NON STRUTTURALI DI SOSTEGNO

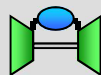
Opere di sostegno non strutturali

Se l'opera di sostegno è monolitica e/o costituita da elementi giustapposti fra di loro con semplici contatti reciproci (ovvero privi di legami meccanici che possano operare in tutte le direzioni), pur essendo in generale una struttura (presenza di più elementi assemblati), può essere analizzata senza il ricorso delle teorie della tecnica delle costruzioni.

Per l'analisi dell'opera in genere è sufficiente, in questo caso, ricorrere ai metodi della statica dei corpi rigidi, disciplina che si può enucleare dalla fisica e dalla meccanica newtoniana.

Definiremo quindi al seguito "**opere di sostegno non strutturali**" quelle opere per la cui trattazione si ricorre sostanzialmente alle seguenti discipline:

- a) statica del corpo rigido
- b) meccanica delle terre e delle rocce.



Le OPERE NON STRUTTURALI DI SOSTEGNO: definizione delle tipologie

Tra le opere di sostegno citate dalle NTC 2018 e con riferimento alla classificazione espressa, potremmo definire, per i nostri scopi, come “**non strutturali**” le seguenti opere:

1) **MURI DI SOSTEGNO A GRAVITA'** (MASSICCI)

Possono essere costituiti da muri in calcestruzzo o in massi ciclopici accatastato e/o cementati (massicciate)

3) **MURI CELLULARI E IN GABBIONI**

Possono essere costituiti da elementi prefabbricati giustapposti a semplice incastro o da gabbioni scatolari in pietrame affiancati e/o sovrapposti (questi ultimi con le dovute riserve del caso, vedi oltre).

Le NTC 2018 non riferiscono in alcun modo delle opere di sostegno in **ingegneria naturalistica** costituite appunto dall'insieme di elementi naturali (vegetali e/o inerti) collegati reciprocamente a formare una struttura atta a svolgere una funzione statica.

Anche queste opere di sostegno possono essere definite, ai fini della presente trattazione, “non strutturali”.



La SPINTA DELLE TERRE: metodi di calcolo

L'opera di sostegno deve sostanzialmente resistere alle **spinte e azioni** indotte :

- 1) dal **cuneo** di terra a tergo
- 2) dalla presenza di **acqua interstiziale** nelle terre
- 3) dai **carichi statici e/o dinamici** agenti sopra il cuneo di spinta (es.: manufatti realizzati sopra il cuneo, carichi stradali, ecc.)
- 4) dalle **azioni sismiche**.

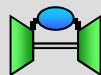
La prima delle azioni (spinta del cuneo di terra) si può ricavare attraverso le seguenti teorie, in ordine temporale di formulazione:

- a) teoria del masso di Coulomb (1776)
- b) teoria degli stati plastici di Rankine (1857).

L'azione dell'acqua si ricava dalle formulazioni di cui sopra e/o dalle formulazioni dell'idrostatica.

Le azioni statiche e dinamiche superiori si trasferiscono in funzione del metodo utilizzato per il calcolo della spinta delle terre.

Le azioni sismiche si calcolano in genere con il metodo pseudostatico.

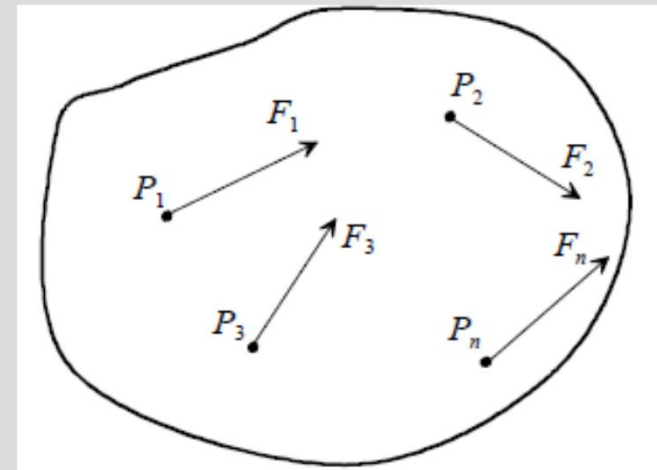


La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - richiami della SCR

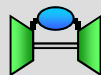
Il metodo di calcolo del masso di Coulomb si basa sostanzialmente sulla teoria della **Statica del Corpo Rigido** (SCR) vincolato.

Secondo tale teoria l'analisi dell'equilibrio (condizione di quiete) di un corpo rigido soggetto ad un sistema di forze passa attraverso le seguenti fasi consequenziali:

- 1) rappresentazione di ciascuna **forza** attraverso un vettore applicato in un punto, caratterizzato da una direzione, un verso e una intensità
- 2) riduzione del sistema di forze ad un sistema più semplice, ovvero ad una **risultante delle forze**
- 3) **verifica** che il corpo rigido vincolato sia in equilibrio: lo è se è nulla la risultante delle forze esterne (azioni e reazioni vincolari) e nullo il momento del sistema costituito da tali forze, rispetto a qualunque polo.



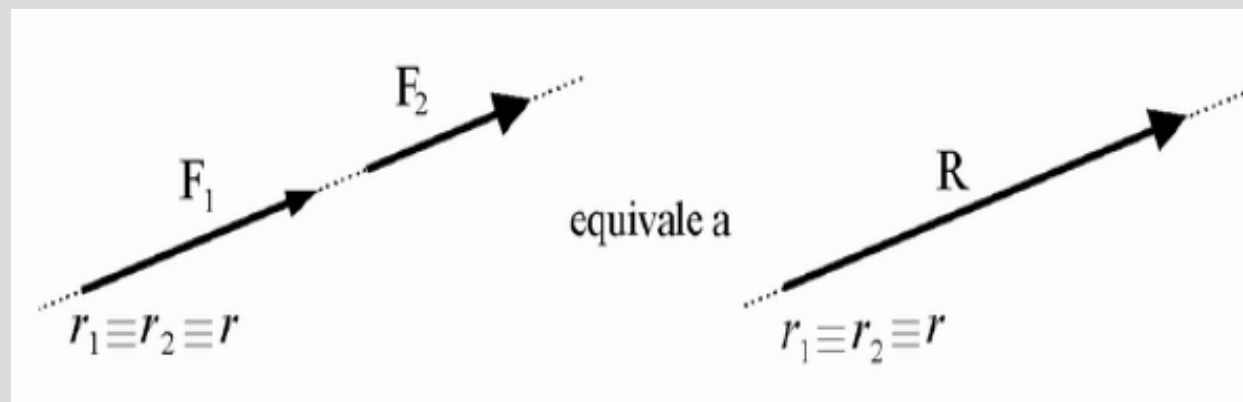
Prof. Paolo Rocco, POLIMI



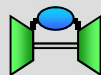
La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - richiami della SCR

Risultante di due forze concordi con la stessa retta d'azione

Un sistema formato da due forze concordi F_1 e F_2 con stessa retta d'azione $r_1 \equiv r_2 \equiv r$ è equivalente (o equipollente) ad un sistema formato da un'unica forza R , con retta d'azione r e concorde a F_1 e F_2 , il cui modulo è pari alla somma $F_1 + F_2$ dei moduli di F_1 e F_2 .



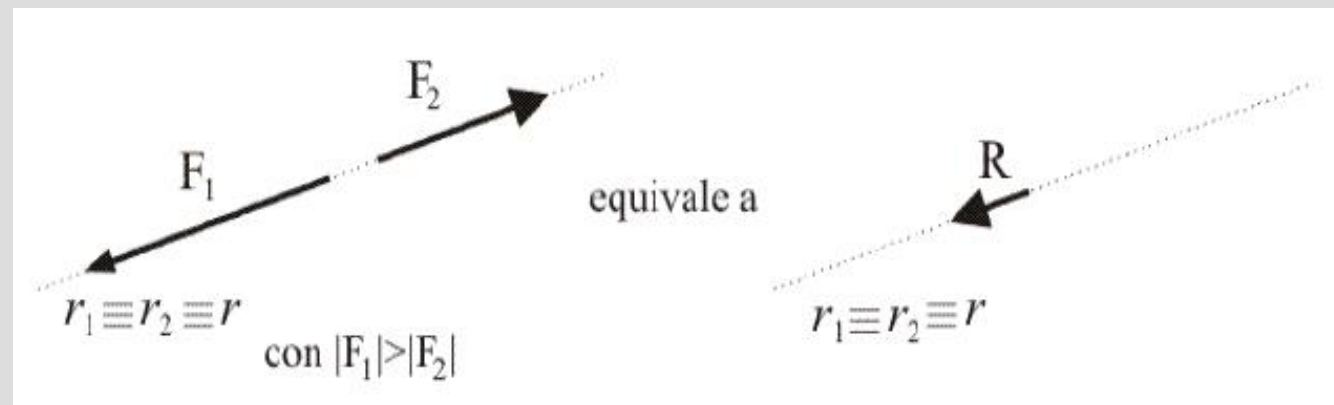
Università di Messina



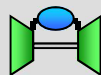
La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - richiami della SCR

Risultante di due forze discordi con la stessa retta d'azione

Un sistema formato da due forze discordi \mathbf{F}_1 e \mathbf{F}_2 con stessa retta d'azione $r_1 \equiv r_2 \equiv r$ è equivalente (o equipollente) ad un sistema formato da un'unica forza \mathbf{R} , con retta d'azione r e concorde alla forza a modulo maggiore, il cui modulo è pari al valore assoluto della differenza tra i moduli di F_1 e F_2 , $|F_1 - F_2|$.



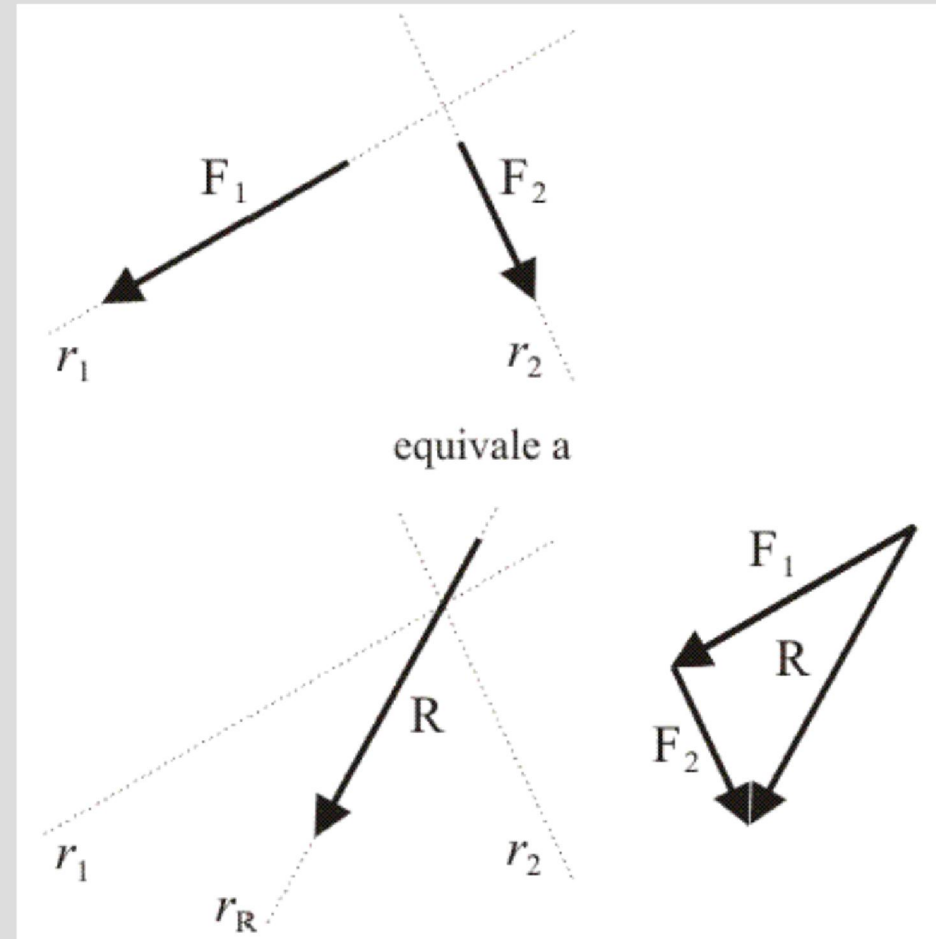
Università di Messina



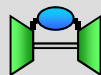
La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - richiami della SCR

Risultante di due forze incidenti

Un sistema formato da due forze F_1 e F_2 giacenti su rette d'azione incidenti, r_1 e r_2 , è equivalente ad un sistema formato da un'unica forza R , risultante del sistema di forze (F_1 , F_2). Il modulo, la direzione e il verso di R sono la somma vettoriale di F_1 e F_2 e la retta d'azione di R , r_R , detta asse centrale, passa per il punto d'intersezione delle rette r_1 e r_2 .



Università di Messina

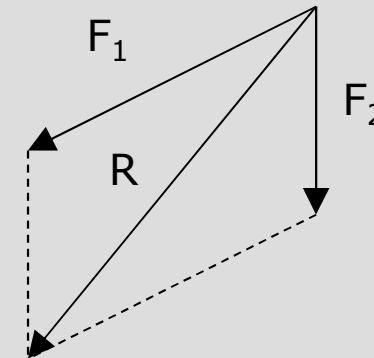


La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - richiami della SCR

Metodi per la determinazione della risultante di due forze incidenti:

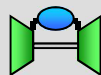
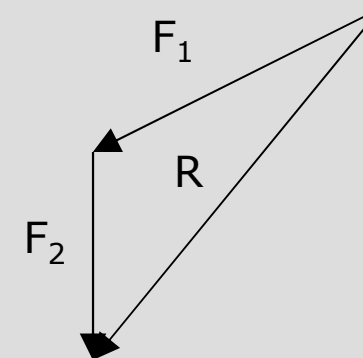
1) metodo del parallelogramma: si fanno slittare le due forze F_1 e F_2 verso il comune punto di intersezione delle rette.

La diagonale del parallelogramma è la risultante R .



2) metodo dei vettori concatenati: si trasla un vettore (es.: F_2) ponendo il suo punto d'origine sull'apice dell'altro (es.: F_1) .

Il vettore che unisce l'origine dell'uno con l'apice dell'altro è la risultante R .

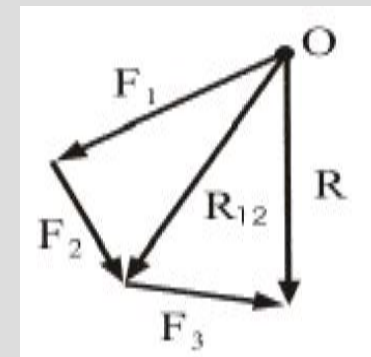
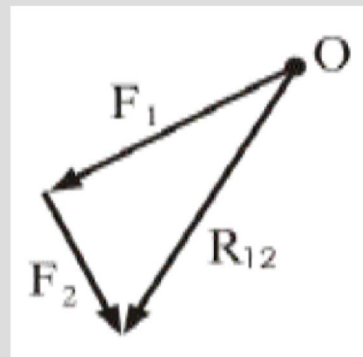
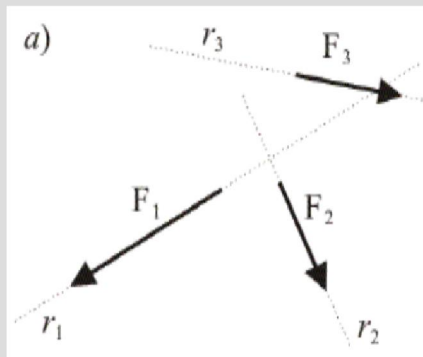


La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - richiami della SCR

Risultante di n forze incidenti ($n > 2$)

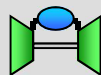
Un sistema formato da n forze con rette d'azione incidenti (Figura a) è equivalente ad un sistema formato da un'unica forza R , di modulo, direzione e verso forniti dalla somma vettoriale delle n forze (vedi composizione nelle figure successive). La retta d'azione della risultante del sistema di forze, detta ancora asse centrale, può essere determinata utilizzando il poligono delle successive risultanti.

La **somma vettoriale** è un'operazione commutativa, l'ordine secondo il quale vengono sommate le « n » forze non influisce sul risultato.



Università di Messina

Ing. Geol. Piergiuseppe Froldi
16/03/2022





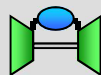
La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - richiami della SCR

Se si applicano i seguenti due **postulati**, l'equilibrio del corpo rigido non è alterato:

- 1) sostituendo ad un insieme di forze applicate in un punto la **forza risultante R** (cioè la somma vettoriale delle singole forze) applicato allo stesso punto, oppure se si sostituisce ad una forza applicata in un punto altre forze aventi per somma vettoriale la prima ed applicate nel punto.
- 2) se si trasporta il punto di applicazione di una forza lungo la sua retta di applicazione (vettore traslante, *sliding vector*).

Pertanto, sulla base di quanto postulato, si può concludere che i seguenti sistemi sono tutti **equipollenti** ad un'unica forza:

- un sistema di forze le cui rette di applicazione concorrono in un punto (sistema di forze concorrenti)
- un sistema di forze parallele a risultante non nullo
- un sistema di forze piane a risultante non nullo.



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - richiami della SCR

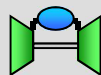
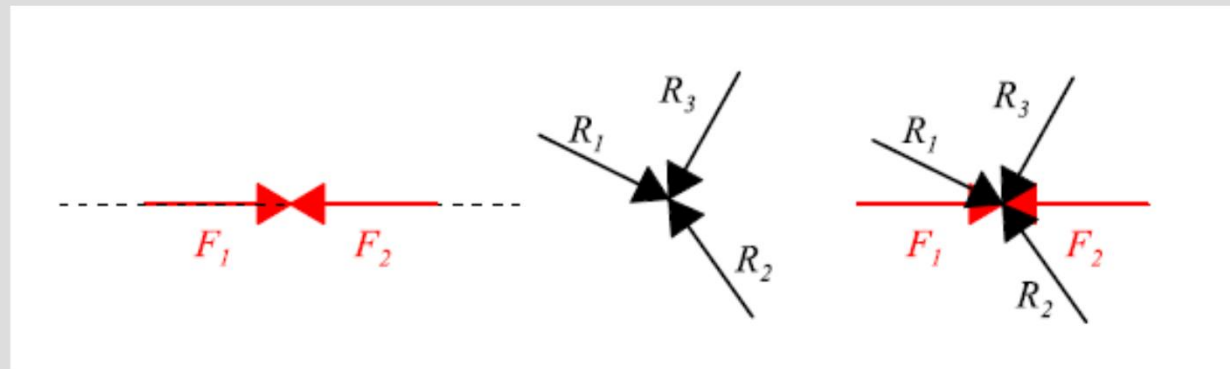
Esempio di **sistema di forze concorrenti in equilibrio**:

$$F_1 + F_2 = 0$$

$$R_1 + R_2 + R_3 = 0$$

allora:

$$(F_1 + F_2) + (R_1 + R_2 + R_3) = 0 + 0 = 0$$



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - richiami della SCR

Coppia di forze

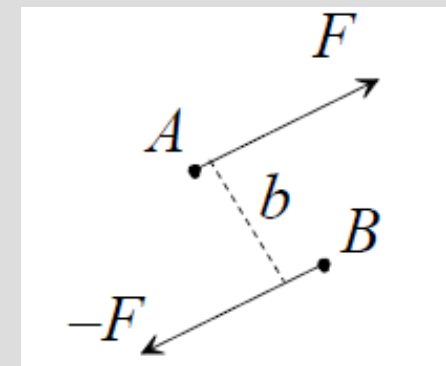
Se si considera un sistema di forze a risultante nulla, esso è equipollente a due forze opposte F e $-F$, applicate in due punti A e B .

Si possono avere due casi:

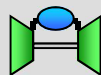
- 1) nel caso in cui le due forze hanno la stessa retta di applicazione, possono sopprimersi, essendo la risultante nulla
- 2) nel caso in cui le due forze giacciono su rette di applicazione parallele, esse costituiscono una coppia.

Della coppia di forze si possono definire:

- a) **piano della coppia**: quello su cui giacciono le due rette di applicazione
- b) il **braccio** b , ovvero la distanza tra le due rette
- c) il **verso** (orario o antiorario).



Prof. Paolo Rocco, POLIMI



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - richiami della SCR

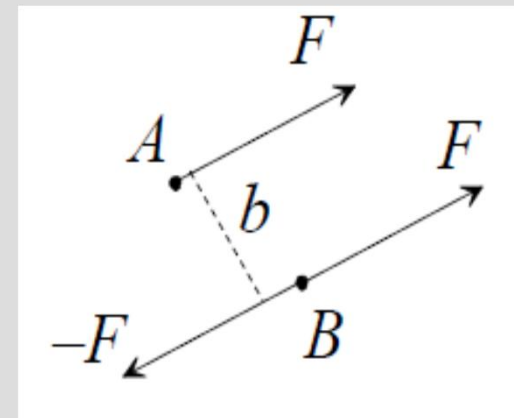
Trasformazione di una forza in una forza spostata ed una coppia (teorema di Huighens)

Si può agevolmente dedurre che aggiungendo una coppia, è possibile spostare una forza da un punto di applicazione ad un altro.

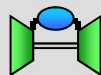
Infatti se alla forza F applicata nel punto A si aggiungono due forze opposte F e $-F$ (la cui risultante è nulla e quindi lasciando inalterato o equipollente il sistema) nel punto B , si ottengono:

- la forza F applicata nel punto B
- la coppia di forze F e $-F$, applicate in A e B .

Quindi un generico sistema di forze agenti su un corpo rigido, è equipollente ad **una forza**, applicata in un punto, e ad **una coppia**.



Prof. Paolo Rocco, POLIMI



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - richiami della SCR

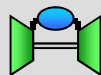
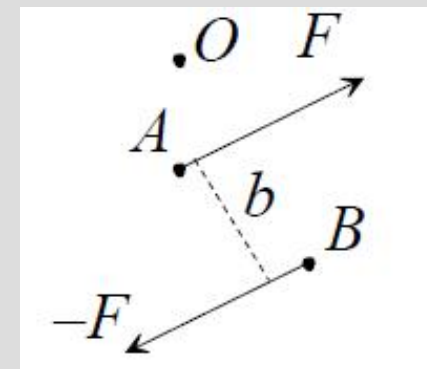
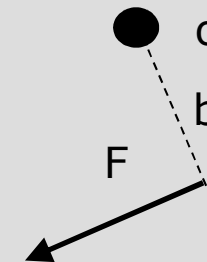
Momento di una forza rispetto ad un polo sul piano

Il momento di una forza F rispetto ad un polo qualsiasi "o" è definito dal **vettore momento M** (prodotto vettoriale) della forza rispetto al polo, quindi il vettore momento è definito in modulo dal prodotto del modulo di F per la distanza "b" del polo dalla retta di applicazione della forza.

Per il **teorema di Varignon** il momento del sistema di forze per un determinato polo è uguale al momento della risultante per lo stesso polo.

Inoltre, il vettore momento può essere rappresentato da una coppia che avrà:

- modulo pari al prodotto $F \times b$, essendo b il braccio della coppia
- verso o senso di rotazione congruente con il verso della coppia



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - richiami della SCR

Condizioni di equilibrio del corpo rigido vincolato

Si consideri il teorema fondamentale che dice che condizione necessaria e sufficiente (CNS) perché due sistemi di forze applicate ad un corpo rigido siano equipollenti è che abbiano la stessa risultante e lo stesso momento rispetto ad un polo.

Allora CNS perché un corpo rigido vincolato sia in **equilibrio** è che:

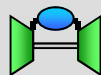
- 1) sia nulla la risultante delle forze esterne (sia quelle attive, o agenti, che quelle di reazione vincolare)
- 2) sia nullo il momento del sistema costituito da tali forze, rispetto a qualunque polo.

Ciò si traduce nelle seguenti espressioni:

$$R + R' = 0$$

$$M + M' = 0$$

dove R' e M' sono rispettivamente risultante e momento delle forze di reazione vincolare.





La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - richiami della SCR

Condizioni di equilibrio del corpo rigido vincolato nel piano

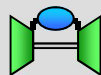
Nel piano, le equazioni di equilibrio espresse in forma vettoriale, si possono più agevolmente ridurre alle seguenti:

$$\Sigma F_{\text{est},x} = 0 \text{ (sommatoria nulla delle forze esterne lungo l'asse x)}$$

$$\Sigma F_{\text{est},y} = 0 \text{ (sommatoria nulla delle forze esterne lungo l'asse y)}$$

$$\Sigma M_{\text{est},0} = 0 \text{ (sommatoria nulla dei momenti esterni per un punto qualsiasi)}$$

0)



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - sviluppo

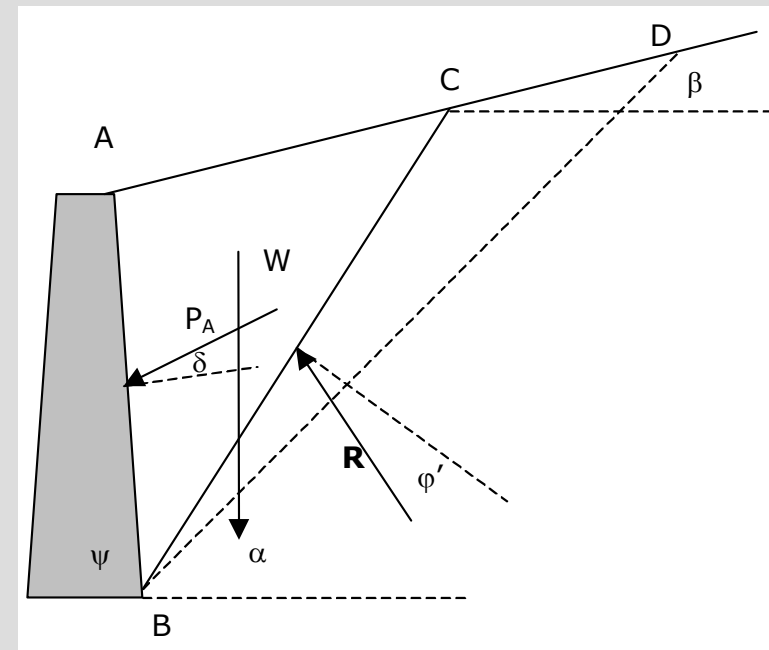
Cuneo di Coulomb

nonostante sia stato formulato ben prima della teoria delle spinte delle terre, tale metodo supera alcune delle limitazioni analitiche dell'approccio di Rankine, quali per esempio:

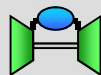
- 1) la presenza di attrito all'interfaccia opera terreno
- 2) la non verticalità del paramento di monte dell'opera.

Il modello si presta soprattutto per la determinazione delle spinte sull'opera anche nei seguenti casi:

- superficie superiore del terreno irregolare
- sovraccarichi irregolari e/o complessi
- presenza di fessure di trazione (terreni coesivi).



Froldi, 2001



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - sviluppo

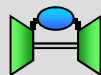
Cuneo di Coulomb - ipotesi

Il modello ipotizza la formazione di **superfici di scorrimento piane** passanti per la base della parete, analizzando le condizioni statiche all'equilibrio limite di un cuneo di terreno delimitato a valle dal paramento di monte dell'opera, superiormente dalla superficie topografica e inferiormente dalla superficie di rottura di tentativo.

Nel caso della determinazione del cuneo di spinta attiva a tergo dell'opera, quello **critico** è quello dotato di massima spinta, al contrario di quanto succede per il cuneo di spinta passiva a valle dell'opera, per il quale si ricerca quello che minimizza detta resistenza passiva.

La ricerca del cuneo di **massima spinta** (a monte dell'opera) e di **minima resistenza** (a valle dell'opera) può essere effettuata analiticamente (Statica del Corpo Rigido) o graficamente (metodo dei vettori).

Il metodo può svilupparsi sia **analiticamente** che **graficamente**, attraverso l'analisi vettoriale delle forze a cui è assoggettato il cuneo potenziale di rottura in esame.

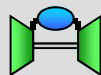


La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - sviluppo grafico

Cuneo di Coulomb - procedura grafica

Procedendo in **via grafica**, occorre calcolare il cuneo di tentativo (vedi figura precedente) sottoposto alle forze che, in condizioni statiche, configurano un poligono costituito da:

- W = peso del cuneo di terreno = $\frac{1}{2} \gamma_n \text{sen}(\psi + \beta) \underline{AB} \underline{AC}$
 - P_A = spinta attiva sul muro
 - R = reazione del terreno sulla superficie di scorrimento di tentativo
- dove:
- \underline{AB} = superficie del paramento di monte dell'opera di sostegno
 - \underline{AC} = superficie superiore del cuneo di terreno
 - \underline{BC} = superficie di rottura alla base del cuneo di terreno
 - α = angolo di inclinazione sull'orizzontale del piano di rottura di tentativo
 - β = angolo di inclinazione sull'orizzontale della superficie superiore
 - δ = angolo di attrito tra terreno e paramento di monte del muro



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - sviluppo grafico

Cuneo di Coulomb - procedura grafica

(EC 7 suggerisce di adottare un valore pari a $2/3 \varphi$ per strutture prefabbricate e φ per strutture in calcestruzzo gettate in opera); alcuni codici suggeriscono, nel caso delle strutture prefabbricate, $\delta = 1/2 \varphi$. La mobilitazione dell'angolo di attrito δ tra muro e terreno, presuppone un significativo movimento dell'opera di sostegno nella direzione di valle.

ψ = angolo di inclinazione sull'orizzontale del paramento di monte del muro

- $\varphi = \varphi' =$ angolo di attrito interno del terreno
- $\gamma_n = \gamma' =$ peso di volume del terreno (in genere $1,75 \div 1,85 \text{ t/m}^3$).

Per ogni superficie di rottura di tentativo BC_1, BC_2, BC_3 , ecc., si identifica un differente cuneo potenzialmente instabile, quale ABC_1, ABC_2, ABC_3 a cui si associano differenti valori di P_A ; la **costruzione grafica di Culmann** (poligoni delle forze per diversi α) permette l'identificazione del maggiore di questi valori (valore ricercato).





La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - mobilitazione attrito

Cuneo di Coulomb - mobilitazione dell'attrito muro-terreno

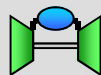
Gli **spostamenti dell'opera di sostegno** di altezza H necessari per la mobilitazione dell'angolo di attrito muro-terreno, possono essere determinati in prima approssimazione (caso di spostamento verso valle, stato di spinta attiva, vedi oltre) con la seguente tabella (Wu, 1975):

TERRENI SABBIOSI

- spostamento parallelo alla base di $0,001H$
- rotazione attorno alla base di $0,001H$

TERRENI ARGILLOSI

- spostamento parallelo alla base di $0,004H$
- rotazione attorno alla base di $0,004H$



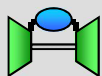
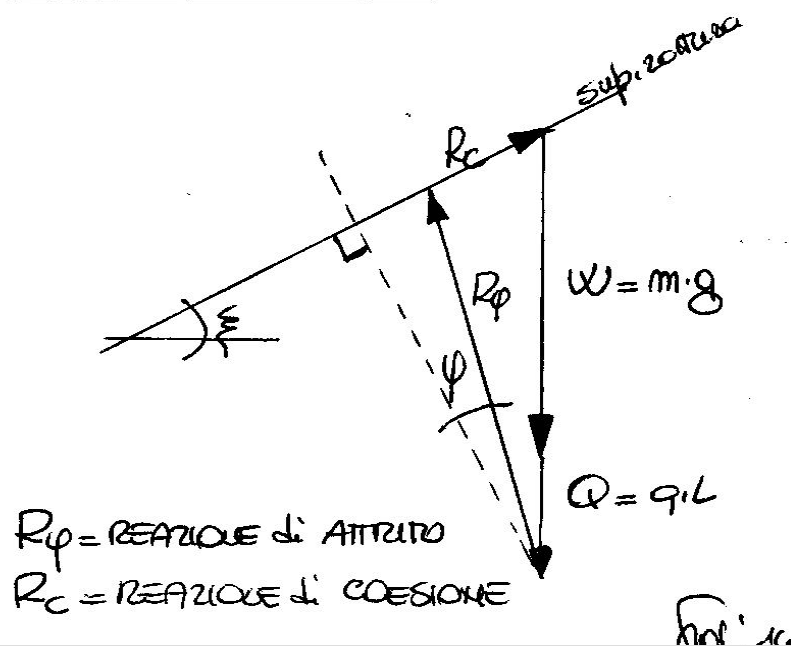
La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - sviluppo grafico

Nel caso di **risoluzione grafica** deve essere costruito graficamente il **poligono delle forze** il quale si deve chiudere con le resistenze disponibili (mobilitabili) sulla superficie di scivolamento, come da schema al seguito, valido per scivolamento su superficie dotata di attrito e coesione, senza sottospinte idrauliche.

Il poligono delle forze era un tempo molto utilizzato allorquando non erano disponibili le capacità di calcolo attualmente offerte dai computer.

Rappresenta ancora una buona analisi per la comprensione fisica delle condizioni di stabilità dei cunei di terreno potenzialmente instabile.

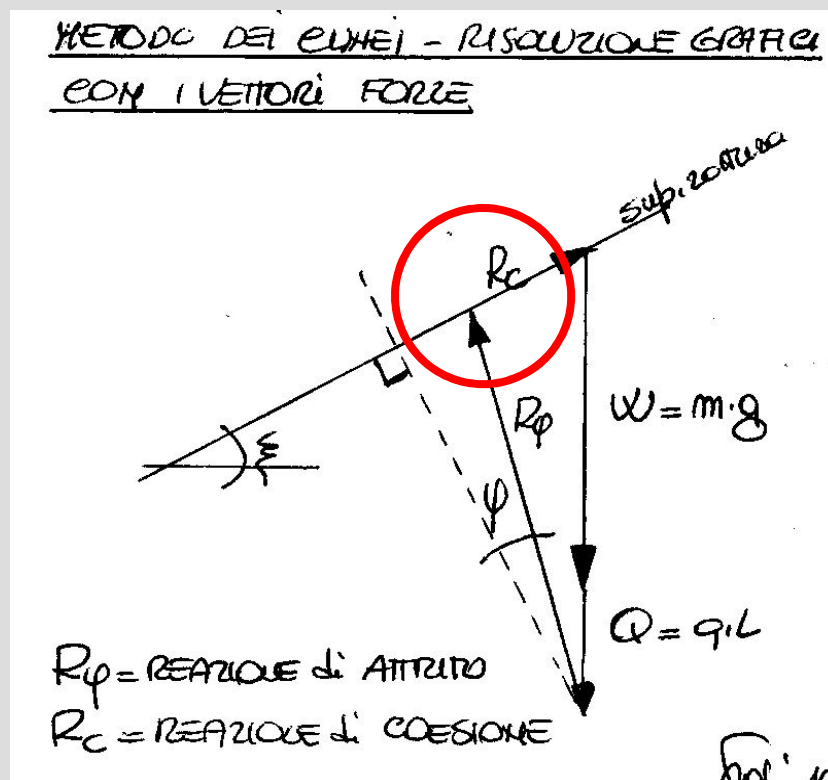
METODO DEI CUNEI - RISOLUZIONE GRAFICA
CON I VETTORI FORZE



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - sviluppo grafico

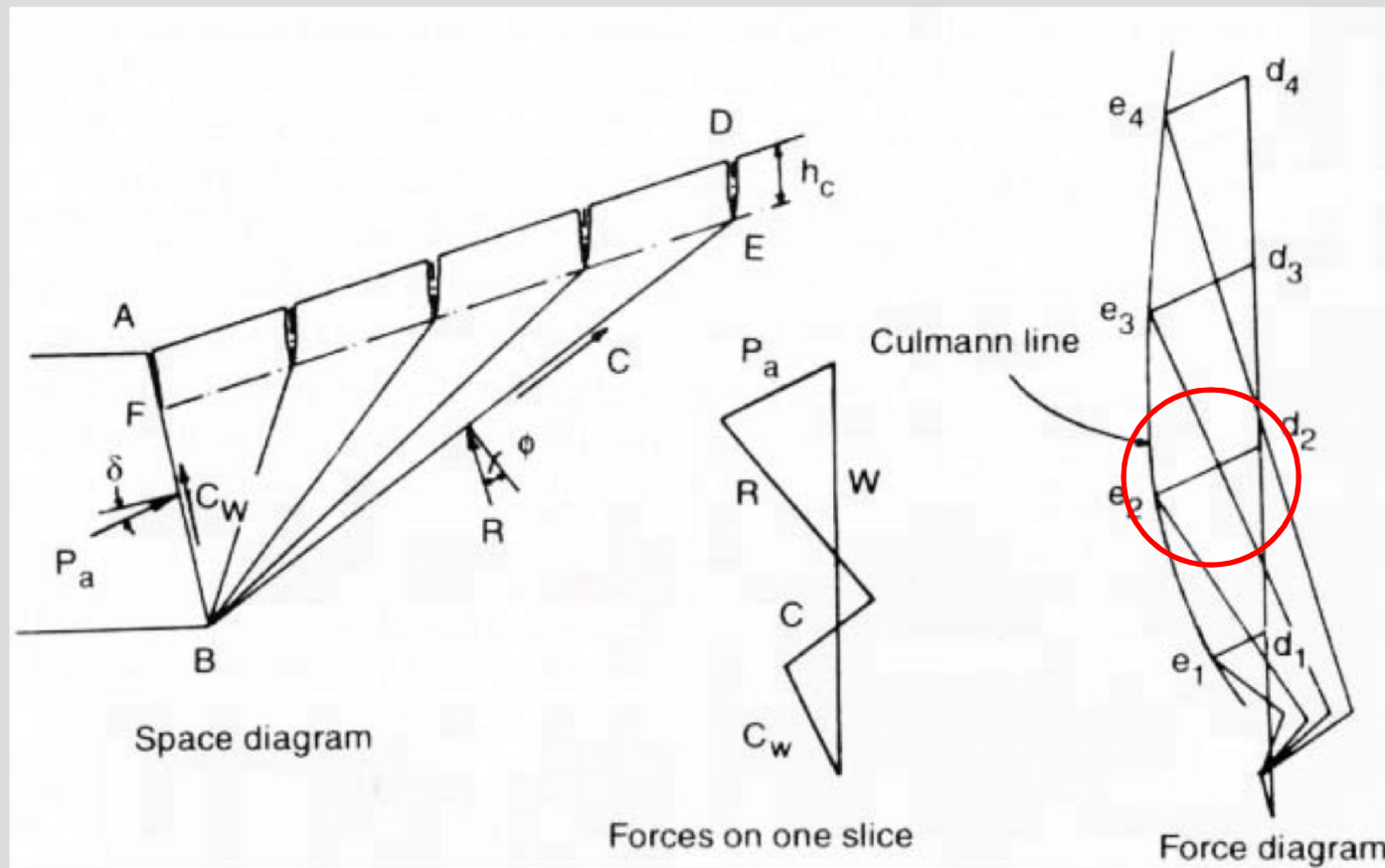
Nella risoluzione grafica rappresentata in figura, la presenza della **reazione di coesione mobilitabile** sulla superficie di rottura deve essere in grado di chiudere il poligono delle forze ($FS = 1$), poiché in assenza di chiusura il cuneo è instabile in quanto la reazione di attrito è insufficiente per la stabilità.

Nel caso la reazione di **coesione massima mobilitabile** sia inferiore al tratto mancante per la chiusura del poligono si avrà instabilità ($FS < 1$), nel caso in cui sia superiore si avrà stabilità con $FS > 1$.

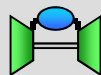


La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - sviluppo grafico

Cuneo di Coulomb - procedura grafica - metodo di Culmann



J. Facciorusso, C. Madiari, G. Vannucchi - Dispense di Geotecnica, 2006





La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - sviluppo analitico

Nel caso di **risoluzione analitica** devono essere verificate le seguenti equazioni di equilibrio alla traslazione:

Traslazione orizzontale (h):

$$\Sigma F_h = 0$$

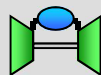
Forze orizzontali = componenti h della forza peso, dei sovraccarichi, della sottopressione idraulica sulla superficie di rottura, azione sismica orizzontale, ecc.

Traslazione verticale (v):

$$\Sigma F_v = 0$$

Forze verticali = componenti v della forza peso, dei sovraccarichi, della sottopressione idraulica sulla superficie di rottura, azione sismica verticale, ecc.

Si trascurano i momenti.



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - tension crack

Teoricamente, nei terreni coesivi, la forza di coesione crea l'apertura di **fessure di trazione fino ad una profondità**, al di sotto della superficie topografica, sia essa orizzontale che inclinata, pari a:

$$z_0 = \frac{2c}{\gamma} \tan(45^\circ + \phi / 2)$$

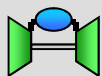
dove:

c = coesione in termini di tensioni totali

ϕ = angolo di attrito in termini di tensioni totali.

Possono essere anche usati parametri in termini di tensioni efficaci (c' , ϕ').

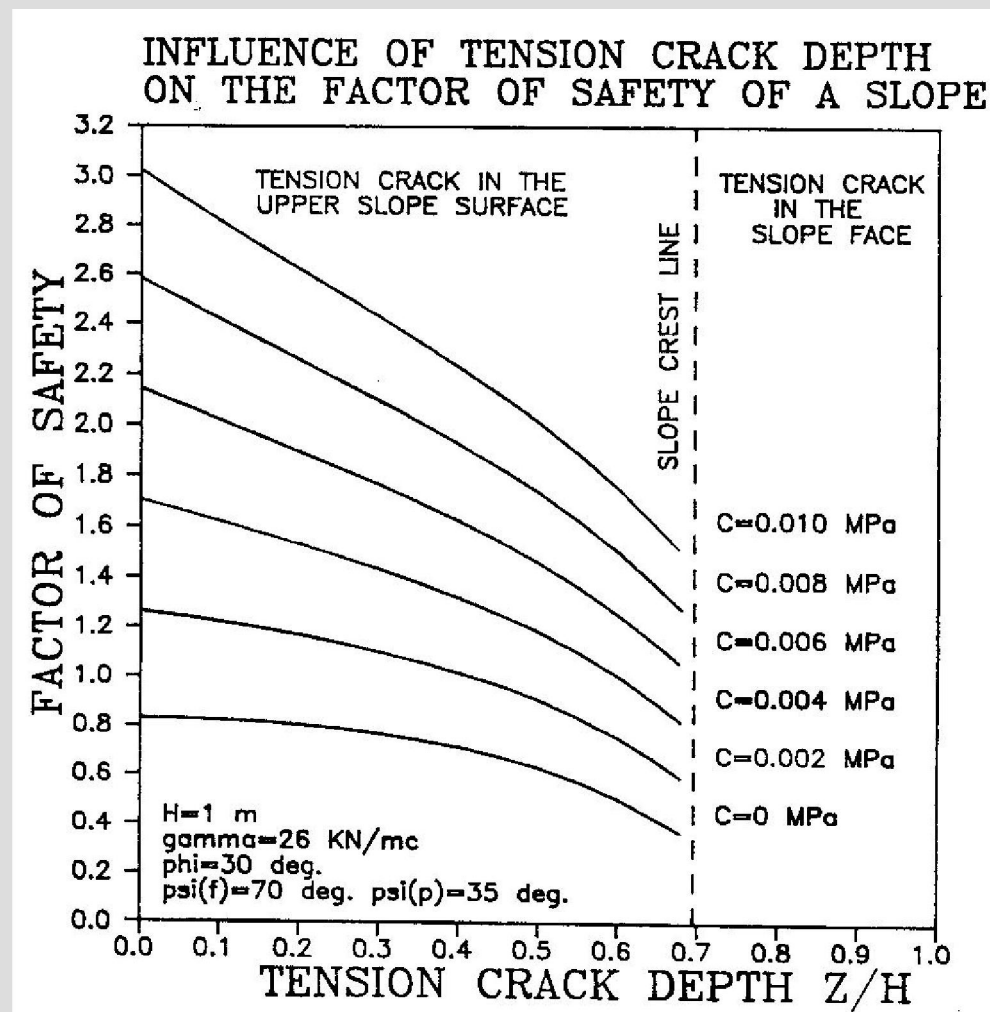
L'effetto dell'apertura della fessura di trazione è quello di ridurre la dimensione del cuneo instabile e modificarne le condizioni statiche.



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - tension crack

L'altezza della tension crack (t.c.) e la spinta idrostatica orizzontale che in essa si genera, sono potenzialmente in grado di abbassare sensibilmente il **Fattore di Sicurezza** nel caso di cunei di dimensioni limitate (vedi figura da Frolidi, 1996).

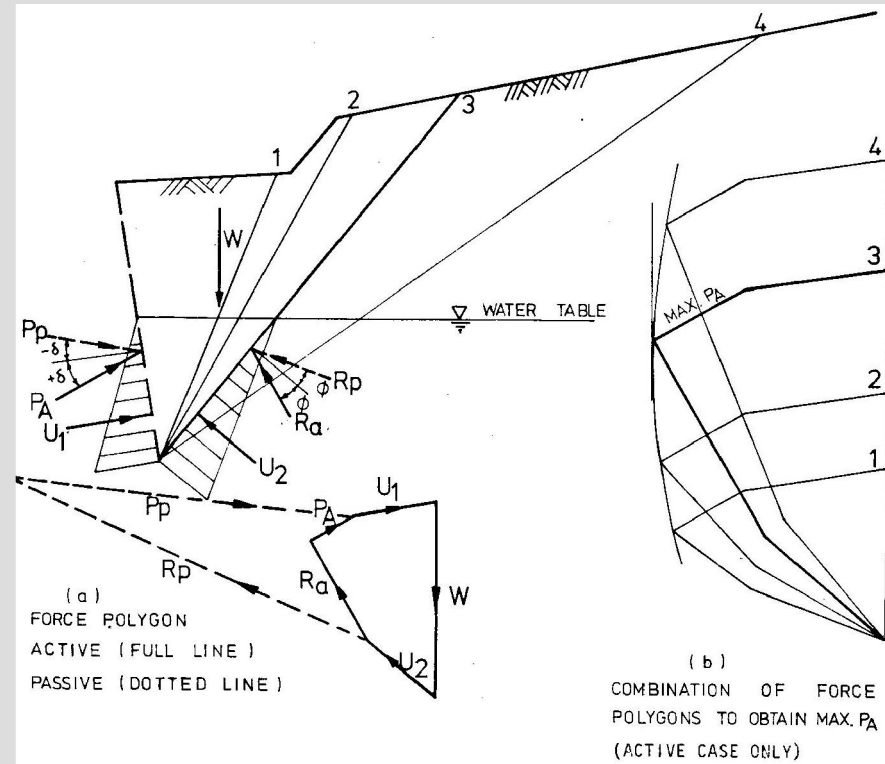
Pertanto in questi modelli occorre ricercare il valore di **FS minimo** facendo variare sia l'inclinazione del piano di rottura che la posizione delle t.c.



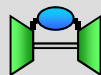
La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - spinta idrostatica

In generale, nel metodo di Coulomb in corrispondenza di terreno permeabile, la **spinta idrostatica**, laddove non vi sia drenaggio a tergo dell'opera, può essere imputata come la risultante del triangolo delle spinte con base alla base dell'opera di sostegno, come rappresentato oltre nell'esempio di calcolo.

Nel caso in cui la superficie di rottura di ipotesi coincida con un limite di permeabilità, la risultante incide direttamente contro tale superficie, come evidenziato in figura.

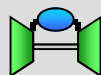


GCO, 1982

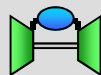
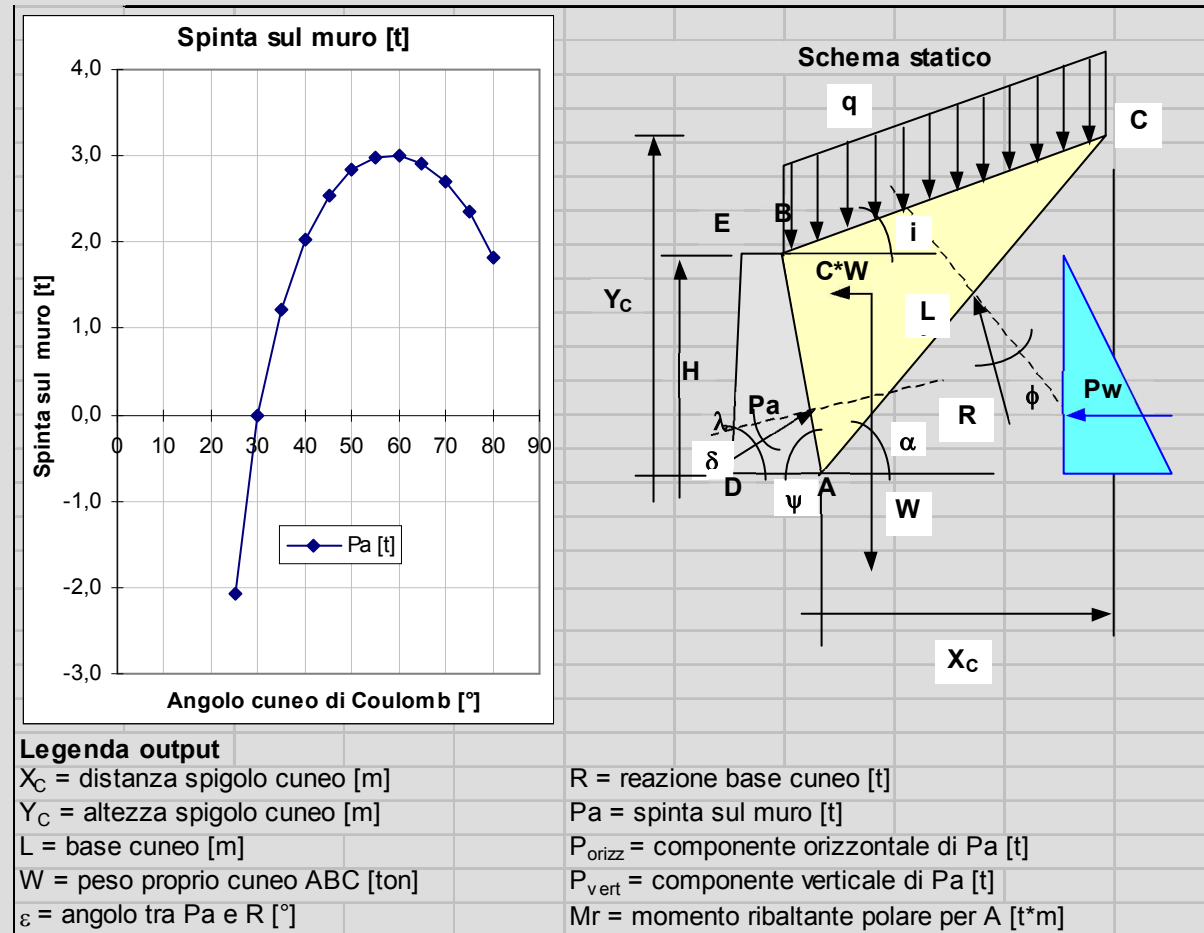


La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - esempio

Muro di sostegno con carico verticale distribuito											
Calcolo delle spinte secondo il metodo del cuneo di Coulomb su superficie piana (1776)											
Committente				Data							
Lavoro				Località							
Ipotesi = terreno omogeneo granulare a tergo del muro-verifica a lungo termine-condizioni efficaci											
Dati di input				Verifica A2 + M2 + R2 - statica							
Carico distribuito verticale superiore q [t/m ²] =				0,00							
Coefficiente di intensità sismica orizz. k_h =				0,000 k_h - zona di II categoria sismica							
Altezza paramento monte muro H [m] =				3,00			Angolo orizz. muro lato valle λ [°] =				90
Angolo orizzontale muro lato monte ψ [°] =				90							
Angolo orizzontale pendio superiore i [°] =				5,7			* positivo in senso antiorario				10,00%
Angolo di attrito muro-terreno δ [°] =				0							
Angolo di attrito terreno ϕ' [°] =				30,00							
Peso di volume terreno γ [t/m ³] =				1,90			Drenato Saturo				
Angolo orizzontale cuneo α [°] =				variabile			x				
α	X_c	Y_c	L	W	ε	R	Pa	P_{orizz}	P_{vert}	Mr	
[°]	[m]	[m]	[m]	[t]	[°]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t*m]	
25	8,19	3,82	9,04	23,34	85	23,43	-2,07	-2,07	0,00	-2,07	
30	6,29	3,63	7,26	17,91	90	17,91	-0,02	-0,02	0,00	-0,02	
35	5,00	3,50	6,10	14,25	95	14,30	1,23	1,23	0,00	1,23	
40	4,06	3,41	5,30	11,57	100	11,74	2,02	2,02	0,00	2,02	
45	3,34	3,33	4,72	9,50	105	9,83	2,53	2,53	0,00	2,53	
50	2,75	3,27	4,28	7,83	110	8,33	2,84	2,84	0,00	2,83	
55	2,26	3,23	3,94	6,44	115	7,10	2,99	2,99	0,00	2,99	
60	1,84	3,18	3,68	5,24	120	6,04	3,01	3,01	0,00	3,01	
65	1,47	3,15	3,47	4,18	125	5,10	2,92	2,92	0,00	2,91	
70	1,14	3,11	3,31	3,23	130	4,21	2,70	2,70	0,00	2,70	
75	0,83	3,08	3,19	2,35	135	3,32	2,34	2,34	0,00	2,34	
80	0,54	3,05	3,10	1,53	140	2,38	1,82	1,82	0,00	1,82	



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - esempio



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - esempio

Calcolo manuale del cuneo di massima spinta Caso di terreno granulare senza falda

$$\gamma = \text{angolo in C} = 180^\circ - (90^\circ + i) - (90^\circ - \alpha) = -1 + \alpha = -5,7 + 60 = 54,3^\circ$$

$$\begin{aligned} \underline{AC} = L &= \text{da teorema dei seni sul triangolo ABC} = H \cdot [\text{sen}(90^\circ + i)] / \text{sen } \gamma \\ &= 3 \cdot (\text{sen } 95,7^\circ) / \text{sen } 54,3^\circ = 3,68 \text{ m} \end{aligned}$$

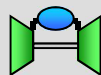
$$X_c = \underline{AC} \cdot \cos \alpha = 3,68 \cdot \cos 60^\circ = 1,84 \text{ m}$$

$$Y_c = X_c \cdot \tan \alpha = 1,84 \cdot \tan 60^\circ = 3,19 \text{ m}$$

$$\text{Area cuneo} = 1/2 \underline{AC} \cdot \underline{AB} (=H) \cdot \text{sen}(90^\circ - \alpha) = 0,5 \cdot 3,68 \cdot 3 \cdot \text{sen}(90^\circ - 60) = 2,76 \text{ m}^2$$

consideriamo un cuneo di larghezza unitaria in senso trasversale, il suo peso sarà:

$$\begin{aligned} W = \text{peso cuneo} &= \text{area cuneo} \cdot 1 \cdot \text{peso di volume} = 2,76 \cdot 1 \cdot 1,9 \text{ t/m}^3 \\ &= 5,24 \text{ t} = 52,4 \text{ kN} \end{aligned}$$



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - esempio

Calcolo manuale della risultante delle forze

Applichiamo le equazioni dell'equilibrio statico secondo le direzioni orizzontale (h) e verticale (v):

Traslazione orizzontale (h):

$$\Sigma F_h = 0$$

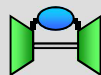
Traslazione verticale (v):

$$\Sigma F_v = 0$$

poiché trascuriamo l'attrito di interfaccia tra muro e cuneo spingente, la reazione dell'opera sul cuneo **P_a** sarà orizzontale

poiché il terreno è dotato di solo attrito, la reazione **R** del substrato sulla superficie di rottura sarà inclinata di ϕ verso monte, quindi si può concludere con semplici ragionamenti che sarà inclinata di $\alpha - \phi$ rispetto a W

Perché le due equazioni siano soddisfatte, il poligono delle forze deve chiudersi su se stesso.



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb - esempio

Calcolo manuale della risultante delle forze

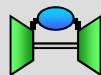
La condizione di chiusura del poligono delle forze si traduce nelle seguenti equazioni:

$$P_a = W \cdot \tan (\alpha - \phi) = 5,24 \cdot \tan (60^\circ - 30^\circ) = 3,02 \text{ t/m}$$

$$R = W / \cos (\alpha - \phi) = 5,24 / \cos (60^\circ - 30^\circ) = 6,05 \text{ t/m}$$

Il calcolo si complica in presenza di:

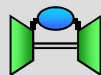
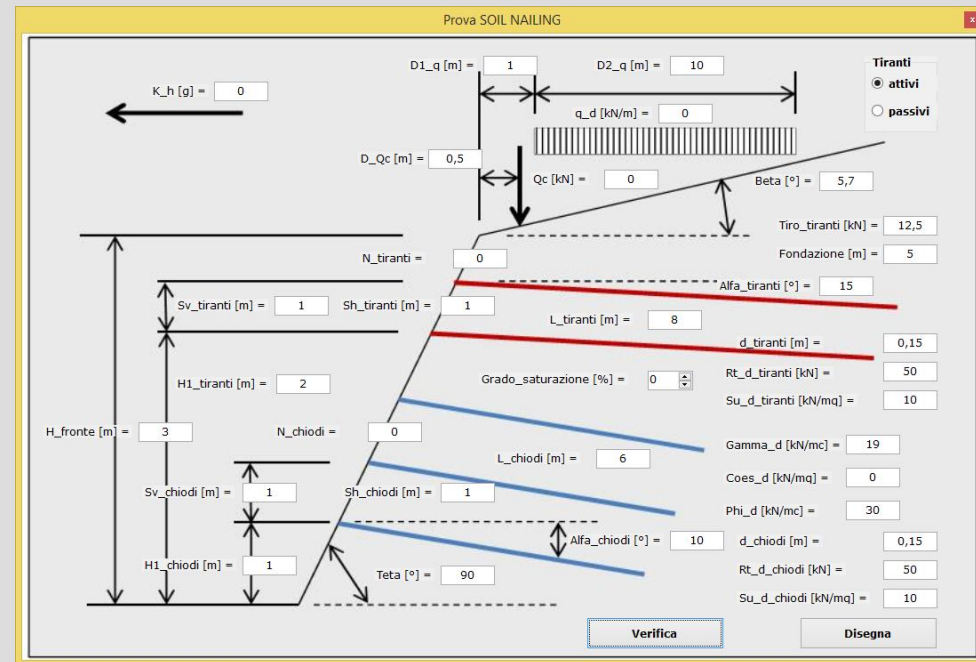
- 1) terreno coesivo
- 2) tension crack
- 3) angolo di attrito muro terreno non nullo
- 4) azione sismica
- 5) carichi sulla superficie del cuneo
- 6) paramento di monte dell'opera non verticale.



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb – esempio calcolo automatico

Calcolo automatico della risultante delle forze

Con il programma di calcolo automatico realizzato dallo scrivente (vedi a fianco), nato per la progettazione e verifica delle pareti chiodate (soil nailing), è possibile verificare con il metodo di Coulomb la spinta orizzontale in essere per tale geometria.

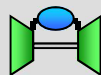
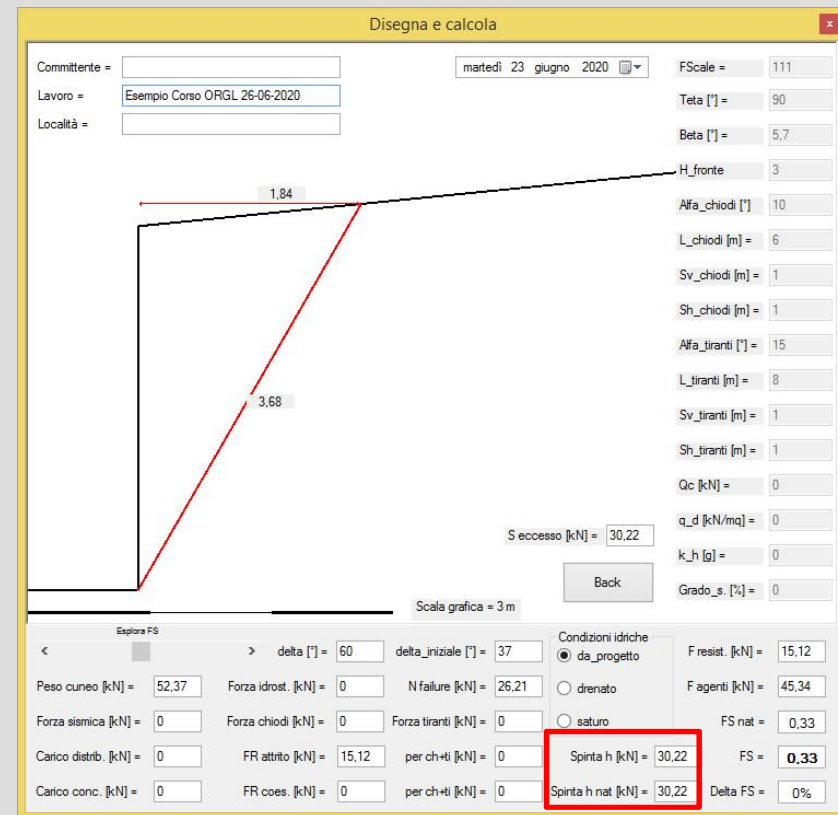


La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Coulomb – esempio calcolo automatico

Calcolo automatico della risultante delle forze

Il risultato che si consegue è lo stesso ed evidenziato con il quadro rosso.

Con tale programma è possibile risolvere una vasta casistica che interessa, oltre che i terreni armati con chiodi passivi e/o attivi, anche le spinte delle terre in numerose configurazioni geometriche e di carico, in condizioni statiche e sismiche, drenate, parzialmente drenate e non drenate.



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine (1857)

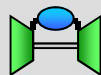
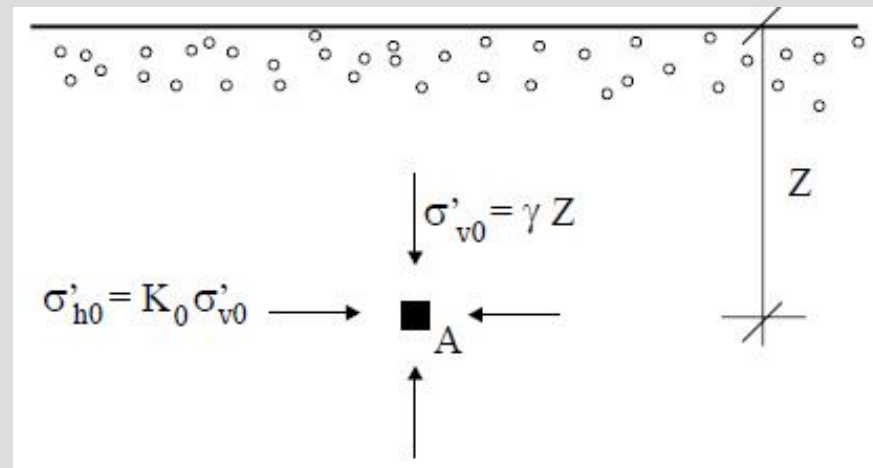
Si consideri una massa di terreno omogeneo dotato di sola resistenza per angolo di attrito efficace (φ o φ' – materiale perfettamente granulare): in un qualsiasi punto sotto la superficie di campagna in assenza di falda un elementino infinitesimo di terreno è sottoposto alle tensioni efficaci (al netto di u):

σ_1' = pressione verticale in sito ($\equiv \sigma_{v0}$)

σ_3' = pressione orizzontale in sito ($\equiv \sigma_{h0}$)

dove in stato indeformato il rapporto $\sigma_3' / \sigma_1' = K_0$ è funzione sia delle caratteristiche litotecniche del terreno sia della sua storia tensionale.

J. Facciorusso, C. Madiati, G. Vannucchi – Dispense di Geotecnica, 2006



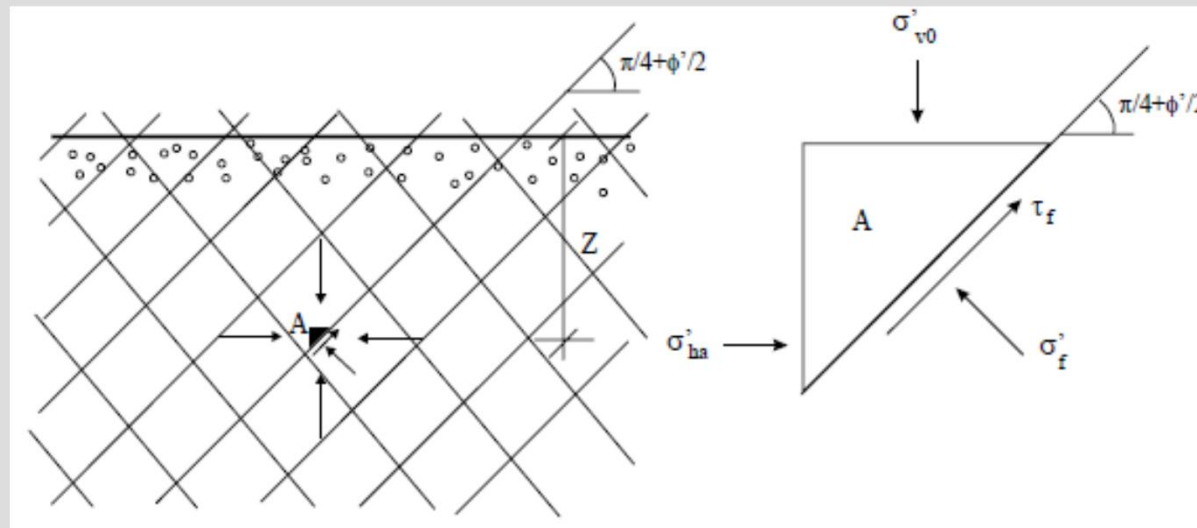
La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - spinta attiva

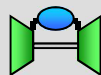
Lo stato di equilibrio plastico (alla rottura plastica) si raggiunge con le pressioni laterali:

p_a = pressione laterale attiva (vedi figura)

p_p = pressione laterale passiva



J. Facciorusso, C. Madiati, G. Vannucchi - Dispense di Geotecnica, 2006



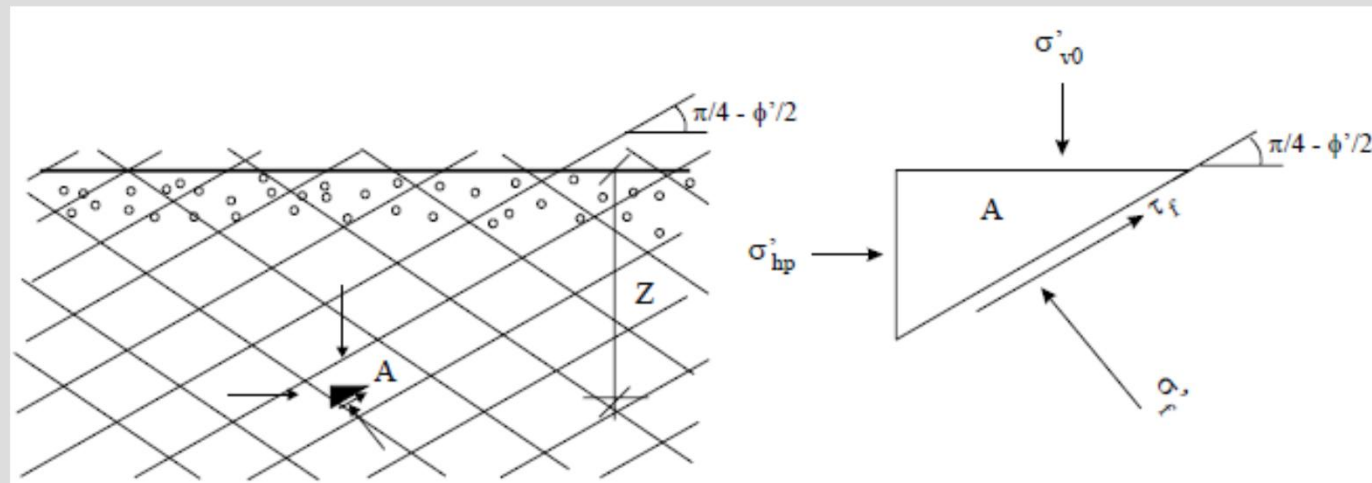
La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - spinta passiva

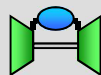
La rottura plastica avverrà quando:

$$\sigma_3' = p_a < \sigma_1' \quad \Rightarrow \text{espansione}$$

$$\sigma_3' = p_p > \sigma_1' \quad \Rightarrow \text{compressione}$$



J. Facciorusso, C. Madiai, G. Vannucchi - Dispense di Geotecnica, 2006



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - spinta passiva

le inclinazioni sull'orizzontale dei piani di rottura plastica saranno:

$$\alpha_a = 45^\circ + \varphi / 2$$

$$\alpha_p = 45^\circ - \varphi / 2$$

il rapporto tra la pressione limite laterale alla rottura plastica e la pressione verticale è:

$$K_a = p_a / \sigma_1' = \text{coefficiente di spinta attiva} = \tan^2 (45^\circ - \varphi / 2) = (1 - \text{sen } \varphi) / (1 + \text{sen } \varphi)$$

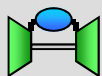
$$K_p = p_p / \sigma_1' = \text{coefficiente di spinta passiva} = \tan^2 (45^\circ + \varphi / 2) = (1 + \text{sen } \varphi) / (1 - \text{sen } \varphi)$$

Si noti che $K_a = 1 / K_p$ da cui $K_a K_p = 1$

Da cui le pressioni laterali in condizioni di rottura plastica:

$$p_a = K_a \times \sigma_1'$$

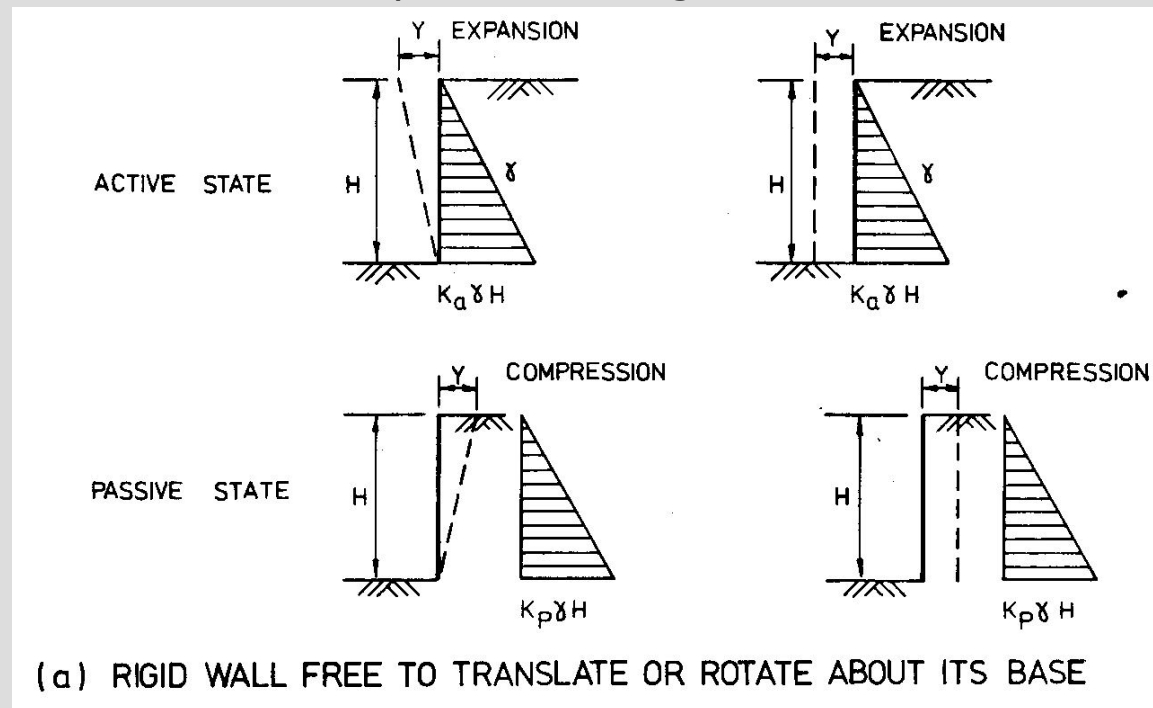
$$p_p = K_p \times \sigma_1'$$



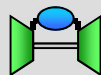
La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - lo stato della deformazione

Lo stato di deformazione del terreno dipende dalle caratteristiche di rigidità e di vincolo dell'opera di sostegno.



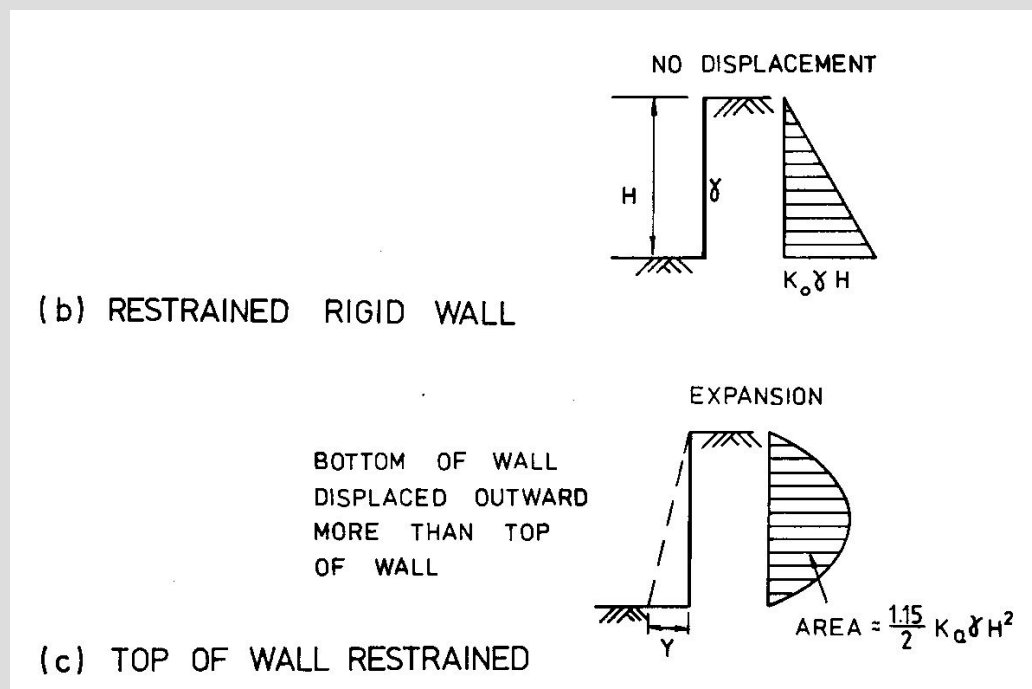
GCO, 1982



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - lo stato della deformazione

Lo stato di deformazione del terreno dipende dalle caratteristiche di rigidità e di vincolo dell'opera di sostegno.



GCO, 1982

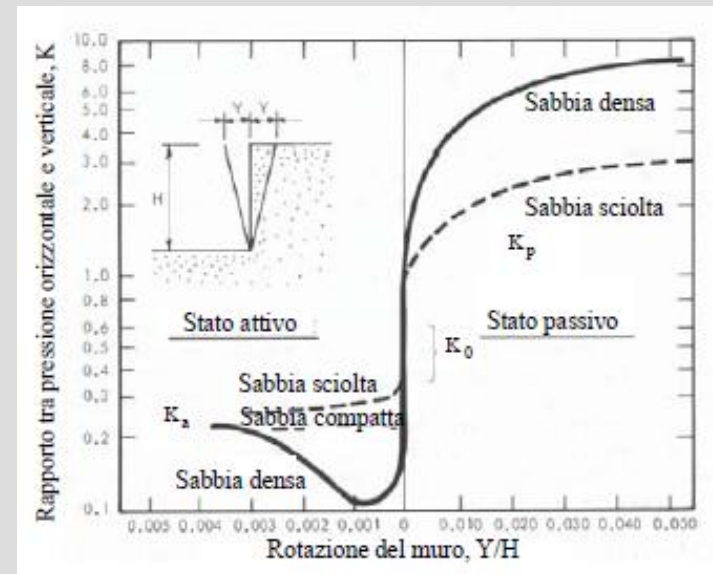


La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

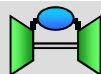
Le spinte di Rankine - lo stato della deformazione

Le pressioni di spinta laterali attiva e passiva incorrono con entità deformative percentuali molto differenti, ben superiori nel caso della spinta passiva che nel caso di quella attiva.

J. Facciorusso, C. Madiari, G. Vannucchi – Dispense di Geotecnica, 2006



Terreno	Rotazione Y/H	
	Decompressione (Stato attivo)	Compressione (Stato passivo)
Incoerente denso	0,001	0,020
Incoerente sciolto	0,004	0,060
Coesivo consistente	0,010	0,020
Coesivo molle	0,020	0,040



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - la spinta a riposo

Nel caso in cui non si abbiano spostamenti dell'opera di sostegno, la spinta che agisce è quella **a riposo** (at rest).

Il **coefficiente di spinta a riposo**, per terreni normalmente consolidati e superficie superiore orizzontale ($\beta = 0^\circ$) è a pari a:

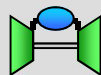
$$K_0 = 1 - \tan^2 \varphi'$$

il valore di progetto della spinta a riposo per terreni ad alto angolo di attrito non dovrebbe essere inferiore a 0,5.

Nel caso di pendio superiore non orizzontale a inclinazione β , il codice geotecnico danese (Danish Geotechnical Institute, 1978) suggerisce il seguente valore:

$$K_0 = 1 + \tan^2 \beta$$

Il punto di applicazione della spinta a riposo pari a $1/2 K_0 \gamma H^2$ è sempre posto a $H/3$.



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - le formulazioni

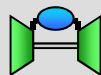
Il modello di base considera:

- una massa di terreno omogeneo e isotropo di estensione semi-infinita a monte dell'opera
- l'assenza di attrito all'interfaccia con il terreno ($\delta = 0^\circ$)
- un paramento di monte verticale.

Nel caso di condizioni completamente drenate (assenza di falda), presenza di solo attrito efficace φ' e pendio superiore orizzontale ($\beta = 0^\circ$), combinando le precedenti tensioni orizzontali in condizione limite di rottura secondo diagrammi di distribuzione triangolari lungo lo sviluppo verticale del paramento considerato, la spinta complessiva agente sul paramento (posizionata a $H/3$ dello sviluppo) di altezza H è pari rispettivamente a:

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2$$



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - le formulazioni

Nel caso di condizioni completamente drenate (assenza di falda), solo attrito efficace φ' e pendio superiore inclinato ($\beta \neq 0^\circ$), la spinta complessiva di monte (agente) diviene:

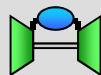
$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \cos \beta$$

La spinta complessiva si posiziona ancora a $h=H/3$ dello sviluppo del paramento (distribuzione triangolare), ma è inclinata di β rispetto all'orizzontale.

I coefficienti di spinta laterale attiva e passiva (nel caso di compressione verso monte), si modificano nei seguenti:

$$K_a = \frac{\cos \beta - \sqrt{(\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi')}}{\cos \beta + \sqrt{(\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi')}}$$

$$K_p = \frac{1}{K_a} = \frac{\cos \beta + \sqrt{(\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi')}}{\cos \beta - \sqrt{(\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi')}}$$



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - le formulazioni

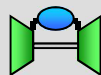
Nel caso di di condizioni completamente drenate (assenza di falda), coesione efficace c' e attrito efficace φ' e pendio superiore orizzontale ($\beta = 0^\circ$), le tensioni limite attiva e passiva si modificano come segue (K_a e K_p si calcolano come nel caso di solo attrito):

$$p_a = K_a \sigma_v' - 2c' \sqrt{K_a}$$

$$p_p = K_p \sigma_v' + 2c' \sqrt{K_p}$$

Poiché il terreno non è in grado di sopportare stati di trazione, si formeranno fessurazioni dal p.c. fino ad una quota pari a:

$$z_o = \frac{2c'}{\gamma \sqrt{K_a}}$$



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - le formulazioni

Pertanto la spinta attiva complessiva avrà una distribuzione triangolare a partire da tale quota, e risulterà pari a:

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma (H - z_o)^2$$

Essa sarà applicata ad un'altezza dalla base dell'opera pari a:

$$h = \frac{H - z_o}{3}$$

La spinta passiva complessiva invece avrà una distribuzione trapezoidale a partire da un valore non nullo in sommità all'opera (potendo contare sulla coesione), e risulterà pari alla somma delle componenti a distribuzione rettangolare (P_1 , dovuta alla coesione) e a distribuzione triangolare (P_2 , dovuta all'angolo di attrito) :



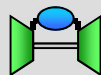
La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - le formulazioni

$$P_p = P_1 + P_2 = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 + 2c' \sqrt{K_p} H$$

La linea di azione della risultante così composta (altezza $h=H/3$ per la P_1 , e $h=H/2$ per la P_2), sarà ad una quota intermedia tra $H/3$ e $H/2$, ovvero a:

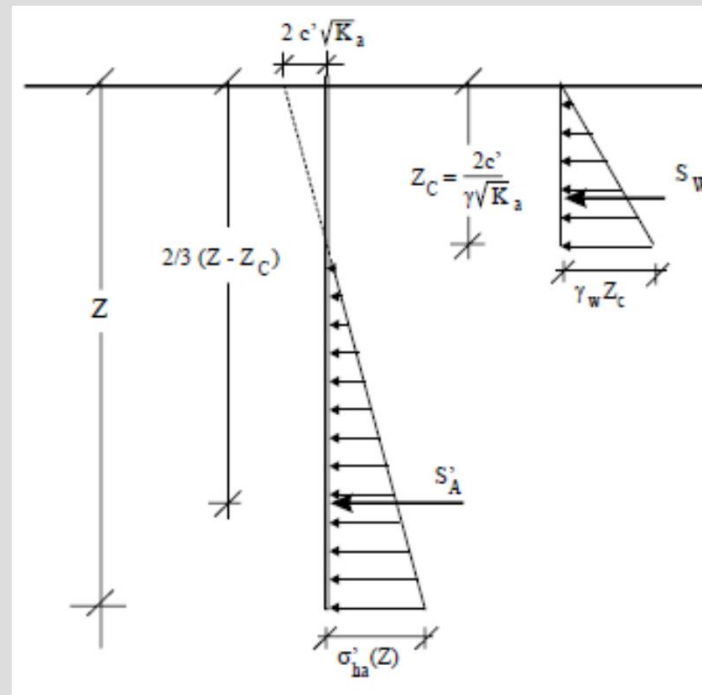
$$h = \frac{P_1 \frac{H}{3} + P_2 \frac{H}{2}}{P_1 + P_2}$$



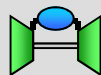
La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - le formulazioni

Esempio di diagramma di spinta attiva in un terreno dotato di coesione e attrito



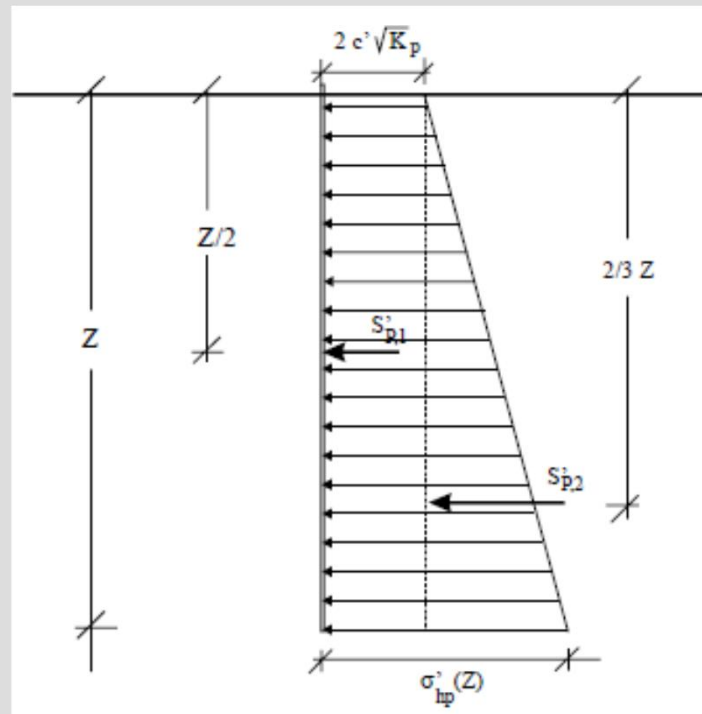
J. Facciorusso, C. Madij, G. Vannucchi - Dispense di Geotecnica, 2006



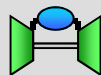
La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - le formulazioni

Esempio di diagramma di spinta passiva in un terreno dotato di coesione e attrito



J. Facciorusso, C. Madiaj, G. Vannucchi - Dispense di Geotecnica, 2006



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - le formulazioni

Effetto del sovraccarico distribuito

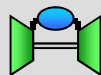
L'effetto di un sovraccarico “q” uniformemente distribuito sulla pressione orizzontale limite, è dato dalla somma dello stesso per il corrispondente coefficiente di spinta, ovvero le pressioni limite diverranno:

$$p_a = K_a \sigma_v' + K_a q - 2c' \sqrt{K_a}$$

$$p_p = K_p \sigma_v' + K_p q + 2c' \sqrt{K_p}$$

Di conseguenza varieranno le spinte totali sul paramento.

si ricorda che la teoria di Rankine si basa sugli sforzi efficaci, identici a quelli totali nel caso di assenza di falda come quello appena illustrato ($\gamma = \gamma'$, c' e ϕ').



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - terreni coesivi

Nei **terreni coesivi** (fini) in cui le condizioni critiche si raggiungono in uno stato non drenato, ovvero in terreni saturi e assenza di drenaggio, è appropriato l'uso delle resistenze totali in termini non drenati (totali), ovvero di c_u e γ .

Concettualmente $\phi_u = 0$, ma la trattazione rimane valida anche per $\phi_u < 10^\circ$.

Nei **materiali granulari** invece, appare ragionevole attribuire una pressione neutra $u=0$ al di sopra della falda, mentre al di sotto di questa, in assenza di drenaggio, si assumono le spinte precedentemente calcolate con il valore di peso di volume efficace (γ'), sommando vettorialmente la seguente spinta idrostatica dell'acqua a distribuzione triangolare su un'altezza pari a z dal piede dell'opera:

$$P_w = \frac{1}{2} \gamma_w z^2$$



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - esempio

Si abbia un muro di sostegno a paramento verticale liscio con terrapieno composto da due strati orizzontali differenti:

strato superiore (0÷7m) $\Rightarrow c' = 0 \quad \varphi' = 28^\circ \quad \gamma_1 = 18 \text{ kN/m}^3$

strato inferiore (7÷12m) $\Rightarrow c' = 0 \quad \varphi' = 34^\circ \quad \gamma_2 = 20 \text{ kN/m}^3$

si vuole determinare la risultante delle spinte sul muro in intensità e posizione.

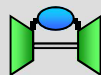
$$K_a \text{ strato superiore} = (1 - \sin 28^\circ) / (1 + \sin 28^\circ) = 0,361$$

$$K_a \text{ strato inferiore} = (1 - \sin 34^\circ) / (1 + \sin 34^\circ) = 0,283$$

Le pressioni orizzontali nello strato superiore sono:

$$z = 0\text{m} \Rightarrow p_a = 0$$

$$z = 7\text{m} \Rightarrow p_a = K_a \cdot \gamma_1 \cdot h_1 = 0,361 \cdot 18 \cdot 7 = \mathbf{45,5 \text{ kN/m}^2}$$



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

Le spinte di Rankine - esempio

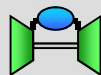
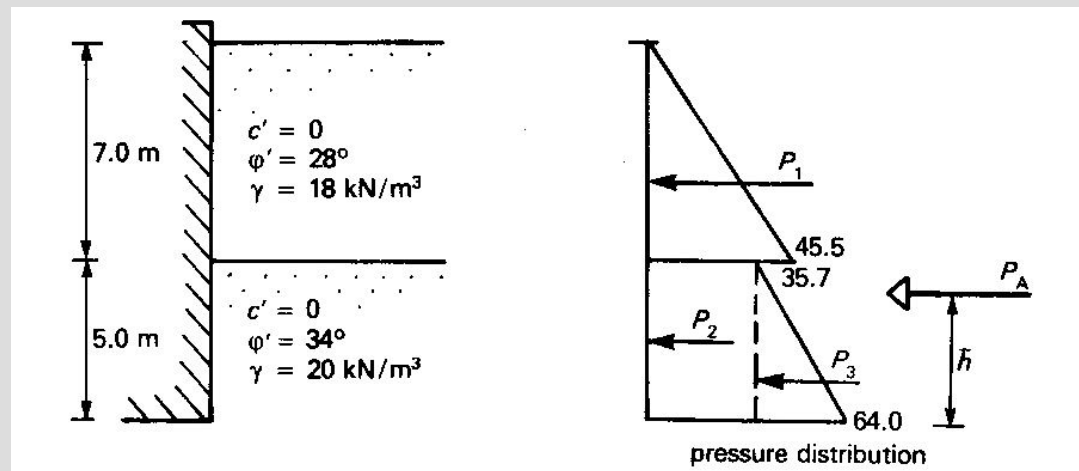
Le pressioni orizzontali nello strato inferiore sono:

$$z = 7\text{m} \Rightarrow p_a = K_a \cdot \gamma \cdot h_1 = 0,283 \cdot 18 \cdot 7 = \mathbf{35,7} \text{ kN/m}^2$$

$$z = 12\text{m} \Rightarrow p_a = K_a \cdot [(\gamma_1 \cdot h_1) + (\gamma_2 \cdot h_2)] = 0,283 \cdot 226 = \mathbf{64,0} \text{ kN/m}^2$$

L'area totale del diagramma delle pressioni rappresenta l'intensità della risultante delle spinte:

$$P_a = P_1 + P_2 + P_3 = 409 \text{ kN/m}$$



La SPINTA DELLE TERRE: metodo di Rankine - teoria

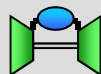
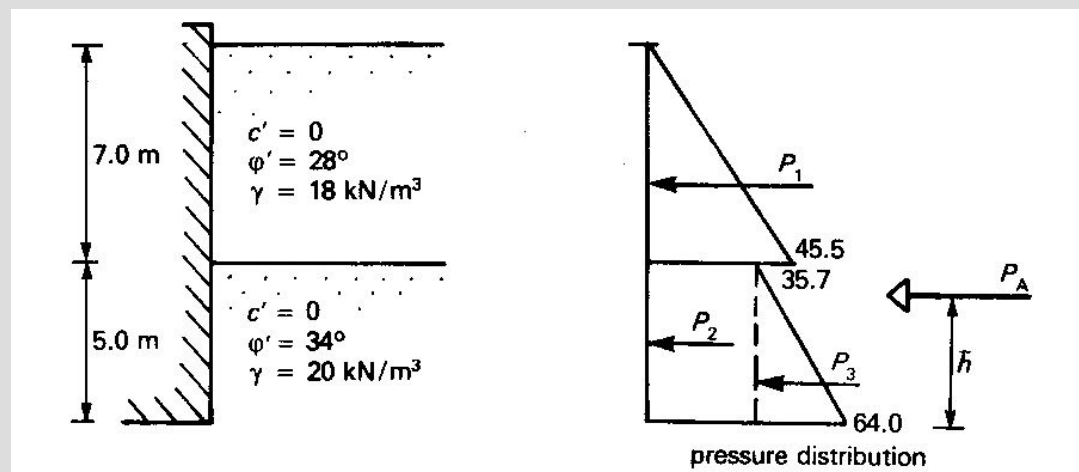
Le spinte di Rankine - esempio

per determinare h , l'altezza della risultante sulla base del muro, occorre sviluppare l'equazione di equilibrio alla rotazione così formulata:

$$(P_1 + P_2 + P_3) \cdot h = \Sigma P_n \cdot h_n = (P_1 \cdot h_1) + (P_2 \cdot h_2) + (P_3 \cdot h_3)$$

da cui:

$$h = [(P_1 \cdot h_1) + (P_2 \cdot h_2) + (P_3 \cdot h_3)] / (P_1 + P_2 + P_3) = 4,24 \text{ m}$$





La SPINTA DELLE TERRE: sistemi di drenaggio - la spinta idrostatica

La spinta idrostatica nel caso dei drenaggi

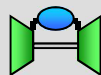
Precedentemente, a proposito della spinta di Rankine, è stato detto che l'azione delle spinte idrostatiche deve essere computata a parte attraverso il calcolo della spinta idrostatica alla base dell'opera di sostegno e successivamente della sua composizione globale secondo un diagramma di distribuzione triangolare.

Tale assunzione appare corretta e conservativa laddove l'opera di sostegno risulta impermeabile e non presenta elementi di drenaggio a tergo, verso monte.

Laddove esistono elementi e condizioni di drenaggio, all'azione idrostatica si sostituiscono azioni idrodinamiche indotte dal reticolo di flusso che si instaura a tergo dell'opera.

Il reticolo di flusso che si può ipotizzare dipende dalla configurazione del drenaggio realizzato, per esempio:

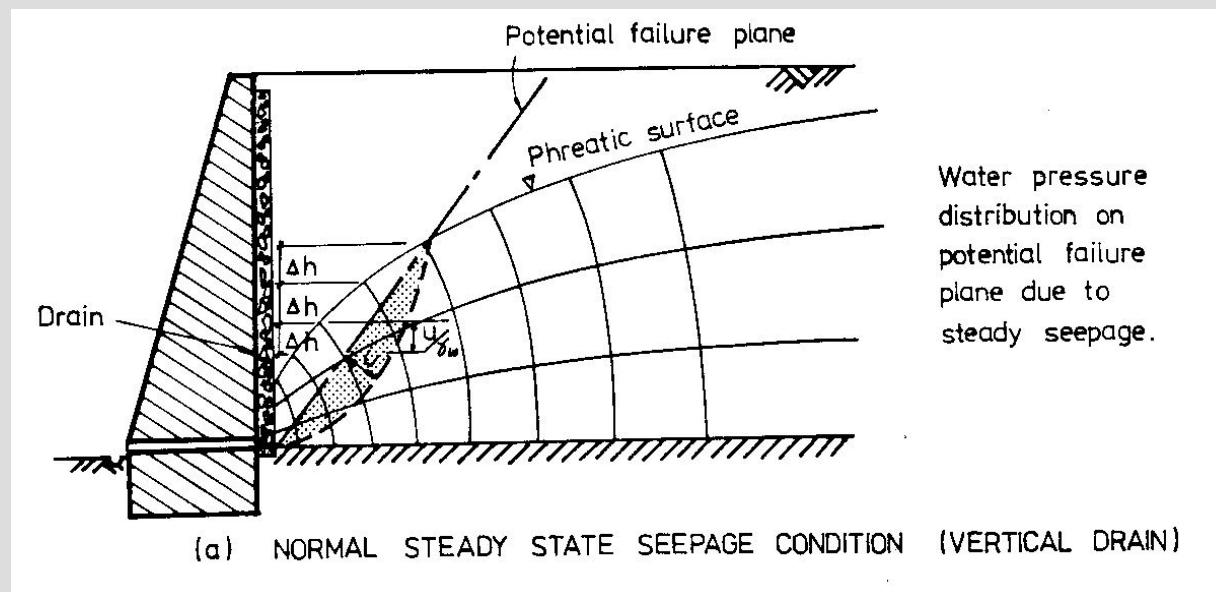
- 1) drenaggio verticale
- 2) drenaggio inclinato.



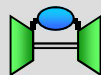
La SPINTA DELLE TERRE: la spinta idrostatica

La spinta idrostatica nel caso di isotropia idraulica e drenaggio verticale

la risultante delle forze idrostatiche determinata con il reticolo di flusso idrodinamico, si somma al poligono delle forze agenti sul cuneo instabile in verifica.



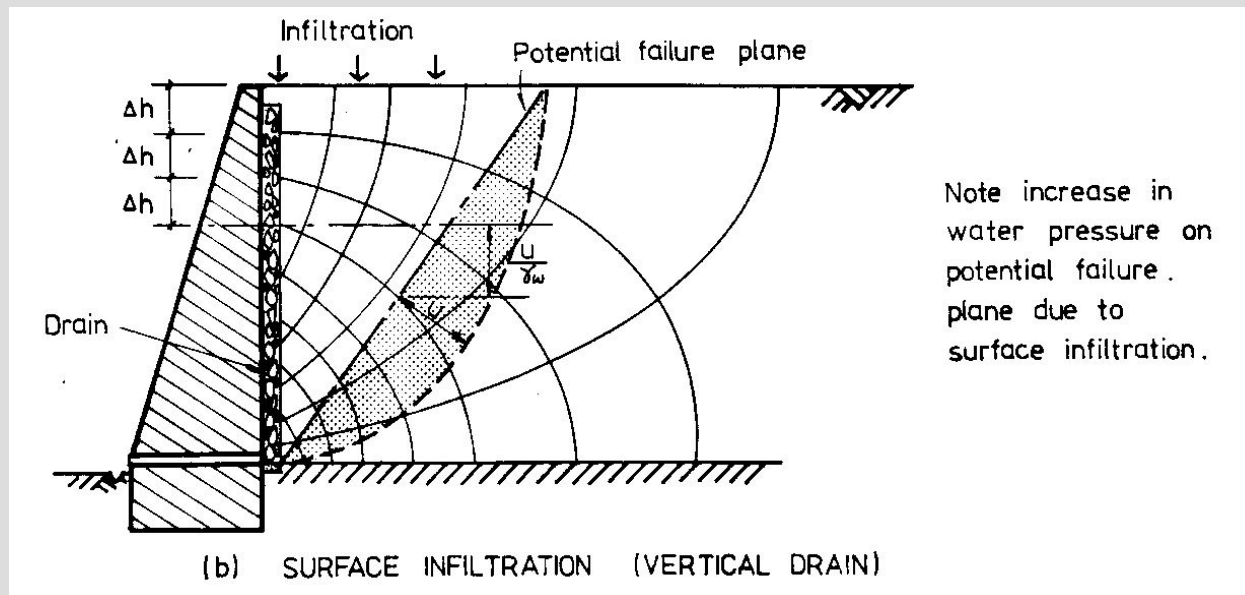
GCO, 1982



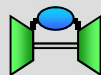
La SPINTA DELLE TERRE: la spinta idrostatica

La spinta idrostatica nel caso di isotropia idraulica, drenaggio verticale e infiltrazione superficiale

la risultante delle forze idrostatiche determinata con il reticolo di flusso idrodinamico, si somma al poligono delle forze agenti sul cuneo instabile in verifica.



GCO, 1982

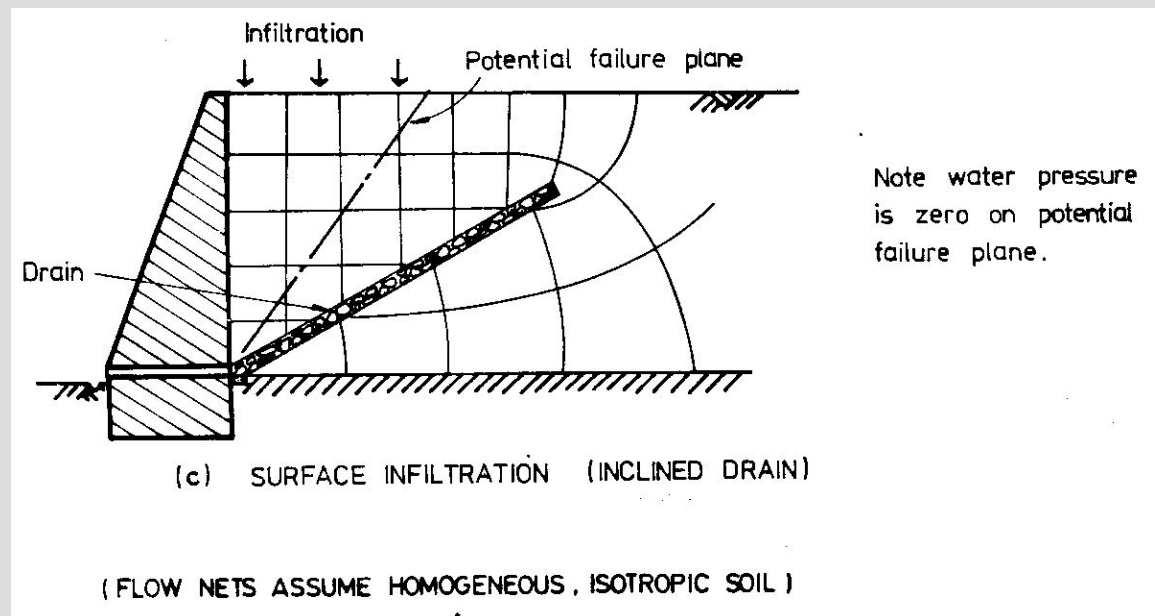


Ing. Geol. Piergiuseppe Froidi
16/03/2022

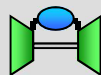
La SPINTA DELLE TERRE: la spinta idrostatica

La spinta idrostatica nel caso di isotropia idraulica, drenaggio inclinato e infiltrazione superficiale

la risultante delle forze idrostatiche determinata con il reticolo di flusso idrodinamico, si somma al poligono delle forze agenti sul cuneo instabile in verifica.



GCO, 1982

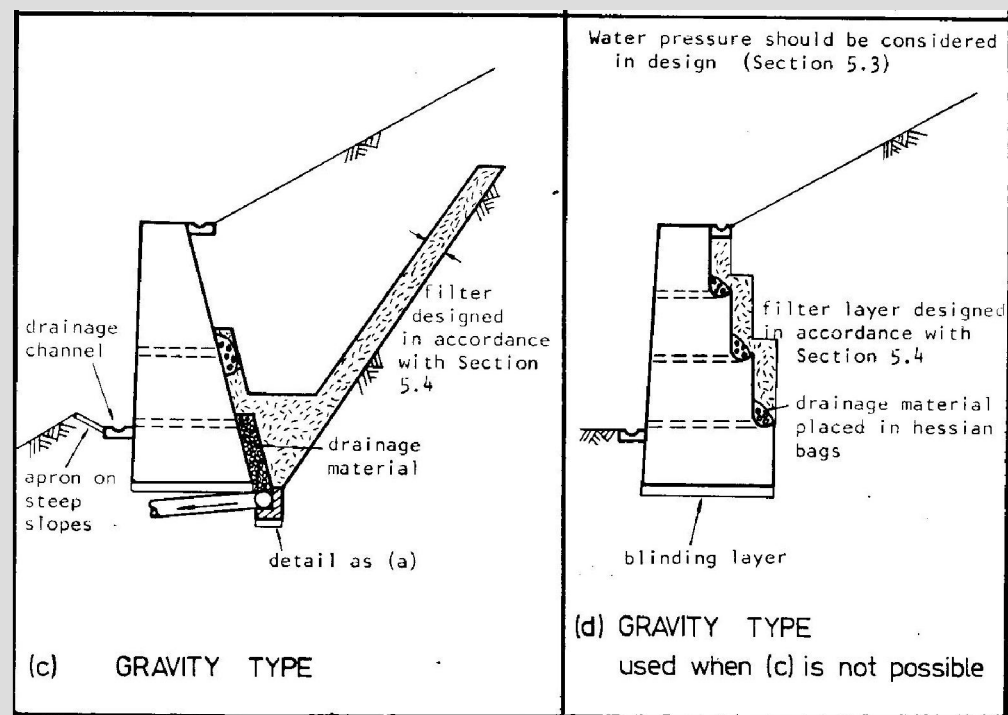


Ing. Geol. Piergiuseppe Froldi
16/03/2022

La SPINTA DELLE TERRE: modelli di drenaggio

Modelli di drenaggio per opere di sostegno a gravità

nel caso c) la pressione dell'acqua può essere trascurata, sia sul piano di rottura del cuneo che a tergo dell'opera di sostegno, mentre nel caso d) deve essere considerata nel calcolo.



GCO, 1982



Ing. Geol. Piergiuseppe Froldi
16/03/2022



Le norme: Le NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI

Per **Stato Limite Ultimo** di una opera di sostegno possiamo principalmente intendere i seguenti:

- SLU di tipo geotecnico (**GEO**) e di equilibrio di corpo rigido (**EQU**) in analisi:

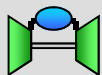
- 1) stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno
- 2) scorrimento sul piano di posa
- 3) collasso per carico limite dell'insieme fondazione terreno
- 4) ribaltamento.

Con riferimento all'analisi statica precedentemente illustrata, i punti 2 e 4 corrispondono rispettivamente alle seguenti verifiche:

- a) TRASLAZIONE (orizzontale, verticale o inclinata)
- B) ROTAZIONE.

Le verifiche di sicurezza agli SLU vanno effettuate, secondo le norme, nelle condizioni *"sia a breve sia a lungo termine"*.

Inoltre, i meccanismi di collasso sono determinati dalla **"mobilitazione della resistenza del terreno"**.





Le Norme:

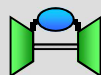
Capitolo 6. PROGETTAZIONE GEOTECNICA

Per gli **Stati Limite di Esercizio** occorre riferirsi agli *“spostamenti dell’opera di sostegno e del terreno circostante, i quali devono essere valutati per verificarne la compatibilità con la funzionalità dell’opera e con la sicurezza e funzionalità di manufatti adiacenti, anche a seguito di modifiche indotte sul regime delle acque sotterranee.”*

- SLE di tipo geotecnico (GEO): spostamento o deformazione della massa in analisi.

Qualora vi siano manufatti sensibili agli spostamenti dell’opera di sostegno, *“deve essere sviluppata una specifica analisi dell’interazione tra opere e terreno, tenendo conto della sequenza delle fasi costruttive.”*

In genere entrambe le due tipologie di SLU e SLE, sono strettamente correlate dalla interazione tra terreno e opera di sostegno.



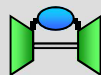


La Circolare MLLPP 7/2019: Capitolo 6. PROGETTAZIONE GEOTECNICA

In merito agli SLU, la Circolare MLLPP [3] non specifica molto di più di quanto dicano le norme, salvo riassumere i cinque SLU degli Eurocodici:

- **EQU** – perdita di equilibrio della struttura, del terreno o dell'insieme terreno-struttura, considerati come corpi rigidi;
- **STR** – raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali, compresi gli elementi di fondazione;
- **GEO** – raggiungimento della resistenza del terreno interagente con la struttura con sviluppo di meccanismi di collasso dell'insieme terreno-struttura;
- **UPL** – perdita di equilibrio della struttura o del terreno, dovuta alla sottospinta dell'acqua (galleggiamento);
- **HYD** – erosione e sifonamento del terreno dovuta a gradienti idraulici.

Ai fini della nostra analisi quelli da verificare sono principalmente gli EQU e GEO.





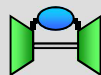
La Circolare MLLPP 7/2019: Capitolo 6. PROGETTAZIONE GEOTECNICA

In merito agli SLE, la Circolare MLLPP indica genericamente che “**si riferiscono al raggiungimento di valori critici di spostamenti e rotazioni, assoluti e/o relativi, a distorsioni che possono compromettere la stabilità dell’opera**” anche in funzione di una loro progressione nel tempo.

Si aggiunge che detti SLE dovrebbero riferirsi anche a situazione in grado di compromettere anche **la funzionalità dell’opera**.

Per i nostri scopi quindi possiamo distinguere, in linea di principio, due casi tipologici:

- a) caso di opera di consolidamento separata o estranea a qualsiasi altra opera antropica soggetta a SLE; in questo caso gli SLE dell’intervento geotecnico **possono non essere verificati** in quanto non connessi all’altra opera meccanicamente collegata
- b) caso di opera di consolidamento connessa ad un’opera antropica, soggetta a SLE, da proteggere o con cui interagisce o potrebbe interagire meccanicamente; in questo caso gli SLE dell’intervento geotecnico **devono essere verificati** in quanto connessi all’altra opera meccanicamente collegata.





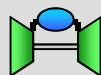
Le Norme:

Capitolo 6. PROGETTAZIONE GEOTECNICA

Verifica degli SLE

In tutti i casi, nelle condizioni di esercizio, gli **spostamenti** dell'opera di sostegno e del terreno circostante devono essere **valutati per verificarne la compatibilità con la funzionalità dell'opera e con la sicurezza e funzionalità di manufatti adiacenti**, anche a seguito di modifiche indotte sul regime delle acque sotterranee.

In presenza di manufatti particolarmente sensibili agli spostamenti dell'opera di sostegno, deve essere sviluppata una specifica analisi dell'interazione tra opere e terreno, tenendo conto della sequenza delle fasi costruttive.



La Circolare MLLPP 7/2019:

Capitolo 6. PROGETTAZIONE GEOTECNICA

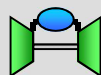
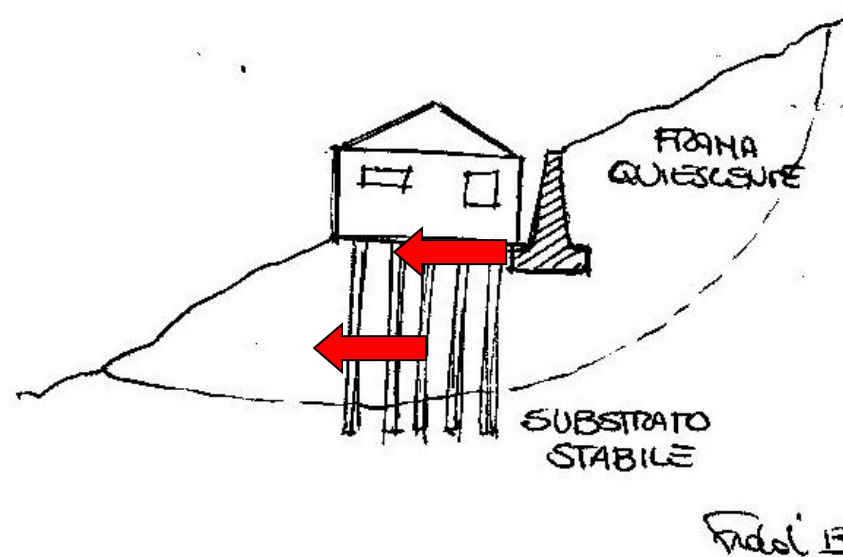
Esempio - Edificio civile su frana quiescente

L'opera di sostegno MURO dovrebbe essere verificata agli SLE spostamenti, in quanto la sua fondazione è adiacente o sottostante la fondazione dell'edificio.

L'opera PALIFICATA di FONDAZIONE, con funzioni che possono essere anche di consolidamento del versante, deve essere verificata agli SLE, in quanto eventuali spostamenti e/o rotazioni si riflettono sulla statica dell'edificio.

ESEMPIO 1

OPERA di CONSOLIDAMENTO → PALIFICATA
OPERA di SOSTEGNO → MURO in C.A.





Le Norme: Capitolo 6. PROGETTAZIONE GEOTECNICA

Le azioni sull'opera di sostegno

Le Norme precisano che le azioni sull'opera di sostegno sono quelle dovute:

- 1) al peso proprio del terreno e del materiale di riempimento
- 2) ai sovraccarichi
- 3) all'acqua
- 4) ad eventuali ancoraggi presollecitati
- 5) al moto ondoso
- 6) ad urti e collisioni
- 7) alle variazioni di temperatura ed al ghiaccio.

Tra i **sovraccarichi** a tergo dell'opera devono essere valutati la *"eventuale presenza di costruzioni, di depositi di materiale, di veicoli in transito, di apparecchi di sollevamento."*





Le Norme:

Capitolo 6. PROGETTAZIONE GEOTECNICA

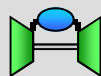
Il modello geometrico

“Il modello geometrico dell’opera di sostegno deve tenere conto delle possibili variazioni del livello del terreno a monte e a valle del paramento rispetto ai valori nominali.”

Si devono pertanto considerare eventuali:

- a) accumuli di terreno a monte dovuti a fenomeni di instabilità
- b) asportazione di terreno a valle dovuti ad erosioni o a fenomeni di instabilità.

*“Il livello di progetto della **superficie libera dell’acqua** o della falda freatica deve essere scelto sulla base di misure e sulla conoscenza del regime delle pressioni interstiziali nel sottosuolo. In assenza di particolari sistemi di drenaggio, nelle verifiche allo SLU, si deve sempre ipotizzare che la superficie libera della falda non sia inferiore a quella del livello di sommità dei terreni con bassa permeabilità ($k < 10^{-6}$ m/s).”*



Le Norme:

Capitolo 6. PROGETTAZIONE GEOTECNICA

Verifica di stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno

Deve essere effettuata secondo l'Approccio 1 - Combinazione 2
A2+M2+R2

tenendo in conto dei seguenti coefficienti parziali sulle azioni:

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}



Le Norme:

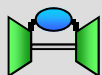
Capitolo 6. PROGETTAZIONE GEOTECNICA

Verifica di stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno

e tenendo in conto dei seguenti coefficienti parziali sulle resistenze dei materiali:

Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_r	γ_r	1,0	1,0



Le Norme:

Capitolo 6. PROGETTAZIONE GEOTECNICA

Verifica di scorrimento, collasso e ribaltamento

Devono essere effettuate secondo il seguente approccio:

Approccio 2

Combinazione unica - A1+M1+R3

tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.5.I.:

Tab. 6.5.I - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi di muri di sostegno

Verifica	Coefficiente parziale (R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,4$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$
Ribaltamento	$\gamma_R = 1,15$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,4$

Nella verifica a ribaltamento i coefficienti R3 della Tab. 6.5.I si applicano agli effetti delle azioni stabilizzanti.





La spinta sulle opere di sostegno: MODELLAZIONE GEOLOGICA

Gli studi “**geo**” dovranno essere effettuati in due fasi distinte, la seconda successiva alla prima:

- 1) Studi, rilievi e indagini geologiche
- 2) indagini geotecniche.

Lo **studio geologico** deve precisare:

- l'origine e la **natura dei terreni, delle rocce** e degli eventuali **terreni di riporto**
- il loro **assetto stratigrafico** e strutturale
- le condizioni generali di **stabilità del sito**
- il **regime delle pressioni interstiziali** al di sotto e a tergo dell'opera di sostegno.

Lo studio geologico sarà realizzato con specifiche tecniche, rilievi e indagini.

Sulla base dei risultati dello studio geologico, rappresentati nel **modello geologico**, verranno programmate le indagini geotecniche.





La spinta sulle opere di sostegno: MODELLAZIONE GEOTECNICA

Le **indagini geotecniche** devono effettuarsi secondo i seguenti criteri:

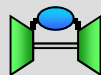
- a)** avere estensione tale da consentire la verifica delle condizioni di stabilità locale e globale del complesso opera-terreno, anche tenuto conto di eventuali moti di filtrazione
- b)** consentire la caratterizzazione geotecnica e geomeccanica dei terreni in sede e di riporto, in particolare per l'eventuale terreno di riempimento a tergo dell'opera di sostegno

Si evince la particolarità e il dettaglio dello studio geotecnico nei confronti dello specifico caso esaminato.

In esso si richiama l'attenzione sulla scelta delle seguenti caratteristiche:

- 1) **numero minimo di verticali** di indagine
- 2) **profondità e l'estensione** delle indagini.

Gli elementi raccolti permetteranno di rappresentare in dettaglio il **modello geotecnico del sottosuolo**.



Stabilità globale del complesso opera-terreno: ANALISI STATICA

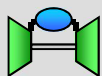
Le condizioni di stabilità dell'insieme opera-terreno devono essere determinate attraverso una adeguata **analisi statica**.

L'analisi statica deve essere effettuata, secondo le norme, con **metodi** che tengano conto della:

- forma e posizione della superficie di scorrimento
- dell'assetto strutturale
- dei parametri geotecnici
- del regime delle pressioni interstiziali.

Nel caso dei pendii in frana le verifiche di sicurezza devono essere eseguite lungo le **superfici di scorrimento** che meglio approssimano quella/e riconosciuta/e con le indagini.

Negli altri casi (frana potenziale), la verifica di sicurezza deve essere eseguita lungo **superfici di scorrimento cinematicamente possibili**, in numero sufficiente per ricercare la **superficie critica** alla quale corrisponde il grado di sicurezza più basso.



Stabilità globale del complesso opera-terreno: ANALISI SISMICA secondo le NTC 2018 e l'EC-7

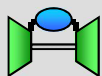
Le verifiche di sicurezza in campo sismico, possono essere eseguite mediante metodi (NTC 2018 e EC 7):

- 1) pseudostatici
- 2) degli spostamenti
- 3) di analisi dinamica.

“Nei **metodi pseudostatici**, l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso **W** del volume di terreno potenzialmente instabile.”

Nelle verifiche allo stato limite ultimo, in mancanza di studi specifici, le **componenti orizzontale e verticale** di tale forza possono esprimersi come:

- componente orizzontale $\Rightarrow \mathbf{F}_h = k_h \cdot W = \beta_S \cdot a_{\max}/g \cdot W$
- componenti verticali $\Rightarrow \mathbf{F}_v = k_v \cdot W = \pm 0,5 k_h \cdot W$



Stabilità globale del complesso opera-terreno: ANALISI SISMICA secondo le NTC 2018 e l'EC-7

k_h, k_v = coefficienti sismici orizzontali e verticali

β_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito
(vedi tabella sottostante).

Tab. 7.11.I – Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	β_s	β_s
$0,2 < a_g (g) \leq 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g (g) \leq 0,2$	0,27	0,24
$a_g (g) \leq 0,1$	0,20	0,20

La componente verticale deve essere presa in considerazione con il segno staticamente più sfavorevole.

Nel caso dell'utilizzo del metodo semplificato, il parametro a_{max} può essere valutato come segue:

$$a_{max} = S \cdot a_g$$

$S = S_S \cdot S_T$ = coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica e dell'amplificazione topografica.





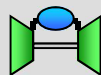
Stabilità dell'opera di sostegno: ANALISI SISMICA secondo le NTC 2018

Anche in questo caso le **verifiche di sicurezza in campo sismico**, possono essere eseguite mediante metodi precedentemente definiti e con l'analisi pseudostatica.

Per dette opere sono ammissibili spostamenti permanenti indotti dal sisma che non alterino significativamente la resistenza dell'opera e che siano compatibili con la sua funzione e con quella di eventuali strutture o infrastrutture interagenti con essa.

È necessario tenere in conto dei seguenti aspetti:

- effetti inerziali nel terreno, nelle strutture di sostegno e negli eventuali carichi aggiuntivi presenti
- comportamento anelastico e non lineare del terreno
- effetto della distribuzione delle pressioni interstiziali, se presenti, sulle azioni scambiate fra il terreno e l'opera di sostegno
- condizioni di drenaggio
- influenza degli spostamenti dell'opera sulla mobilitazione delle condizioni di equilibrio limite.



Stabilità dell'opera di sostegno: ANALISI SISMICA secondo le NTC 2018

Verificata preliminarmente l'esistenza di un adeguato margine di sicurezza a liquefazione dei terreni interagenti con l'opera di sostegno, si ricorre ai **metodi all'equilibrio limite con azioni sismiche implementate in modo pseudostatico**.

Le **componenti orizzontale e verticale** delle azioni sismiche possono esprimersi ancora come (caso di muri che possono spostarsi):

- componente orizzontale $\Rightarrow \mathbf{F}_h = k_h \cdot W = \beta_m \cdot a_{max}/g \cdot W$
- componenti verticali $\Rightarrow \mathbf{F}_v = k_v \cdot W = \pm 0,5 k_h \cdot W$

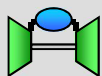
dove:

β_m = coefficiente che assume i valori espressi al seguito

$\beta_m = 0,38$ nelle verifiche allo stato limite ultimo (SLV)

$\beta_m = 0,47$ nelle verifiche allo stato limite di esercizio (SLD)

Per muri che non siano in grado di subire spostamenti, il coefficiente β_m assume valore unitario.





Stabilità dell'opera di sostegno: ANALISI SISMICA secondo le NTC 2018

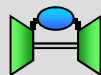
Nel caso di muri di sostegno liberi di traslare o di ruotare intorno al piede, si può assumere che l'incremento di spinta dovuto al sisma agisca nello stesso punto di quella statica.

Negli altri casi, in assenza di specifici studi, si deve assumere che tale incremento sia applicato a metà altezza del muro.

Si ricorda che la a_{\max} è pari a:

$$a_{\max} = S \cdot a_g = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

Lo stato limite di ribaltamento deve essere trattato impiegando coefficienti parziali unitari sulle azioni e sui parametri geotecnici (§ 7.11.1) e utilizzando valori di β_m incrementati del 50% rispetto a quelli innanzi indicati e comunque non superiori all'unità.





Stabilità dell'opera di sostegno: SCORRIMENTO SUL PIANO DI POSA

La verifica di stabilità dell'opera di sostegno allo **scorrimento sul piano di posa**, consiste nel verificare la seguente disequazione:

$$E_d \leq R_d$$

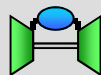
dove:

E_d = valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione, nella fattispecie della spinta del terreno a tergo dell'opera

R_d = valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico, nella fattispecie dell'interfaccia tra opera di sostegno e terreno sottostante

Ai fini della verifica alla traslazione sul piano di posa di muri di sostegno con fondazioni superficiali, non si deve in generale considerare il contributo della resistenza passiva del terreno antistante il muro.

In casi particolari, da giustificare se ne può tenere in conto per un'aliquota non superiore al 50%, purché gli spostamenti necessari alla mobilitazione di tale aliquota siano compatibili con le prestazioni attese dall'opera.



Stabilità dell'opera di sostegno: SCORRIMENTO SUL PIANO DI POSA

Il valore di E_d coincide sostanzialmente con la componente orizzontale della **spinta del terreno P_a** , così come calcolata precedentemente stante l'applicazione di tutti i dovuti coefficienti parziali, quindi la chiameremo **$P_{a,d}$** .

Per esempio, nel caso in cui il paramento di monte del muro sia verticale e la P_a sia inclinata di un angolo δ rispetto alla orizzontale, allora la sua **componente orizzontale** diverrà:

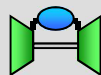
$$P_{a,d_h} = P_a \cos \delta$$

Detta componente tenderà a far slittare l'opera verso valle.

La **componente verticale** della $P_{a,d}$ invece diverrà:

$$P_{a,d_v} = P_a \sin \delta$$

Detta componente tenderà a schiacciare l'opera sul terreno di fondazione, aumentandone la resistenza per attrito.



Stabilità dell'opera di sostegno: SCORRIMENTO SUL PIANO DI POSA

Il valore di **R** coincide sostanzialmente con la componente orizzontale delle azioni resistenti all'interfaccia tra la fondazione dell'opera di sostegno e il terreno di base.

Nel caso l'opera di sostegno sia normalmente appoggiata sul terreno (non incastrata in profondità), allora la **forza resistente caratteristica** sarà:

$$R_k = (W_{m,d} + Pa_{v,d}) \tan \delta_b + c_b B$$

dove:

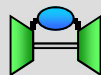
$W_{m,d}$ = peso proprio dell'opera di sostegno, di progetto

$Pa_{v,d}$ = componente verticale di progetto della spinta sul muro

δ_b = angolo di aderenza di base (contatto tra fondazione e terreno) = $\frac{2}{3} \varphi_d'$

c_b = coesione di base (contatto tra fondazione e terreno) = normalmente assunta pari a 0, salvo specifici accorgimenti costruttivi

B = larghezza dell'opera di sostegno alla base.





Stabilità dell'opera di sostegno: SCORRIMENTO SUL PIANO DI POSA

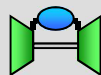
Pertanto la verifica consisterà nel controllo della seguente disequazione:

$$\mathbf{E_d} \leq \mathbf{R_d} \Rightarrow Pa_{,d_h} \leq R_k / \gamma_{R3} = [(W_{m,d} + Pa_{,v_d}) \tan \delta_b + c_b B] / \gamma_{R3}$$

dove:

R3 = coefficiente di sicurezza parziale per lo SLU GEO = 1,1

Nel caso di strutture miste o composite, le verifiche di stabilità globale devono essere accompagnate da verifiche di stabilità locale e di funzionalità e durabilità degli elementi singoli.



Stabilità dell'opera di sostegno: RIBALTAMENTO

La verifica consisterà nel controllo della seguente disequazione:

$$MR_d \leq MS_d$$

dove:

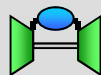
MR_d = momento ribaltante di progetto

MS_d = momento stabilizzante di progetto.

I momenti si calcolano rispetto al piede di valle dell'opera di sostegno.

Lo stato limite di ribaltamento non prevede la mobilitazione della resistenza del terreno di fondazione e deve essere trattato come uno SLU EQU (equilibrio del corpo rigido), utilizzando i coefficienti parziali sulle azioni (EQU) e sul terreno spingente (M2) per il calcolo delle spinte.

Ciò significa che il coefficiente di resistenza globale non deve essere applicato (non è nemmeno previsto nella tabella).



Stabilità dell'opera di sostegno: RIBALTAMENTO

Il **momento ribaltante di progetto** sarà dato dalla componente orizzontale di progetto applicata nel punto di applicazione al di sopra della base dell'opera di altezza H e diverrà in genere:

$$MR_d = Pa_{,d_h} \cdot H/3$$

Il **momento stabilizzante di progetto** sarà dato dalla somma vettoriale delle componenti di peso proprio dell'opera di sostegno, che per la sua caratteristiche di funzionamento a gravità (casi contemplati in questa trattazione), formeranno un momento contrario a quello instabilizzante:

$$MS_d = (W_{m,d} \cdot b_m + W_{t,d} \cdot b_t)$$

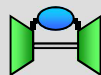
dove:

$W_{m,d}$ = peso proprio dell'opera di sostegno, di progetto (con coeff. EQU)

b_m = braccio di W_m rispetto al piede di valle dell'opera di sostegno

$W_{t,d}$ = peso proprio dell'eventuale terreno stabilizzante, di progetto (con coeff. EQU)

b_t = braccio di W_t rispetto al piede di valle dell'opera di sostegno.



Stabilità dell'opera di sostegno: RIBALTAMENTO

Con riferimento alla figura a fianco (a), il **momento ribaltante di progetto**, è dato da:

$$MR_d = P_H \cdot \gamma_{G1} \cdot y$$

dove:

γ_{G1} = coefficiente parziale per carico permanente da EQU = 1,1

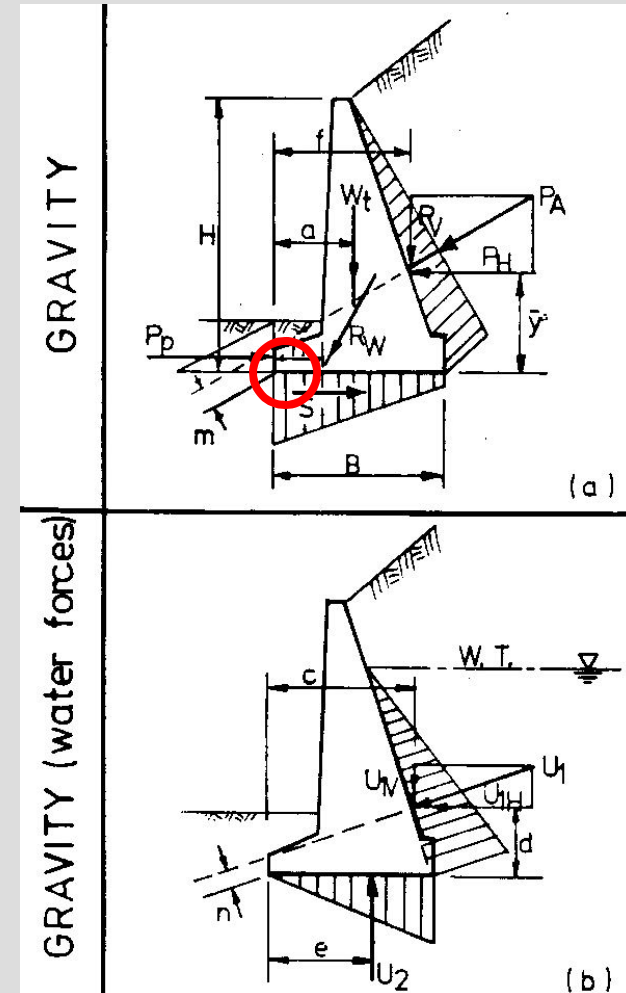
mentre il **momento stabilizzante di progetto**, è dato da:

$$MS_d = (W_t \cdot \gamma_{G1} \cdot a) + (P_v \cdot \gamma_{G1} \cdot f)$$

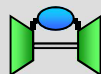
dove:

γ_{G1} = coefficiente parziale per carico permanente da EQU = 0,9

Nel caso (b) le forze si modificano a causa della pressione idrostatica.

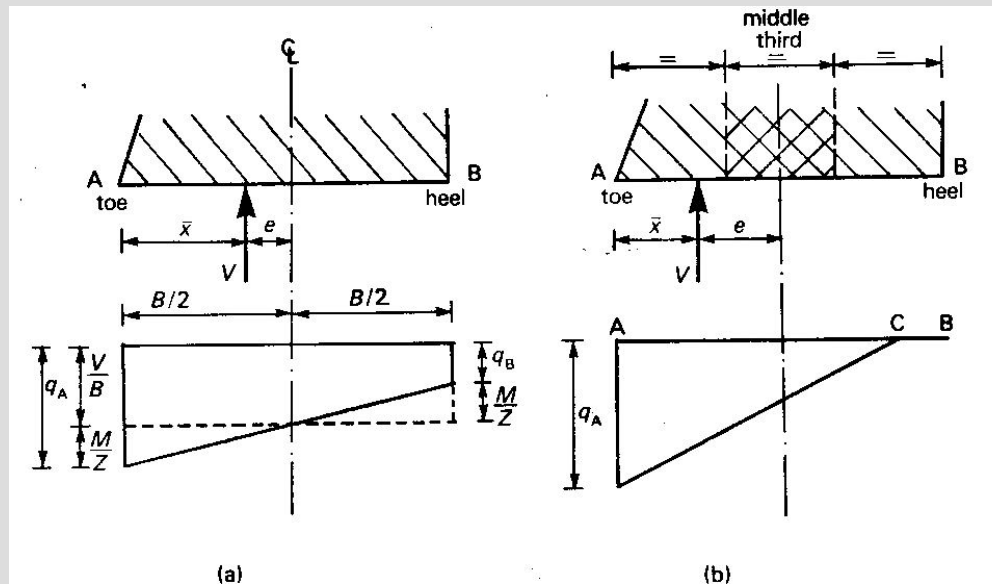


GCO, 1982

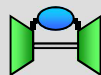


Stabilità dell'opera di sostegno: COLLASSO PER CARICO LIMITE

La verifica del collasso per carico limite dell'insieme fondazione terreno viene effettuata con i consueti metodi di calcolo della **capacità portante delle fondazioni superficiali** (es.: Terzaghi modificata Vesic, 1975) che qui si omettono. La particolarità del caso specifico è data dalla **distribuzione delle pressioni sul terreno di fondazione** che, a causa della spinta del terreno, non sarà mai di tipo rettangolare, ma sarà **asimmetrica** come rappresentato nelle figure sottostanti.



Whitlow, 1983



Stabilità dell'opera di sostegno: COLLASSO PER CARICO LIMITE

Il valore della **eccentricità** del carico **e**, dovrà essere utilizzato nelle formule di calcolo della capacità portante, considerando una **fondazione fittizia** larga $B' = B - 2e$ (fino a che $e \leq B/6$).

Detto valore si ricava dalla seguente:

$$e = \frac{\sum M_c}{\sum F_v}$$

dove:

$\sum M_c$ = sommatoria dei momenti rispetto al centro (mezzeria) della fondazione c

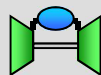
$\sum F_v$ = sommatoria delle forze verticali sulla base della fondazione.

Qualora sia necessario determinare le pressioni sui bordi di valle e di monte della fondazione, con riferimento alla figura precedente, si potranno presentare due casi tipologici:

a) caso di $e \leq B/6$ (forza verticale V ricadente nel "terzo medio")

b) caso di $e > B/6$ (forza verticale V ricadente fuori dal "terzo medio").

I due casi sono da trattare diversamente.



Stabilità dell'opera di sostegno: COLLASSO PER CARICO LIMITE

Caso di e nel "terzo medio"

Le pressioni di valle (A) e di monte (B) sulla fondazione saranno, con riferimento alla figura precedente:

$$q_A = V/B + 6Ve/B^2$$

$$q_B = V/B - 6Ve/B^2$$

Caso di e fuori dal "terzo medio" (la fondazione "parzializza")

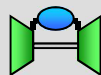
Si noti che se $e > B/6$ (V interseca la fondazione fuori dal terzo medio), il valore di q_B diviene negativo, ma poiché ciò non può succedere in pratica in quanto la superficie di contatto fondazione-terreno non possiede resistenza a trazione, le pressioni di valle (A) e di monte (B) dovranno essere calcolate nel seguente modo:

$$q_A = 2V/3x$$

$$q_B = q_C = 0$$

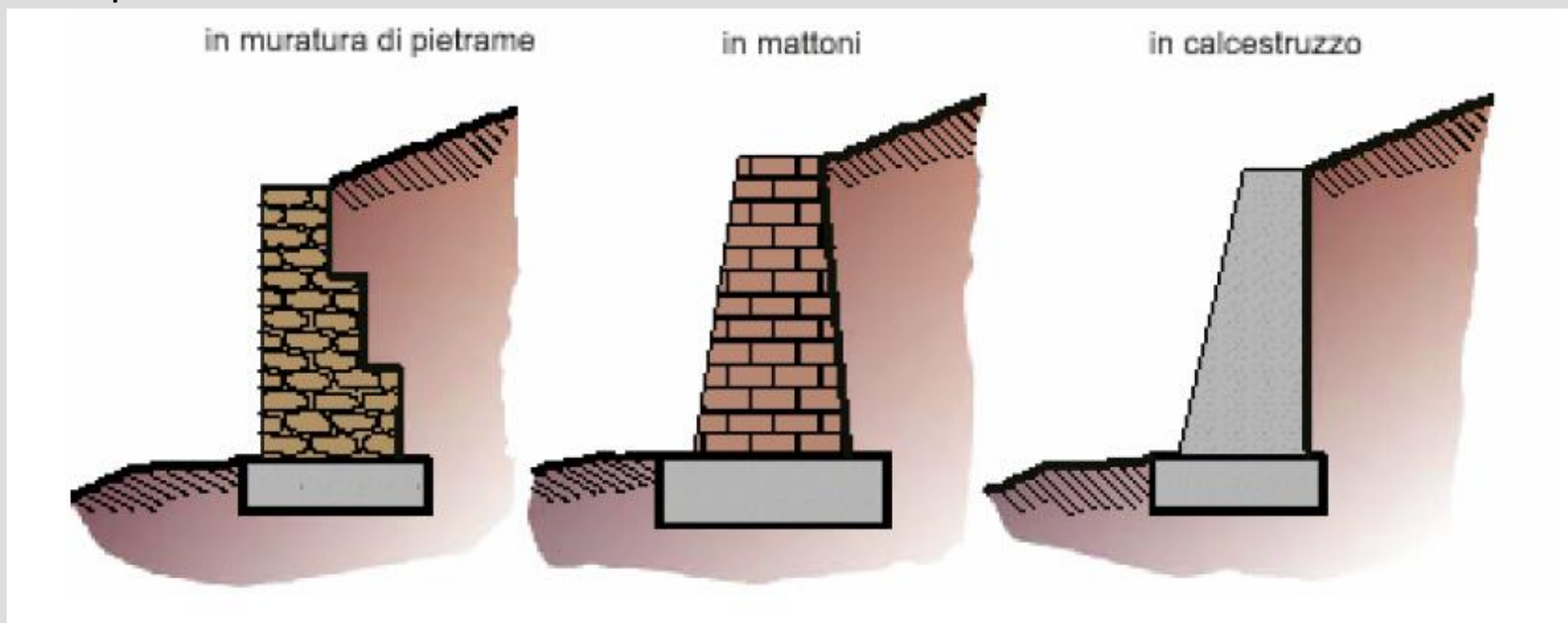
con:

$$x = B/2 - e$$

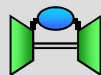


Tipologia delle opere di sostegno “non strutturali”: MURI DI SOSTEGNO A GRAVITA’

Come **strutture massicce e pesanti** agiscono prevalentemente “a gravità”, contrastando con il proprio peso le spinte del terreno a tergo dell’opera. In genere si realizzano in calcestruzzo, pietrame e/o in mattoni e per sostenere terreno o altro materiale con altezze non superiori a 4-5 m.



GNDT



Ing. Geol. Piergiuseppe Froldi
16/03/2022

99

Tipologia delle opere di sostegno “non strutturali”: MURI DI SOSTEGNO A GRAVITA’

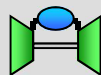
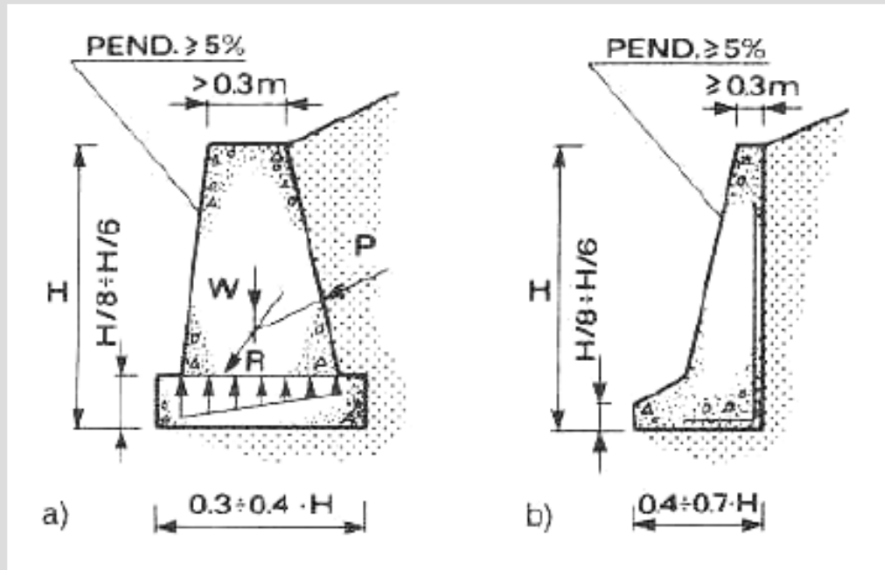
L’opera di sostegno è costituito da due **elementi principali**:

- una fondazione;
- una struttura in elevazione che la sormonta costituita da un paramento esterno ed uno interno.

In genere presentano sezione trapezoidale e possono avere la base della fondazione inclinata verso monte così da aumentare la stabilità.

Il loro dimensionamento di massima può essere effettuato sulla base delle misure rappresentate nelle figure a fianco.

I muri a semi-gravità (b) hanno una armatura di irrobustimento interna.



Tipologia delle opere di sostegno “non strutturali”: MURI CELLULARI A GABBIA O “CRIB WALLS”

I **muri cellulari a gabbia** o “**Crib Walls**” rientrano categoria dei muri a gravità con la particolarità di essere drenanti.

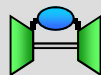
Permettono di realizzare un’opera di sostegno capace di assolvere le funzioni statiche mantenendo nel contempo le caratteristiche necessarie per un’ottimale inserimento paesaggistico, idrogeologico ambientale.

Sono generalmente formati dalla giustapposizione di elementi prefabbricati mutuamente collegati con semplice sovrapposizione o con sagomature ad incastro.

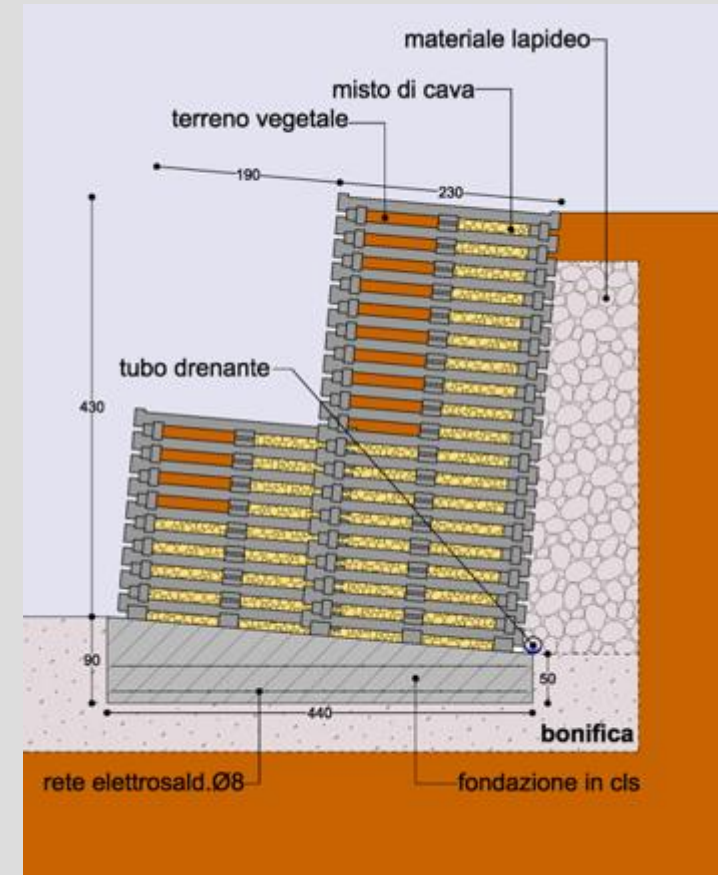
Gli **elementi prefabbricati** sono generalmente:

- a) travetti in c.a. o c.a.v. longitudinali e trasversali formanti contenitori grigliati (griglie spaziali)
- b) vaschette in c.a. o c.a.v.
- c) blocchi in c.a.

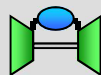
All’interno degli elementi viene effettuato un **riempimento di materiale inerte** lapideo o misto di cava al fine di aumentarne il peso complessivo e costituire l’elemento drenante.



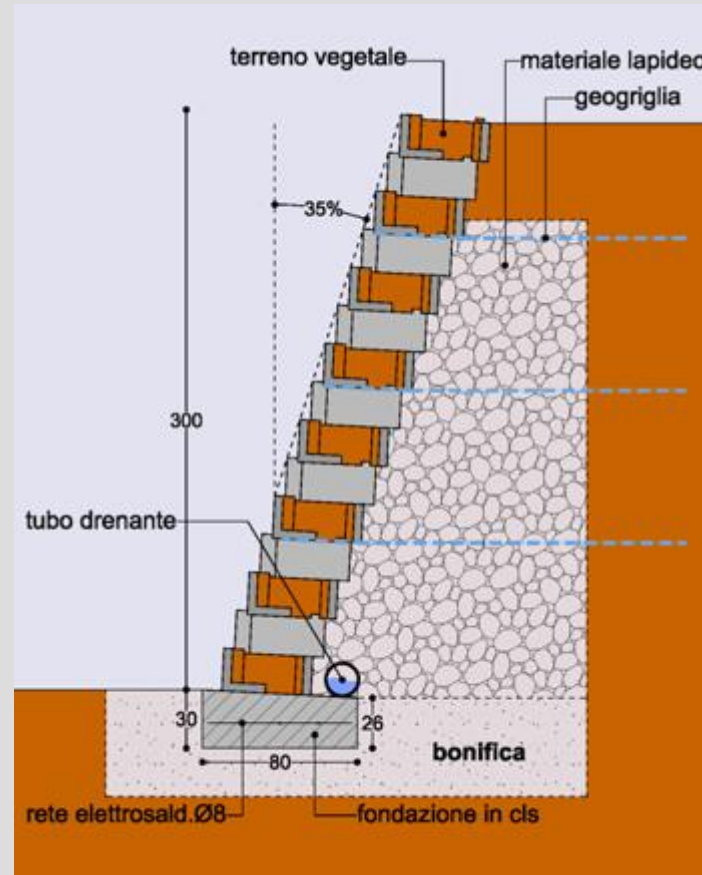
Tipologia delle opere di sostegno “non strutturali”: MURI CELLULARI a travetti



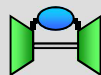
www.aspia.it/



Tipologia delle opere di sostegno “non strutturali”: MURI CELLULARI a vaschette

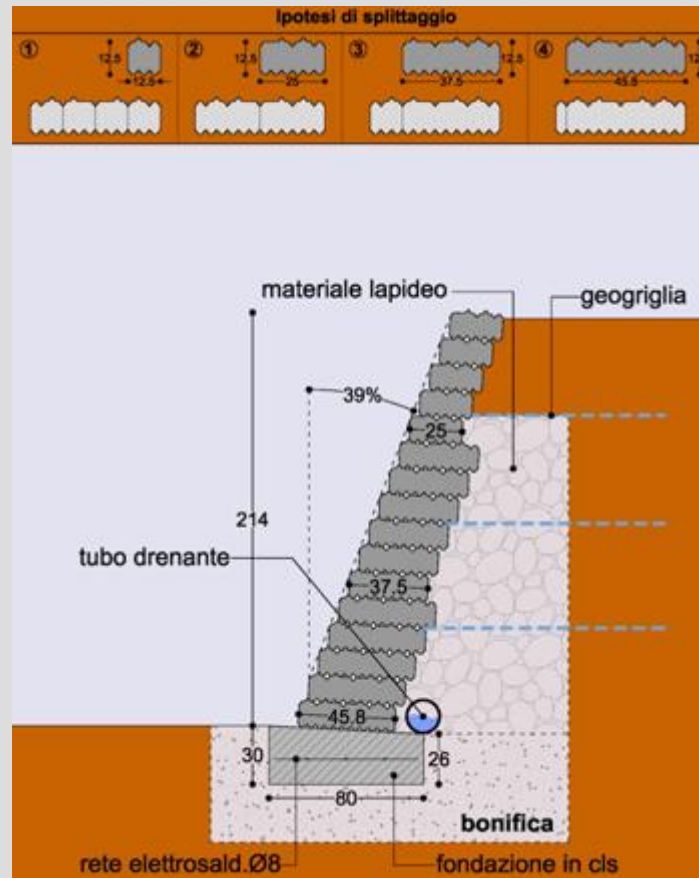


www.aspia.it/

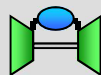


Ing. Geol. Piergiuseppe Froldi
16/03/2022

Tipologia delle opere di sostegno “non strutturali”: MURI CELLULARI a blocchi



www.aspia.it/



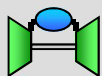
Ing. Geol. Piergiuseppe Froldi
16/03/2022

Tipologia delle opere di sostegno “non strutturali”: MURI IN GABBIONI SCATOLARI

I **muri in gabbioni scatolari** sono opere di sostegno realizzate con la giustapposizione, secondo diversi schemi, di gabbioni in rete metallica tessuta con filo di ferro galvanizzato a caldo con rivestimento in lega Zinco-Alluminio e/o polimero plastico (protezioni a lunga durabilità - DM 14/9/05 - Norme Tecniche per le Costruzioni, Con. Sup. LL.PP. - Linee guida per la redazione di capitolati per l'impiego di rete metallica a doppia torsione 16/2006 Maggio 2006).



www.borghiazio.com



Tipologia delle opere di sostegno “non strutturali”: MURI IN GABBIONI SCATOLARI

La **maglia esagonale** che costituisce il singolo scatolare deve essere a doppia torsione tipo 8x10.

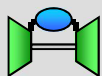
Il **riempimento** degli scatolari avviene direttamente in cantiere; il materiale utilizzato è pietrame di adeguate caratteristiche e pezzatura (15÷25 cm).

E' preferibile utilizzare ciottoli di fiume o spaccato da cava; esso deve avere adeguate caratteristiche di densità, resistente e gelività).

La posa dell'inerte nel gabbione metallico deve essere tale da assicurare al sistema complessivo le corrette caratteristiche di peso, porosità, forma della struttura e mutuo incastro del materiale lapideo.

Solo contando sulla mutua interazione (ingranamento) tra pietrame e rete metallica, l'insieme potrà assumere caratteristiche di solidità e monoliticità.

L'interno dei gabbioni risulta rinforzato da legature interne in grado di ripartire adeguatamente sull'insieme complessivo le spinte e le azioni gravanti sull'opera di sostegno, che viene quindi a funzionare come muro a gravità massiccio.



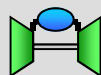
Tipologia delle opere di sostegno “non strutturali”: MURI IN GABBIONI SCATOLARI

In taluni casi i gabbioni vengono successivamente **rinverditi** sulla parte superiore per migliorarne l’inserimento ambientale.

Attraverso la realizzazione di tasche vegetative in corrispondenza del paramento frontale dei muri in gabbioni, la vegetazione che viene a crescere sviluppa le parti aeree, contribuendo a intercettare e smaltire le acque meteoriche.

Inoltre la crescita dell'apparato radicale contribuisce ad aumentare le forze resistenti

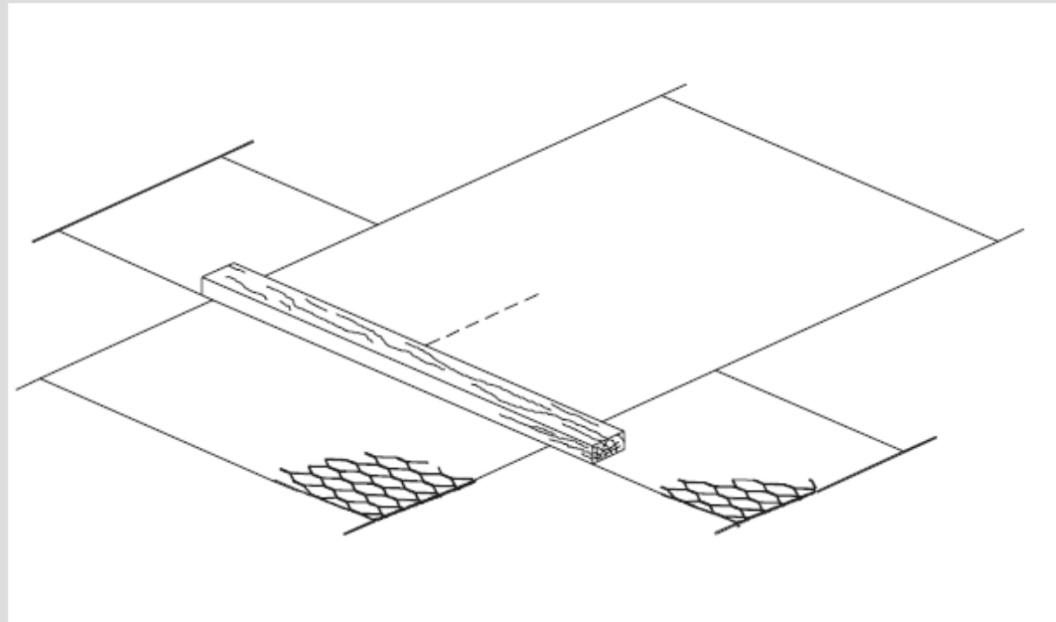
interne.



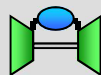
www.borghiazio.com

MURI IN GABBIONI SCATOLARI: Le modalità di realizzazione

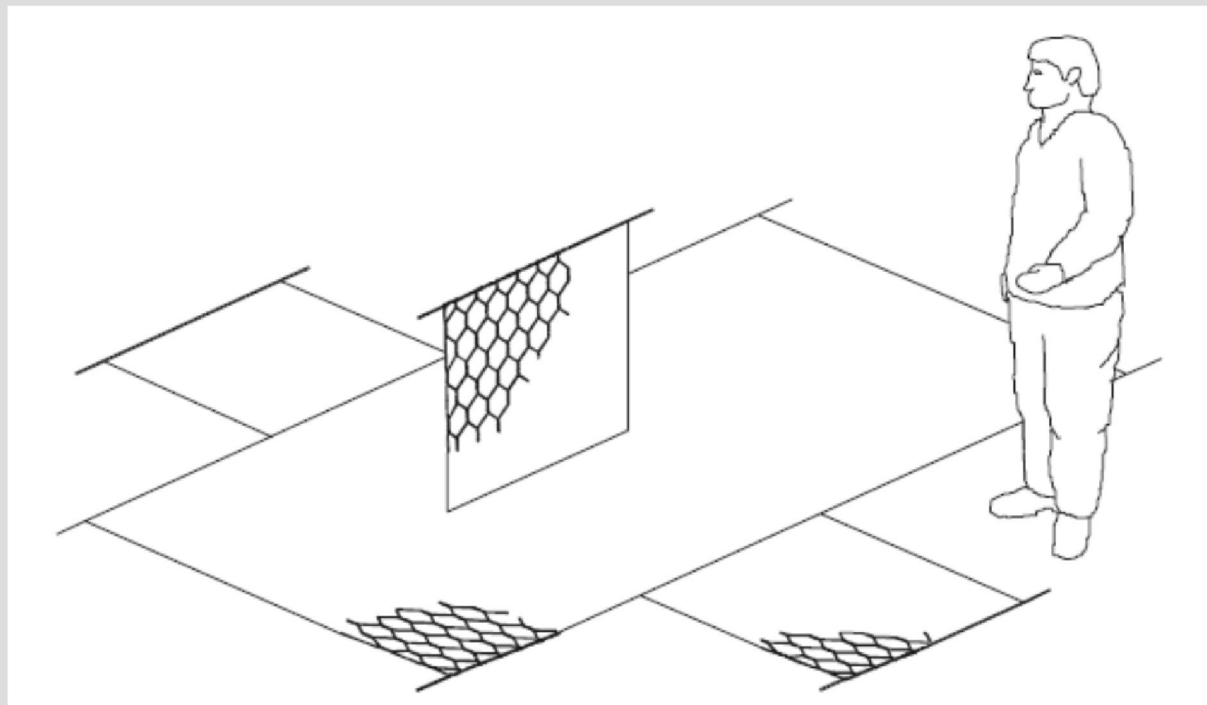
Per prima cosa si aprono i **gabbioni scatolari in rete metallica**. Saranno messi in verticale i diaframmi centrali e i pannelli laterali così da formare da formare una struttura aperta di forma prismatica a base rettangolare o quadrata. Diaframmi e pannelli saranno legati al fronte e al retro di ciascun gabbione.



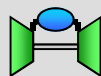
Da manuale di Borghi Azio S.p.A.



MURI IN GABBIONI SCATOLARI: Le modalità di realizzazione



Da manuale di Borghi Azio S.p.A.



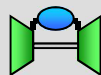
MURI IN GABBIONI SCATOLARI: Le modalità di realizzazione

Il **filo di legatura** dovrà essere ben assicurato agli orli dello scatolare alternando giri singoli a giri doppi per ogni apertura della maglia, ogni 150 mm circa, stringendo bene ogni giro e fissando in fondo il filo alla giunzione tra filone e doppia torsione.

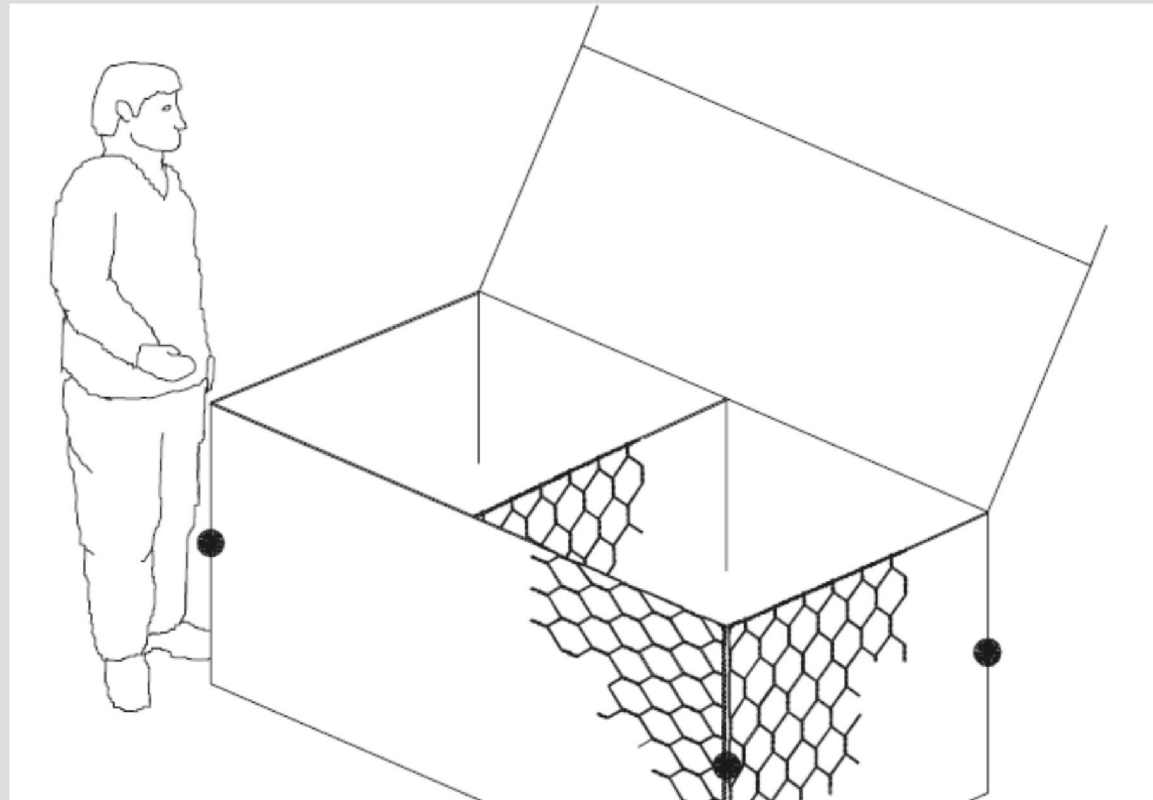
Il **fondo** su cui saranno appoggiati i gabbioni dovrà essere regolarizzato, livellato, piano o leggermente inclinato verso monte come indicato da progetto; dovrà essere ripulito da detriti e vegetazione.

Dopo aver preparato il fondo, i gabbioni pre-assemblati verranno posizionati vuoti e connessi a quelli adiacenti per formare una **struttura monolitica continua**. Vengono posizionati fronte a fronte o schiena a schiena così da facilitarne il riempimento e la chiusura con i coperchi.

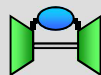
Da manuale di Borghi Azio S.p.A.



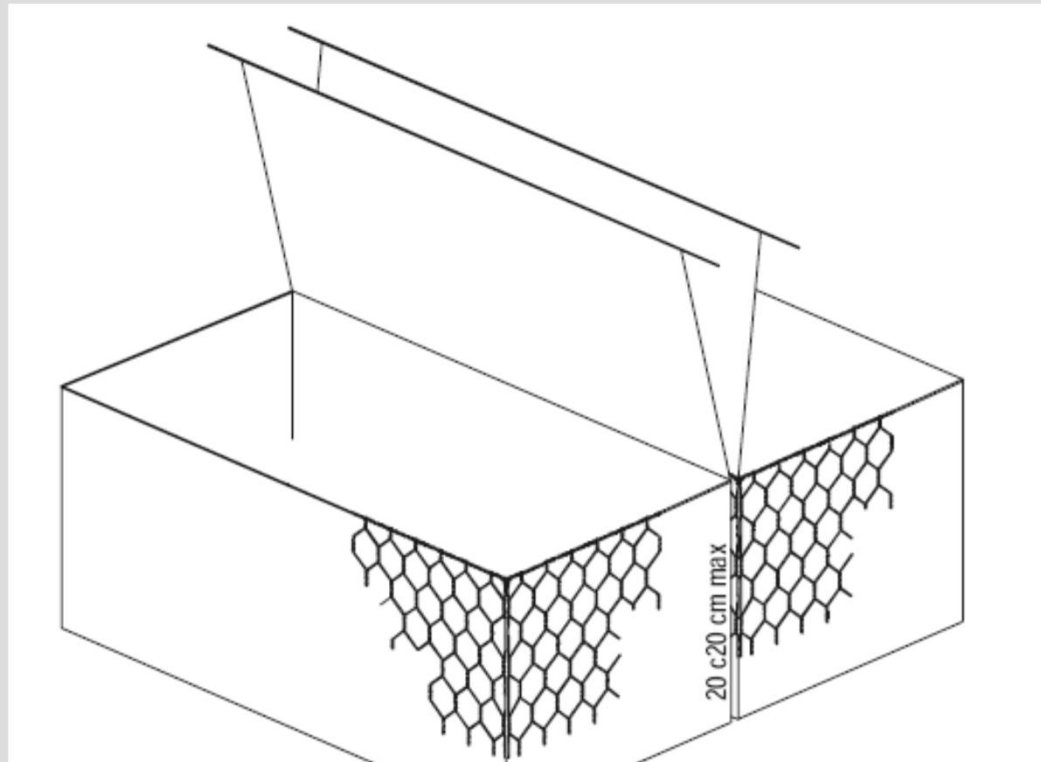
MURI IN GABBIONI SCATOLARI: Le modalità di realizzazione



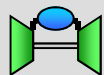
Da manuale di Borghi Azio S.p.A.



MURI IN GABBIONI SCATOLARI: Le modalità di realizzazione



Da manuale di Borghi Azio S.p.A.



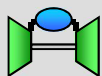
MURI IN GABBIONI SCATOLARI: Le modalità di realizzazione

Le **rocce per i gabbioni** possono essere ottenute con qualsiasi metodo di estrazione da cava. Le litologie utilizzate dovranno essere compatte e dure, angolari o arrotondate, dovranno essere ben cementate, insolubili in acqua e resistenti nei confronti dell'azione gelo/disgelo. La pezzatura dei ciottoli utilizzati dovranno avere dimensioni comprese indicativamente tra 150 e 200 mm.

Le rocce devono essere posizionate in strati da 300 mm per gabbioni altri 1 m, e strati da 250 mm per quelli da 0,5 m. Ogni singolo strato del riempimento non dovrà mai superare i 300 mm di altezza.

È richiesto il **completamento manuale del riempimento** al fine di ottenere una porosità finale del Gabbione di circa il 25-30%. Il riempimento andrà fatto per singole unità, anche se diverse unità dovessero essere pronte contemporaneamente.

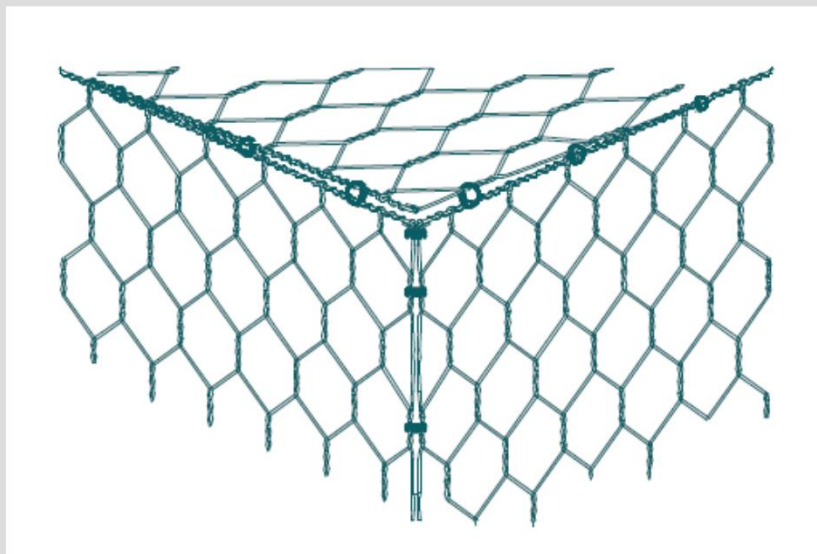
Da manuale di Borghi Azio S.p.A.



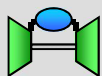
MURI IN GABBIONI SCATOLARI: Le modalità di realizzazione

Una volta livellate le rocce di riempimento e minimizzati gli spazi vuoti, verrà chiuso il **coperchio**, stringendo bene i lati del gabbione utilizzando, se necessario, gli attrezzi appropriati.

Il **filo di legatura del coperchio** dovrà essere attorcigliato due volte lungo gli orli dei vari lati del gabbione e lungo il diaframma centrale. I coperchi adiacenti dovranno essere collegati simultaneamente.



Da manuale di Borghi Azio S.p.A.

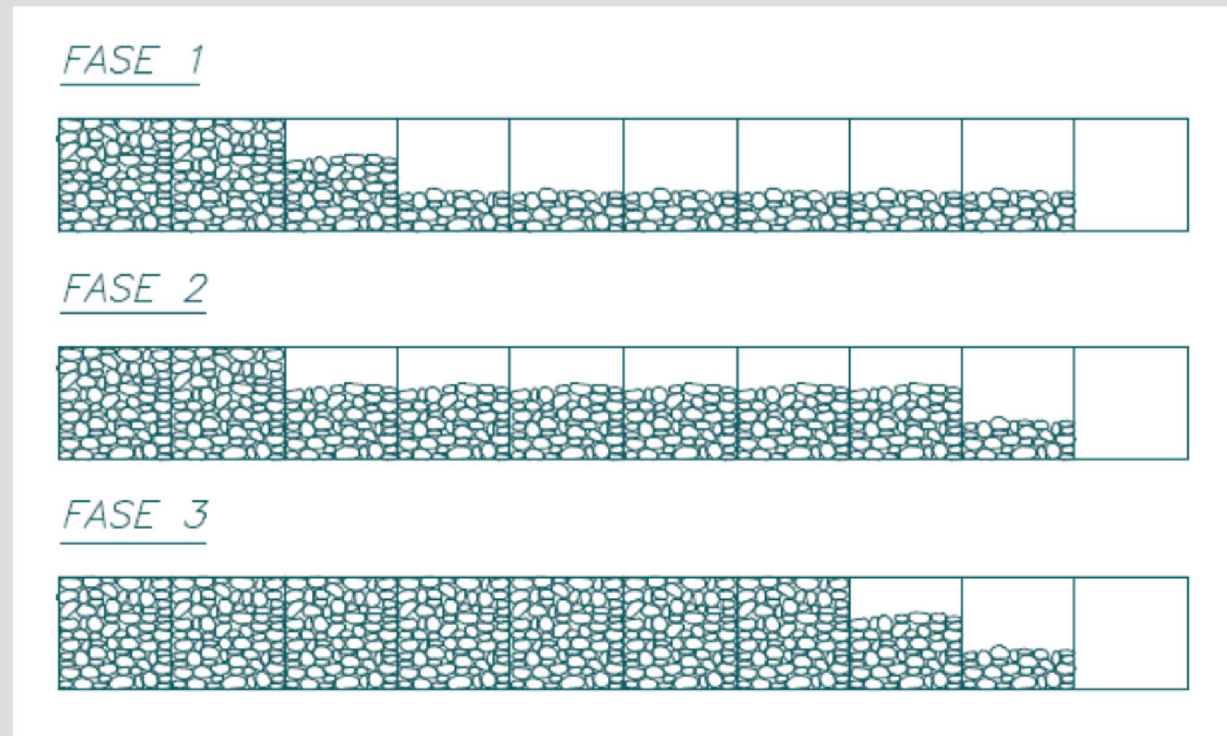


Ing. Geol. Piergiuseppe Frolidi
16/03/2022

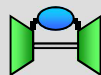
114

MURI IN GABBIONI SCATOLARI: Le modalità di realizzazione

Si dovrà procedere progressivamente con la **chiusura completa** di ogni singolo gabbione preceduta dal riempimento parziali di quelli che seguono.

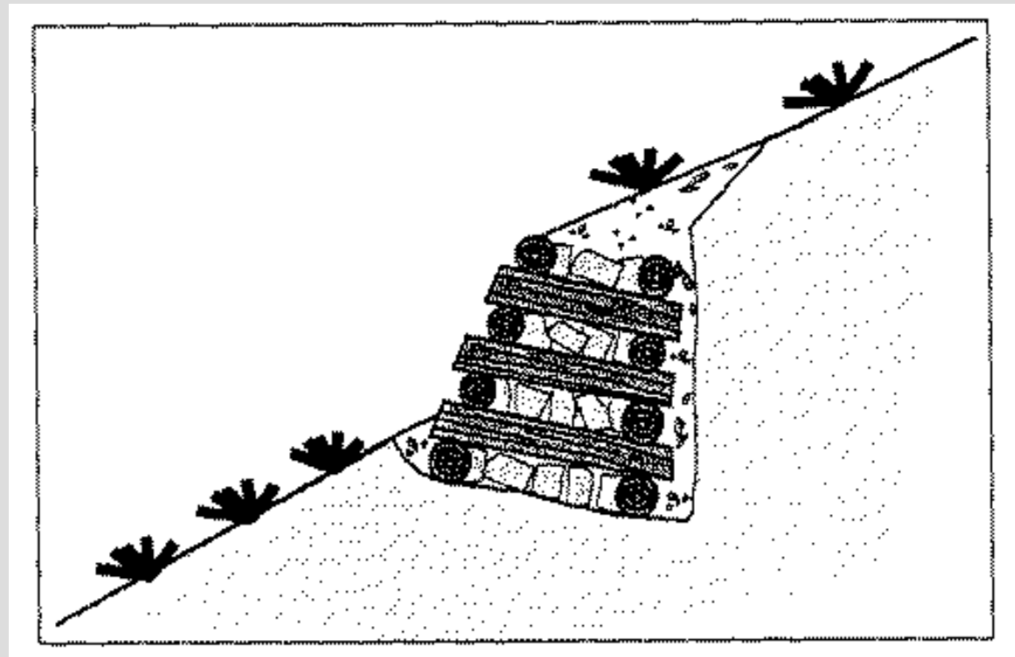


Da manuale di Borghi Azio S.p.A.

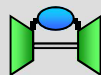


PALIFICATE IN LEGNO: Le palificate a parete doppia

Si **dimensionano** analogamente alle opere di sostegno in muratura o in gabbioni, considerando la palificata nel suo complesso costituita dalla struttura lignea e dal materiale di riempimento.



Da Simonato & Bischetti, 2003

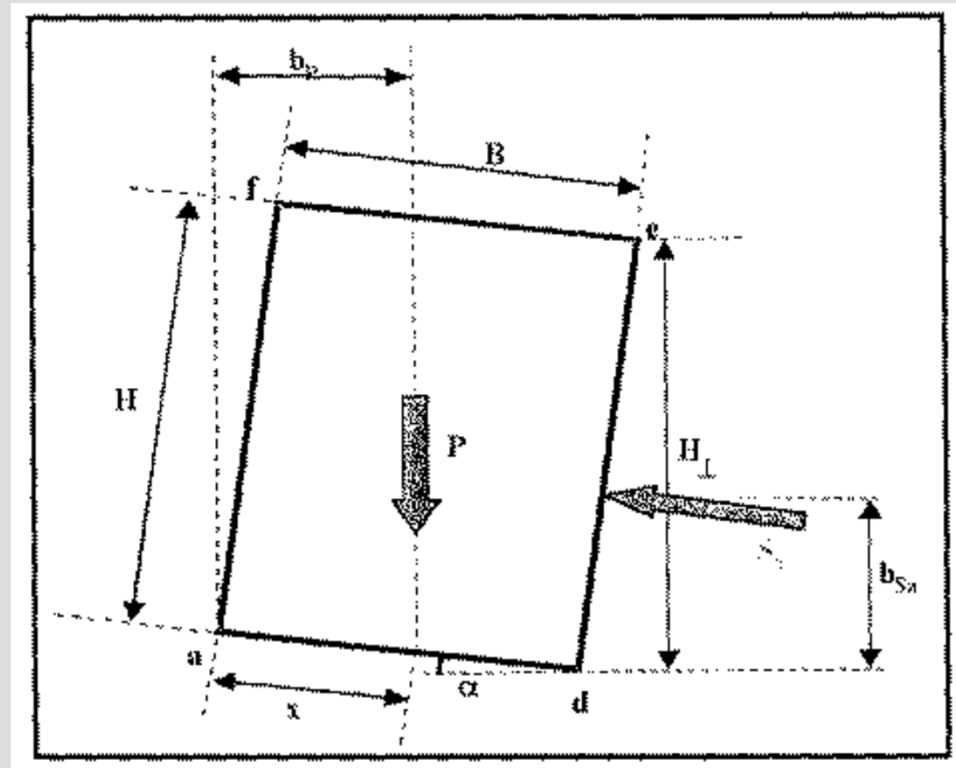


Ing. Geol. Piergiuseppe Frolidi
16/03/2022

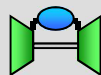
116

PALIFICATE IN LEGNO: Le palificate a parete doppia

Lo **schema statico** di verifica della stabilità esterna è del tutto analogo a quello utilizzato per le opere di sostegno rigide.



Da Simonato & Bischetti, 2003



PALIFICATE IN LEGNO: Le palificate a parete doppia

Per **dimensionamento preliminare** si possono assumere i seguenti valori utili per il calcolo dell'altezza e della base della palificata:

$$H_{\text{palificata}} = 1 - [0,7 \tan(\varphi/2)]$$

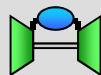
$$B_{\text{palificata}} = 0,7 H_{\text{palificata}}$$

La **stabilità interna** deve essere verificata assimilando la gabbia in legno ad una struttura cubica contenente il materiale di riempimento.

Ciascun cubo ha pianta rettangolare di:

- 1) lunghezza pari a quella definita dall'interasse tra gli elementi lignei trasversali all'opera
- 2) larghezza pari a quella definita dall'interasse tra gli elementi lignei longitudinali posti allo stesso livello.

La spinta indotta dal materiale di riempimento va ad agire sugli elementi trasversali, i quali funzioneranno da tiranti impedendo l'allontanamento reciproco dei paramenti (di valle e di monte); la verifica va condotta su tali elementi.

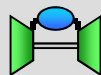


Le NTC 2018 per le opere di sostegno: LA RELAZIONE GEOTECNICA

Le verifiche geotecniche e i relativi risultati devono essere illustrati nella **Relazione Geotecnica**, che deve contenere (da NTC 2018):

“Le scelte progettuali, il programma e i risultati delle indagini, la caratterizzazione e la modellazione geotecnica, di cui al 6.2.2, unitamente ai calcoli per il dimensionamento geotecnico delle opere e alla descrizione delle fasi e modalità costruttive,..”.

Nel caso delle opere di sostegno occorre considerare che il **“dimensionamento geotecnico”**, a causa dell'interazione suolo-struttura, potrebbe comportare la verifica congiunta degli SLU di tipo GEO e STR, talora inscindibili fra loro, a meno di verificare solo gli SLU GEO sotto l'ipotesi di opera di sostegno infinitamente rigida.



Le competenze e responsabilità professionali: CENNI SULLE FIGURE COINVOLTE

La progettazione generale di un'opera di sostegno, per la necessaria valutazione dell'interazione terreno-struttura coinvolge entrambe le **figure professionali** del Geologo e dell'Ingegnere (progettista).

Il Cap. 6 - Progettazione geotecnica delle NTC 2018, stabilisce che, nell'ambito del progetto, debbano essere sviluppate e redatte le seguenti relazioni:

- 1) RELAZIONE GEOLOGICA
- 2) **RELAZIONE GEOTECNICA**

La prima è stato stabilito essere di competenza esclusiva del Geologo (vedi giurisprudenza).

La seconda è di competenza "concorrente" ovvero può essere sviluppata sia dall'Ingegnere che da Geologo (vedi sentenza TAR Lazio 5231/2009), specificatamente per i progetti sottoposti alle NTC 2008 (cfr. CDS, IV, n° 491/2002; IV, n° 705/1998; V, n° 701/1995; Ad. Gen. N° 154/1994; n° 164/1992).



Le competenze e responsabilità professionali: CENNI SULLE FIGURE COINVOLTE

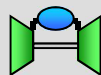
Si osservino in dettaglio i contenuti della **RELAZIONE GEOTECNICA**:

- a) scelte progettuali
- b) il programma e i risultati delle indagini
- c) la caratterizzazione e la modellazione geotecnica
- d) calcoli per il dimensionamento geotecnico delle opere (SLU e SLE)
- e) la descrizione delle fasi e delle modalità costruttive.

E' parere diffuso e condiviso (vedi giurisprudenza) che i punti b), c), i **calcoli SLU GEO** del punto d) e parte delle descrizioni di cui al punto e) siano di competenza anche del Geologo.

Le responsabilità professionali ne derivano di conseguenza.

Grazie dell'attenzione!



FINE DELLA PRESENTAZIONE

Per info sui programmi di calcolo utilizzati nel presente corso chiedere direttamente all'autore attraverso i seguenti riferimenti:

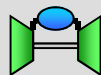
Dott. Ing. Geol. Piergiuseppe Froidi
Ingénieur Géotechnique CNAM - Paris
Via Emilia Est, 202
43123 - Parma (PR)
Tel. 0521-483979 - Cell. 329-2171997
e-mail: piergiuseppefroidi@libero.it

<https://piergiuseppefroidi.wixsite.com/geoingegneria>



BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- [1] Decreto 17 Gennaio 2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Roma.
- [2] UNI EN 1997-1:2005 Eurocodice 7 (2005) – Progettazione geotecnica – Parte 1 : Regole generali. Versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 1997-1.
- [3] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Circolare 21 Gennaio 2019, n. 7 (2019) - Istruzioni per l'applicazione dell' "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 Gennaio 2018. Roma.
- [4] UNI EN 1992-1:2005 Eurocodice 2 (2005) – Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Parte 1-1 : Regole generali e regole per gli edifici. Versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 1992-1-1.
- [5] Progettazione delle opere geotecniche secondo Le NTC 2018 e gli Eurocodici (2020) – Maggioli Editore. Santarcangelo di Romagna (RN).
- [6] Dissesto idrogeologico e stabilità dei versanti (2015) – Consolidamento dei pendii con palificate – Maggioli Editore. Santarcangelo di Romagna (RN).



BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

[7] Progettazione delle opere geotecniche secondo le NTC 2018 e gli Eurocodici

- Fondazioni profonde
- Opere di consolidamento con pali
- Ancoraggi

Maggioli Editore. Santarcangelo di Romagna (RN).

