



Corso di aggiornamento per ingegneri

12 Crediti Formativi Professionali

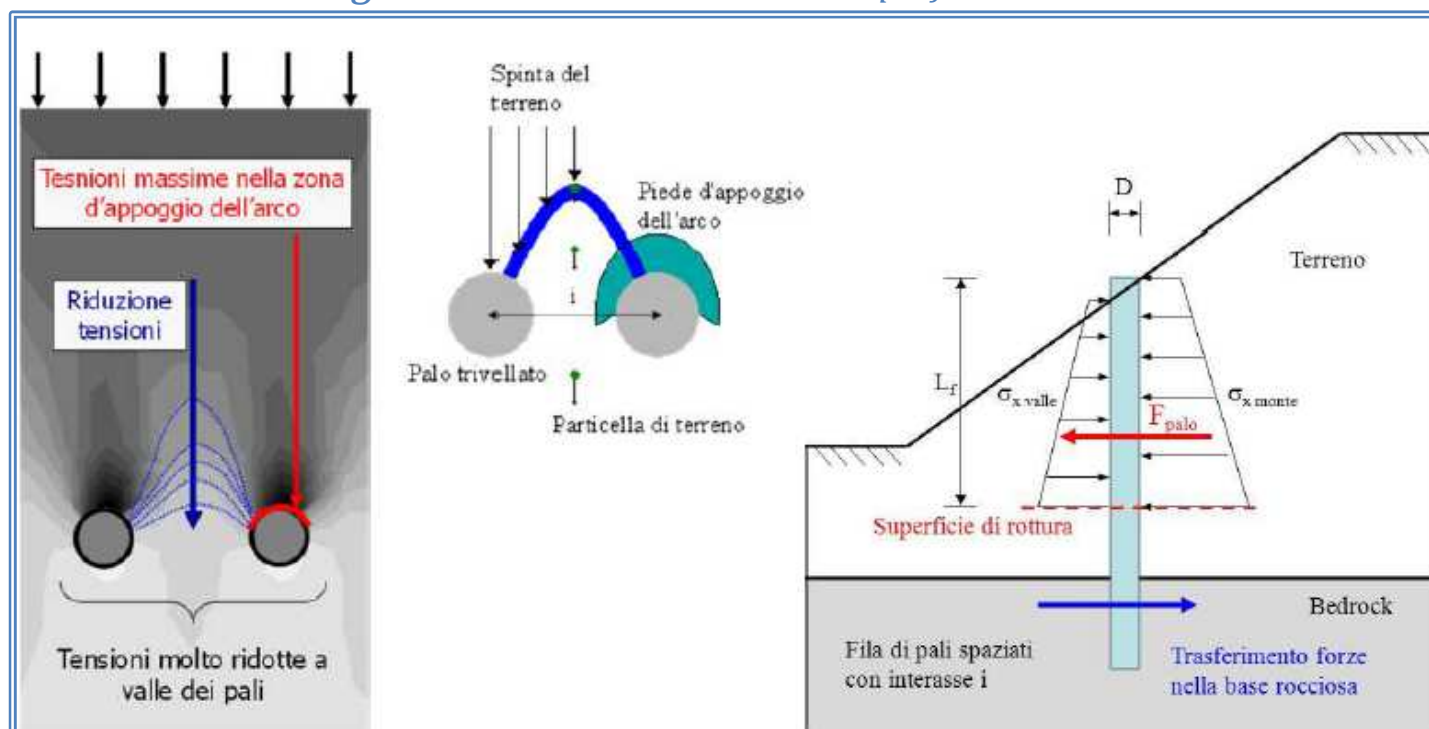
San Ponziano, Spoleto, 22-23 settembre 2017

Corso organizzato da APICE srl e prof. Aurelio Gherzi col patrocinio dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Perugia

CORSO

Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

Ing. Francesco Oliveto: Libero professionista



Spoleto, 23 Settembre 2017

MECCANICA DELLE FRANE E METODOLOGIE DI CONSOLIDAMENTO

INDICE

ore 8.30–10.30/11.00-13.00 :

1. Opere di Sostegno:

Strutture superficiali: (*muri a gravita, a mensola e contrafforti in c.a.*)

Strutture di sostegno speciali: (*Paratie libere e con tiranti, pali discreti, muri su pali e/o con tiranti, pozzi strutturali*)

2. Calcoli di Stabilit : Cenni sui metodi MEL, FEM-FDM.

3. Interazione struttura – Pendio instabile: Meccanismi di trasferimento delle azioni, fattore di sicurezza progetto, calcolo della resistenza degli interventi, scelta dell'ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilit , metodi di calcolo per pali e pozzi strutturali soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche geotecniche e strutturali.


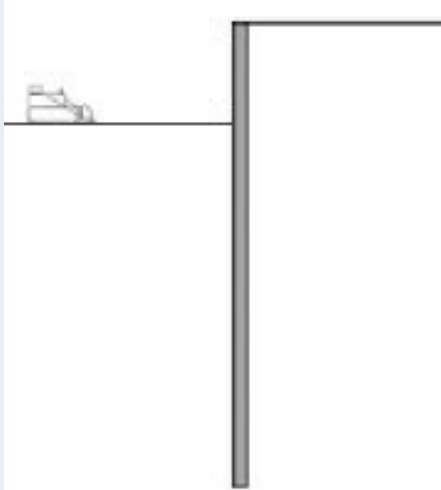

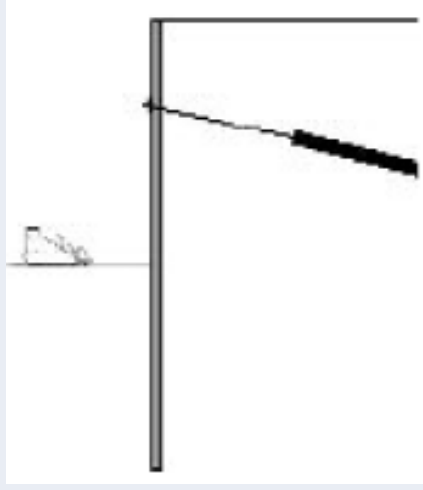
4. Pendii in roccia: Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.

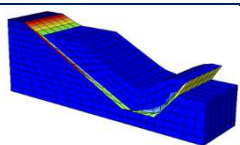
3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

MECCANISMI DI TRASFERIMENTO DELLE AZIONI

Fatta eccezione per gli ancoraggi pretesi, tutti gli elementi strutturali anzidetti **entrano in carico** secondo **meccanismi particolari** che si differenziano dalle normali **opere di sostegno**.

Infatti quest'ultime vengono caricate a seguito di una variazione delle **condizioni al contorno**, quali **carico a monte** o **scavo a valle**. In conseguenza di questo squilibrio ne consegue che la struttura si **sposta e si deforma interagendo con il terreno nel suo intorno**.

Fase:1 infissione della paratia nel terreno	Fase2: realizzazione della prima fase di scavo, il terreno a tergo e sostenuto dalla paratia	Fase 3: messa in opera dei tiranti di ancoraggio	Fase 4 :ripresa delle operazioni di scavo fino alla quota di fondo scavo finale
			



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

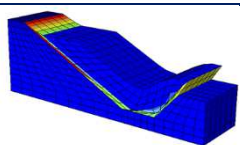
MECCANISMI DI TRASFERIMENTO DELLE AZIONI

Nel caso delle opere di stabilizzazione dei pendii, queste inizialmente **scariche all'atto della loro realizzazione**, entrano in carico per gli **spostamenti che il pendio subisce in conseguenza dell'elevata mobilitazione della resistenza a taglio del terreno**. Le cause che provocano gli spostamenti in atto possono essere varie in dipendenza del tipo di movimento franoso (**fenomeni viscosi, oscillazioni della falda, azioni sismiche etc.**).

Si tratta di un meccanismo d'interazione assai complesso che richiede **un'analisi tensodeformativa in campo elastoplastico-viscoso dell'insieme pendio struttura**, in particolare negli elementi impegnati **lungo la superficie critica nell'intorno del quale è attinto il maggior grado di mobilitazione della resistenza**.

Differente è il caso di **pendii stabili** il cui margine di sicurezza venga **ridotto al di sotto dei valori ammissibili**, a seguito della **realizzazione di scavi o perché caricato dalla costruzione di rilevati**. In questo caso si induce una variazione di **stato tensionale al contorno del pendio, che determina un regime di deformazione**.

Se gli spostamenti sono in parte contrastati dall'opera, preventivamente realizzata, sono le **deformazioni indotte a far entrare in carico la struttura**. In questo caso gli **scorrimenti sulla superficie critica sono trascurabili in quanto la mobilitazione della resistenza inizialmente bassa si conserva per l'azione di contenimento delle strutture di sostegno**.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

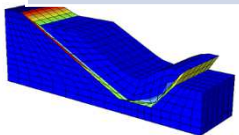
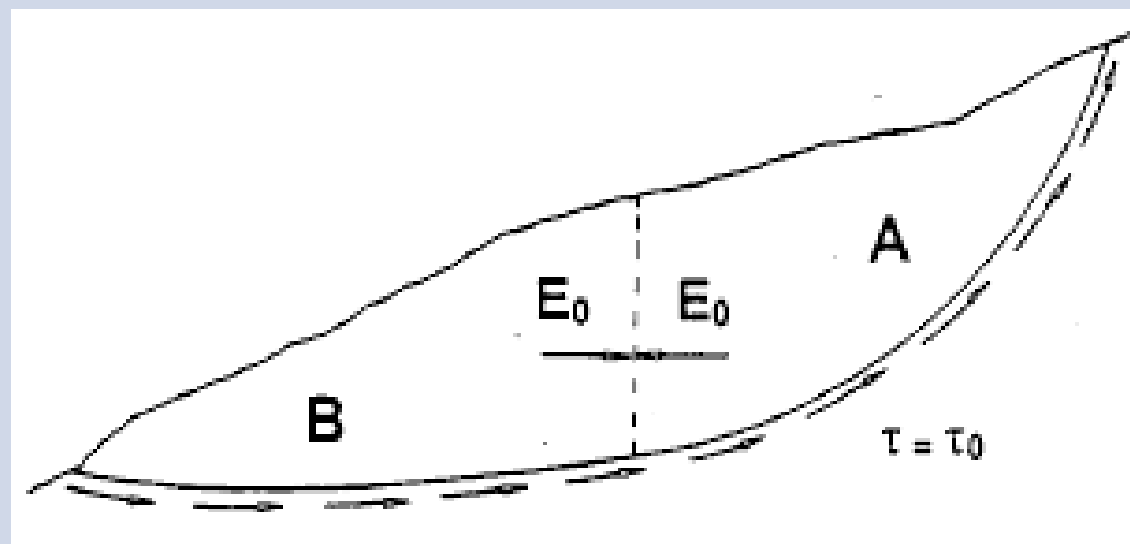
MECCANISMI DI TRASFERIMENTO DELLE AZIONI

Ai fini dell'interazione e per comprenderne il significato fisico meccanico si fa riferimento a metodi di calcolo basati sull'equilibrio limite . Analisi effettuate con metodi avanzati agli elementi finiti non lineare permetteranno di ottimizzare l'intervento predimensionato con tale tecnica. Il metodo è stato proposto da Evangelista (1994).

Si fa riferimento al caso di un pendio naturale o scarpata esistente instabile ossia interessata da scorrimenti. Si descrive in modo qualitativo e quantitativo il meccanismo di entrata in carico di una struttura rigida (paratia, pali) immersa nel terreno.

Le ipotesi sono :

- ☐ *stato di deformazione piana ;*
- ☐ *scorrimenti che avvengono in una fascia ristretta lungo la superficie critica.*
- ☐ *Ipotesi sullo stato tensionale in sito prima dell'entrata in carico dell'opera pari ad E_0*



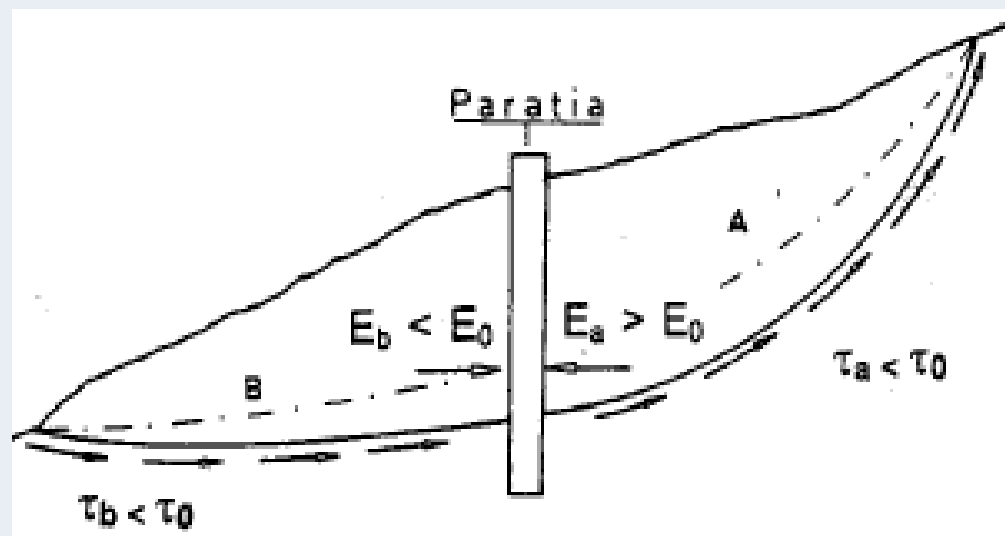
3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

MECCANISMI DI TRASFERIMENTO DELLE AZIONI

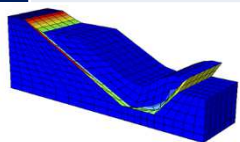
L'opera suddivide la massa al di sopra della superficie critica in due settori , quello di monte **A** e di valle **B** (vedi figura), si ipotizza che la realizzazione della stessa non abbia modificato lo stato tensionale in sito e quindi caricata a monte e a valle da due spinte uguali e opposte pari a E_0 che prima si esercitava nel terreno. Tale spinta può essere calcolata con un metodo **MEL** che permetterà di calcolare il fattore di sicurezza iniziale F_0 .

□ Si ipotizza inoltre con le ipotesi fatte sul MEL , **che il grado di mobilitazione sia costante lungo la superficie di scorrimento** e quindi inizialmente uguale alla base dei **settori A e B**.

□ Se il valore è elevato **si verificano scorrimenti** che in assenza dell'opera di sostegno **avrebbero fatto spostare liberamente verso valle l'intera massa**;



□ La presenza dell'opera **limita gli spostamenti**, il settore di monte tende ancora a **scorrere verso il basso** ed a **impegnare l'opera incrementando l'interazione con questa**.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

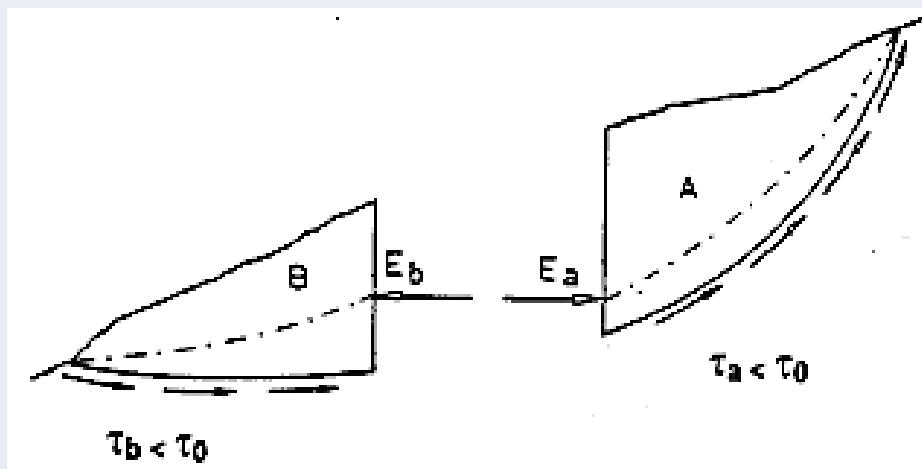
MECCANISMI DI TRASFERIMENTO DELLE AZIONI

- ❑ *Lo scorrimento avviene a seguito di **deformazione per compressione** (stato limite passivo) del settore A.*

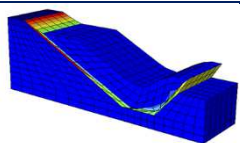
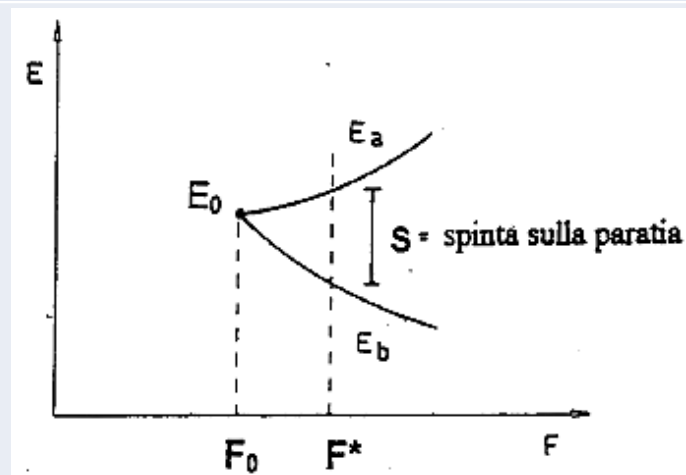
Se si indica con E_a il valore della spinta che questa esercita sul settore A essa risulterà aumentata rispetto al valore iniziale E_0 . Il nuovo valore di $E_a > E_0$, farà diminuire il grado di mobilitazione a monte è pertanto il coefficiente di sicurezza F_a sul settore A sarà aumentato.

$$E_a > E_0 \quad \tau_a < \tau_0 \quad F_a > F_0$$

Determinazione di E_a e E_b dall'analisi dei blocchi



Andamento della spinta S con il fattore di sicurezza F



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

MECCANISMI DI TRASFERIMENTO DELLE AZIONI

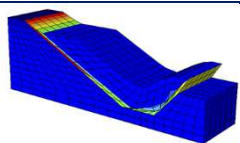
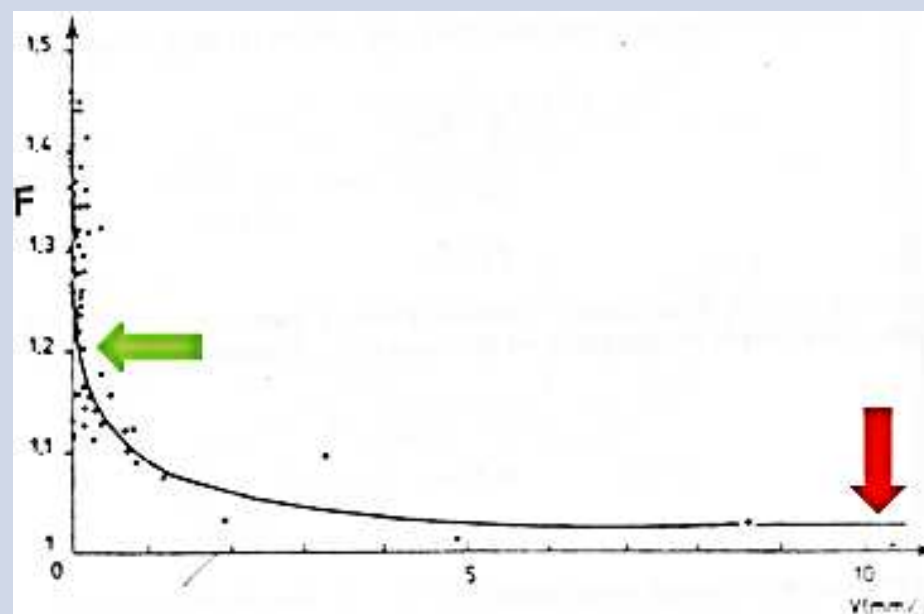
- ❑ A valle il settore **B** tenderà a scorrere verso il basso con deformazione per estensione (limite attivo) con diminuzione di E_b del grado di mobilitazione ed aumento del fattore di sicurezza F_b . Si avrà pertanto:

$$E_b < E_0 \quad \tau_b < \tau_0 \quad F_b > F_0$$

L'opera risulterà caricata dalla spinta $S = E_a - E_b$ che tenderà ad aumentare nel tempo fino a che gli spostamenti si saranno esauriti.

Perché può essere valutata correttamente la spinta finale sull'opera dovrebbe essere nota la legge che lega *il grado di mobilitazione della resistenza a taglio con la velocità degli scorrimenti lungo la superficie critica*.

Studi sperimentali hanno messo in evidenza che per valori di F_s prossimi all'unità corrisponde una velocità elevata (>10 mm/g) e che questa subisce riduzioni significative per modesti aumenti di F_s . Secondo uno studio condotto da Cartier (1985), un valore di $F_s=1.20$ è capace di arrestare il movimento.

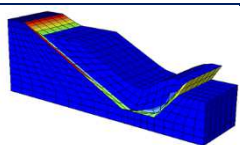
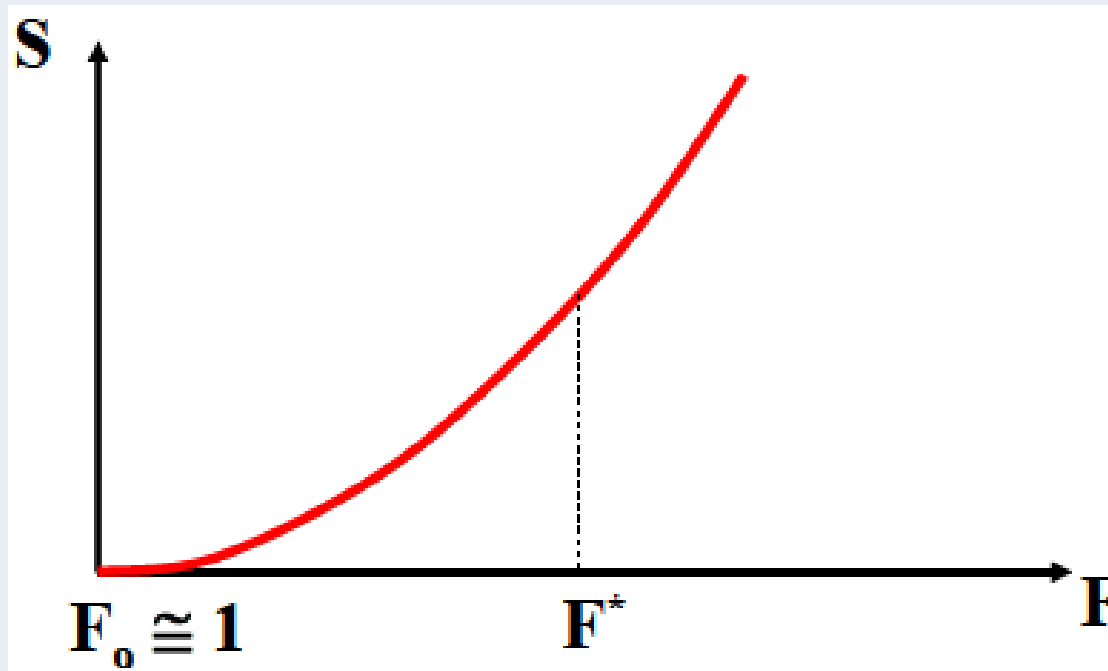


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

MECCANISMI DI TRASFERIMENTO DELLE AZIONI

Come si è visto tramite una descrizione semplificata del fenomeno, si è voluto evidenziare come la spinta S esercitata sull'opera evolve progressivamente nel tempo e raggiunge il carico, che necessita **per bloccare le deformazioni del pendio**, quindi l'opera assorbe **solo quando è strettamente necessario**.

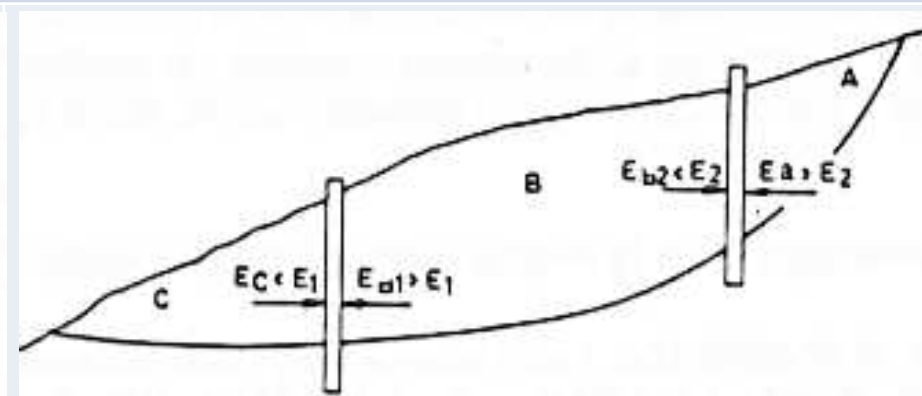
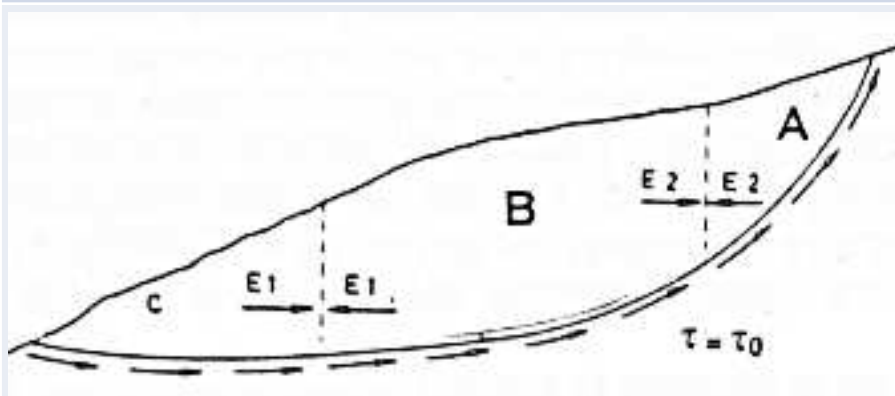
Il calcolo della spinta S richiede l'assunzione di un prefissato grado di mobilitazione della resistenza taglio lungo la superficie di scorrimento ossia di un fattore di sicurezza F^* . Il calcolo di S andrà fatto valutando E_a ed E_b nell'ipotesi che sui settori **A** e **B** il fattore di sicurezza sia pari F^* . E' chiaro che S risulterà una funzione crescente di F^* .



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

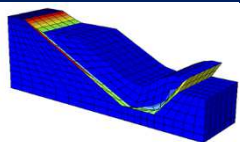
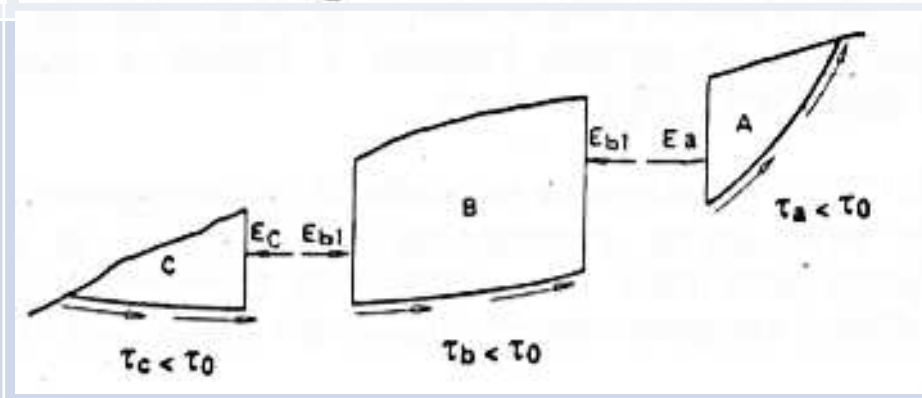
MECCANISMI DI TRASFERIMENTO DELLE AZIONI

L'analisi può essere esteso anche a due o più paratie, il concetto d'interazione non cambia ma per la risoluzione del problema occorre fare ulteriori ipotesi. Nel caso di due paratie la massa viene suddivisa in tre settori: **quello di monte A , centrale B, di valle C.**



La spinta sulle due opere varranno:

- ❑ Opera di valle varrà : $S_1 = E_{b1} - E_c$
- ❑ Opera di monte $S_2 = E_a - E_{b2}$

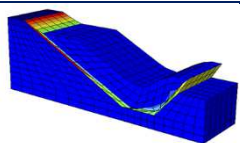
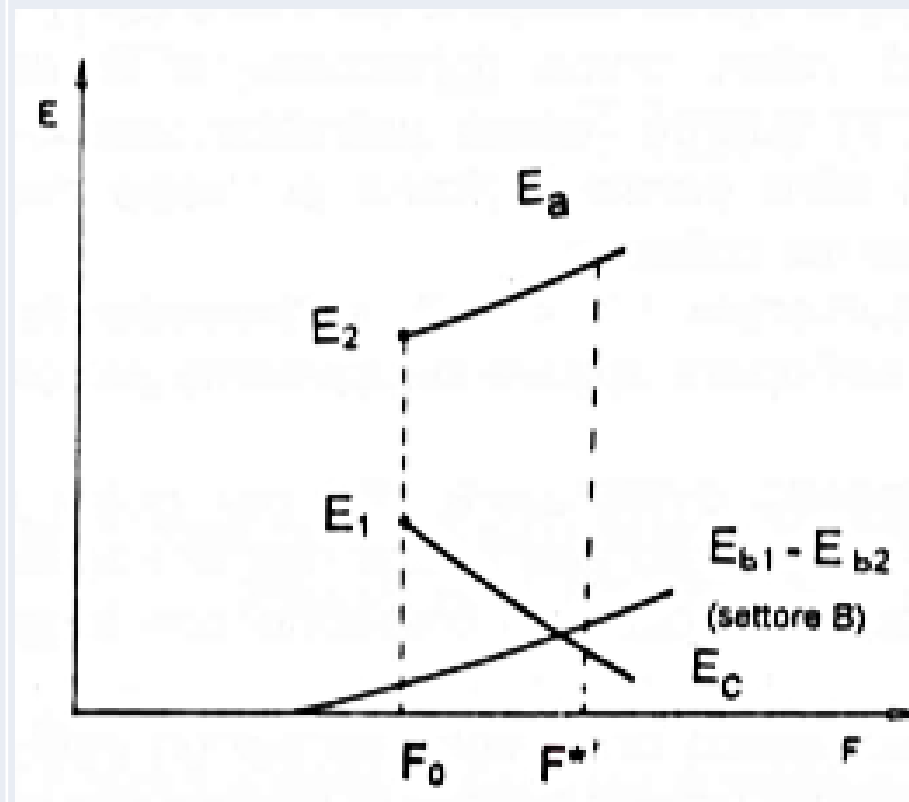


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

MECCANISMI DI TRASFERIMENTO DELLE AZIONI

Procedendo come prima è possibile tracciare le curve E_a, F_a, E_c, F_c che esprimono la correlazione fra la spinta sul settore di valle e di monte al variare del coefficiente di sicurezza F .

- ❑ Analizzando il settore centrale B si potrà tracciare la curva del termine : $S_m = E_{b1} - E_{b2}$,in funzione di F_b . La condizione che $F_a = F_b = F_c$ non è sufficiente a ricavare le quattro incognite del problema. Sarà necessario imporre una condizione del tipo $S_1/S_2 = b$, dove b deve essere scelto dal progettista.
- ❑ Nel caso in cui sia in atto il progetto di stabilizzazione della frana e si è in possesso **di misure di spostamento orizzontale della massa instabile**, il coefficiente b può essere scelto in modo che risulti **maggiormente gravata l'opera dove quest'ultimi sono maggiori**.



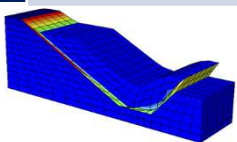
3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

CONSIDERAZIONI SULL'INTERAZIONE OPERA-PENDIO

Una volta nota l'interazione fra la massa e l'opera è necessario dimensionare la stessa. E' opportuno chiarire i seguenti aspetti:

- ❑ Le spinte vengono determinate sulla base di sole **condizioni di equilibrio globale**, trascurando **l'interazione che avviene localmente lungo l'elemento**, per cui non è nota a priori la **distribuzione delle pressioni lungo la paratia**.
- ❑ Il calcolo della spinta presuppone la scelta di un appropriato valore di **F***, che rappresenta il coefficiente di sicurezza capace di annullare gli spostamenti della frana. Nella letteratura si fa riferimento a valore alquanto variabili, vengono ritenuti sufficienti coefficienti di sicurezza compresi tra il **5 e il 20%**.
 - *Se si fa riferimento al limite inferiore si fa una scelta coraggiosa in quando l'opera potrebbe essere sollecitata molto al di sopra **della sua resistenza ultima**, ossia la frana potrebbe essere stabilizzata ma l'opera sarebbe in condizioni di collasso.*
 - *Il limite superiore è un buon compromesso per la stabilità della frana e dell'opera.*

Nel rispetto del miglior rapporto costo benefici il costo dell'opera è funzione del dello spessore del corpo frana con le **legge piu che lineare**. Esiste quindi un limite economico di applicabilità per un **intervento strutturale di questo tipo**, esso può essere valutato intorno ad uno spessore del terreno in stabile pari a **10-15 mt** in funzione **della tipologia adottata**.

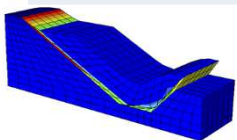
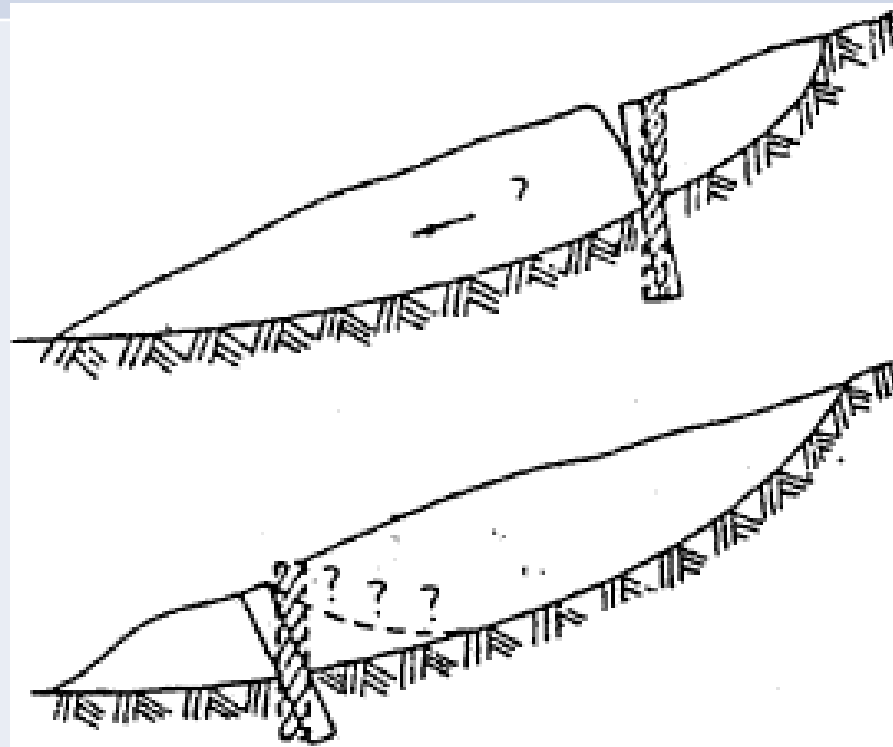


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

UBICAZIONE OPERA DI SOSTEGNO

La prima domanda che ci viene spontanea, data un corpo frana attivo con una superficie di scorrimento nota come forma e dimensioni, **dove posiziono la mia opera?** A meno che non ci sono condizioni al contorno particolari da proteggere quella della presenza di infrastrutture quali edifici, strade etc. esistono due posizioni limite

- ❑ *Per ragioni puramente economiche converrebbe mettere l'opera dove la superficie di scorrimento è meno profonda ossia in testa al corpo frana. Se l'opera è collocata **troppo in alto** potrebbe non **arrestare la frana che si muoverebbe verso valle** rendendo inutile l'intervento.*
- ❑ *Collocando l'opera vicino al piede del pendio la massa instabile eserciterebbe una spinta considerevole e quindi far **collassare l'opera o addirittura scavalcarla**.*

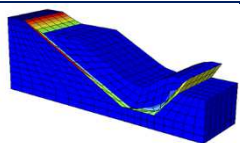
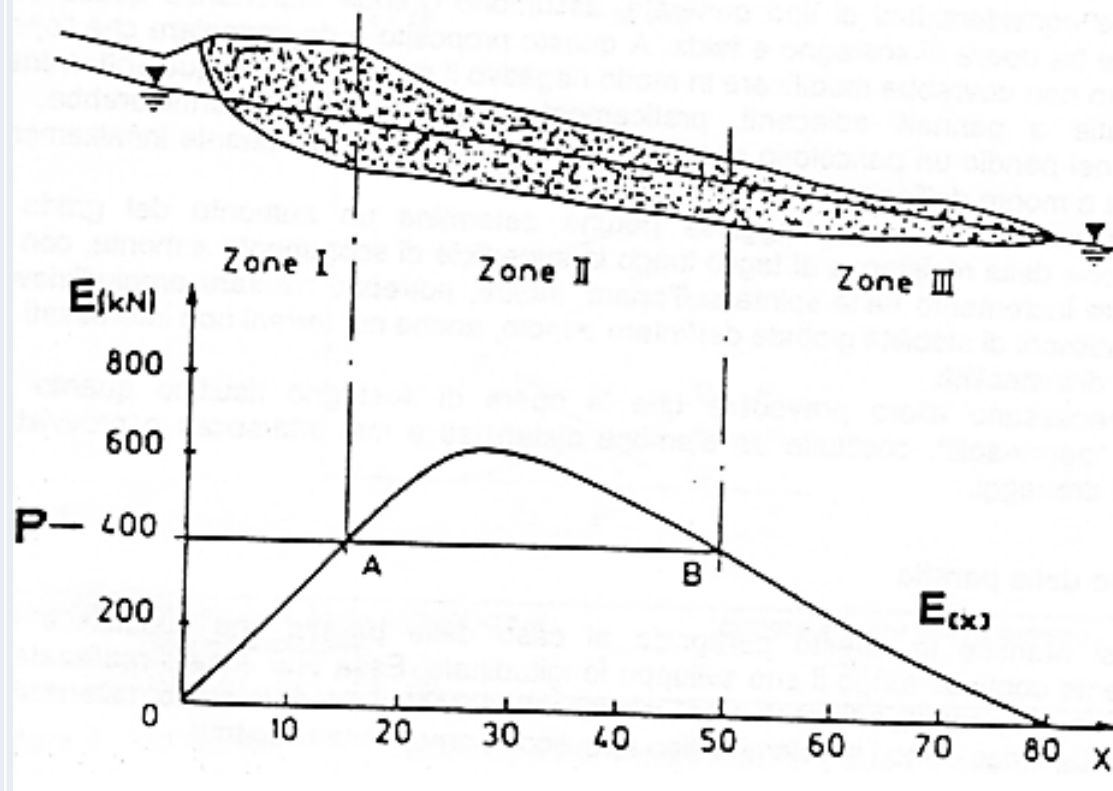


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR

UBICAZIONE OPERA DI SOSTEGNO

Cartier (1986) e Nakamura (1989) suggeriscono di procedere nel seguente modo :

- ❑ Si valuta con uno dei metodi MEL (Janbu etc.) la distribuzione delle forze interstriscia interne alla massa E_i ;
- ❑ si valuta l'azione orizzontale P che viene richiesta per amplificare il fattore di sicurezza da $F_0 \rightarrow F^*$;
- ❑ Gli autori suggeriscono, in relazione alla figura a lato, come posizione ottimale dell'opera, la zona **AB** in cui il valore di E supera P , ovvero Zona II.



3. **INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE:** *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

CONSIDERAZIONI PROGETTUALI

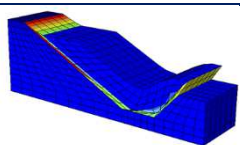
Fra le considerazioni generali, assume grande importanza l'interazione tra opera di sostegno e falda. L'opera non dovrebbe modificare in modo negativo il regime delle acque sotterranee.

- ☐ *Una paratia a pannelli adiacenti praticamente impermeabile, determinerebbe nel pendio uno sbarramento idraulico con innalzamento della falda a monte. Ciò determinerebbe un aumento del grado di mobilitazione della resistenza al taglio, con notevole incremento della spinta sull'opera, che potrebbe risultare pregiudizievole per la stabilità globale dell'intero pendio e interessare i terreni stabili.*
- ☐ *E' necessario avere opere di sostegno permeabili. Costituiti da elementi distanziati e mai intersecati o provvisti di opportuni drenaggi.*

PROPORZIONAMENTO DELL'OPERA DI SOSTEGNO

Nel progetto di una paratia vanno effettuate le seguenti verifiche:

- ☐ *La lunghezza d'infissione dell'opera al di sotto della superficie di scorrimento, deve essere tale da garantire che non si verifichino scorrimenti più profondi;*
- ☐ *Le condizioni di resistenza dell'opera a flessione e taglio non devono mai essere raggiunte;*
- ☐ *Nel caso in cui l'opera sia ancorata in testa, i tiri negli ancoraggi devono essere inferiori ai valori limite;*



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

CONSIDERAZIONI PROGETTUALI

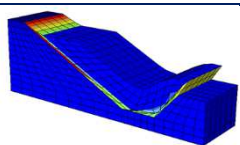
Fra le considerazioni generali, assume grande importanza l'interazione tra opera di sostegno e falda. L'opera non dovrebbe modificare in modo negativo il regime delle acque sotterranee.

- ☐ *Una paratia a pannelli adiacenti praticamente impermeabile, determinerebbe nel pendio uno sbarramento idraulico con innalzamento della falda a monte. Ciò determinerebbe un aumento del grado di mobilitazione della resistenza al taglio, con notevole incremento della spinta sull'opera, che potrebbe risultare pregiudizievole per la stabilità globale dell'intero pendio e interessare i terreni stabili.*
- ☐ *E' necessario avere opere di sostegno permeabili. Costituiti da elementi distanziati e mai intersecati o provvisti di opportuni drenaggi.*

PROPORZIONAMENTO DELL'OPERA DI SOSTEGNO

Nel progetto di una paratia vanno effettuate le seguenti verifiche:

- ☐ *La lunghezza d'infissione dell'opera al di sotto della superficie di scorrimento, deve essere tale da garantire che non si verifichino scorrimenti più profondi;*
- ☐ *Le condizioni di resistenza dell'opera a flessione e taglio non devono mai essere raggiunte;*
- ☐ *Nel caso in cui l'opera sia ancorata in testa, i tiri negli ancoraggi devono essere inferiori ai valori limite;*



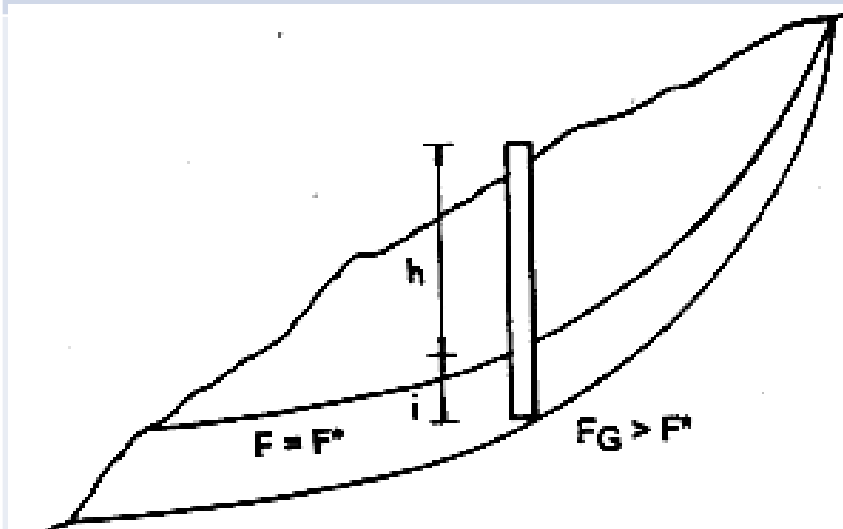
3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

PROPORIZIONAMENTO DELL'OPERA DI SOSTEGNO

Per quanto riguarda la lunghezza d'infissione orientativamente Baker e Yoder (1958), suggeriscono di adottare un infissione pari ad **almeno 1/3 o 1/4 della lunghezza immersa nel terreno stabile.**

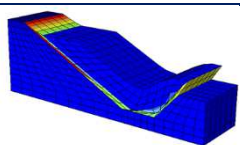
Per verificare tale lunghezza si rende indispensabile effettuare una verifica di stabilità globale **per superfici di scorrimento passanti per l'estremità inferiore dell'opera** $F_G > F^*$, vedi figura a lato.

STABILITÀ GLOBALE SUP.PROFONDE



Ai fini della verifica strutturale dell'opera la stessa viene così schematizzata:

- ❑ *Lungo la massa instabile l'interazione viene sostituita con la spinta S già calcolata. Sappiamo che non sono noti la distribuzione e punto di applicazione. Usualmente si adotta che sia applicata ad $h/3$ ossia abbia distribuzione triangolare;*
- ❑ *La paratia è vista come **una trave alla Winkler su suolo elastoplastico non reagente a trazione**, con il metodo a molle in cui il terreno al di sotto della superficie viene schematizzato come un letto di molle elastoplastiche con resistenze che variano tra lo stato limite attivo e passivo;*

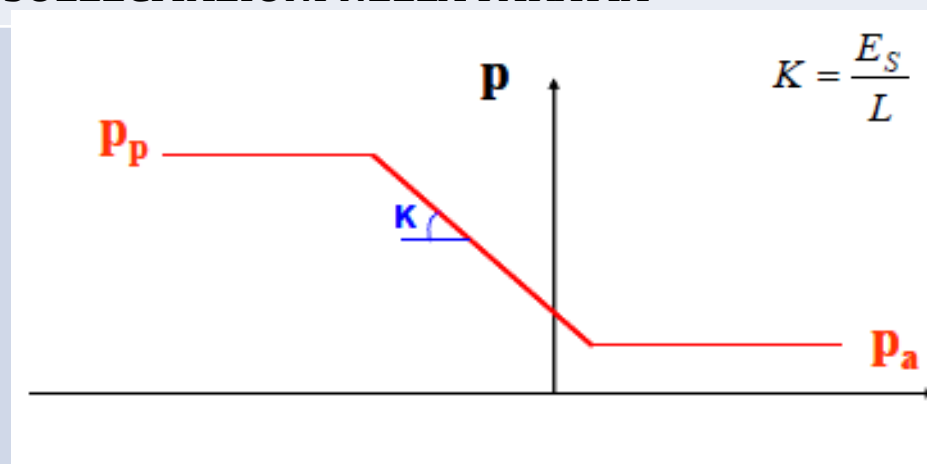
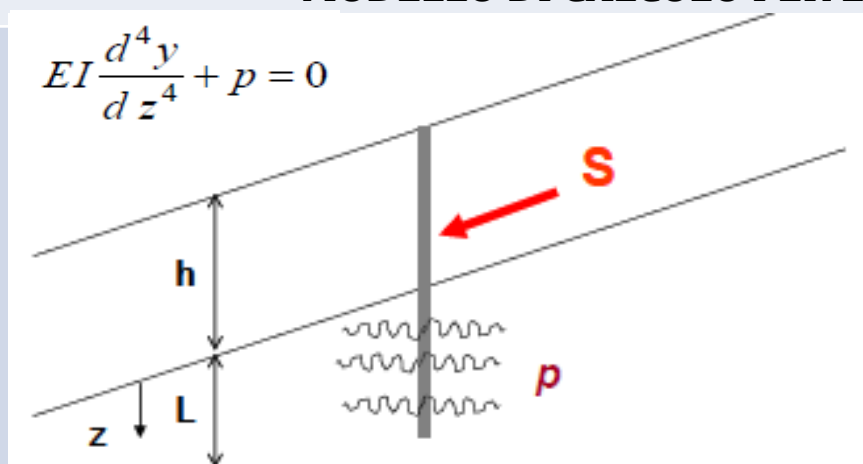


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

PROPORZIONAMENTO DELL'OPERA DI SOSTEGNO

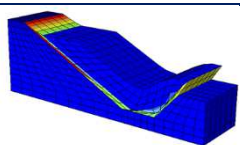
La paratia è vista come una trave alla Winkler su suolo elastoplastico non reagente a trazione, con il metodo a molle in cui il terreno al di sotto della superficie viene schematizzato come un letto di molle elastoplastiche con resistenze che variano tra lo stato limite attivo e passivo;

MODELLO DI CALCOLO PER LE SOLLECITAZIONI NELLA PARATIA



Dove: E_s modulo terreno stabile, L lunghezza di infissione.

Risolta la struttura con un codice di calcolo non lineare, note le sollecitazioni N, T, M e gli spostamenti u, v dell'opera è possibile effettuare le **verifiche SLU** confrontando con le rispettive resistenze a taglio e flessione M_R, T_R , ossia il soddisfacimento delle seguenti relazioni $M < M_R(N)$ e $T < T_R$



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

PROPORZIONAMENTO DELL'OPERA DI SOSTEGNO

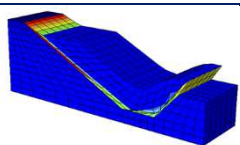
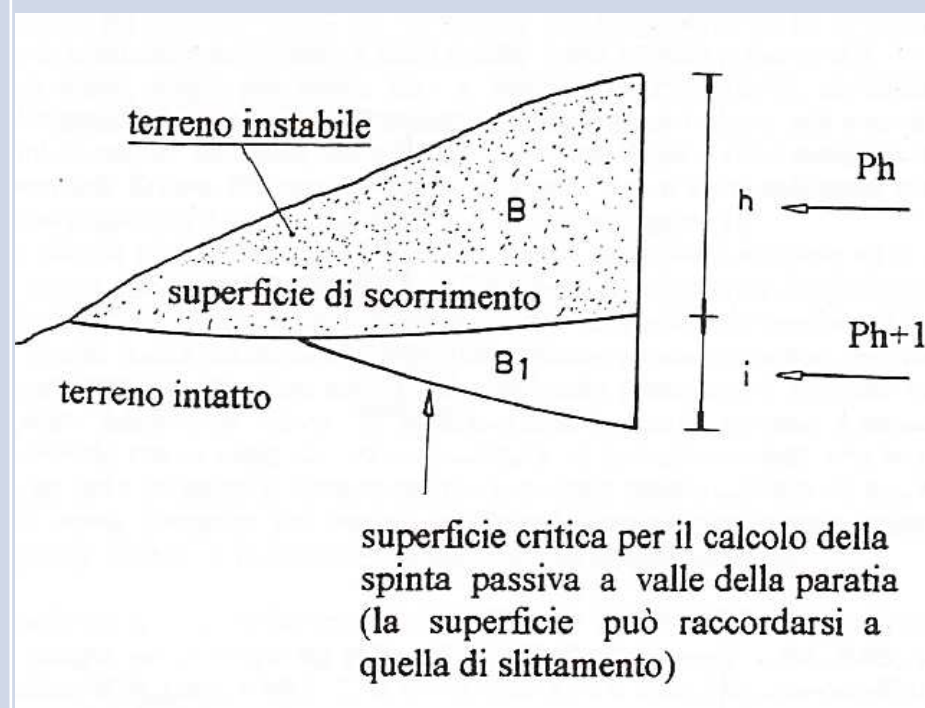
Un'altra verifica da effettuare è quella della resistenza passiva mobilitata a valle della paratia nel tratto infisso per trasmettere l'azione S .

VERIFICA RESISTENZA PASSIVA DI VALLE

$$S_p = P_{h+i} - P_h = 0.50 \cdot \gamma \cdot K_p \cdot [(h + i)^2 - i^2]$$

Dove:

- ☐ γ : peso naturale del terreno;
- ☐ K_p : coefficiente di spinta passiva;
- ☐ H : profondità superficie di scorrimento;
- ☐ i : infissione paratia nel terreno stabile.
- ☐ P_h : spinta che instabilizza il settore B o una sua porzione;
- ☐ P_{h+i} : spinta che instabilizza il settore $B+B_1$
- ☐ S_p : spinta passiva esplicata sul tratto i dai terreni di valle stabili;
- ☐ $\sigma_p = S_p / i$: tensione passiva media sul tratto infisso



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

PROPORZIONAMENTO DELL'OPERA DI SOSTEGNO

VERIFICA PARATIA CON TIRANTE IN TESTA

Un'ultima verifica è quella della paratia tirante in testa, ossia la stabilità globale alla rotazione intorno al punto sommitale. La verifica è condotta con il MEL in termini di tensioni efficaci in presenza di una possibile presenza della falda (vedi figura a lato)

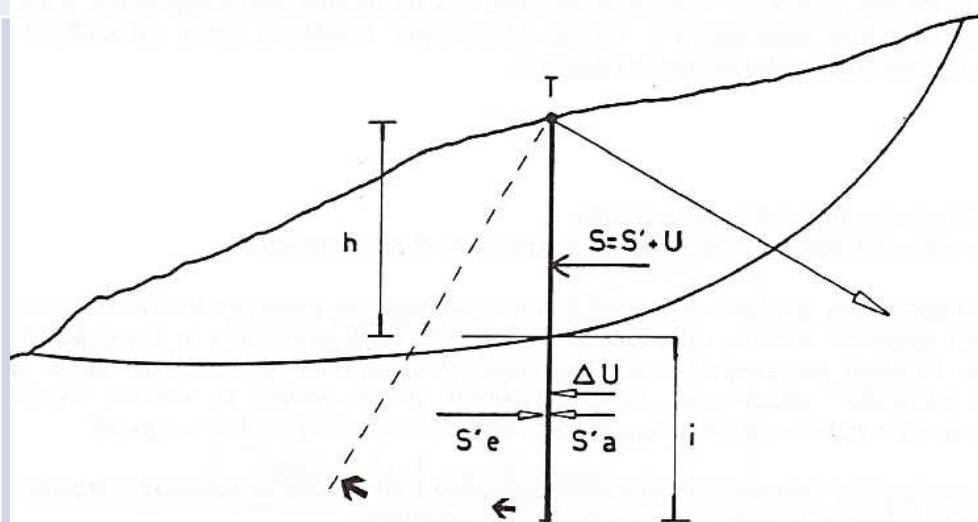
Il coefficiente di sicurezza nei riguardi della stabilità dell'opera viene espresso in funzione del grado di mobilitazione della resistenza passiva effettiva :

$$F_R = S'_P / S'_e$$

Dove:

- ❑ S'_P : spinta passiva effettiva che si esercita a valle del tratto infisso.
- ❑ S'_e : azione che equilibra alla rotazione tutte le azioni applicate sulla paratie
- ❑ Affinché la verifica sia soddisfatta e conservativa deve essere :

$$1,50 < F_R < 2,00$$



S = spinta totale sul tratto h

S' = spinta effettiva sul tratto h

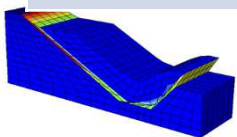
U = differenza di pressione neutra tra monte e valle sul tratto h

S'_a = spinta attiva effettiva nel tratto i

$\Delta U = U_m - U_v$ = differenza delle pressioni neutre tra monte e valle nel tratto i

S'_e = spinta che equilibra alla rotazione intorno al punto T le forze in gioco

S'_p = spinta passiva effettiva nel tratto i



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

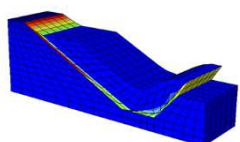
INTERAZIONE OPERA-PENDIO

Il metodo proposto da Evangelista (1994), nonostante un'interazione semplificata tramite un approccio all'equilibrio limite risolve il problema in maniera esaustiva e può essere usato come metodo di progetto/verifica da affinare con metodologie più avanzate.

L'unico problema deriva dalla forte assunzione sul fattore di sicurezza **che è unico per il settore di monte e quello a valle dell'opera**. Tale condizione non è semplice da realizzare in quanto il coefficiente del corpo **a monte sicuramente aumenterà al valore di progetto** mentre quello a valle potrebbe **non aumentare o essere diverso**.

Alla luce di quanto detto va approfondita l'interazione opera-pendio, definendo un parametro fondamentale che è quello della Resistenza di un intervento.

Possiamo definire come **resistenza di un intervento** la **forza massima che l'intervento stesso è capace di esplicare sul corpo di frana**. Affinché un intervento possa esplicare sul corpo in frana una certa forza è necessario che l'intervento **sia efficacemente ancorato fuori dal corpo di frana**. Pertanto un intervento completamente incluso nel volume in frana non offrirà alcuna resistenza. La resistenza dell'intervento dipende sia dal terreno dove esso è immerso o poggiato (**resistenza geotecnica**) che dalla resistenza degli elementi strutturali (**resistenza strutturale**).



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

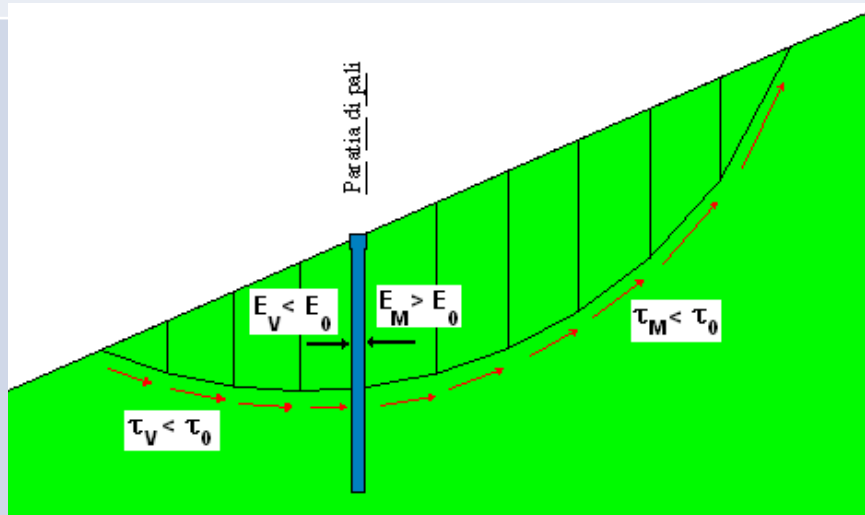
INTERAZIONE OPERA-PENDIO

Nei MEL a conci è possibile tener conto della presenza degli interventi sulla stabilità del pendio secondo due approcci:

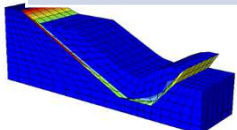
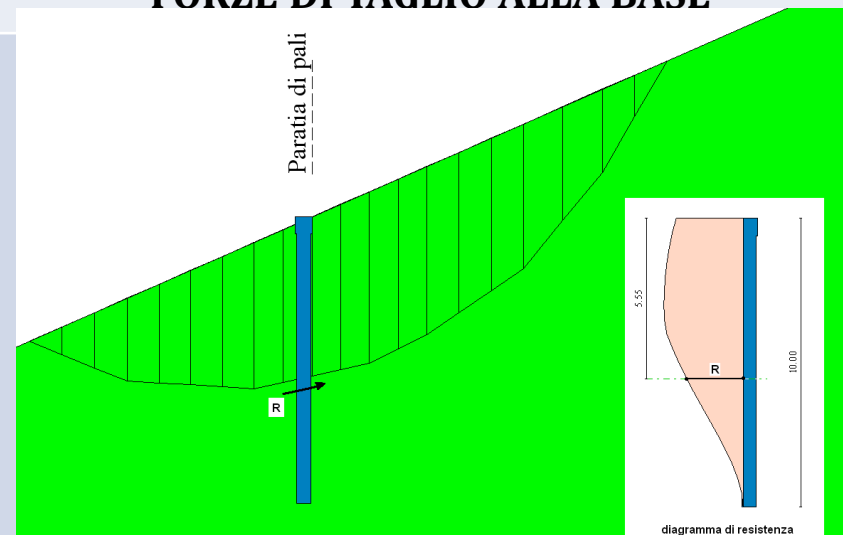
1. Nel primo approccio (*variazione delle forze di interstriscia*) l'intervento interviene sulla distribuzione delle forze mutue (***E***) fra le strisce.
2. Nel secondo modo lo stesso *interviene sulla resistenza a taglio (***T***) alla base della striscia (***resistenza a taglio equivalente***).*

I due modi di procedere sono riportati nelle figure sottostanti.

VARIAZIONE FORZE INTERSTRISCIA



FORZE DI TAGLIO ALLA BASE



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

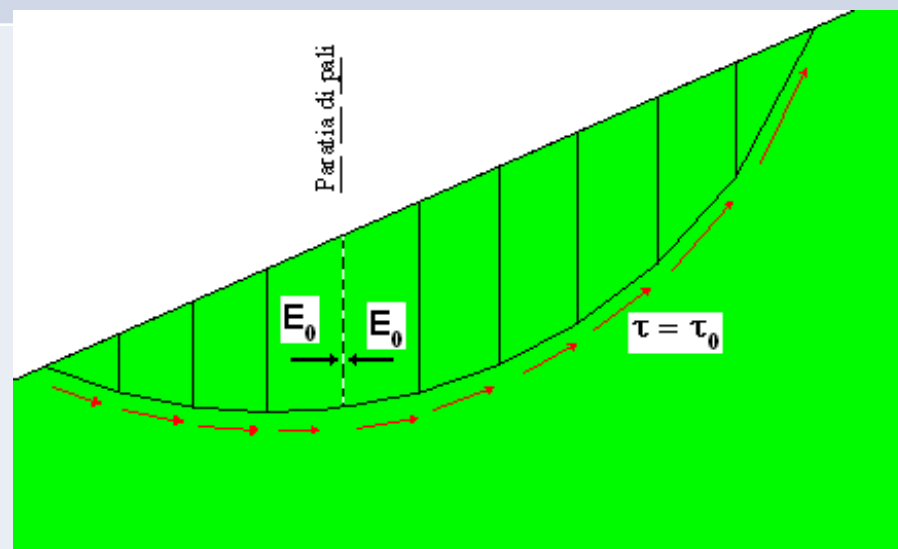
INTERVENTI COME VARIAZIONE DELLE FORZE INTERSTRISCE

Consideriamo la superficie di scorrimento in figura caratterizzata, prima dell'inserimento dell'intervento, da un determinato coefficiente di sicurezza F_0 e da una distribuzione di tensioni resistenti τ_0 . In corrispondenza della sezione di inserimento dell'intervento la parte di monte (M) esercita sulla parte di valle (V) una forza E_0 e viceversa.

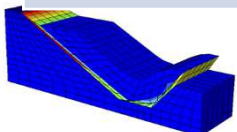
IMPLICAZIONI

Le condizioni di equilibrio della parte a monte rimarranno inalterate se togliamo la parte a valle sostituendola con la forza E_0 oppure con qualche opera in grado di fornire la stessa forza. Questa semplice sostituzione lascia inalterato il fattore di sicurezza ed il grado di mobilitazione della parte a monte.

Qualora l'opera che andiamo ad inserire è in grado di fornire una resistenza R , sulla parte di monte si eserciterà una forza E_M maggiore della forza E_0 , avremo pertanto *un aumento del*



fattore di sicurezza nel settore di monte (F_M) ed una corrispondente diminuzione del grado di mobilitazione.



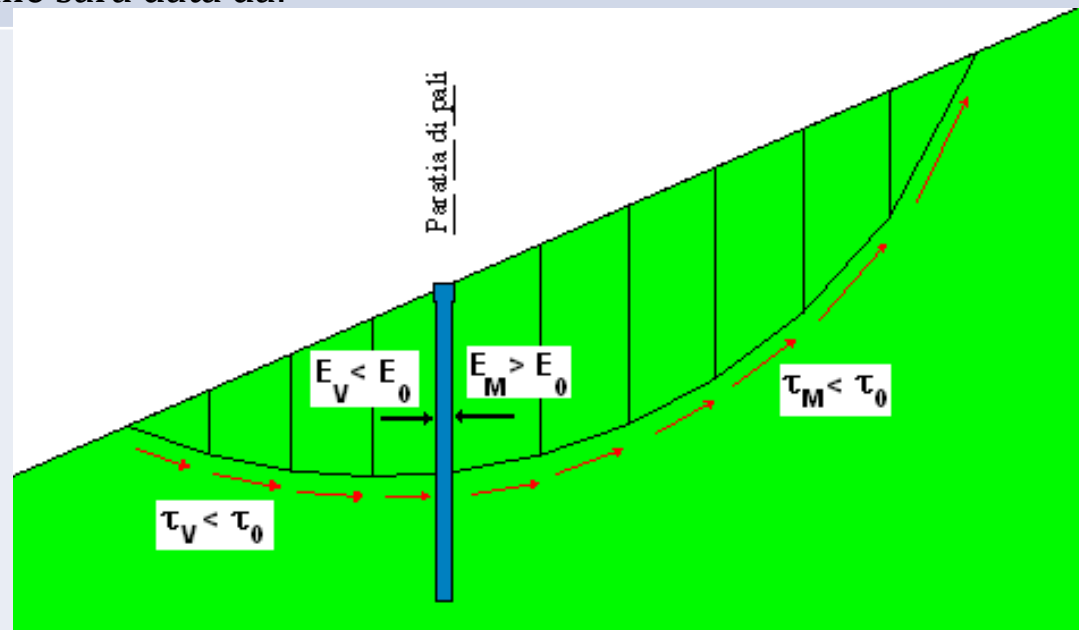
3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

INTERVENTI COME VARIAZIONE DELLE FORZE INTERSTRISCE

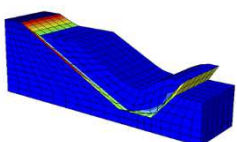
Sul settore di valle la forza esercitata dal settore di monte sarà diminuita per la presenza dell'opera e pertanto si avrà una diminuzione del grado di mobilitazione ed un aumento del coefficiente di sicurezza (F_V). In generale la forza a valle sarà data da:

$$E_V = \max[(E_M - R), 0]$$

I coefficienti di sicurezza a valle ed a monte, calcolati con queste nuove forze al contorno, saranno in generale diversi fra di loro e superiori (al minimo uguali) al valore iniziale F_0 . Riassumiamo di seguito ciò che accade nelle ipotesi su descritte:



<input type="checkbox"/> SETTORE DI MONTE	$E_M \geq E_0$	$\tau_M \leq \tau_0$	$F_M \geq F_0$
<input type="checkbox"/> SETTORE DI VALLE	$E_V \leq E_0$	$\tau_V \leq \tau_0$	$F_V \geq F_0$

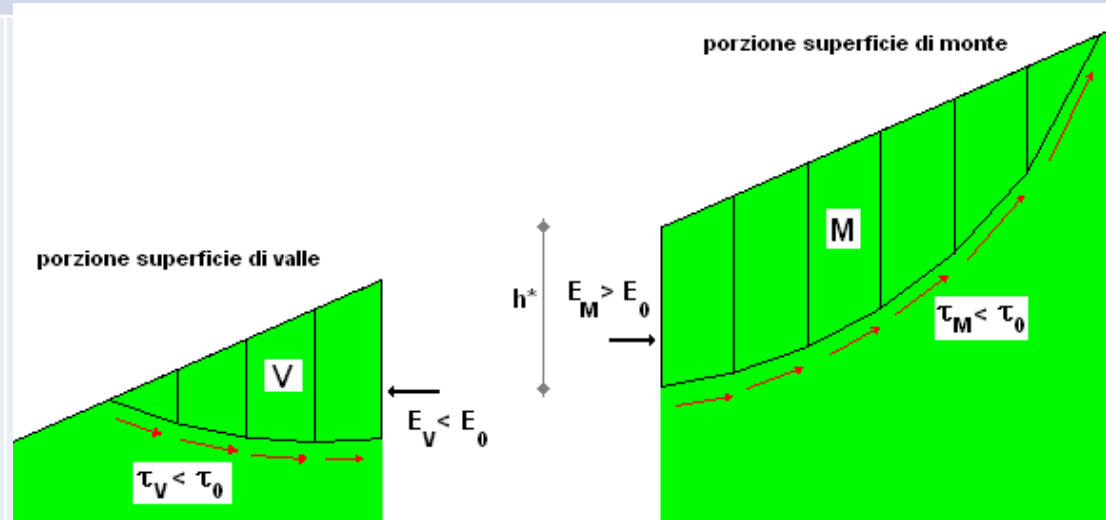


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

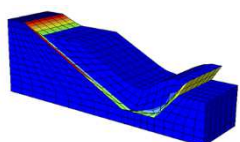
INTERVENTI COME VARIAZIONE DELLE FORZE INTERSTRISCE

Il modello determina il diagramma di resistenza dell'intervento secondo le opzioni di progetto dell'opera. Noto il valore della resistenza dell'intervento (R) alla quota (h^*) di intersezione dello stesso con la superficie di scorrimento, inizia il procedimento iterativo per portare il fattore di sicurezza della parte della superficie a monte F_M al valore di progetto (F^*) richiesto **“Grado di sicurezza desiderato”**.

Il procedimento iterativo consiste nell'incrementare la forza interstriscia da E_0 ad E_M ($\Delta R = E_M - E_0$) fino a che il fattore di sicurezza della superficie di monte sia maggiore o uguale a quello richiesto $F_M \geq F^*$. Alla superficie di a valle sarà attribuita come forza da monte la differenza $E_V = E_M - R \geq 0$.



Viene ricalcolato quindi il fattore di sicurezza con queste nuove condizioni al contorno (F_V). Il modello riporta come risultati entrambi i fattori di sicurezza (F_M ed F_V) e **considera come significativo il minimo fra i due o quello di monte a secondo dei casi**.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

INTERVENTI COME VARIAZIONE DELLE FORZE INTERSTRISCE

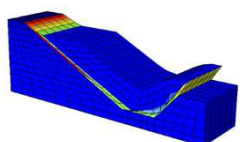
L'incremento del fattore di sicurezza dipende dalla resistenza e posizione dell'intervento, dalle forze di interstriscia presenti nella superficie di scorrimento analizzata e dal grado di mobilitazione (inverso del fattore di sicurezza).

In alcuni casi, sembra che fattore di sicurezza resti inalterato.

Scendendo in dettaglio (*coefficienti di sicurezza a monte e a valle*) si nota che il fattore di sicurezza è ***aumentato nella parte di monte ma non in quella si valle.***

Quindi mediamente il fattore di sicurezza aumenta sempre ma può darsi che una delle due porzioni (*in genere la porzione di valle*) non riceve beneficio dalla presenza dell'intervento :

- *a causa della resistenza bassa dello stesso;*
- *per la sua posizione all'interno del volume di frana;*
- *a causa del valore del fattore di sicurezza di progetto elevato richiesto all'intervento ;*



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

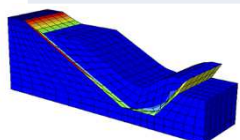
INTERVENTI COME VARIAZIONE DELLE FORZE INTERSTRISCE

Esaminiamo i casi che si possono presentare. Consideriamo una superficie con coefficiente di sicurezza F_{S0} inferiore al valore di progetto F^* ed un intervento con resistenza R . Sia E_0 la forza mutua agente fra la porzione di monte e di valle in corrispondenza della sezione di inserimento dell'intervento.

- ❑ **CASO_1:** Per ottenere il coefficiente desiderato, F^* , sulla parte di monte è necessario una forza resistente $R_Q > R$. Il metodo proposto inserisce al massimo una forza pari ad R ottenendo $E_M = E_0 + R$ pertanto otteniamo un aumento del fattore di sicurezza di monte $F_M < F^*$ ma inferiore al valore richiesto. Sulla parte di valle la forza che si eserciterà sarà pari a $E_V = E_M - R = E_0 + R - R = E_0$, pari al valore senza intervento. Quindi il fattore di sicurezza della parte di valle resterà inalterato $F_V = F_{S0}$;
- ❑ **CASO_2:** Per ottenere il coefficiente desiderato, F^* , sulla parte di monte è sufficiente una forza resistente $R_Q < R$. Il metodo proposto inserisce una forza pari a R_Q ottenendo una forza di monte $E_M = E_0 + R_Q$ ed un fattore di sicurezza pari a quello di progetto richiesto F^* . Sulla porzione di valle la forza sarà ridotta al valore (ricordiamo che $(R_Q - R < 0)$):

$$E_V = E_M - R = E_0 + R_Q - R < E_0$$

Essendo diminuita la forza agente da monte sul settore di valle $E_V < E_0$ il fattore di sicurezza di questa porzione risulterà aumentato rispetto al valore iniziale ossia $F_V > F_{S0}$.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

INTERAZIONE CON PIU OPERE

Nel caso in cui siano presenti più interventi metodo si estende facilmente ed inizia a procedere dal settore monte verso l'ultimo di valle.

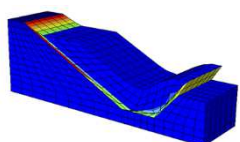
Per semplicità di trattazione consideriamo il caso di 2 interventi, (*P1 disposto a monte e P2 quello a valle*) la superficie di scorrimento analizzata risulterà suddivisa in 3 parti ([M]monte, [C]centrale e [V]valle).

Il calcolo procede nel modo descritto di seguito.

- ☐ Si considera la presenza dell'intervento **P1** che agisce sul settore di monte **[M]** ed altera le forze di interstriscia del settore di valle **[C]+[V]** come descritto nel caso di un solo intervento ;
- ☐ Si considera la presenza dell'intervento **P2** che agisce sul settore centrale **[C]** e sul settore di valle **[V]**.

Il metodo in questo caso riporta i fattori di sicurezza di tutti i settori. Il grado di sicurezza desiderato per l'intervento **P1 influisce pertanto sulle forze a valle di P1 e quindi anche sull'efficacia dell'intervento P2.**

- ☐ Se si imposta un grado di sicurezza maggiore all'intervento P1 risultano più scaricati i settori [C] e [V] e pertanto l'intervento P2 **potrà essere dimensionato con resistenze più basse.**
- ☐ Viceversa se il grado di sicurezza dell'intervento P1 viene ridotto le forze a valle verranno ridotte di meno e pertanto l'intervento P2 **sarà soggetto a forze più grandi.**

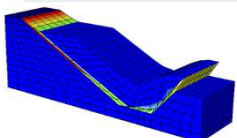
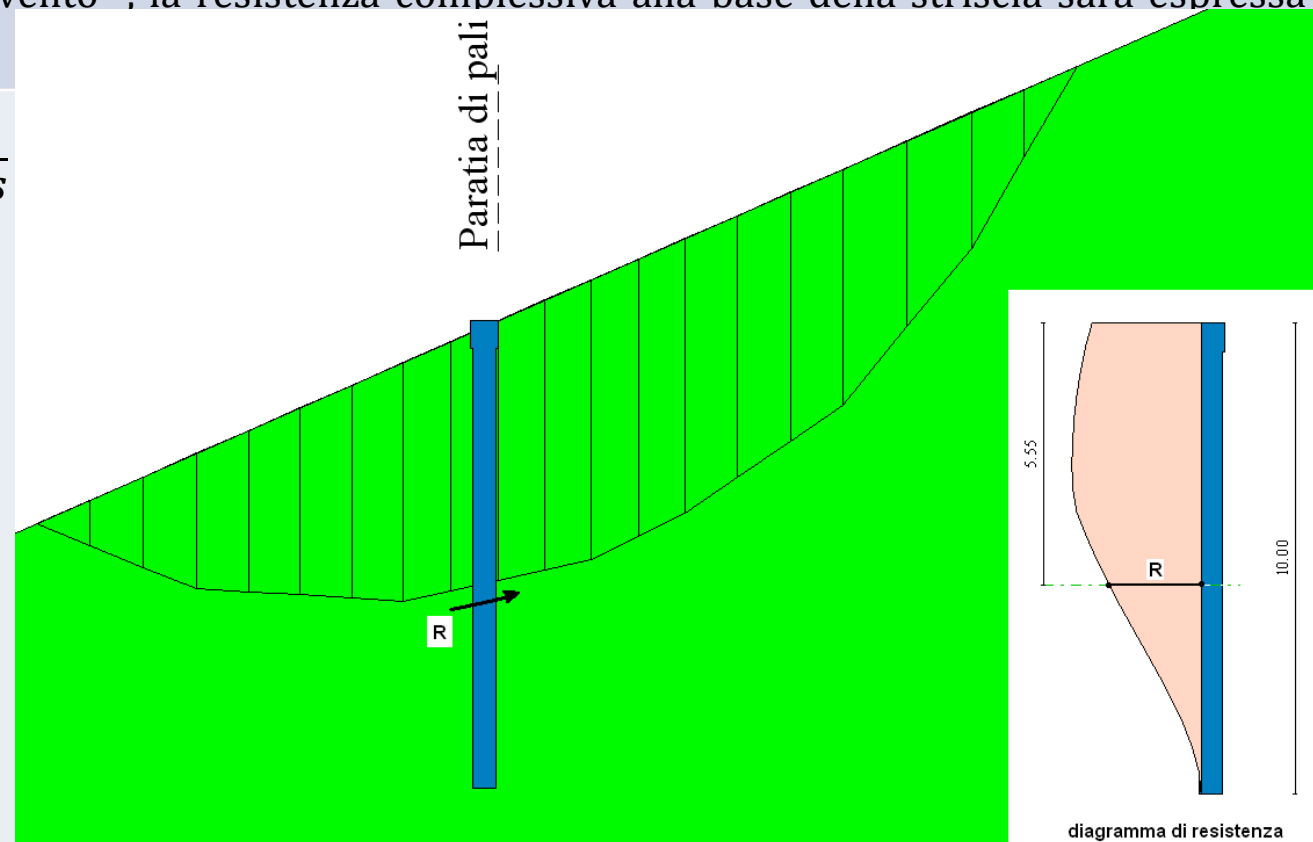


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

INTERVENTI COME INCREMENTO DI RESISTENZA A TAGLIO

L'intervento è considerato come un incremento di resistenza a taglio alla base della striscia (coesione equivalente) immediatamente a monte dell'intervento stesso. Indicando con R la resistenza a taglio dell'intervento, la resistenza complessiva alla base della striscia sarà espressa come:

$$S_R = \frac{c'}{F_S} \cdot L + N' \cdot \frac{tg\varphi'}{F_S} + \frac{R}{F_S}$$



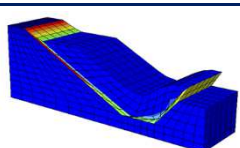
3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

INTERVENTI COME INCREMENTO DI RESISTENZA A TAGLIO

Pertanto in tutte le equazioni di equilibrio dei vari metodi alla base della striscia interessata verrà utilizzata questa espressione per la resistenza.

Otteniamo quindi un ***unico fattore di sicurezza per tutta la superficie***. Si perde in tal modo l'informazione sui coefficienti di sicurezza parziali sui vari settori in cui la superficie di rottura viene suddivisa dall'intervento.

Questa modalità sembrerebbe più idonea in presenza di una serie di interventi disposti in modo ***ravvicinato fra di loro in quanto l'effetto di diffusione della resistenza è sicuramente più realistico (reticolo di micropali)***. Nel caso di un intervento molto resistente ma disposto in posizione non ottimale, questo modo di procedere può comportare risultati indesiderati (***non a vantaggio della sicurezza***) in quanto la forza resistente porterebbe ad un ***coefficiente di sicurezza globale (medio) soddisfacente*** ma ***localmente si potrebbero avere dei coefficienti di sicurezza più bassi di quelli desiderati***.



RESISTENZA DEGLI INTERVENTI

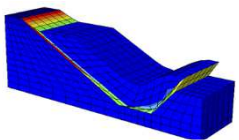
Ogni tipologia d'intervento ha una sua resistenza massima che contribuisce a stabilizzare il pendio in funzione:

- *della geometria dell'opera;*
- *delle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali strutturali;*
- *delle caratteristiche geotecniche e idrauliche del pendio;*
- *dalle azioni statiche e dinamiche sul pendio;*
- *dell'ubicazione sul pendio;*
- *della superficie di scorrimento analizzata.*

La resistenza deve essere determinata in funzione dei meccanismi di collasso opera-pendio di tipo (GEO-STR-EQU), e per alcuni interventi in un certo numero di sezioni lungo l'altezza dello stesso.

Si ottiene in tal modo un diagramma di resistenza (di ampiezza variabile lungo l'altezza) che verrà utilizzato nell'analisi di stabilità. Calcoleremo, due diagrammi di resistenza in funzione della crisi dell'opera o del terreno :

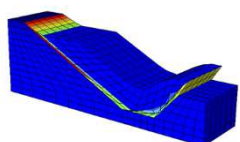
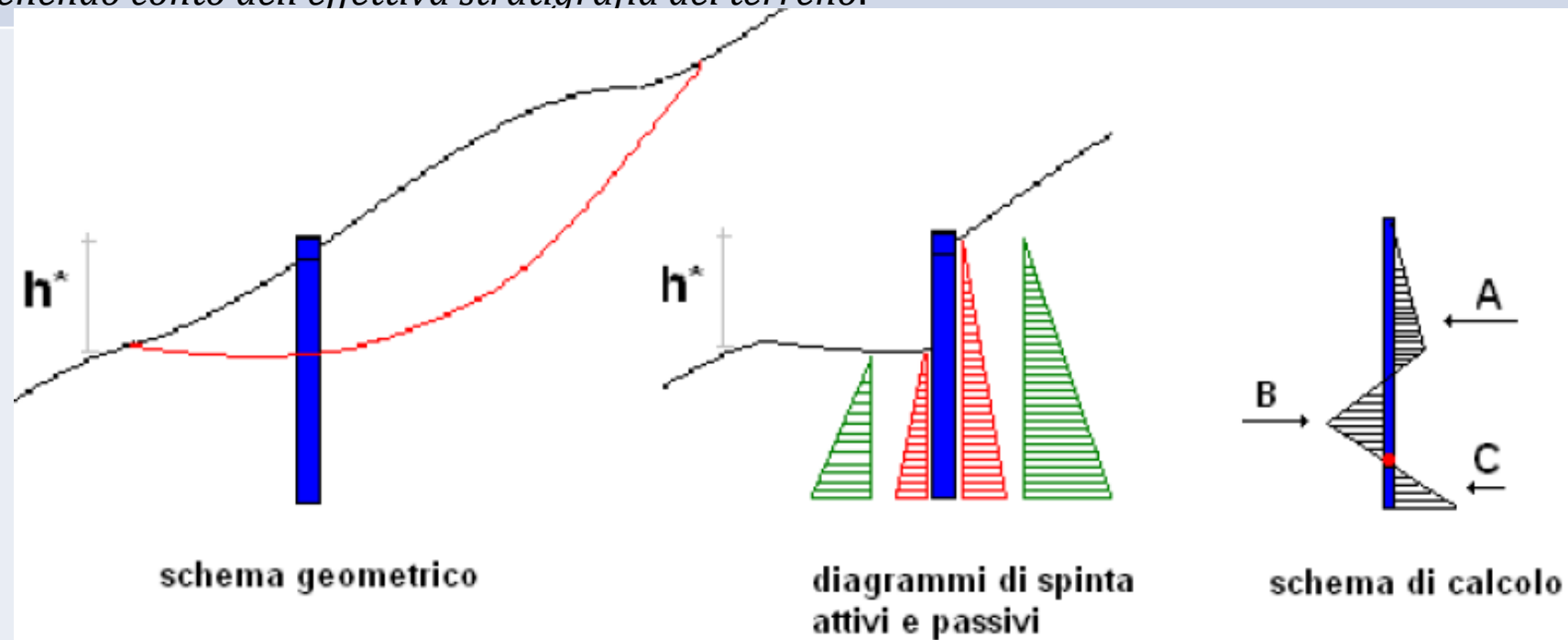
1. *Resistenza geotecnica;*
2. *Resistenza strutturale.*



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

RESISTENZA DEGLI INTERVENTI-PARATIA DI PALI

Il calcolo della resistenza della paratia viene effettuato secondo i metodi classici dell'equilibrio limite. Data la generica superficie di scorrimento (che interseca la paratia ad una profondità h^* rispetto alla testa) vengono determinati i diagrammi di resistenza passiva e di spinta attiva a monte e a valle dell'opera secondo lo schema di figura. Tali diagrammi vengono calcolati tenendo conto dell'effettiva stratigrafia del terreno.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

RESISTENZA DEGLI INTERVENTI-PARATIA DI PALI E/O TIRANTI

Mediante le equazioni di equilibrio sia alla traslazione che alla rotazione fra:

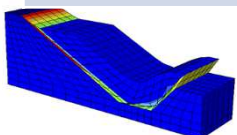
- *spinta attiva di monte (A)*;
- *resistenza passiva di valle (B)*;
- *controspinta (C)*, a monte del punto di rotazione;

viene determinata la spinta A_1 che la paratia è **capace di sopportare**. Tale valore rappresenta la **resistenza geotecnica** dell'intervento, la quale risulta *diversa per ogni sezione in quanto* varia il rapporto fra la parte “fuori terra - h^* ” e l'altezza totale della paratia H .

Note le caratteristiche dei materiali con cui è realizzata la paratia (*momento ultimo della sezione (M_Y)*), *i diagrammi delle sollecitazioni*, si calcola il momento flettente massimo e si impone che non sia superiore ad (M_Y). Da qui si **ricava la resistenza strutturale A_2** .

La resistenza dell'intervento *alla quota prefissata è quindi data dal valore minimo tra resistenza geotecnica e resistenza strutturale*.

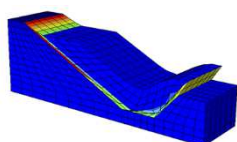
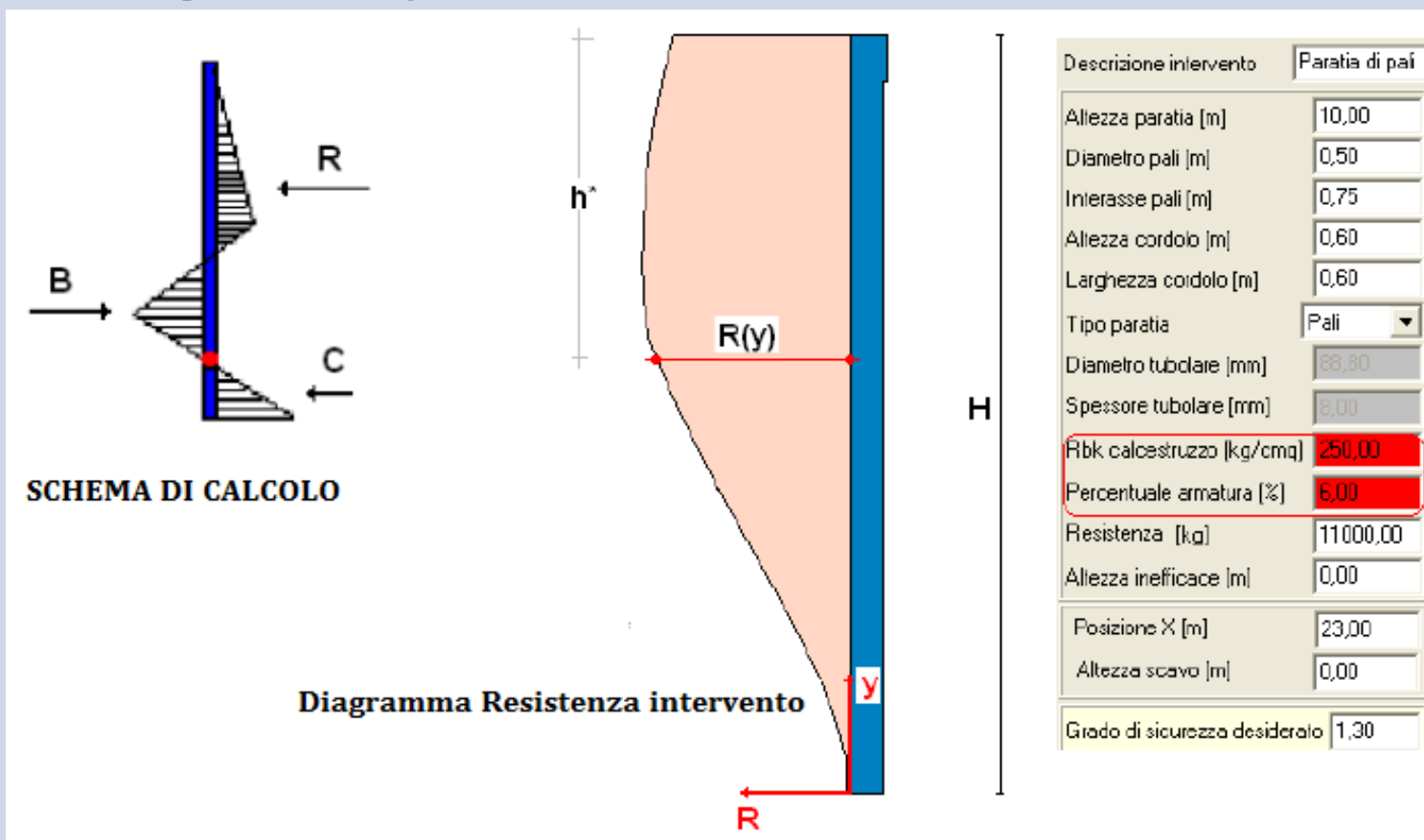
Nel caso in cui siano presenti dei tiranti con tiro pari a T questa entra nelle equazioni di equilibrio e influisce sul calcolo della resistenza dell'intervento. Nell'equilibrio alla rotazione si fa l'ipotesi che la spinta A (*resistenza dell'intervento*) sia applicata *ad 1/3 dell'altezza libera(h^*) rispetto al punto di intersezione paratia-superficie di rottura*.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

RESISTENZA DEGLI INTERVENTI-PARATIA DI PALI E/O TIRANTI

Il tipico diagramma di resistenza dell'intervento per una paratia di Pali con determinate caratteristiche è riportato in figura



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

RESISTENZA DEGLI INTERVENTI-MURI DI SOSTEGNO

Il calcolo della resistenza del muro di sostegno si differenzia in funzione della tipologia di muro, con fondazione superficiale o su pali/micropali e tiranti sul paramento di elevazione.

MURI CON FONDAZIONE SUPERFICIALE

La resistenza geotecnica di un muro con fondazione superficiale è data dal minimo ***fra la resistenza allo scorrimento alla base e la resistenza a ribaltamento***. La resistenza allo scorrimento può essere calcolata con la seguente espressione, con:

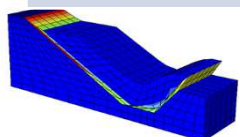
$$R_{SLIDE} = N \cdot \tan \phi + c \cdot B$$

- N è lo sforzo normale sulla base di fondazione;
- ϕ e c sono rispettivamente l'angolo di attrito medio e la coesione media lungo la base;
- B rappresenta la larghezza della fondazione.

Dato il momento stabilizzante (e =eccentricità di N rispetto allo spigolo di valle) $M_{STAB} = N \cdot e$, la verifica a ribaltamento per una forza F , applicata a quota y rispetto alla base è espressa dalla relazione

$$F \cdot y \leq M_{STAB} \rightarrow F \leq M_{STAB}/y$$

Pertanto, data una generica superficie che interseca il muro a quota h^* (rispetto alla testa) la resistenza a ribaltamento sarà data da $R_{EQU} = M_{STAB}/y$.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

RESISTENZA DEGLI INTERVENTI-MURI DI SOSTEGNO

Dove y è la distanza fra lo spigolo a valle del muro ed il punto di applicazione della forza supposta ad $1/3 h^*$ e pertanto vale:

$$y = H_M - h^* + (h^*/3)$$

Con H_M altezza complessiva del muro. La resistenza geotecnica (funzione della posizione dell'intersezione h^*) sarà pertanto data dal minimo fra i due valori:

$$R_{GEO}(h^*) = \min(R_{SLIDE}, R_{EQU})$$

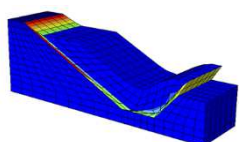
Note le caratteristiche dei materiali costituenti il muro e, quindi, il momento ultimo della sezione M_Y , la resistenza strutturale sarà data da

$$R_{STR} = M_Y/y$$

Dove: y = distanza rispetto all'incastro paramento-fondazione.

La resistenza dell'opera sarà pertanto data dal minimo fra la resistenza geotecnica e quella strutturale.

La presenza di tiranti interviene sia nella *resistenza a scorrimento* che in quella a *ribaltamento* (***entrambe risulteranno aumentate***). Intervengono inoltre nella resistenza strutturale.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

RESISTENZA DEGLI INTERVENTI-MURI DI SOSTEGNO SU PALI

Il calcolo della resistenza di un muro su pali è estremamente complessa in quanto bisogna analizzare il meccanismo di rottura palo-terreno e rimangono comunque delle incertezze quando la superficie di rottura interseca i pali.

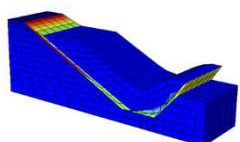
Un modo cautelativo di procedere è il seguente:

- Per ogni fila di pali disposta in fondazione occorre determinare il taglio ultimo resistente (T_R) il quale dipende dal palo e dal terreno in cui è immerso;
- Il taglio T_R viene determinato alla generica quota Y_t applicando in testa al palo la forza e considerando il terreno non resistente dalla stessa fino alla quota Y_t .
- Quindi il palo risulta immerso nel terreno solo nel tratto da Y_t al piede dello stesso.

La determinazione del taglio ultimo tiene implicitamente conto della resistenza strutturale del palo (noto il momento ultimo della sezione).

Naturalmente la **resistenza massima** sarà in corrispondenza *della testa del palo (condizione di palo tutto infisso nel terreno)* e **nulla** *al piede del palo (infissione nulla)* vedi figura seguito.

Ad una generica quota la resistenza complessiva per n file di pali sarà data dalla somma delle resistenze a quella quota).

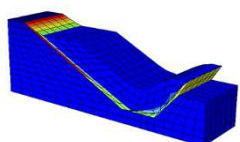
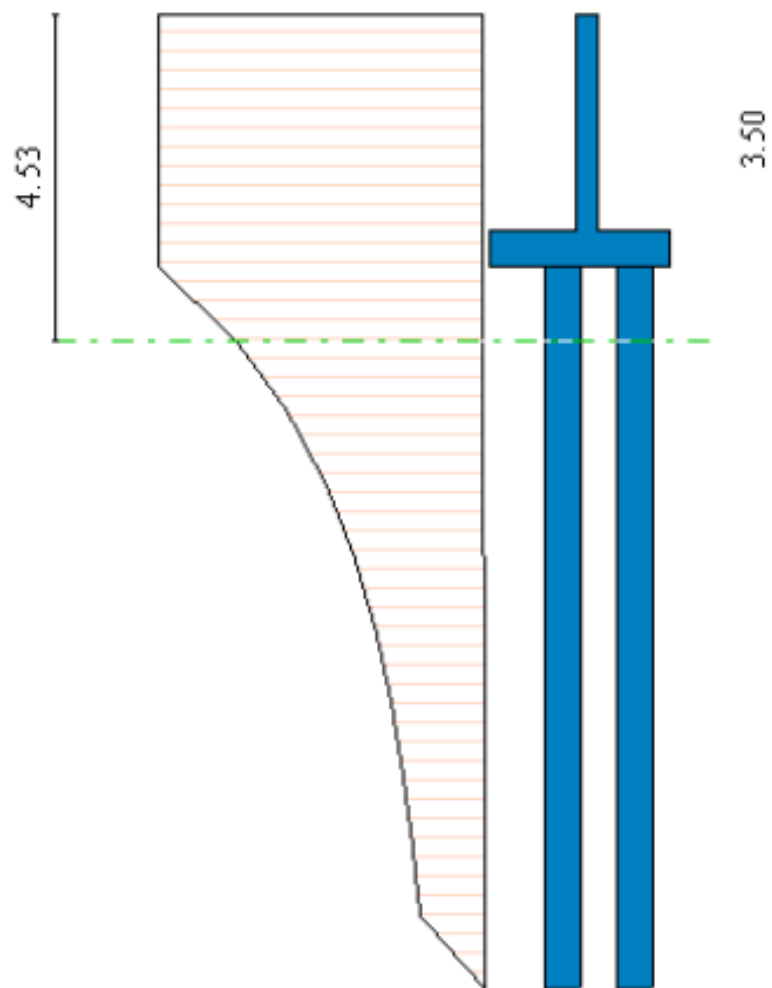


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

RESISTENZA DEGLI INTERVENTI-MURI DI SOSTEGNO SU PALI

Inoltre si fa osservare che:

- *Se la superficie di rottura interseca il muro la resistenza sarà pari alla resistenza in testa ai pali.*
- *Se la superficie interseca il paramento del muro la resistenza sarà limitata da quella strutturale del paramento stesso (resistenza nota una volta note armature e materiale costituente il muro)*
- *La presenza di tiranti anche in questo caso incrementa la resistenza dell'opera alle varie quote.*



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

MURI A GRADONI

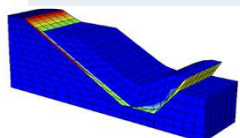
La resistenza di una gradonatura si calcola allo stesso modo della resistenza di un muro di sostegno con fondazione superficiale mettendo in conto la resistenza allo scorrimento e quella a ribaltamento. A differenza del muro di sostegno, la gradonatura viene messa in conto come peso sulle strisce interessate dall'opera.

TIRANTI E CHIODATURE (PASSIVI)

ATTIVO

Il contributo del tirante attivo viene definito tramite il tiro applicato N . Sia quando il tirante è inserito indipendentemente, sia quando insiste su altra opera (muro o paratia) il tiro N sarà considerato totalmente o parzialmente in dipendenza della posizione reciproca fra la superficie di rottura considerata e la fondazione del tirante.

- Se la *fondazione del tirante* è tutta ancorata oltre la superficie di rottura il tiro considerato sarà quello complessivo (N).
- Se il tirante è contenuto nel volume delimitato dalla superficie considerata il contributo del tirante sarà nullo ($N = 0$).
- Se viceversa la *fondazione del tirante* interseca la superficie il tiro considerato sarà in proporzione al tratto ancorato oltre la superficie.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

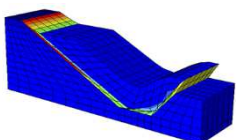
ATTIVO

Il contributo del tirante viene considerato mettendo in conto *sulla base della striscia intersecata dal tirante un incremento di sforzo normale* (e quindi un aumento di resistenza) *ed un incremento di taglio in funzione dell'angolo formato fra la base della striscia e la direzione del tirante*. Questi incrementi introdotti nelle equazioni del metodo aumentano il fattore di sicurezza.

CHIODATURE (PASSIVI)

Il tirante passivo viene definito tramite la resistenza a trazione N e la resistenza a taglio T . Durante il processo di analisi in corrispondenza *della base della striscia intersecata* vengono messe in conto come, *incremento di resistenza a taglio*, sia la *resistenza a trazione che la resistenza a taglio opportunamente proiettate nella direzione della base*.

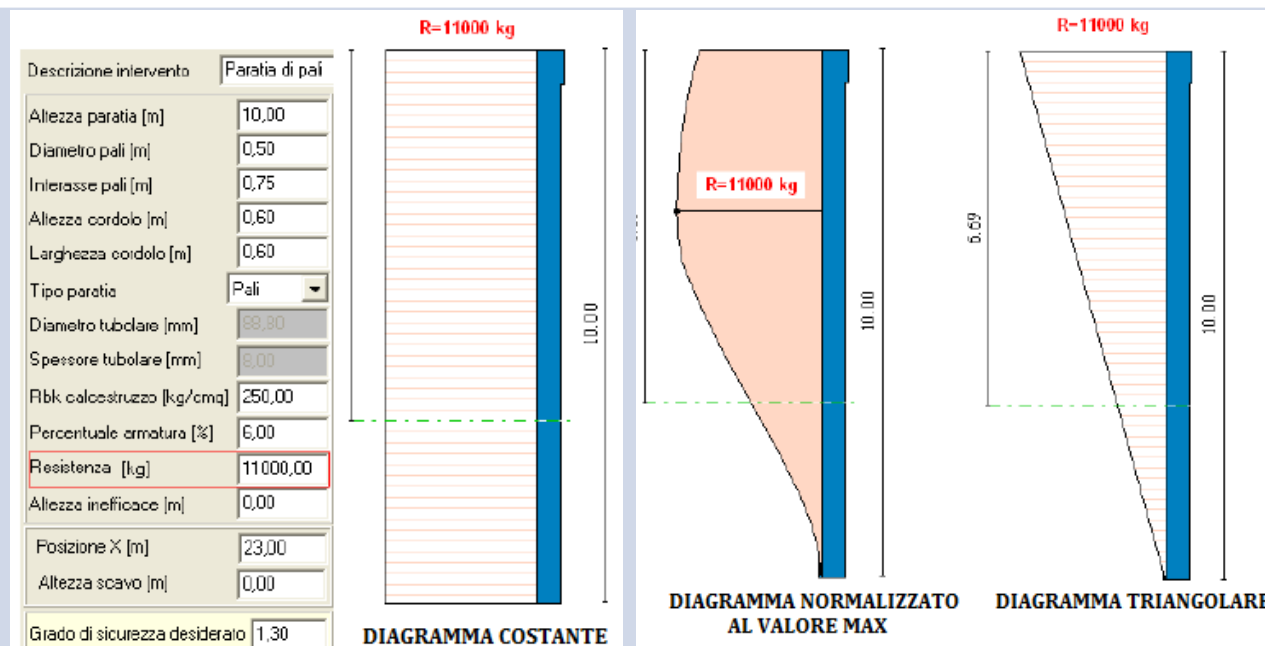
Nel caso di tiranti passivi inseriti su muri o paratie, la componente *di resistenza a taglio rimane applicata sulla base della striscia intersecata* mentre la componente *di resistenza a trazione viene considerata come incremento di resistenza per l'intervento (muro o paratia) su cui il tirante è inserito*.



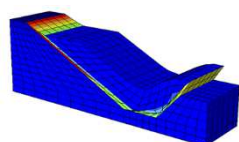
3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

FORMA DEL DIAGRAMMA DELLA RESISTENZA

La forma o distribuzione del diagramma di resistenza dell'intervento può essere qualsiasi ma le più attendibile in funzione degli spostamenti e cinematismo del movimento franoso sono:



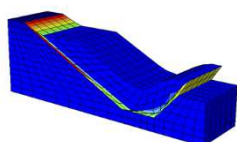
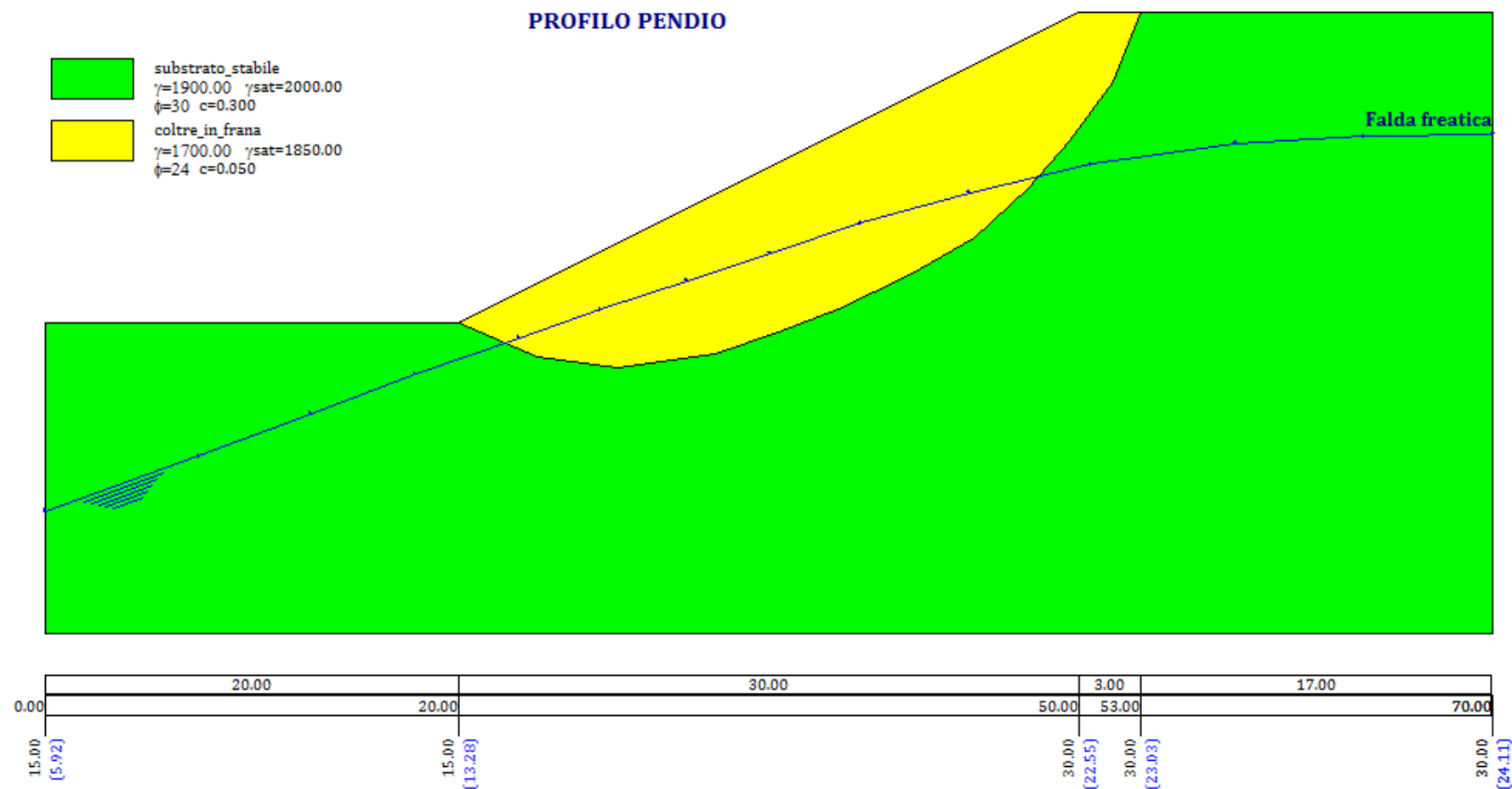
- **Costante:** *il valore di resistenza calcolato avrà distribuzione costante lungo l'altezza;*
- **Normalizzato al valore massimo:** *Il valore della resistenza calcolato sarà normalizzato al valore massimo con forma riportata in figura;*
- **Lineare:** *il valore di resistenza calcolato verrà attribuito alla sommità dell'intervento e sarà decrescente con la quota fino ad annullarsi (diagramma triangolare).*



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

MODELLO GEOTECNICO



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

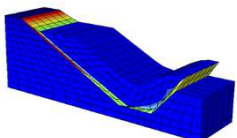
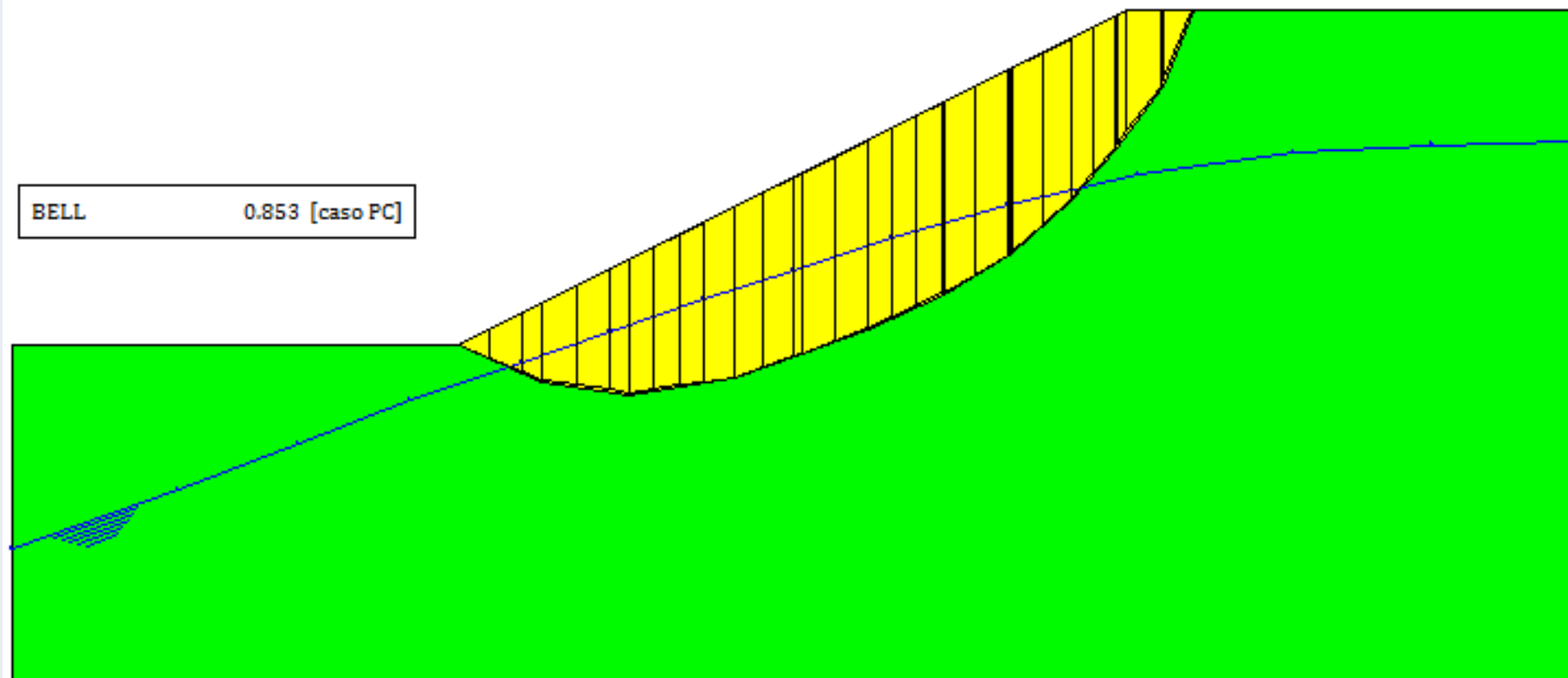
23 Settembre 2017

pag. 42

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

SUPERFICE DI SCORRIMENTO $\rightarrow FS_{MIN} = 0.853 < 1.00$



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

DISTRIBUZIONE DELLE FORZE INTERSTRISCIA $\rightarrow FS_{MIN} = 0.853 < 1.00$

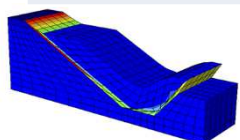
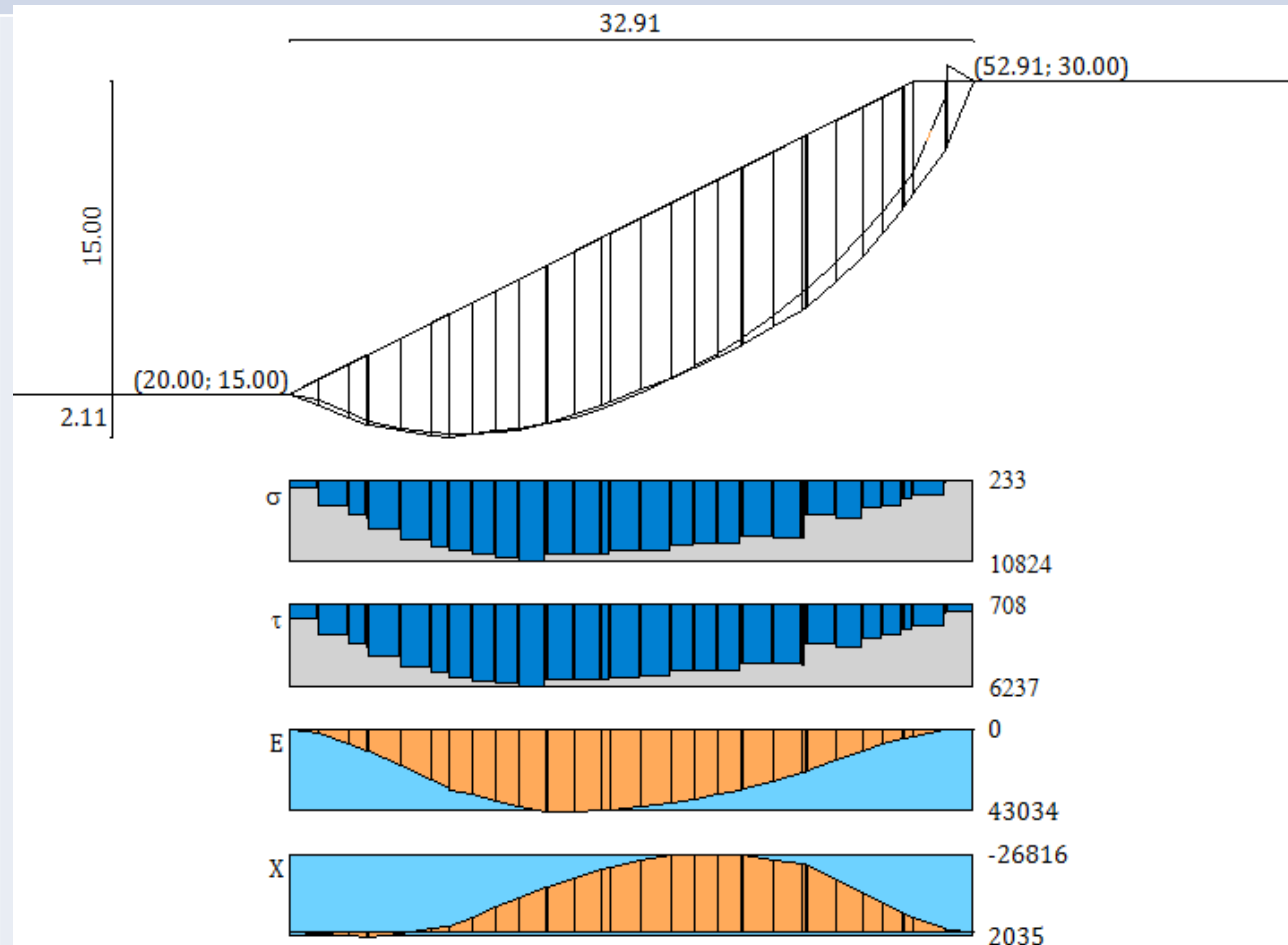
VALORI MAX

$$E_{MAX} = 43034 \text{ kg}$$

$$X_{MAX} = 26816 \text{ kg}$$

$$\sigma_{MAX} = 10824 \text{ kg/m}^2$$

$$\tau_{MAX} = 6237 \text{ kg/m}^2$$



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 44

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

ANALISI DINAMICA SEMPLIFICATA – PARAMETRI SIMICI

DATI

Località: VIGGIANELLO – PZ

$PGA_{SLV} = 0.260 \text{ ag/g}$

$F0=2.300$

$T^*_C=0.367$

Categoria di sottosuolo: C

Condizioni Topografiche: T2

$S_S=1.347$

$S_T = 1.20$

Coefficiente $\beta_S = 0.28$

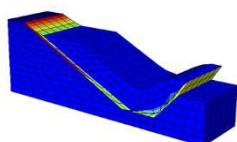
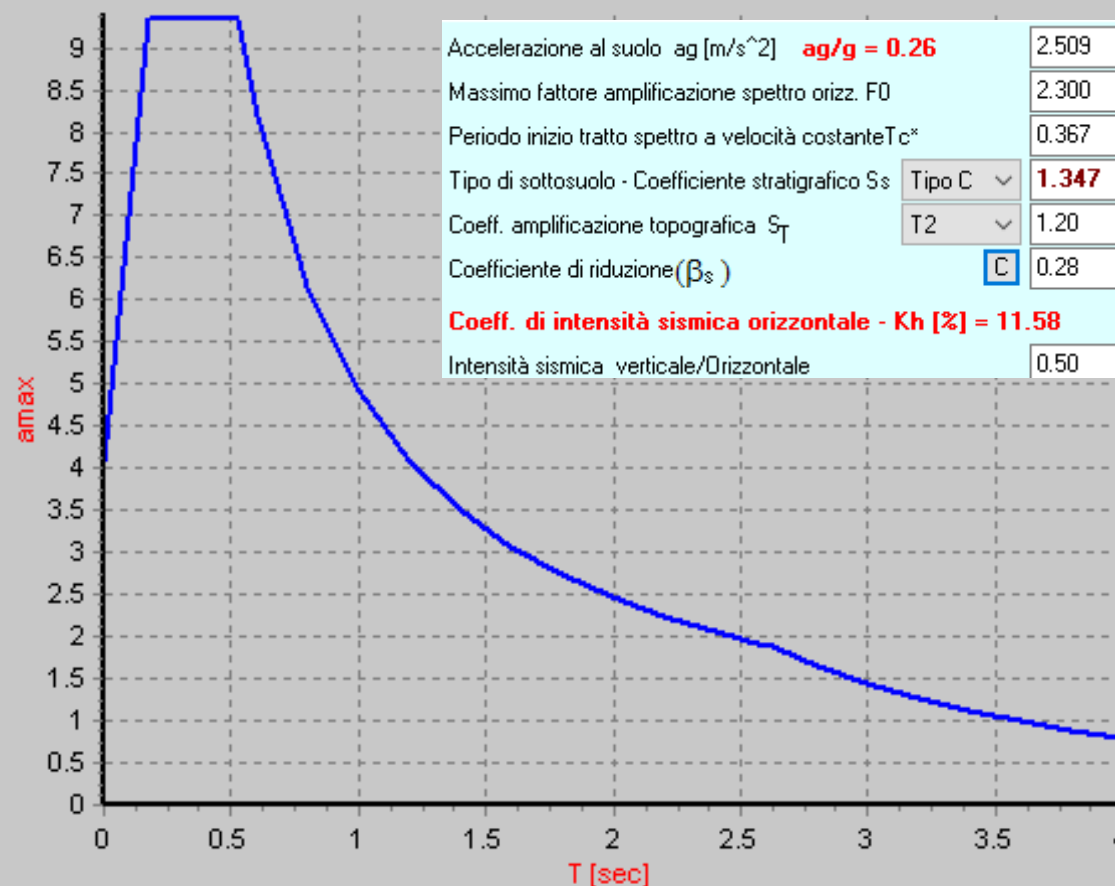
Coefficiente sismico orizzontale

$K_h=0.116$

Coefficiente sismico verticale

$K_v=0.058$

Spettro Elastico Orizzontale



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 45

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

ANALISI DINAMICA SEMPLIFICATA – ACCELEROGRAMMA N°1 DI 7

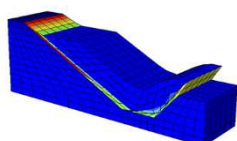
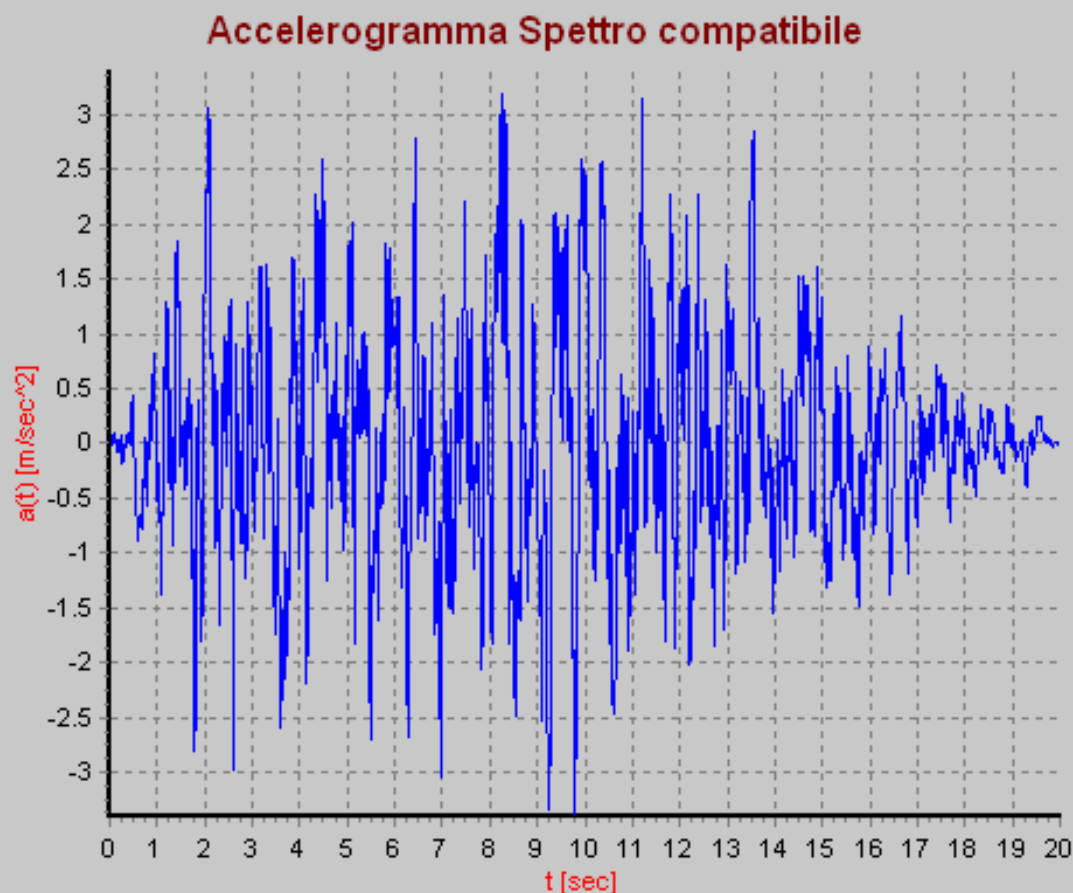
Periodo minimo (sec)	0.02
Periodo massimo (sec)	4.00
Inizio parte stazionaria (sec)	2.00
Durata parte stazionaria (sec)	10.00
Durata Totale (sec)	20.00
n. cicli	1
amax/g	0.345
n. sisma da generare	7
Coefficiente di smorzamento	0.05
Intervallo discretizzazione [sec]	0.01

☒ Accel ☐ Sa[T] ☐ Sv[T] ☐ Sd[T]

CALCOLA

<< Sisma n° 1 >>

	N°	t[sec]	a(t)[m/sec ²]
✱	1	0.000	-0.0091
	2	0.010	-0.0125
	3	0.020	-0.0086
	4	0.030	-0.0031
	5	0.040	0.0069
	6	0.050	0.0149



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

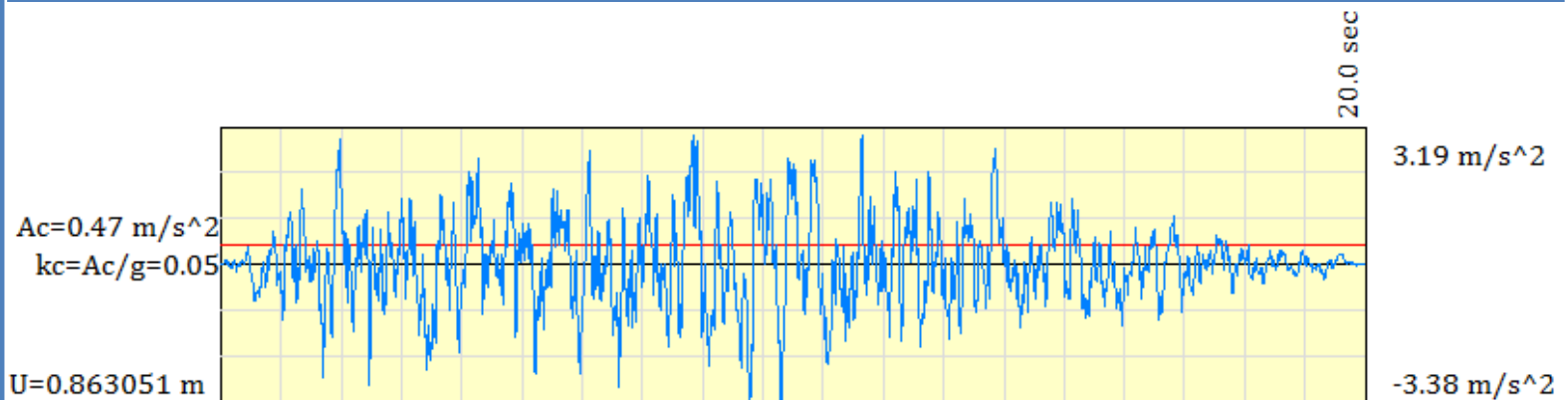
pag. 46

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

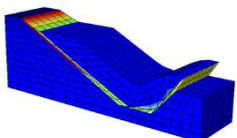
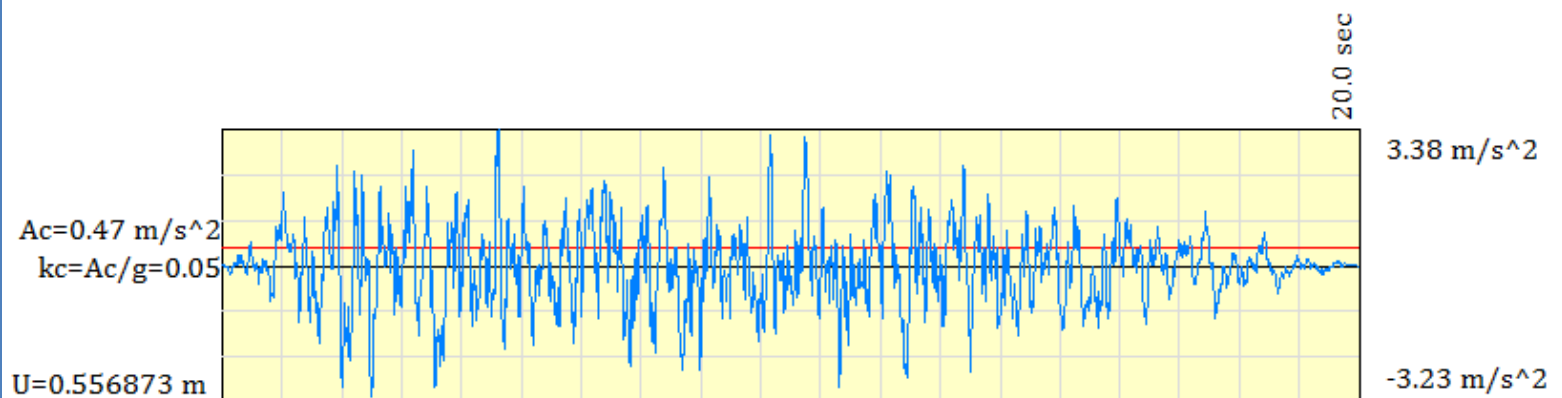
ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

ANALISI DINAMICA SEMPLIFICATA – SPOSTAMENTO PERMANENTE

S1=86.3 cm



S2=55.7 cm



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 47

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

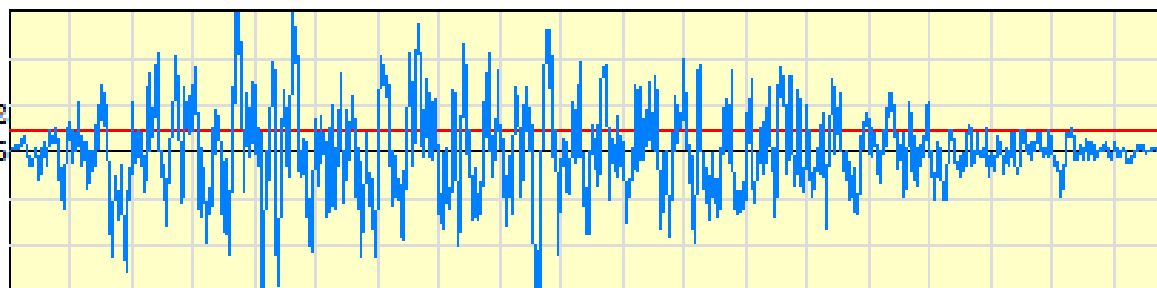
ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

ANALISI DINAMICA SEMPLIFICATA – SPOSTAMENTO PERMANENTE

S3=73.9 cm

$A_c=0.47 \text{ m/s}^2$
 $k_c=A_c/g=0.05$

$U=0.739267 \text{ m}$



20.0 sec

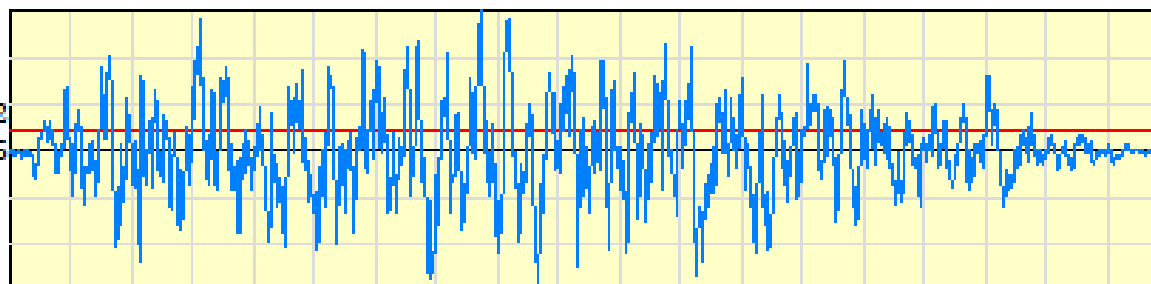
3.36 m/s²

-3.38 m/s²

S4=72.3 cm

$A_c=0.47 \text{ m/s}^2$
 $k_c=A_c/g=0.05$

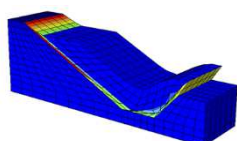
$U=0.723319 \text{ m}$



20.0 sec

3.38 m/s²

-3.27 m/s²



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

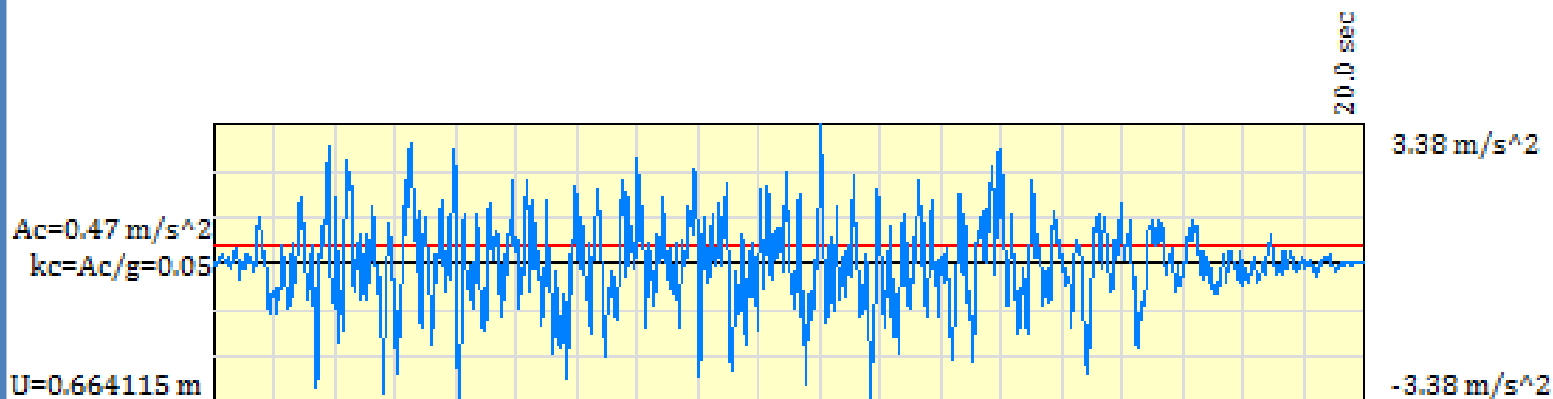
pag. 48

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

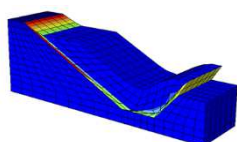
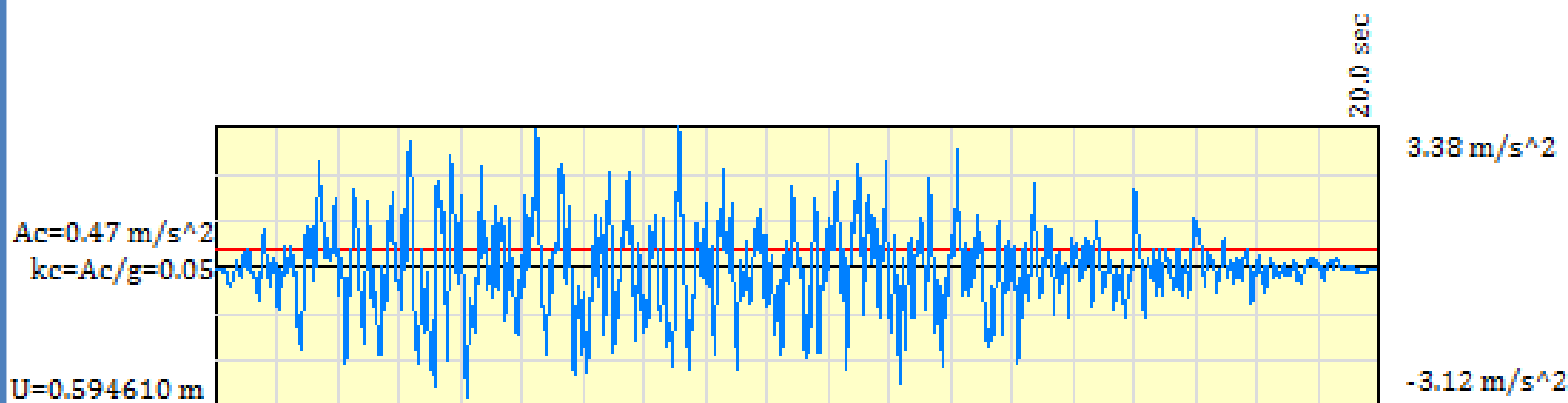
ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

ANALISI DINAMICA SEMPLIFICATA – SPOSTAMENTO PERMANENTE

S5=66.4 cm



S6=59.5 cm



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

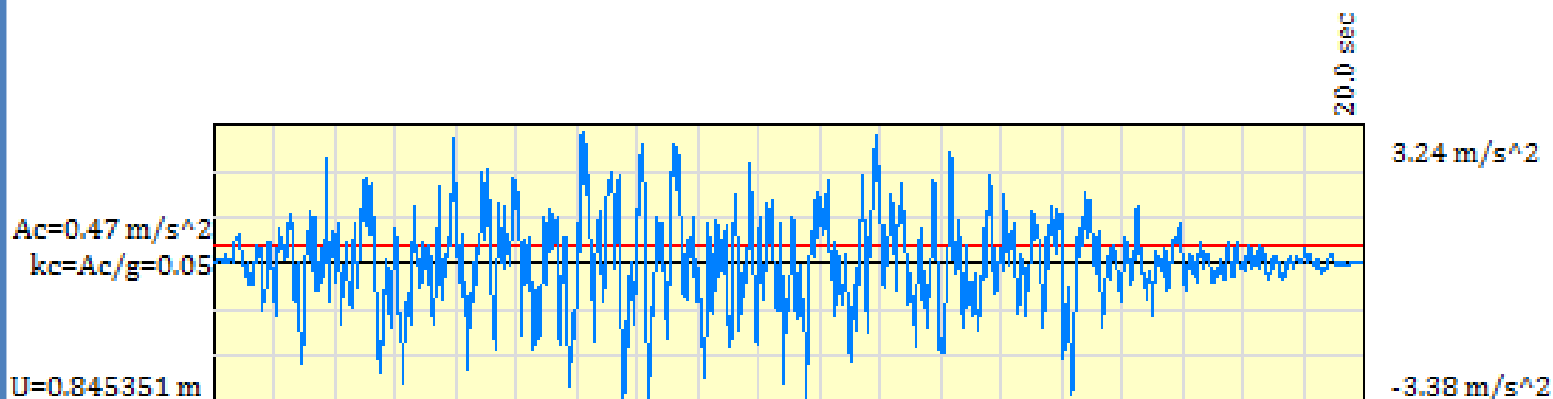
pag. 49

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

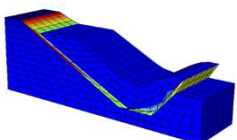
ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

ANALISI DINAMICA SEMPLIFICATA – SPOSTAMENTO PERMANENTE

$S_7 = 84.5 \text{ cm}$



$$S_{\text{PERMANENTE}} = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7) / 7 = \\ (86.3 + 55.7 + 73.9 + 72.3 + 66.4 + 59.5 + 84.5) / 7 = 71.3 \text{ cm}$$



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

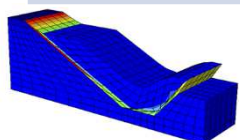
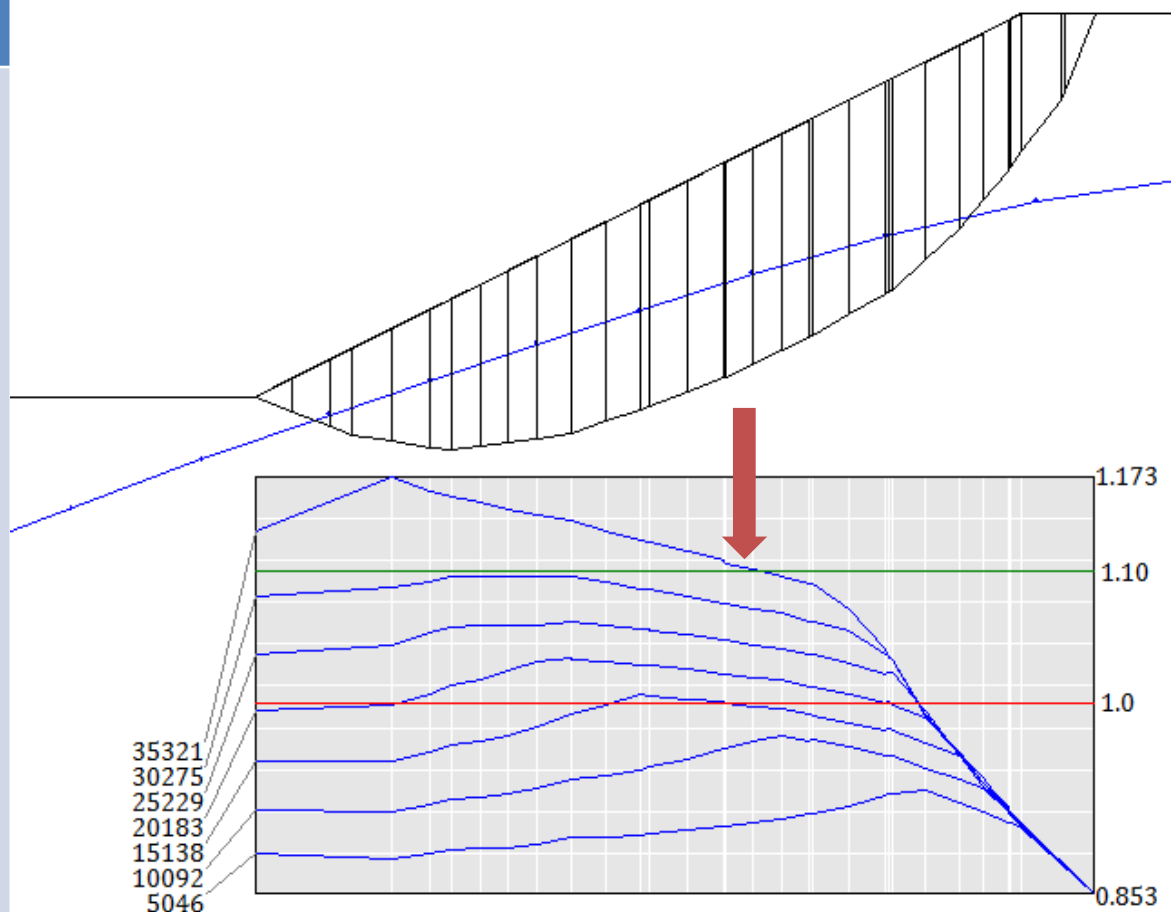
ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

BACK-ANALYSIS: VARIAZIONE DI FS_{MAX} CON POSIZIONE E RESISTENZA INTERVENTO

VALORI DI PROGETTO

Fissato il coefficiente di sicurezza di progetto pari ad **1.10**, il grafico ottenuto facendo variare la posizione e la resistenza dell'intervento in un range tale da raggiungere gli obiettivi previsti, ci dà delle informazioni utili alla scelta dell'intervento in termini di resistenza e posizionamento sul pendio. La posizione che soddisfa i criteri è quella di un'opera posizionata a $x=40\text{ mt}$ da valle, ancorata nello strato stabile e che garantisce una resistenza

$$R_{MAX} = 35321\text{ kg}$$

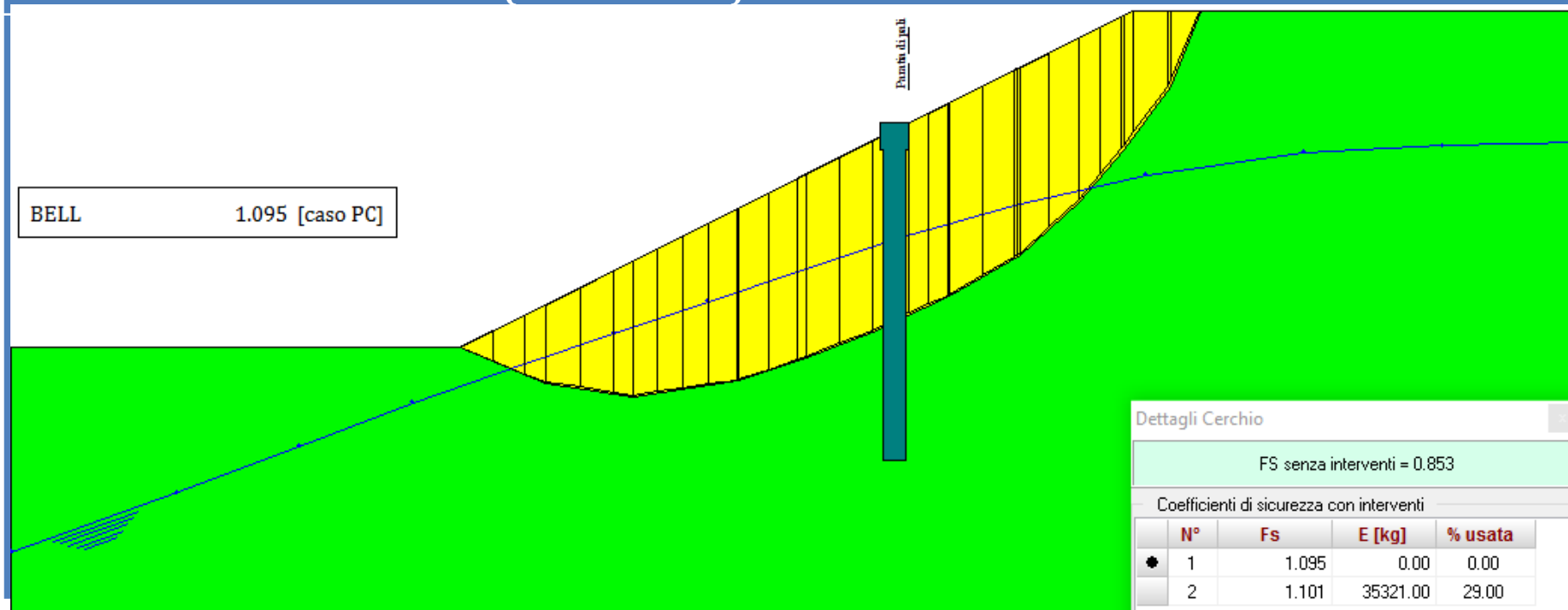


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

STATO DI PROGETTO CON INTERVENTO

Come si può osservare installando una paratia nella posizione $x=40$ mt, sufficiente ancorata nello strato stabile e con una resistenza definita di 35321 kg, i coefficienti di sicurezza del pendio a valle e a monte sono circa uguali al valore di progetto $F^*=1.10$. L'opera impegna solo il 29% della resistenza per stabilizzare il pendio a monte ($0.853 \rightarrow 1.101$), la parte in eccesso viene sfruttata per aumentare la sicurezza a valle ($0.853 \rightarrow 1.095$).



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 52

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

STATO DI PROGETTO CON INTERVENTO

L'opera impegna solo il 29% della resistenza per stabilizzare il pendio a monte (0.853→1.101), la parte in eccesso viene sfruttata per aumentare la sicurezza a valle (0.853→1.095).

Essendo

$$R=35321\text{kg};$$

$$R_Q=(29\%)R=10243\text{ kg};$$

$$E_M=E_0+R_Q=34664+10243=44877\text{kg}$$

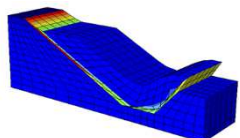
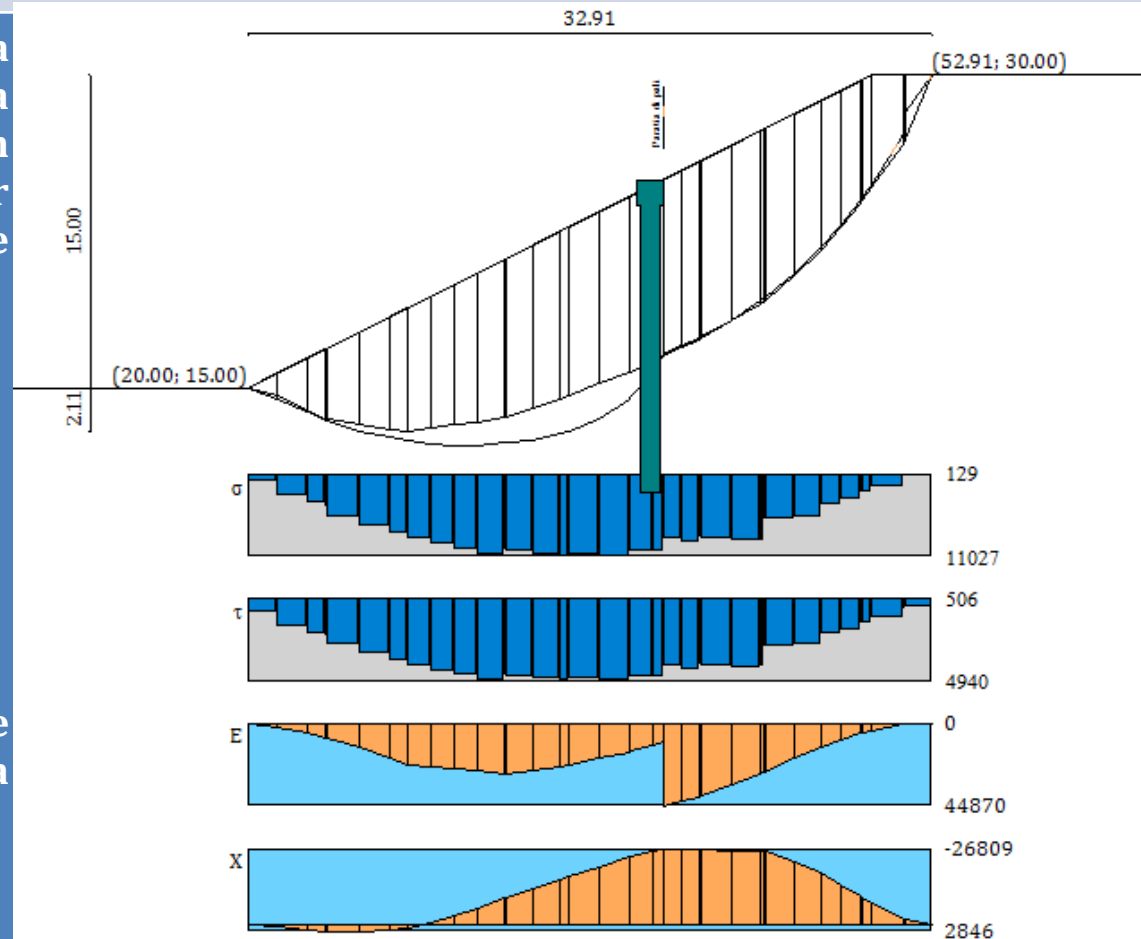
$$E_{MAX-P}=44870\text{ kg}$$

$$E_V=E_M-R=44877-35321=9556\text{ kg}$$

$$E_{MIN-P}=9549\text{ kg}$$

Dove:

E_{MAX-P} , E_{MIN-P} sono i valori delle forze interstriscia a valle e a monte della paratia.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

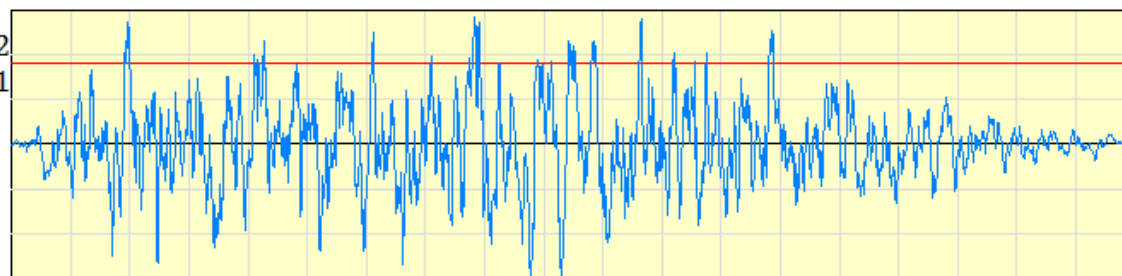
ANALISI DINAMICA SEMPLIFICATA – SPOSTAMENTO PERMANENTE CON OPERA

S1=1.59 cm

$$Ac=2.03 \text{ m/s}^2$$

$$kc=Ac/g=0.21$$

$$U=0.015901 \text{ m}$$

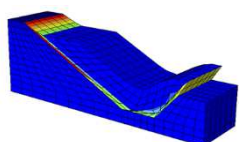
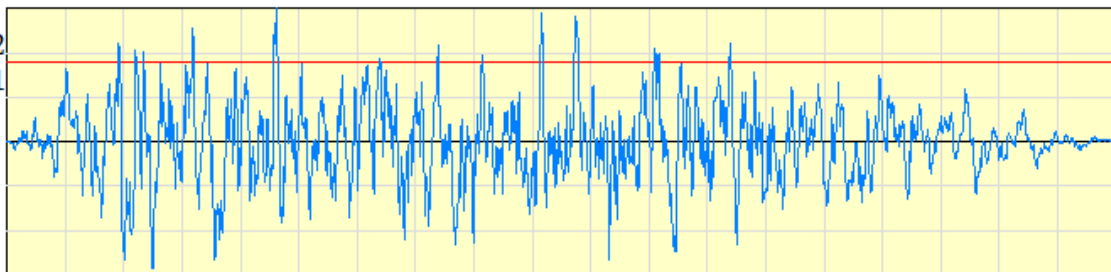


S2=0.80 cm

$$Ac=2.03 \text{ m/s}^2$$

$$kc=Ac/g=0.21$$

$$U=0.008080 \text{ m}$$



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

Seminario COPEC: Disegno e di rinforzo per la stabilizzazione dinamica di movimenti franosi

23 Settembre 2017

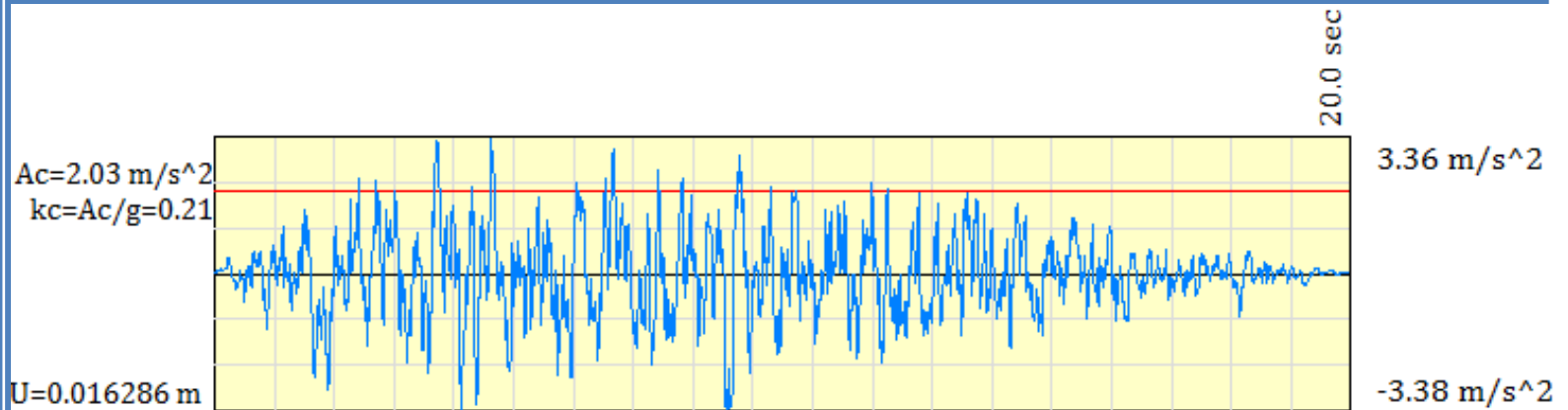
pag. 54

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

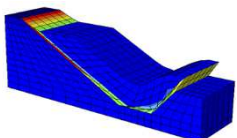
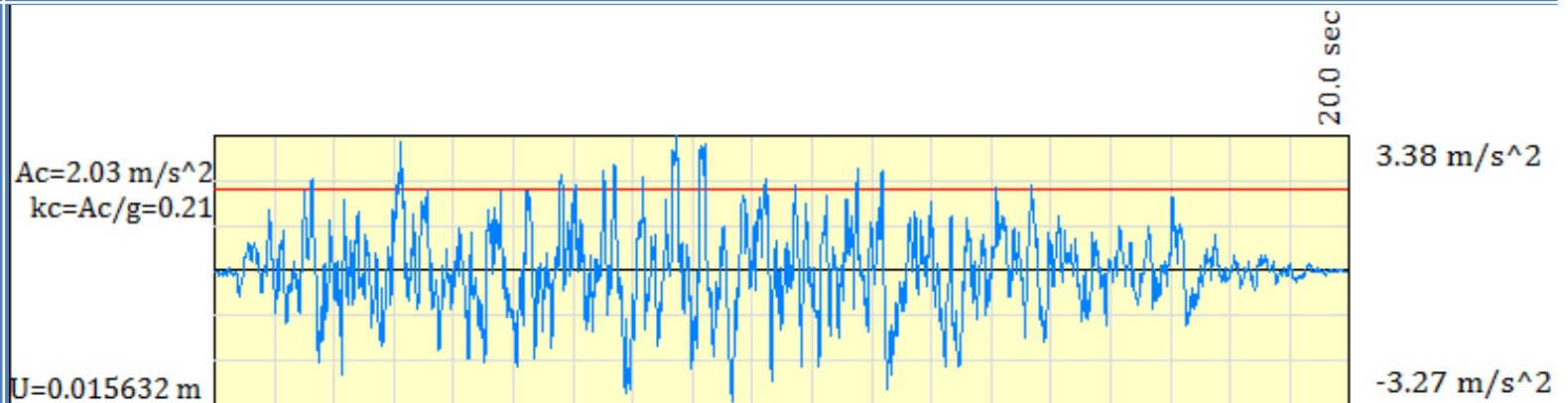
ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

ANALISI DINAMICA SEMPLIFICATA – SPOSTAMENTO PERMANENTE CON OPERA

S3=1.63 cm



S4=1.56 cm



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 55

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

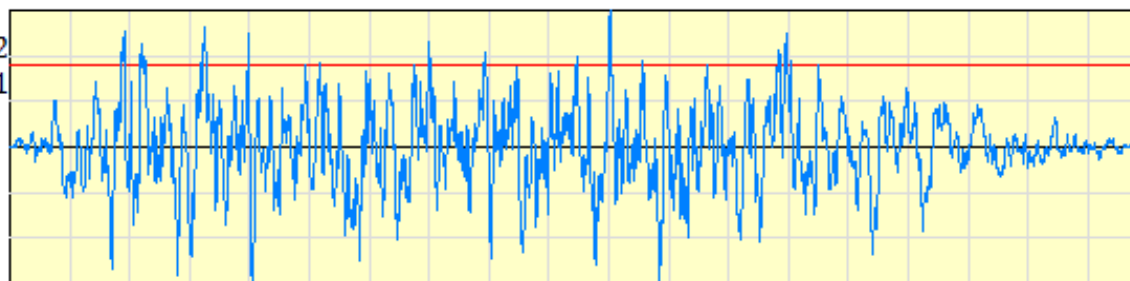
ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

ANALISI DINAMICA SEMPLIFICATA – SPOSTAMENTO PERMANENTE CON OPERA

S5=0.69 cm

$Ac=2.03 \text{ m/s}^2$
 $kc=Ac/g=0.21$

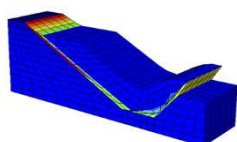
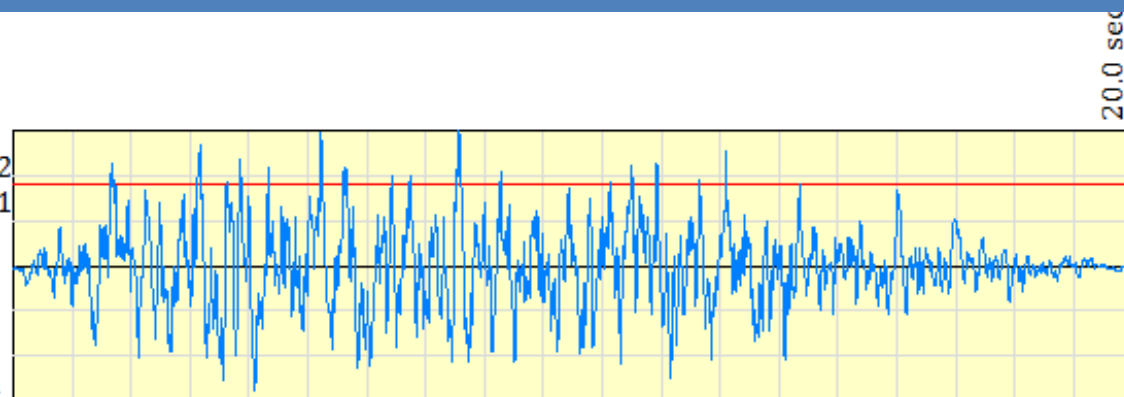
$U=0.006846 \text{ m}$



S6=1.17 cm

$Ac=2.03 \text{ m/s}^2$
 $kc=Ac/g=0.21$

$U=0.011740 \text{ m}$



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

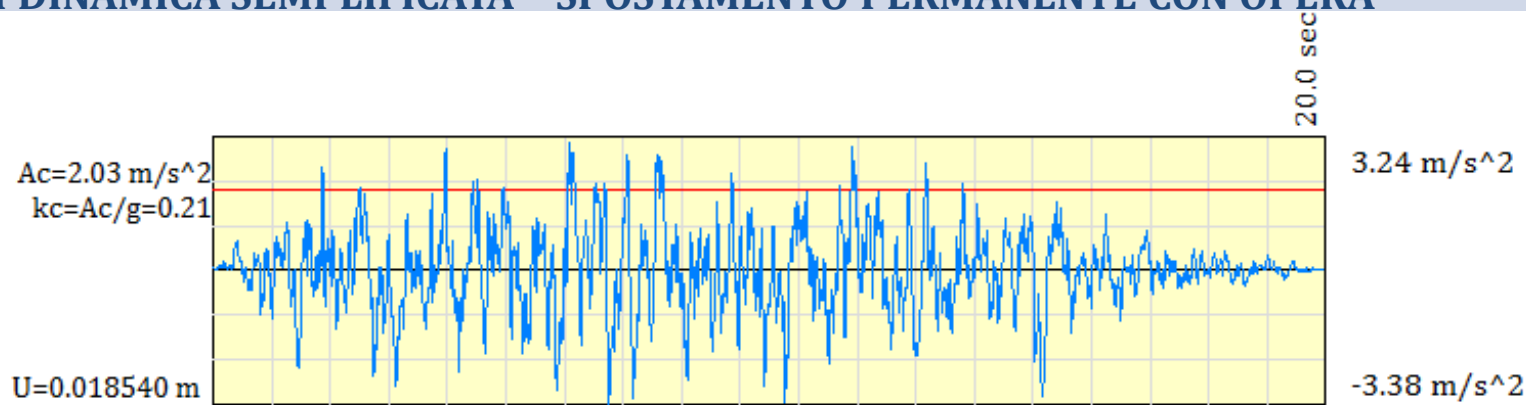
pag. 56

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

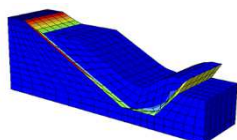
ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA

ANALISI DINAMICA SEMPLIFICATA – SPOSTAMENTO PERMANENTE CON OPERA

$S_7 = 1.85 \text{ cm}$



$$S_{\text{PERMANENTE}} = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7) / 7 = \\ (1.59 + 0.80 + 1.63 + 1.56 + 0.69 + 1.17 + 1.85) / 7 = 1.33 \text{ cm}$$



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA LIBERA

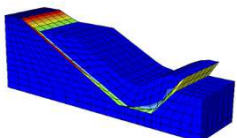
DIMENSIONAMENTO OPERA DI SOSTEGNO CON $R_{MAX} > 35321 \text{ kg}$

Nella stabilizzazione del pendio è stato fatto riferimento ad una paratia con una Resistenza prefissata dall'analista al fine di soddisfare gli obiettivi prefissati ossia raggiungere un coefficiente di sicurezza di progetto pari ad **1.10**.

Al fine di validare la soluzione ottenuta è fondamentale progettare o verificare la paratia in modo che la sua resistenza massima (GEO/STR) sia almeno pari ad $R_{MAX} = 35321 \text{ kg}$. Fissata la posizione dell'opera, al fine di rendere il problema determinato, rimane da definire:

- *Tipo di paratia (pali, setti etc.);*
- *Geometria (Altezza, diametro pali, interasse, spessore setti, etc.);*
- *Materiali e caratteristiche meccaniche (c.a, classe CLS, tipo di acciaio, etc.);*
- *Armature (armature longitudinali, trasversali, etc.);*
- *Schema di vincolo (con cordolo, tiranti, etc.);*

Fissati i parametri in un range ben definito, è possibile determinare la resistenza geotecnica e strutturale della paratia e la distribuzione al fine di garantire l'azione prevista. *Il calcolo è di tipo iterativo. Importante e anche decidere il meccanismo di collasso dell'opera tra (GEOTECNICA e STRUTTURALE)*



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA LIBERA

DIMENSIONAMENTO OPERA DI SOSTEGNO CON $R_{MAX} > 35321 \text{ kg}$

Tipo di paratia: **pali trivellati**

Diametro pali [cm] : **100 cm**

Interasse pali [cm] : **120 cm**

Altezza paratia [m]: **15.0**

Vincolo in testa: **cordolo 130x120 continuo**

Classe calcestruzzo: **C25/30**

Tipo di acciaio : **B450C**

% armatura longitudinale.:

$1.45 = 114 \text{ cm}^2 = 26\Phi 24$

Copriferro [cm]: **5.0**

Armatura trasversale: **staffe $\Phi 12/15 \text{ cm}$**

$R = 36295 \text{ kg}$ % usata = 29

$y = 16.54 \text{ m}$

$R_{max} = 38888 \text{ kg}$

$y_{max} = 22.00 \text{ m}$

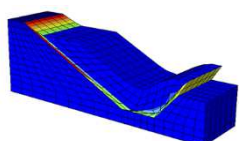
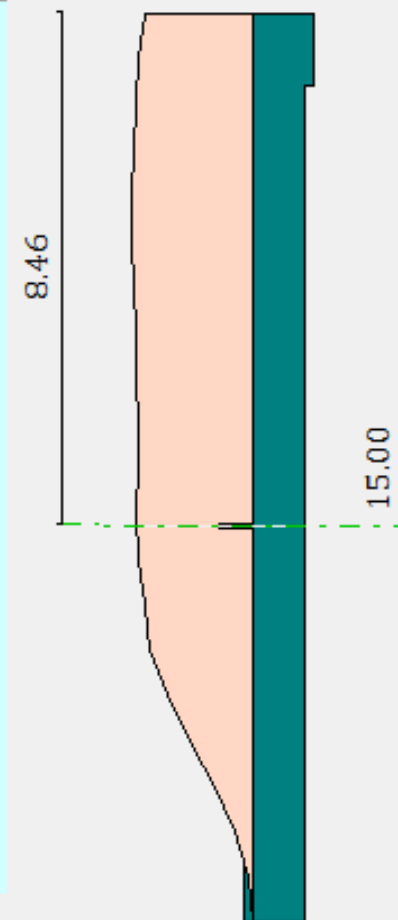
$Mu_{Sez} = 135452 \text{ kgm}$

$R_{taglio} = 119680 \text{ kg}$

Valori diagramma

$y = 16.58 \text{ [m]}$

$R = 36295.38 \text{ [kg]}$



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

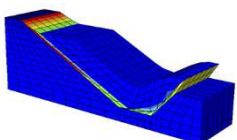
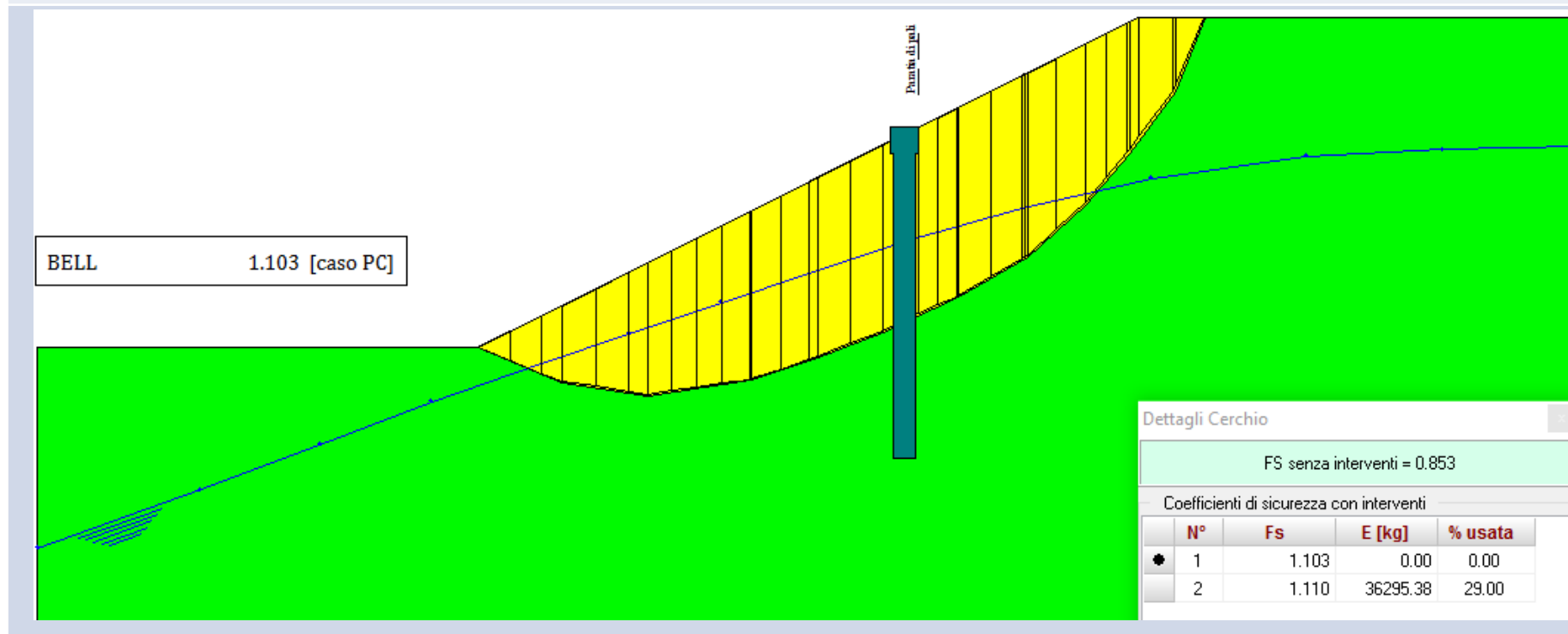
pag. 59

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA LIBERA

DIMENSIONAMENTO OPERA DI SOSTEGNO CON $R_{MAX} > 35321 \text{ kg}$

La paratia progettata ha una resistenza $R_{MAX} = 36295 > 35321 \text{ kg}$, con distribuzione quasi uniforme e un indice di utilizzo per la stabilità a monte pari al **29%**. Rianalizzando il pendio abbiamo che il fattore di sicurezza minimo di valle è pari a **1.103** > 1.095 il linea con quando ipotizzato.

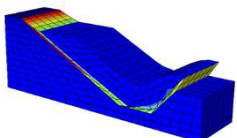
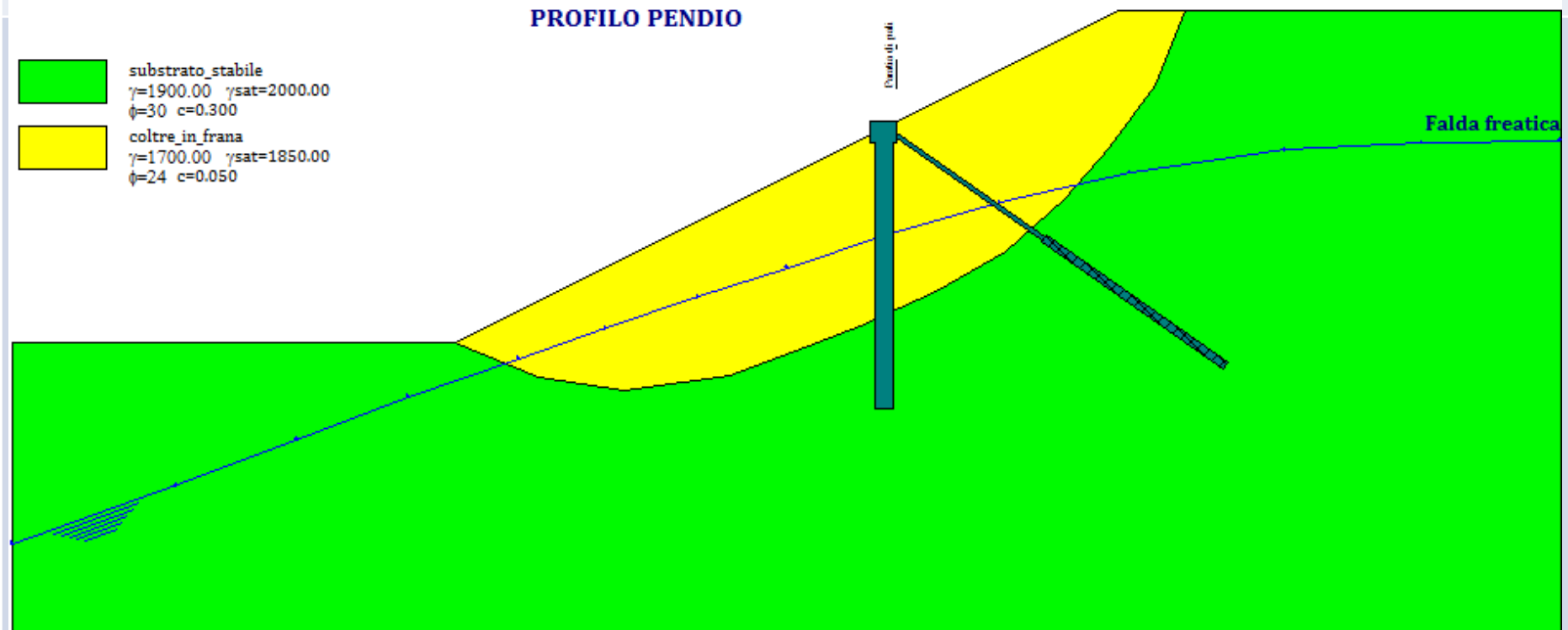


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON PARATIA TIRANTATA

MODELLO GEOTECNICO

Lo stesso pendio è stato stabilizzato con diverse tipologie di opere fermo restando la posizione in modo da poter progettare un intervento compatibile nel miglior rapporto costo benefici.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA TIRANTATA

Tipo di paratia: **pali trivellati con tiranti in testa**

Diametro pali [cm] : **80 cm**

Interasse pali [cm] : **150 cm**

Altezza paratia [m]: **13.0**

Vincolo in testa: **cordolo 120x100 con tirante**

Classe calcestruzzo: **C25/30**

Tipo di acciaio : **B450C**

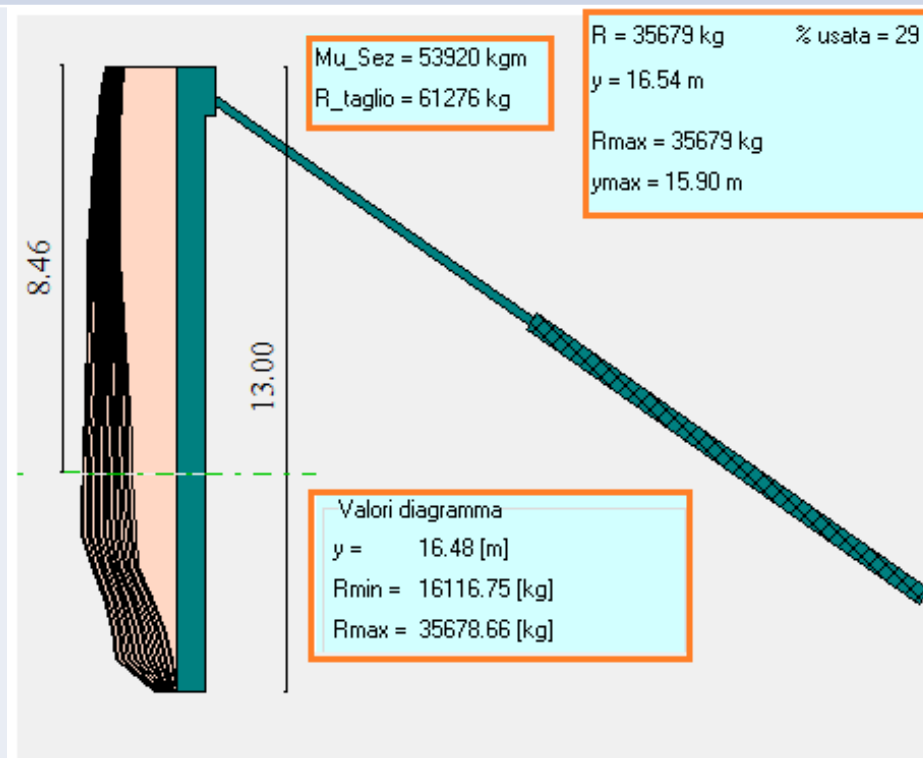
% armatura longitudinale.:

$1.45 \cdot A_c = 73 \text{ cm}^2 = 23 \Phi 20$

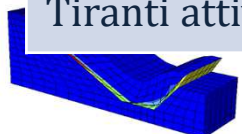
Copriferro [cm]: **5.0**

Armatura trasversale: **staffe $\Phi 12/15 \text{ cm}$**

DIMENSIONAMENTO OPERA DI SOSTEGNO
TIRANTATA - $R_{MAX} > 35321 \text{ kg}$



Tiranti attivi: $L=18 \text{ m}$, $i=1.50 \text{ m}$, $\alpha=35^\circ$, $D_{PERF}=20 \text{ cm}$, $L_{FOND}=10 \text{ m}$, Tiro=15 tonn.

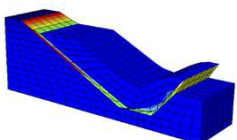
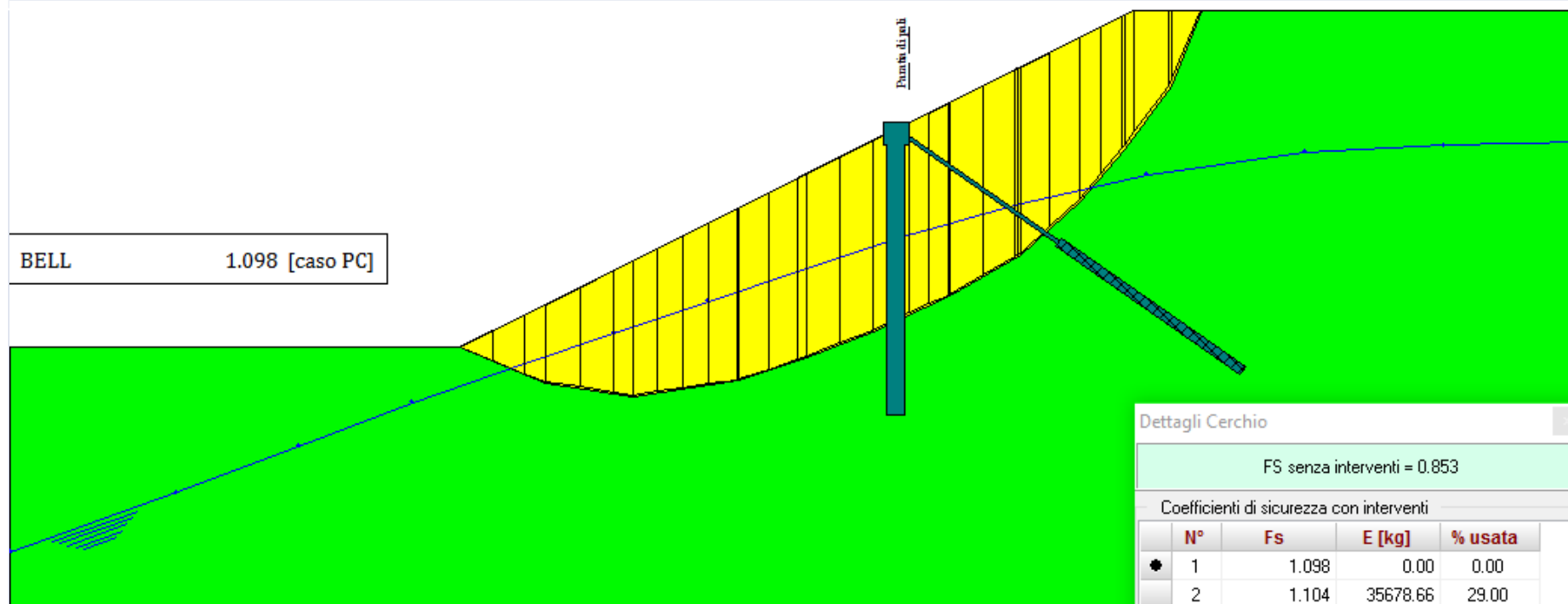


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON UNA PARATIA TIRANTATA

DIMENSIONAMENTO OPERA DI SOSTEGNO CON $R_{MAX} > 35321 \text{ kg}$

La paratia con tiranti in testa progettata con una resistenza $R_{MAX} = 35679 > 35321 \text{ kg}$, con distribuzione in figura sopra, indice di utilizzo per la stabilità a monte pari al **29%**. Rianalizzando il pendio abbiamo che il fattore di sicurezza di valle è pari a **1.098** > 1.095 prossimo a $FS_{PROGETTO} = 1.10$



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

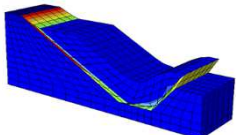
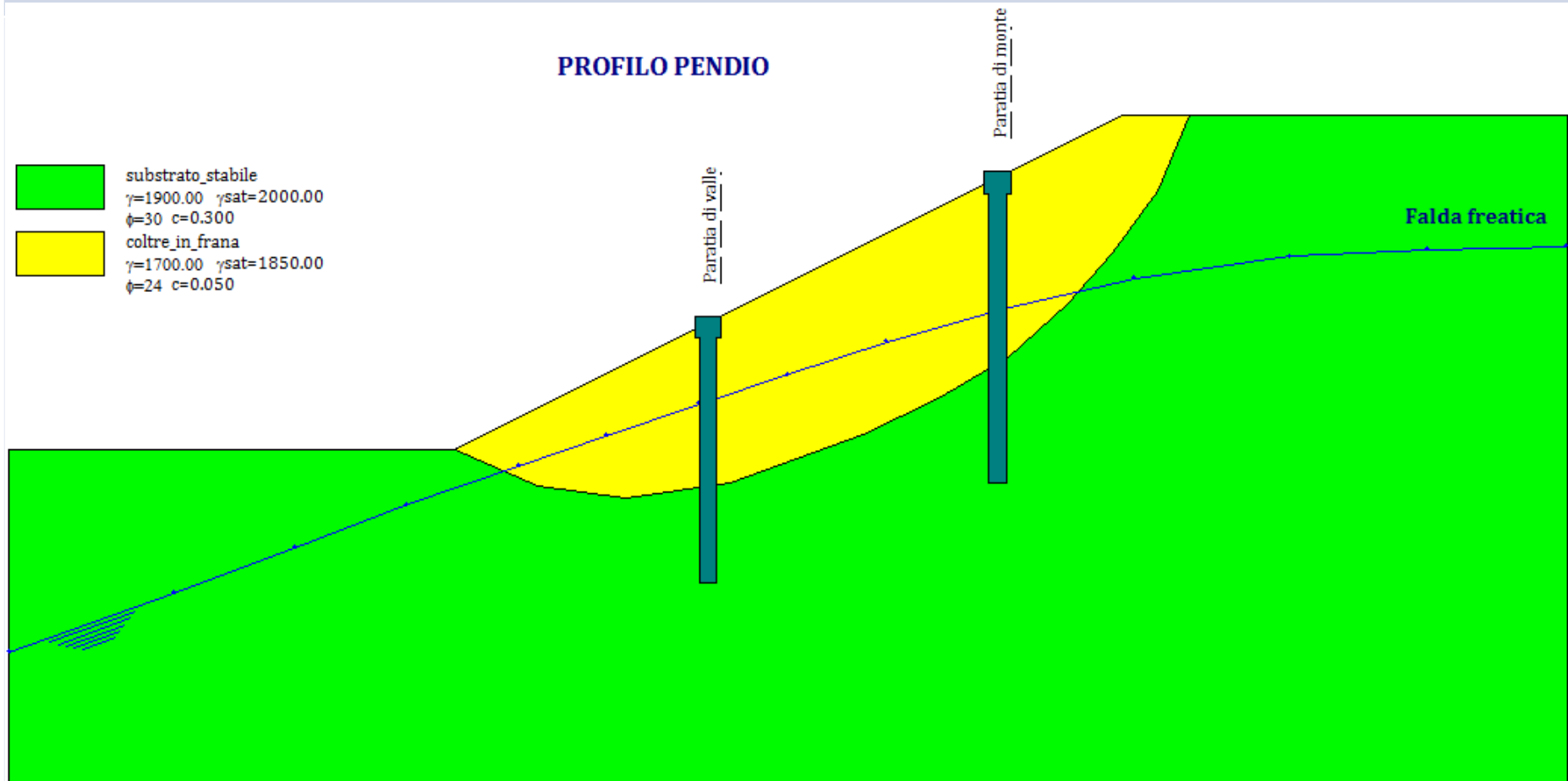
23 Settembre 2017

pag. 63

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON DOPPIA PARATIA

MODELLO GEOTECNICO



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

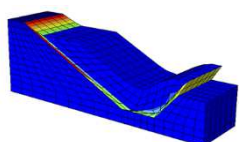
23 Settembre 2017

pag. 64

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON DOPPIA PARATIA

PARATIA DI VALLE	PARATIA DI MONTE
Tipo di paratia: pali trivellati	Tipo di paratia: pali trivellati
Diametro pali [cm] : 80 cm	Diametro pali [cm] : 80 cm
Interasse pali [cm] : 150 cm	Interasse pali [cm] : 150 cm
Altezza paratia [m]: 12.00	Altezza paratia [m]: 14.00
Vincolo in testa: cordolo 120x100 continuo	Vincolo in testa: cordolo 120x100 continuo
Classe calcestruzzo: C25/30	Classe calcestruzzo: C25/30
Tipo di acciaio : B450C	Tipo di acciaio : B450C
% armatura longitudinale.: $1.45 \cdot A_c = 73 \text{ cm}^2 = 23\Phi 20$	% armatura longitudinale.: $1.45 \cdot A_c = 73 \text{ cm}^2 = 23\Phi 20$
Copriferro [cm]: 5.0	Copriferro [cm]: 5.0
Armatura trasversale: staffe $\Phi 12/15 \text{ cm}$	Armatura trasversale: staffe $\Phi 12/15 \text{ cm}$

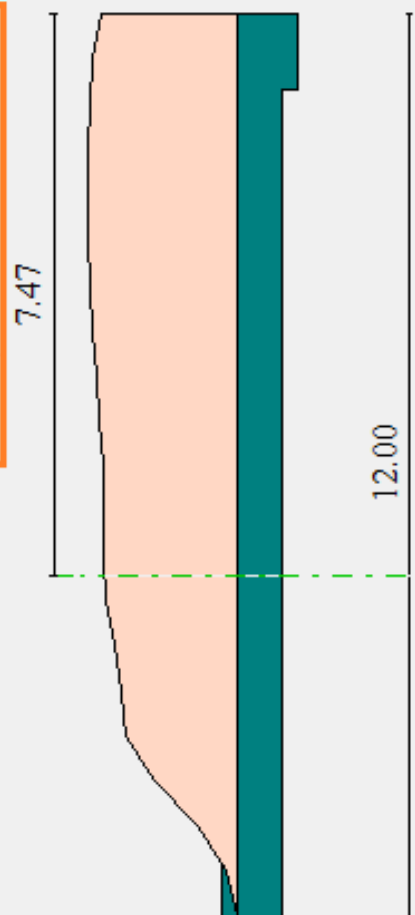


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON DOPPIA PARATIA

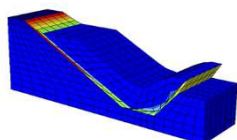
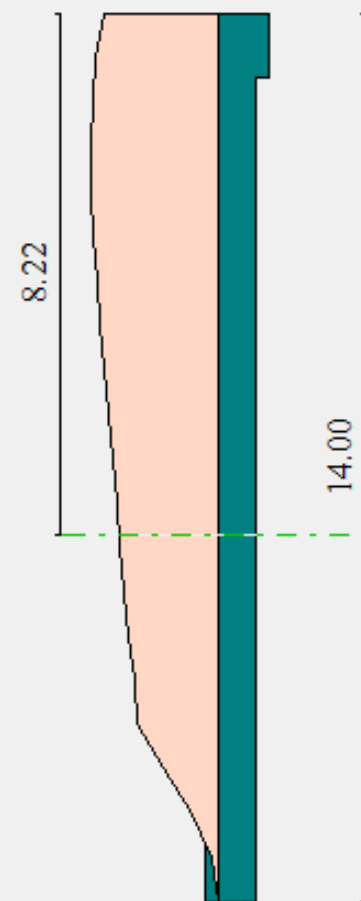
PARATIA DI VALLE → $R_{MAX} = 18628 \text{ kg}$

$R = 18628 \text{ kg}$ % usata = 25
 $y = 13.53 \text{ m}$
 $R_{max} = 21416 \text{ kg}$
 $y_{max} = 18.60 \text{ m}$
 $Mu_{Sez} = 53920 \text{ kgm}$
 $R_{taglio} = 61276 \text{ kg}$
Valori diagramma
 $y = 13.47 \text{ [m]}$
 $R = 18628.50 \text{ [kg]}$



PARATIA DI MONTE → $R_{MAX} = 16849 \text{ kg}$

$R = 16849 \text{ kg}$ % usata = 33
 $y = 19.28 \text{ m}$
 $R_{max} = 21445 \text{ kg}$
 $y_{max} = 25.40 \text{ m}$
 $Mu_{Sez} = 53920 \text{ kgm}$
 $R_{taglio} = 61276 \text{ kg}$
Valori diagramma
 $y = 19.25 \text{ [m]}$
 $R = 16848.55 \text{ [kg]}$

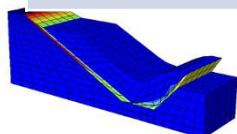
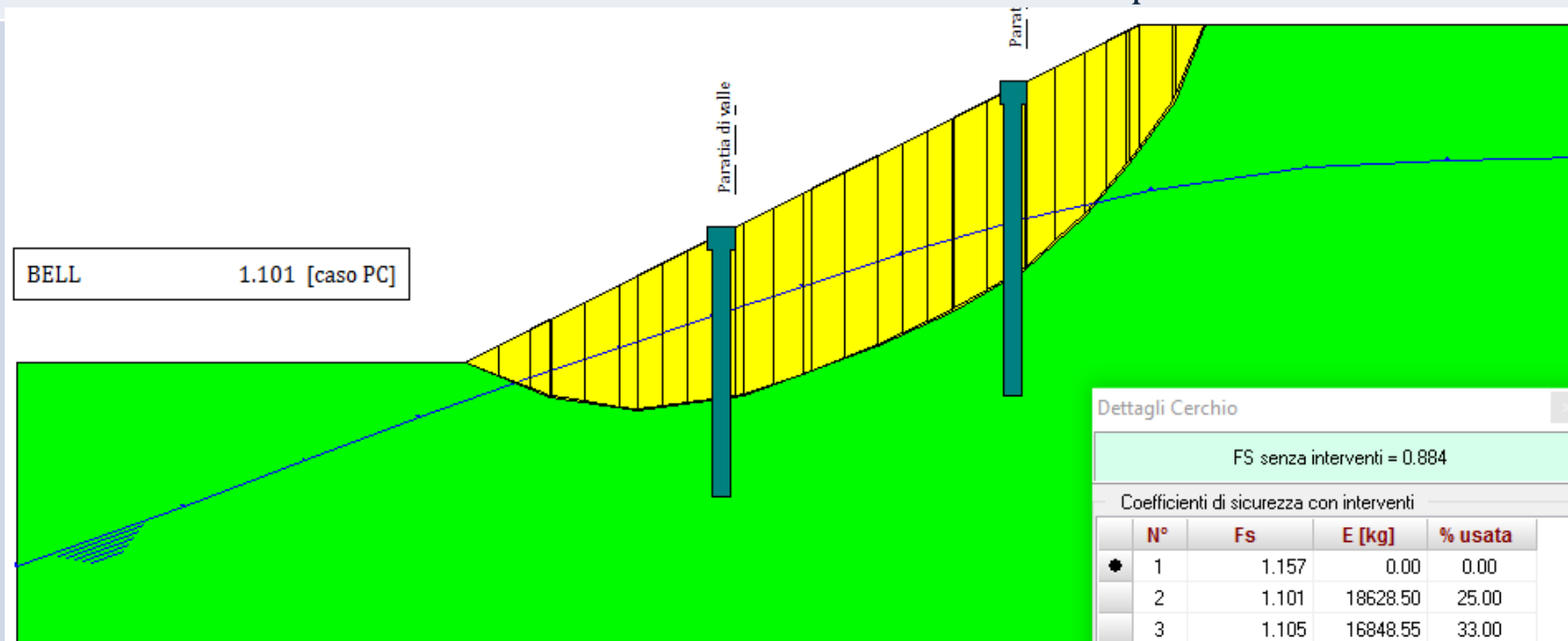


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ESEMPIO: STABILIZZAZIONE DI UNA SCARPATA CON DOPPIA PARATIA

DIMENSIONAMENTO OPERDI SOSTEGNO

Nel caso in oggetto sono state inserite due paratie diverse a valle e monte, sono state scelte le ubicazioni ottimali ed ogni paratia ha esplicato una resistenza di **18628** e **16849 kg** rispettivamente per valle e monte con indice di utilizzo di **33 e 25%**. Analizzando il pendio abbiamo che il fattore di sicurezza minimo tra i tre settori è **1.101** attribuibile al settore di valle prossimo a $FS_{PROGETTO}=1.10$.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

I metodi per la determinazione della massima sollecitazione resistente del palo singolo o più pali interagenti S_R possono appartenere alle seguenti categorie:

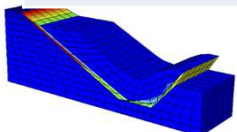
- a) **Metodi basati sulla pressione (Pressure - based methods);**
- b) **Metodi basati sugli spostamenti (Displacement - based methods);**
- c) **Metodi disaccoppiati (uncoupled analytical models);**
- d) **Metodi accoppiati (coupled numerical models).**

Le prime due tipologie di metodi **sono basati sull'analisi dei pali passivi soggetti ad una pressione laterale indotta dagli spostamenti del terreno in movimento indipendentemente dalle condizioni di stabilità del pendio**, ovvero predicono **le massime spinte sui pali**.

I metodi disaccoppiati di solito sono metodi MEL (già descritti in precedenza) in cui:

- In un versante in frana si determinano le caratteristiche **di stabilità iniziale FS** e le **forze resistenti richieste per la stabilizzazione RF**;
- I pali sono soggetti alle pressioni indotte dalle **RF** il cui andamento o distribuzione è assunto in funzione della tipologia del movimento con la profondità, (andamento rettangolare per frane traslazionali, triangolari per fenomeni di creep, intermedie per frane roto-traslazionali).

I metodi accoppiati sono quelli completi al continuo non lineare (FEM, FDM) in cui terreno ed opera interagiscono in maniera puntuale e completa in condizioni drenate e non drenate.



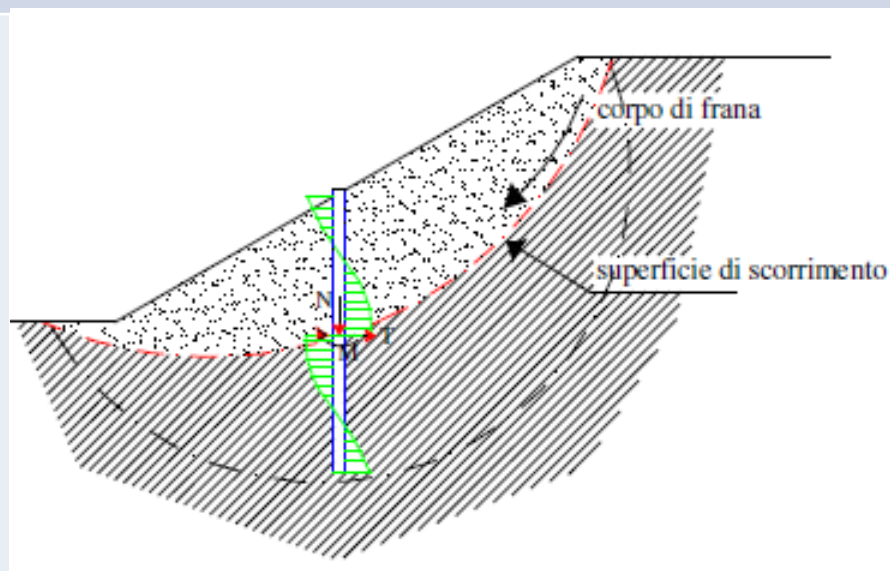
3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

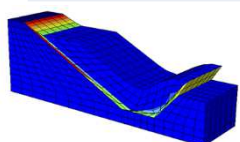
L'impiego dei pali per la stabilizzazione dei pendii risale ai primi anni 70 (Fukuoka, 1970). Gli interventi di stabilizzazione con pali vengono effettuati disponendo gli elementi resistenti in uno o più allineamenti trasversali alla pendenza del pendio. *I pali vengono realizzati con un interasse generalmente superiore a due volte il diametro.*

L'approccio alla progettazione di un intervento di stabilizzazione di un versante con una o più file di pali può essere sintetizzato in tre passi, come indicato da Viggiani (1981):

1. *valutazione della forza di taglio totale necessaria ad ottenere il richiesto incremento del fattore di sicurezza iniziale del pendio F_0 ;*
2. *valutazione della massima forza di taglio che ciascun palo può ricevere dal terreno scivolante e trasmettere alla formazione di base;*
3. *determinazione del tipo, del numero di pali e della loro collocazione più idonea nel pendio.*



Meccanismo di interazione palo-terreno (Cartier, 1986)



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

- Il primo aspetto viene risolto di solito attraverso una classica analisi dell'equilibrio limite che permette di valutare lo sforzo tangenziale che gli elementi strutturali devono esplicare lungo la superficie di scorrimento per incrementare il coefficiente di sicurezza del pendio (**F_0**).
- Alcune esperienze (Sommer, 1977) hanno dimostrato che un pendio già in movimento può essere stabilizzato anche solo attraverso un lieve incremento del coefficiente di sicurezza (**10%**).

Se si fa riferimento ad una superficie critica circolare, è possibile calcolare la coppia stabilizzante M_S necessaria ad innalzare il coefficiente di sicurezza iniziale F_0 al valore richiesto F^* :

$$M_S = (F^* - F_0) \cdot M_R$$

Lo sforzo complessivo S_t che i pali devono esplicare lungo la superficie di scorrimento è:

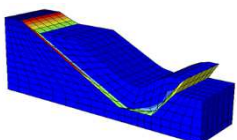
$$S_t = (M_S / R)$$

dove : M_R è il momento ribaltante intorno al centro del cerchio; R è il raggio del cerchio critico.

Lo sforzo S_t verrà fatto assorbire ad una o più file di pali in modo tale che per ciascun palo sia verificata la relazione:

$$S_t / n \times i < S_R$$

dove: n ed i sono rispettivamente il numero di pali della generica fila e l'interasse, ed S_R è la massima sollecitazione resistente che ciascun palo può assorbire.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

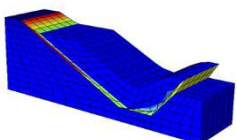
ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

Un approccio di questo tipo **trascura completamente l'aspetto tridimensionale** del problema e non valuta *la possibilità che la superficie di scorrimento in presenza della fila di pali possa essere diversa da quella che si mobilita in assenza di essi*. In seguito verranno brevemente riportate alcune trattazioni teoriche che hanno cercato di portare in conto anche questo ultimo aspetto (Cartier 1986).

Per quanto riguarda la valutazione di S_R , esistono in letteratura alcuni approcci di calcolo che fanno riferimento a varie ipotesi attinenti all'interazione fra i pali ed il terreno al di sopra ed al di sotto della superficie di scorrimento. Altro aspetto da sottolineare è che tutti i metodi disponibili *considerano il palo (o i pali) disposti ortogonalmente alla direzione di avanzamento della coltre*.

Schematizzando, si possono distinguere due diverse famiglie di metodi:

- *la prima è quella in cui l'interazione tra il palo ed il terreno circostante viene studiata in condizioni "a rottura" (ITO e MATSUI, 1975; DE BEER e CARPENTIER, 1977; MUSSO, 1977; VIGGIANI, 1981), considerando quindi un comportamento all'interfaccia rigido-perfettamente plastico e trascurando la deformabilità del palo (PRESSURE METHODS);*
- *una seconda famiglia è quella in cui invece il comportamento all'interfaccia viene analizzato con modelli più complessi, di tipo elastico non lineare, elasto -perfettamente plastico o elasto-plastico (BAGUELIN e FRANK, 1976; CHOW, 1996; POULOS, 1995). Queste trattazioni generalmente permettono di simulare in modo certamente più realistico l'evoluzione della pressione di interazione con l'avanzamento della coltre in frana (DISPLACEMENT METHODS).*



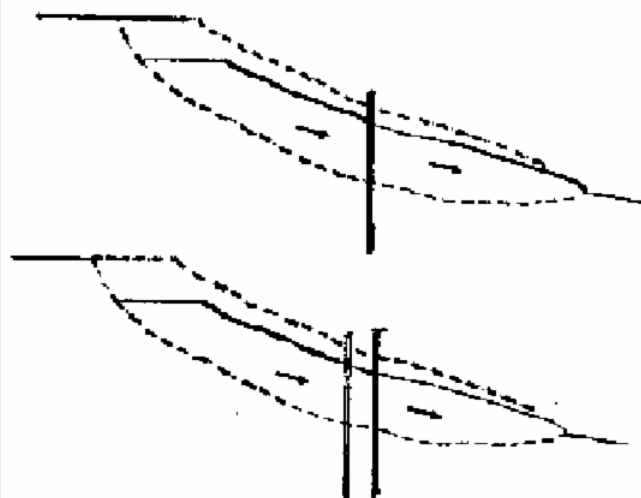
3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

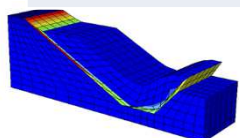
L'intervento di stabilizzazione può risultare mal dimensionato e la crisi del sistema palo-pendio può avvenire con una delle modalità o combinazione riportate in figura :

1. il terreno al contorno dei pali *si plasticizza e scorre tra essi permettendo all'ammasso instabile di scivolare lungo la preesistente superficie di scorrimento;*
2. si formano delle *cerniere plastiche nei pali* e l'ammasso instabile scivola lungo una superficie di scorrimento assimilabile a quella preesistente;
3. i pali ruotano, rigidamente o con la formazione di cerniere plastiche, intorno ad un punto abbastanza profondo, *modificando localmente la superficie di scorrimento preesistente;*
4. si crea una *nuova superficie di scorrimento a una profondità tale da non interessare i pali;*
5. si crea una nuova superficie di scorrimento *a valle o a monte dei pali che con essi non interferisce.*

Meccanismi di rottura del tipo 1



Meccanismo di rottura del tipo 2



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

E' importante osservare che i meccanismi 1 e 2 non comportano una modifica della superficie di scorrimento preesistente a differenza dei meccanismi 3, 4 e 5. Ne consegue che una verifica nei riguardi delle prime due modalità di rottura può effettuarsi disaccoppiando il problema dell'interazione tra terreno e palo dal problema della stabilità globale del pendio. Ciò non è possibile nel meccanismo 3; mentre nei casi 4 e 5 si prescinde totalmente dall'interazione locale e la loro analisi si riconduce ad una semplice verifica di stabilità. Le trattazioni teoriche che verranno richiamate in seguito prevedono sempre una analisi disaccoppiata e pertanto si riferiscono a meccanismi del tipo 1 e del tipo 2.

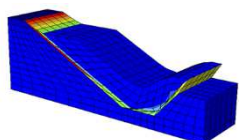
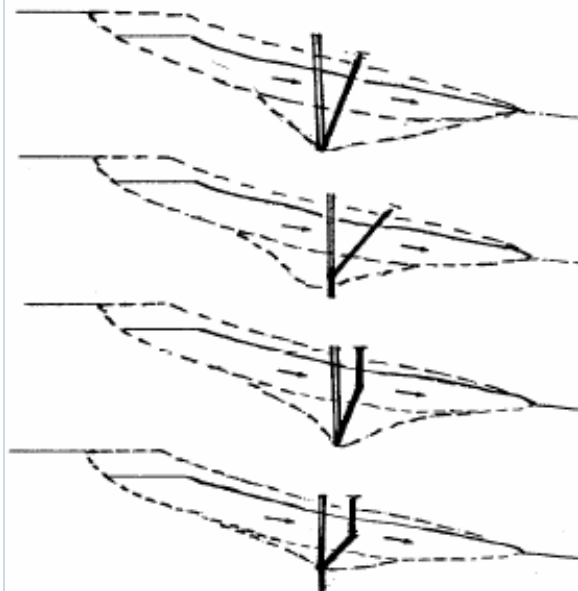
Meccanismi di rottura del tipo 4



Meccanismi di rottura del tipo 5



Meccanismi di rottura del tipo 3



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

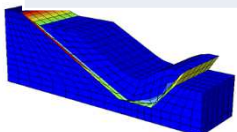
METODI A ROTTURA

Metodi a *rottura* : nell'ambito della categoria dei metodi a rottura si possono distinguere due gruppi.

- ❑ Il primo (Blum, 1936; Broms, 1964; Brinch Hansen, 1961; Viggiani 1981) *considera il caso di palo isolato, e riconduce il problema reale (palo fisso, terreno in frana) a quello della rottura palo-terreno (scorrimento del palo all'interno di una massa di terreno ferma).*
- ❑ Il secondo gruppo (Ito e Matsui, 1975; De Beer e Carpentier, 1977; Broms, 1983) ***studia il comportamento di una o più file di pali che attraversano una coltre in frana;*** a differenza dei precedenti, *questo gruppo fa dipendere la pressione ultima esercitata dalla coltre dall'interasse fra i pali, e quindi portano in conto in qualche modo l'effetto arco che nasce fra i pali.* Tutte le trattazioni appartenenti a questa categoria considerano il palo (o i pali) *infinitamente rigido.*

PALO ISOLATO – METODO BLUM

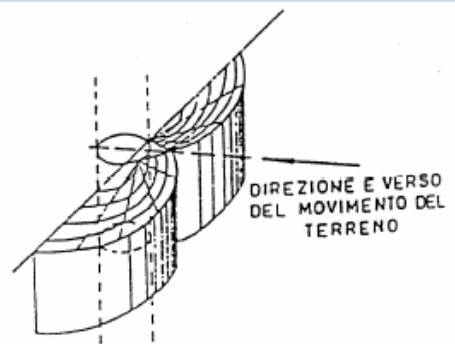
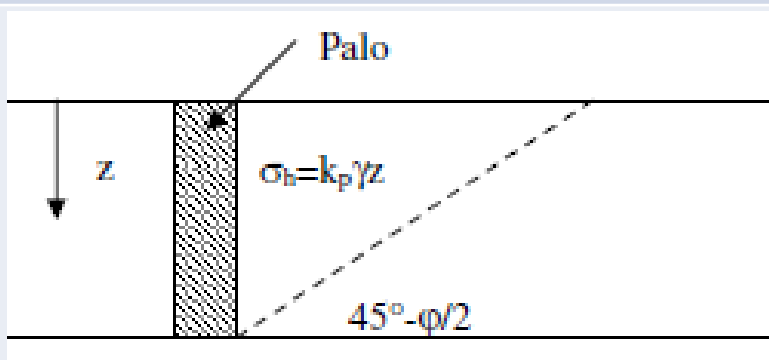
BLUM (1932) ipotizzò, per un mezzo granulare incoerente, superfici di rottura secondo cunei di spinta passiva. Nel caso in cui la profondità (z) è elevata rispetto alla dimensione trasversale (D), le superfici di scorrimento possono essere assimilate a cilindri con direttrici giacenti in piani normali all'asse del palo, e con generatrici parallele a detto asse.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

PALO ISOLATO – METODO BLUM



- Superfici di rottura secondo Blum (palo singolo - $z \approx D$)
- Superfici di scorrimento cilindriche (palo singolo $z \gg D$)

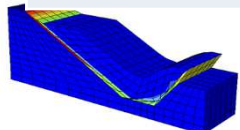
PALO ISOLATO – METODO DI BRINCH – HANSEN

BRINCH HANSEN (1961) fornisce un'espressione del carico limite di un terreno (dotato di coesione e di attrito) che permette di valutare la resistenza massima che un terreno oppone allo spostamento del palo, dove:

$$p_{lim} = q \cdot Kq + c \cdot Kc$$

- q rappresenta la tensione litostatica verticale;
- c la coesione e Kq e Kc sono coefficienti di carico limite funzione dell'angolo di attrito e della profondità.

Questa relazione può essere usata anche per il calcolo della spinta che il terreno in movimento esercita su un palo indeformabile e infinitamente resistente.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

PALO ISOLATO – METODO DI BROMS

BROMS (1964) calcola la pressione limite di interazione facendo riferimento a fenomeni di rottura differenti in funzione della profondità del piano campagna.

- valori limitati del rapporto z/D , le superfici di rottura si sviluppano dalla sezione a profondità z sino a raggiungere il piano campagna (*fenomeno tridimensionale*).
- valori rilevanti di z/D i fenomeni di rottura si sviluppano lungo superfici verticali parallele al palo (*fenomeno di deformazione piana, con piano delle deformazioni ortogonale all'asse del palo*).

Sulla base di tali ipotesi e dei risultati sperimentali, Broms suggerisce per i terreni incoerenti la seguente espressione :

$$\sigma_h = 3 \cdot K_p \cdot \sigma_v$$

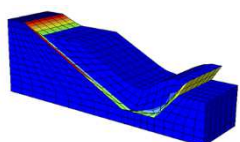
dove:

- σ_v è la tensione verticale effettiva e K_p il coefficiente di spinta passiva di Rankine.

Per i terreni coesivi saturi invece, la pressione limite si calcola con la seguente espressione:

$$\sigma_h = \alpha \cdot c_u$$

- dove: c_u è la coesione non drenata del terreno ed α un coefficiente variabile con la profondità .



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

PALO ISOLATO – METODO DI VIGGIANI

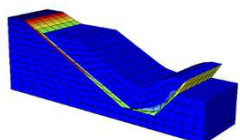
L'approccio di Viggiani (1981) permette di avere una *stima della massima sollecitazione tagliante che un palo stabilizzante può trasmettere lungo la superficie di scorrimento*, con riferimento al caso di un sottosuolo formato da uno strato superiore di terreno che scorre al di sopra di una formazione di base stabile con uno spostamento costante con la profondità con p.c e superficie di scorrimento orizzontali.

Un palo verticale rigido attraversa la coltre in movimento (spessore l_1) e si attesta nella formazione di base per una lunghezza $l_2 = \lambda \times l_1$. Entrambi i terreni sono costituiti da argille in condizioni non drenate i cui parametri di resistenza meccanica sono rappresentati dalla coesione non drenata c_{u1} e c_{u2} . Viggiani ipotizza che lo spostamento relativo palo-terreno sia tale da mobilitare, lungo tutta la lunghezza del palo, la pressione ultima p_y rifacendosi alla trattazione di Broms come :

- $p_y = K_1 \cdot c_{u1} \cdot d$: per il tratto di palo immerso nello strato in movimento;
- $p_y = K_2 \cdot c_{u1} \cdot d$: per il tratto di palo immerso nella formazione di base

dove :

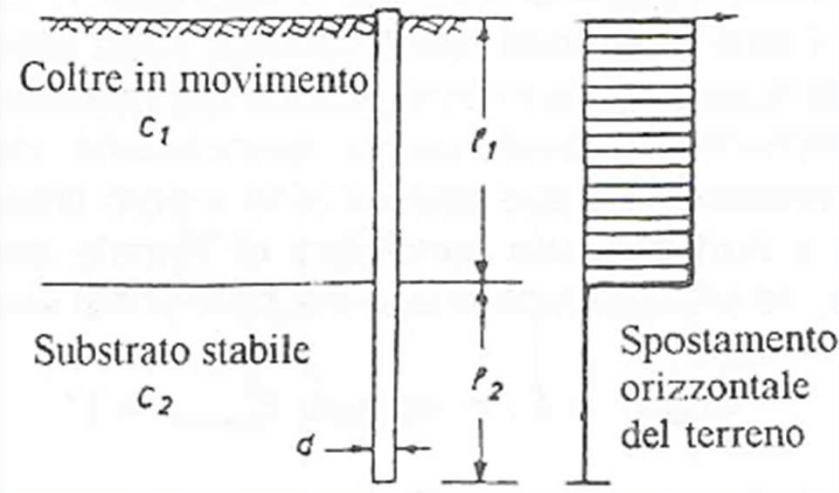
- d è il diametro del palo, c_{u1} e c_{u2} la coesione non drenata dei due strati, e K un coefficiente di capacità portante del palo differenziato per i due strati.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

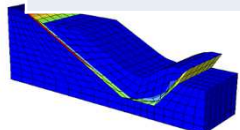
ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

PALO ISOLATO – METODO DI VIGGIANI

MODELLO DI CALCOLO	VALORI DI K - LETTERATURA		
	Riferimento	Valori di K	Schema
	Broms (1964)	8.28-12.56	<i>Palo spostato in un terreno stabile (palo rigido)</i>
	Brinch-Hansen (1961)	8.14	
	De Beer (1949)	6.26	
	Wenz (1963)	8.28-11.42	
	Smoltczyk(1973)	4.00	<i>Palo in terreno in moto (palo passivo)</i>
	Ito-Matsui (1975)	3.33	
	De Beer (1977)	2.80	

In funzione della geometria del problema (*lunghezza e diametro del palo, spessore della coltre*), del *momento di plasticizzazione del palo*, della *resistenza* sia del terreno al di sopra della *superficie di scorrimento* sia della *formazione di base*, l'autore individua sei differenti meccanismi di rottura;

- ☐ tre per il caso in cui il palo è infinitamente rigido ;
- ☐ tre nel caso in cui si possano generare una o più cerniere plastiche .



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR

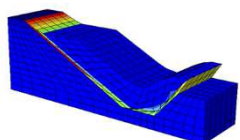
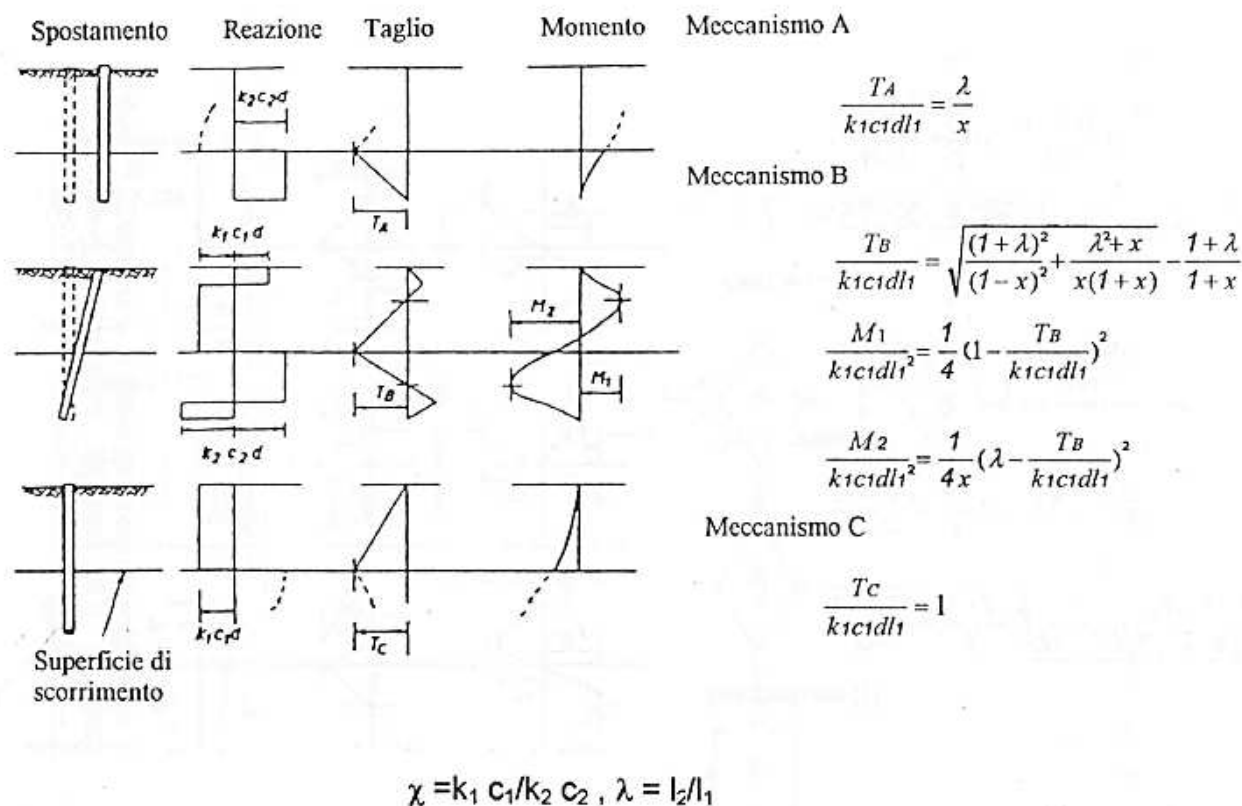
ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

PALO ISOLATO – METODO DI VIGGIANI

PALO RIGIDO

Meccanismi 1 e 2: l'ammasso scivola lungo la preesistente superficie di rottura. Il terreno scorre liberamente tra i pali, li trasporta o causa la formazione di cerniere plastiche posizionate nella coltre instabile. (*Failure modes rigid pile*)

MECCANISMI DI ROTTURA

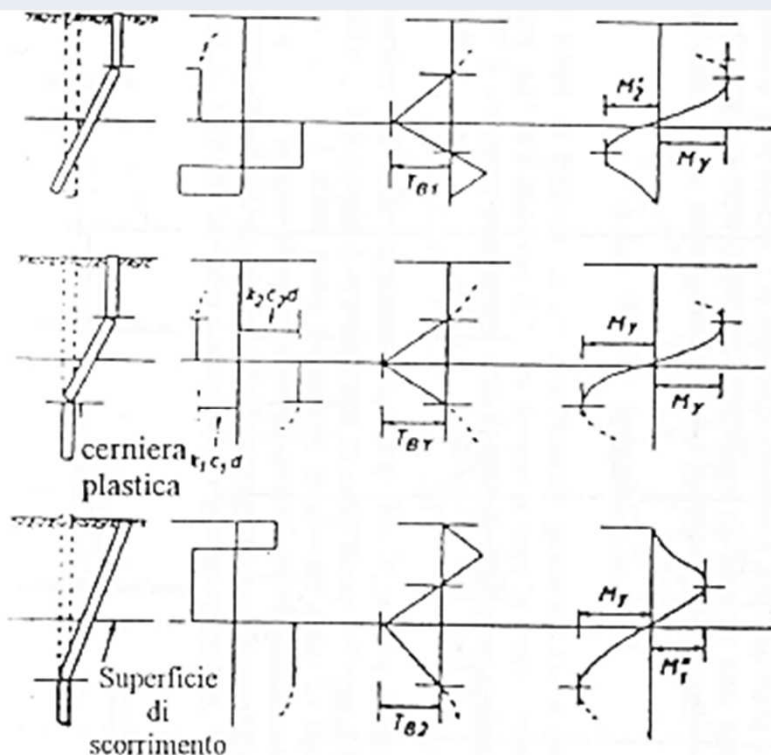


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

PALO ISOLATO – METODO DI VIGGIANI

Meccanismo 3: La superficie di scorrimento si modifica localmente. I pali ruotano rigidamente o si ha la formazione di una cerniera plastica nella formazione stabile. (*Failure modes with plastic hinges pile*)



Meccanismo B1

$$\frac{T_{B1}}{k_1 c_1 d l_1} = \frac{\lambda}{x+2} \left(\sqrt{\frac{2x+2}{\lambda} + \frac{x+2}{\lambda^2} \frac{4M_y}{k_1 c_1 d l_1^2}} - 1 \right)$$

$$\frac{M'^2}{k_1 c_1 d l_1^2} = \frac{1}{4x} \left(\lambda - x \frac{T_{B1}}{k_1 c_1 d l_1} \right)^2$$

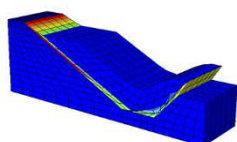
Meccanismo BY

$$\frac{T_{By}}{k_1 c_1 d l_1} = 2 \sqrt{\frac{1}{1+x} \frac{M_y}{k_1 c_1 d l_1^2}}$$

Meccanismo B2

$$\frac{T_{B2}}{k_1 c_1 d l_1} = \frac{1}{1+2x} \left(\sqrt{1 + (1+2x) \left(1 + \frac{4M_y}{k_1 c_1 d l_1^2} \right)} - 1 \right)$$

$$\frac{M''^2}{k_1 c_1 d l_1^2} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{T_{B2}}{k_1 c_1 d l_1} \right)^2$$



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

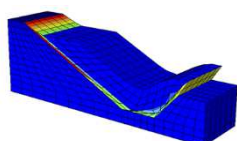
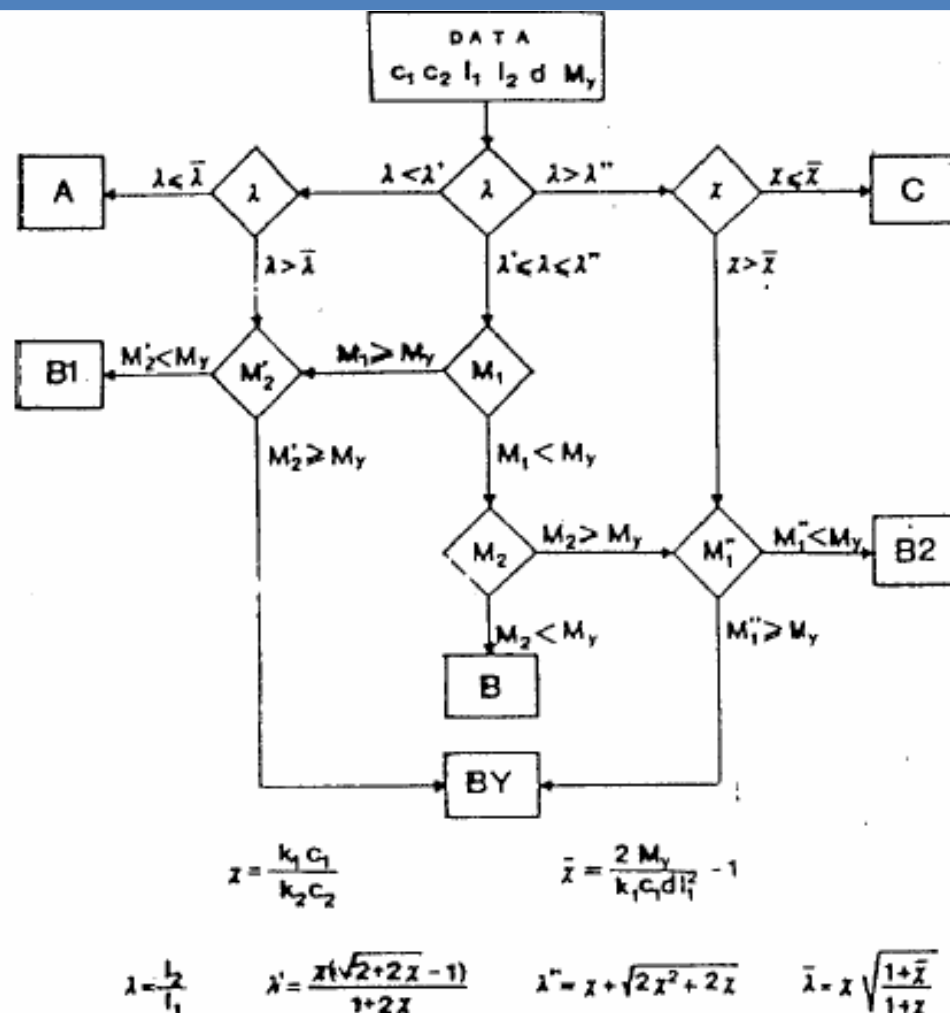
pag. 80

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

PALO ISOLATO – METODO DI VIGGIANI

Schema Iterativo per l'individuazione del Meccanismo di Rottura palo-terreno, ai fini del calcolo della massima sollecitazione agente sui Pali e sulla Stabilizzazione del pendio. Da Viggiani (1981)



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI – ITO MATSUI

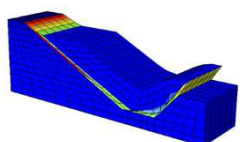
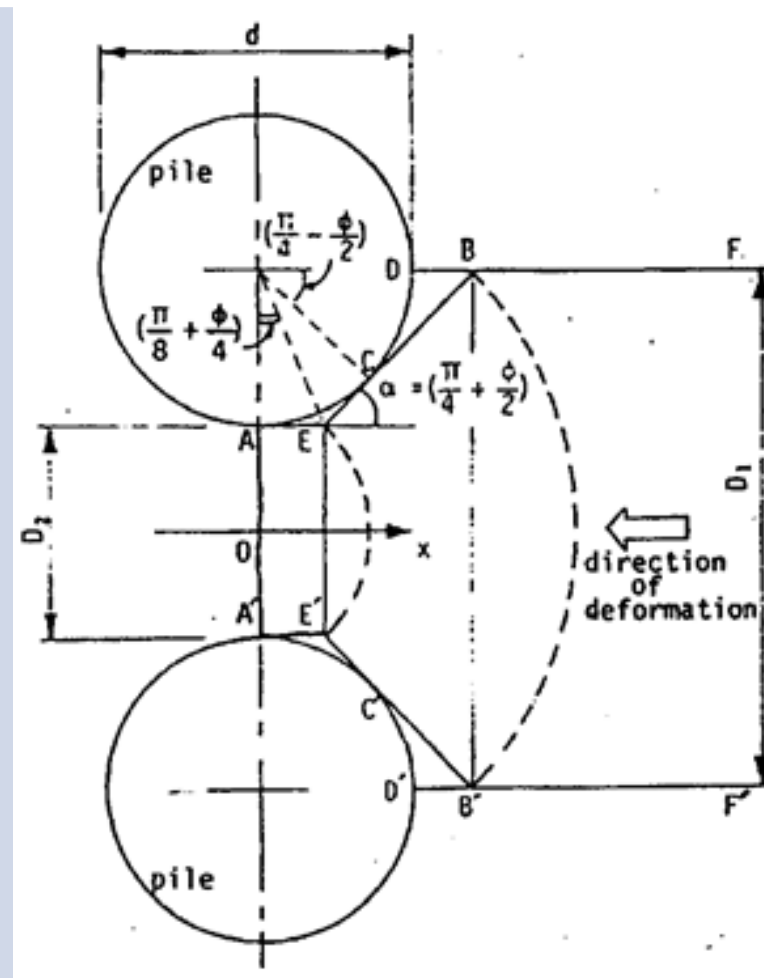
ITO e MATSUI (1975) determinano il valore della pressione ultima esercitata da una coltre su una fila di pali indeformabili e posti lungo una fila perpendicolare alla direzione del moto facendo le seguenti ipotesi:

- *teoria della deformazione plastica (criterio di Mohr-Coulomb);*
- *teoria del flusso plastico (mezzo alla Bingham)*

La teoria della deformazione plastica è basata sulle seguenti ipotesi:

- *stato di deformazione piano lungo l'asse z*
- *rottura del terreno localizzata al volume AECBB'C'E'A';*
- *stato tensionale noto lungo AA' e pari alla tensione attiva di Rankine;*
- *la tensione normale lungo AECB e A'E'C'B' è pari alla tensione passiva di Rankine.*

$$\sigma_{\alpha} = K_P \cdot \sigma_x + 2 \cdot c' \cdot \sqrt{K_P} \rightarrow \tau = c' + \sigma_{\alpha} \cdot \tan \phi$$



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI – ITO MATSUI

Espressioni per calcolare il carico (per unità di lunghezza) agente sul generico palo della fila :

- *per i pali immersi in terreni incoerenti:*

$$p(z) = \frac{\gamma z}{K_P} \left\{ D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right) \left(\sqrt{K_P} \operatorname{tg} \varphi' + K_P - 1 \right) \exp \left[\frac{D_1 - D_2}{D_2} K_P \operatorname{tg} \varphi' \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\varphi'}{4} \right) - D_2 \right] \right\}$$

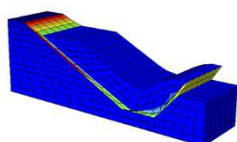
- *per i pali immersi in terreni puramente coesivi:*

$$p(z) = C_u \left\{ D_1 \left[3 \log \left(\frac{D_1}{D_2} \right) + \frac{D_1 - D_2}{D_2} \operatorname{tg} \frac{\pi}{8} \right] - 2(D_1 - D_2) \right\} + \gamma z$$

- $p = p$ (parametri geotecnici, interasse dei pali D_1 , diametro del palo $(D_1 - D_2)$)

$$P = \int_0^h p(z) dz$$

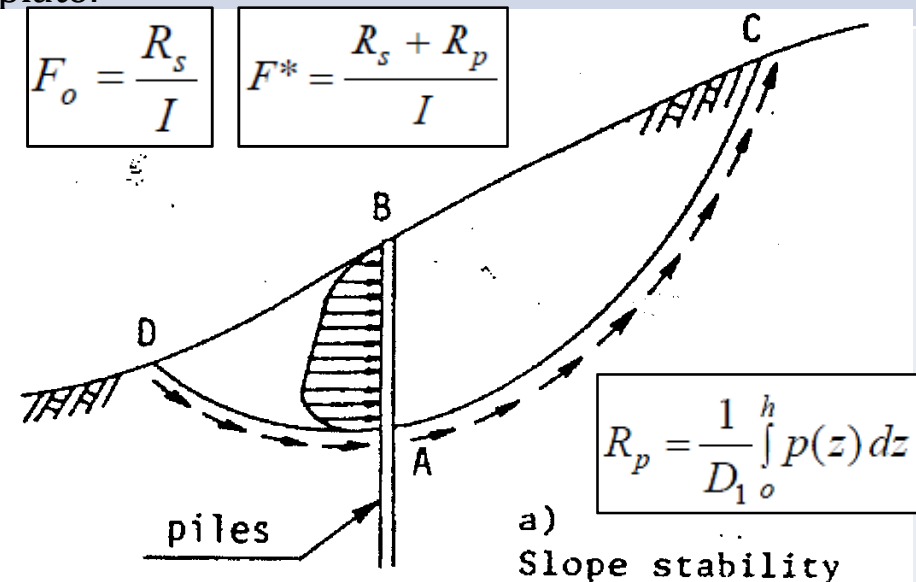
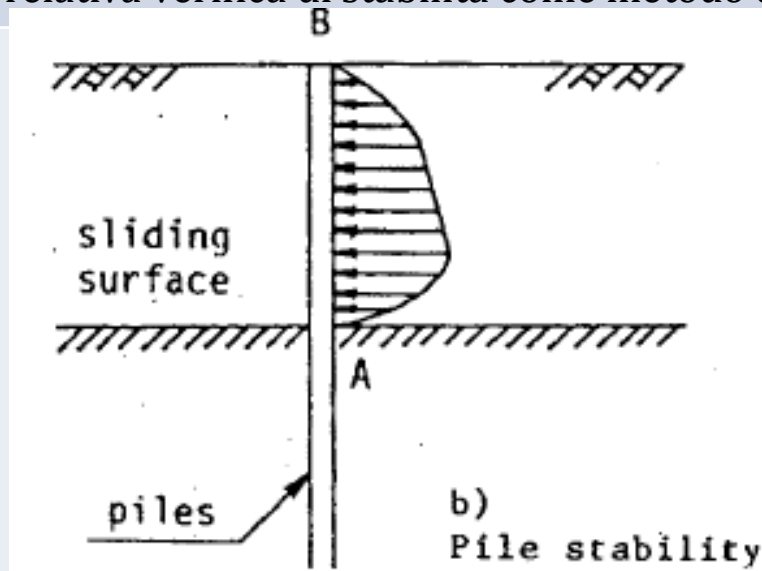
L'integrazione delle pressioni lungo l'altezza del tratto passivo del palo fornisce la massima spinta sui pali da utilizzare nella verifica.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI – ITO MATSUI

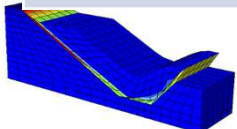
Ito e Matsui (1981) hanno anche proposto una procedura per il calcolo strutturale dei pali e la relativa verifica di stabilità come metodo disaccoppiato.



$$E_p I_p \frac{d^4 w}{dz^4} = p(z) \quad 0 < z < h$$

$$E_p I_p \frac{d^4 w}{dz^4} = -E_s w \quad z > h$$

- R_s = resistenza offerta dal terreno lungo la superficie di scorrimento;
- I = resistenza mobilitata per l'equilibrio delle forze agenti
- R_p = contributo alla resistenza dovuto ai pali

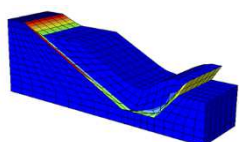
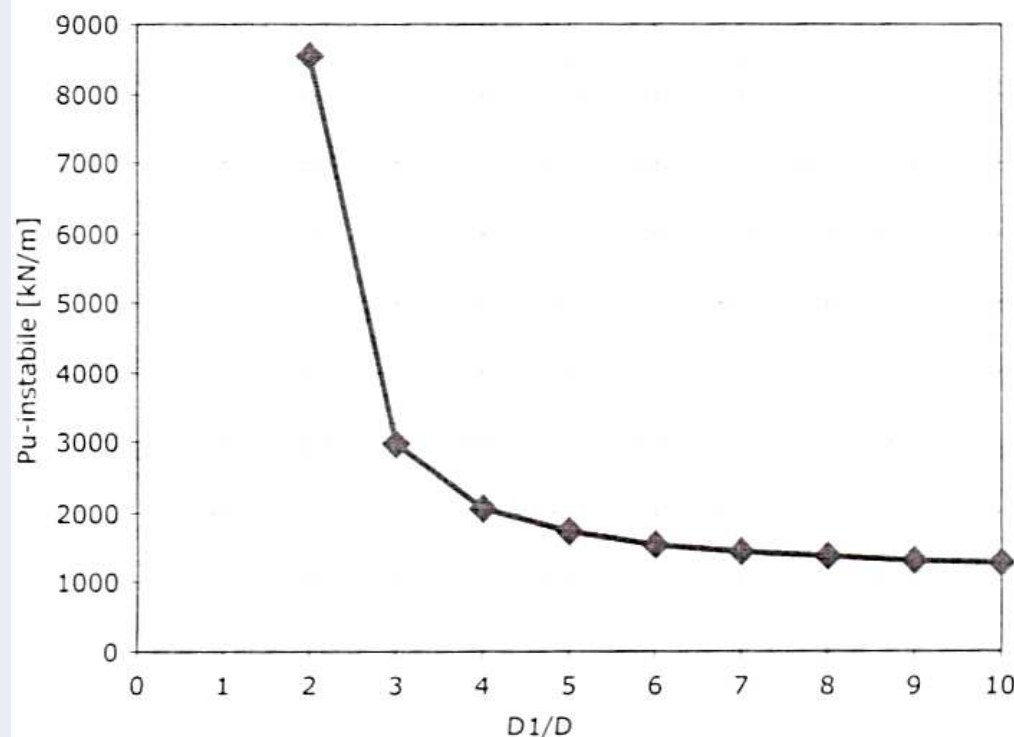


4. ANALISI D'INTERAZIONE OPERE PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI – ITO MATSUI

Le formulazioni delle spinte limite di Ito e Matsui (1981) produce valori limite decrescenti con l'aumentare della spaziatura (s o D_1), tra i pali in allineamento . Per valori di s/d inferiore a 3 l'interazione tra i pali diventa significativa i valori di spinta appaiono poco realistici eccessivi.

- Per un comportamento del palo senza effetto gruppo (palo singolo), ovvero per $s/D > 3$, la spinta limite è l'effettiva forza trasmessa dal flusso di frana sul palo, *in ragione dell'interasse in cui è disposto questo è sottoposto a tutta la spinta della frana su tale dimensione trasversale.*
- Pertanto tale metodo può essere ritenuto efficace, pur producendo valori limite di pressione, ***solo per interasse dei pali ≥ 3***



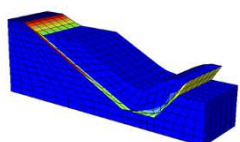
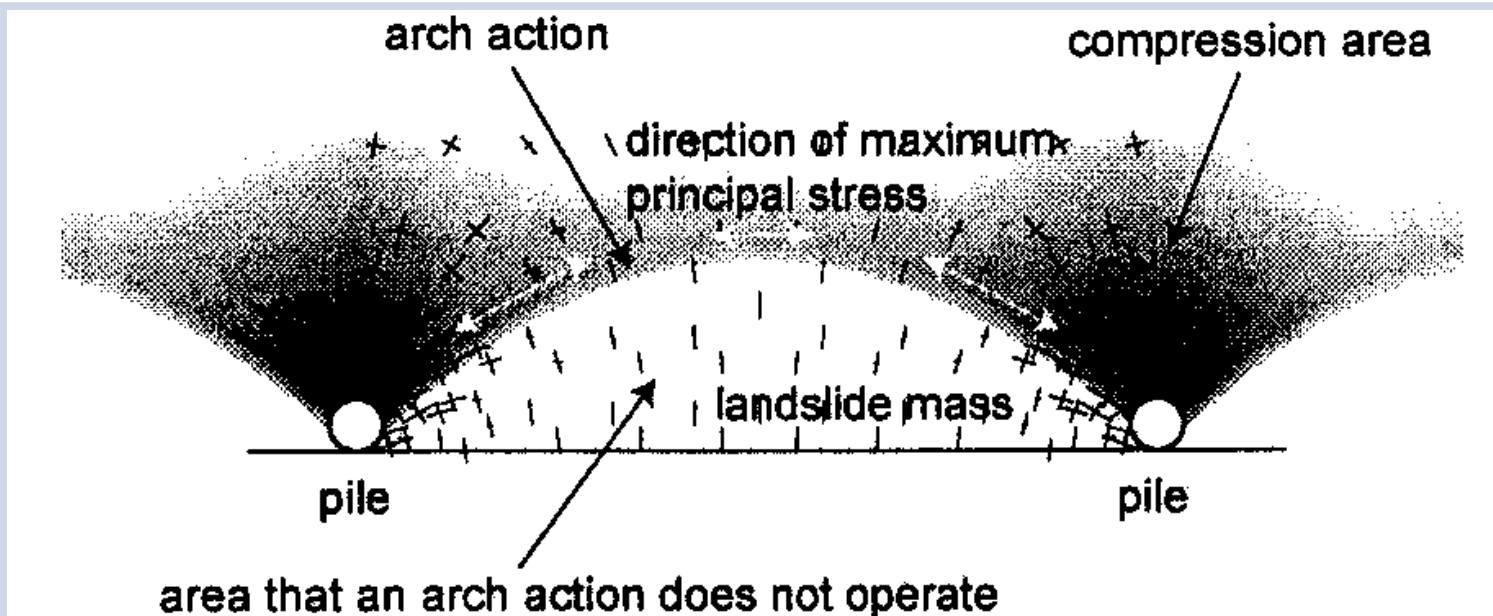
3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

FILA DI PALI DISTANZIATI – EFFETTO ARCO

L'effetto arco si manifesta:

- il terreno instabile rimane “bloccato” fra i pali per effetto arco
- l'arco resistente non si genera (interassi elevati), il terreno continua a scorrere fra i pali ma con una velocità minore a causa della presenza dei pali.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

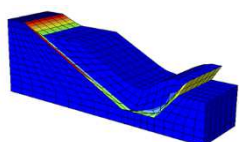
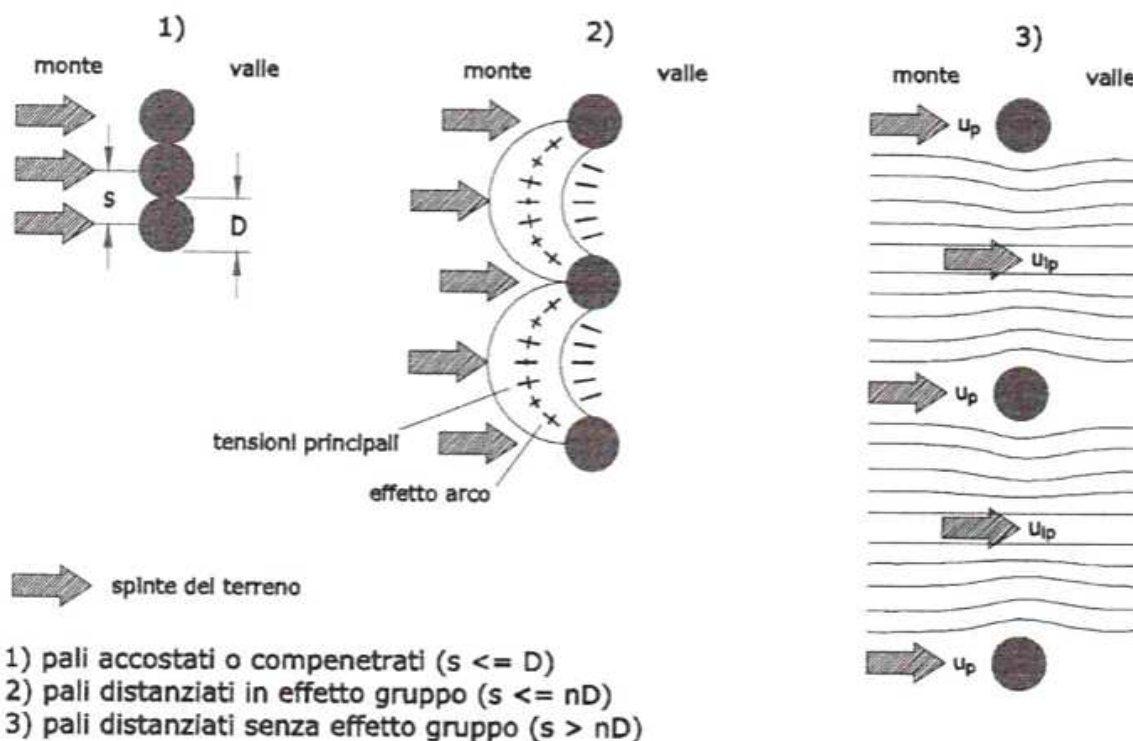
ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

FILA DI PALI DISTANZIATI – EFFETTO ARCO

In funzione dell'accostamento reciproco (s =interasse dei pali) tra i pali di diametro D lungo l'allineamento trasversale, le palificate possono essere distinte in:

- Pali accostati o compenetrati ($s \leq D$);
- A pali distanziati ($s > D$);

Nella prima configurazione l'opera è simile ad una paratia dove le spinte del terreno sovrastante gravano completamente sulla stessa e nessun flusso di terreno avviene tra i pali tra monte e valle.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

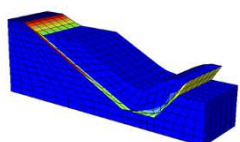
ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

FILA DI PALI DISTANZIATI – EFFETTO ARCO

Nelle seconde il terreno instabile può rifluire totalmente o parzialmente tra i pali in funzione delle caratteristiche geotecniche e dell'effetto arco che si instaura tra gli stessi. Solo con tale effetto è possibile che le spinte instabilizzanti comprese nel settore a monte tra i pali sia trasferita alla parte attiva del rinforzo ossia il palo nella zona stabile.

Quindi con l'introduzione di tale effetto avremo le seguenti tipologie:

1. **Pali accostati o compenetrati ($s \leq D$):** effetto paratia.
2. **Pali distanziati in effetto gruppo ($s \leq n \cdot D$):** n fattore di spaziatura critica. Lo spostamento è impedito dalla formazione di un effetto arco tra i pali che ne impedisce il flusso. Il carico può essere valutato in funzione del settore di competenza (interasse) con accoppiamento meccanico tra pali e i due settori di monte e valle.
3. **Pali distanziati senza effetto gruppo ($s > n \cdot D$):** lo spostamento del terreno tra i pali non è impedito, il carico indotto dai singoli pali dovrebbe essere determinato secondo modelli di flusso plastico, in questo caso i pali fungono da regolatori di velocità della frana in diminuzione.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

FILA DI PALI DISTANZIATI – EFFETTO ARCO

Studi analitici e sperimentali hanno determinato che esiste una spaziatura critica, funzione di numerosi parametri, oltre il quale effetto arco tra due pali adiacenti non si forma.

La determinazione numerica/sperimentale, necessità della misurazione dei seguenti parametri di spostamento ad una certa profondità z dal p.c.

1. *Spostamento del terreno tra i pali (u_{ip});*

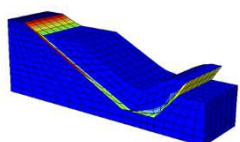
2. *Spostamento dei pali (u_p);*

3. *Rapporto tra (u_{ip}/u_p);*

Quest'ultimo parametro è concettualmente ≥ 1 , dovrebbe essere pari ad **1** affinché la presenza dei pali possa essere efficace nei confronti del movimento del terreno. Modelli numerici mostrano che per valori fino a **2** l'effetto arco si forma, al di sopra flusso del terreno.

Altri studi numerici FEM tridimensionali individuano in funzione del rapporto $s/D=3-5$ evidenza che l'intensità dello spostamento tra i pali cresce da 3→5. In relazione a quanto detto abbiamo che il range per cui si forma l'effetto arco o gruppo nel caso di più file con interazione tra i pali si ha:

$$2 \leq s/D \leq 5$$

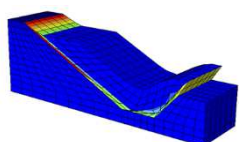
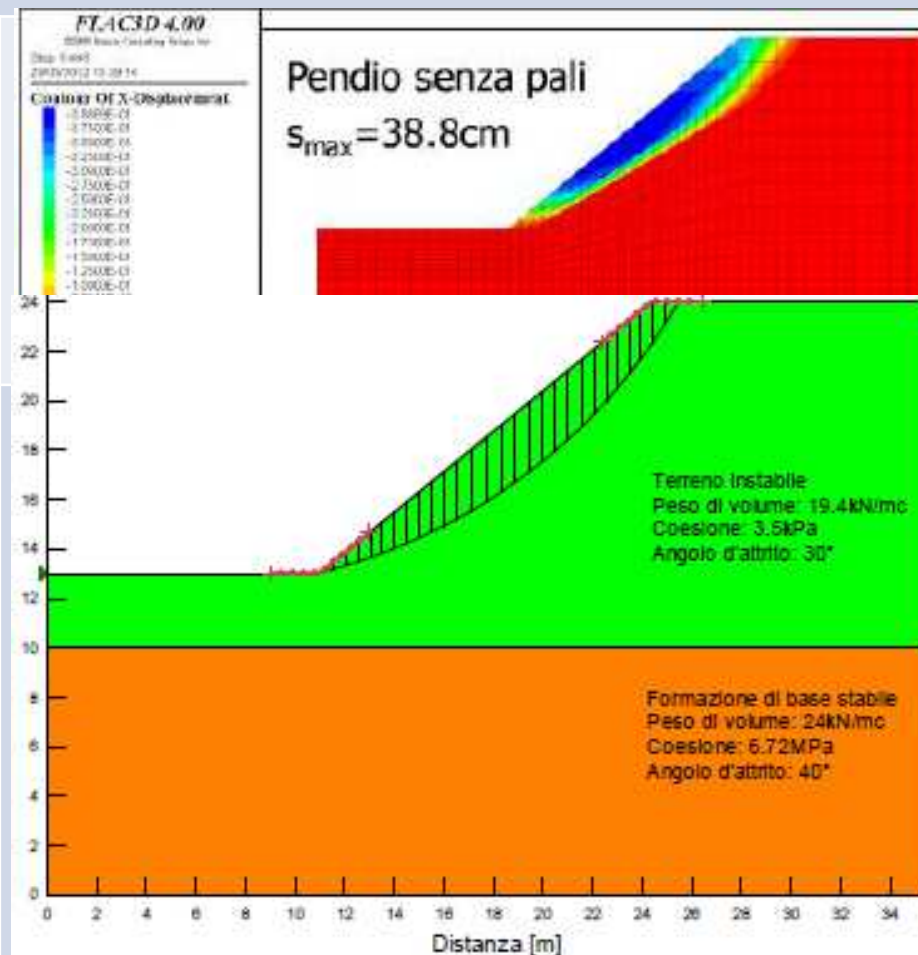


3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

ESEMPIO DI CALCOLO

La modellazione è stata eseguita per un pendio finito teorico riportato in letteratura (Al Bodour, 2010). Il pendio, costituito da un *terreno omogeneo dotato di attrito e coesione*, ha un'inclinazione di circa **39°** ed è *confinato inferiormente da un basamento roccioso orizzontale*; le caratteristiche geotecniche e geometriche principali sono riassunte in figura. L'analisi di stabilità del pendio senza pali è stata eseguita sia con il **MEL** (*Morgenstern e Price*) che con la *tecnica di riduzione della resistenza al taglio (SRM)* usando **FLAC3D** e ambedue le analisi hanno evidenziato condizioni iniziali di equilibrio prossime all'instabilità, **FS = 1.008 ÷ 1.01**.



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

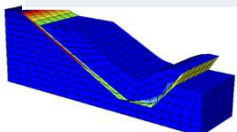
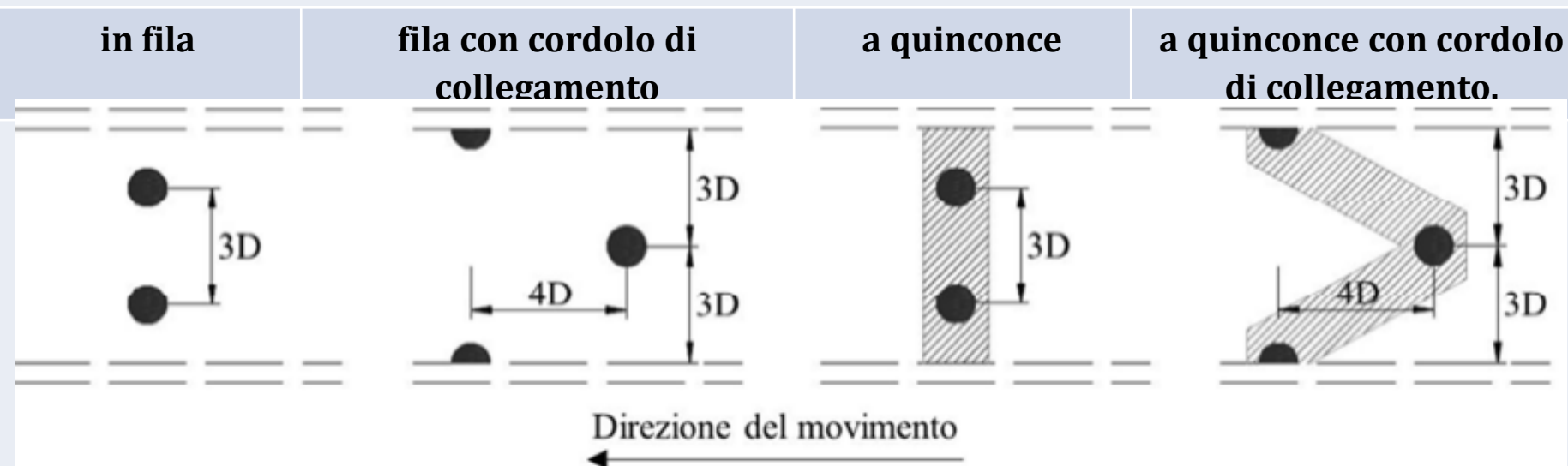
pag. 90

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

ESEMPIO DI CALCOLO

Per il rinforzo del pendio sono stati considerati pali con diametro $D = 60\text{cm}$, ubicati nella mezzzeria del pendio, e con lunghezza totale, $L = 15.5\text{m}$, sufficiente per penetrare nel basamento rigido per $L_r = 7\text{m}$. I pali sono stati inseriti nel pendio *non come elementi Beam* ma *come elementi con dimensioni e caratteristiche di resistenza al taglio reali*. Inoltre, per rendere piu verosimili le loro deformazioni all'aumentare dei movimenti del terreno, e stata assegnata loro un'armatura metallica, in quantità pari **al 3% della sezione**, e le proprietà elastiche di un cls classe **C30/37**. Le analisi hanno preso in esame quattro diverse configurazioni possibili per i pali (figura):



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

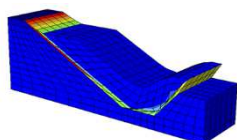
ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

ESEMPIO DI CALCOLO

Tutte le configurazioni analizzate, conducono a un aumento delle condizioni di stabilità del pendio. L'incremento percentuale del fattore di sicurezza (F_s), varia dal **13%**, nei casi di pali in riga e a quinconce senza cordolo di collegamento, fino al **21%** nel caso di pali disposti a quinconce con cordolo rigido di collegamento.

Configurazione pali	F_s	ΔF_s [%]	$S_{\max, \text{terreno}}$ [cm]	$S_{\max, \text{pali}}$ [cm]	S.A.	$F_{\text{up}} - F_{\text{down}}$ [kN]	η
Senza pali	1.01	/	38.8	/	/	0	1.000
In riga	1.14	13	3.4	3.2	1.15	133	0.387
In riga + cordolo	1.14	13	3.4	3.2	1.15	133	0.387
Quinconce (m)				3.5	1.14	71.2	0.619
Quinconce (v)	1.14	13	3.8	3.0	1.25	93.8	0.528
Totale						81.9	0.562
Quinc. + cordolo (m)				2.0	1.45	105.7	0.467
Quinc. + cordolo (v)	1.22	21	3.0	2.0	1.5	95.3	0.460
Totale						116.9	0.410

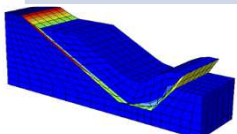
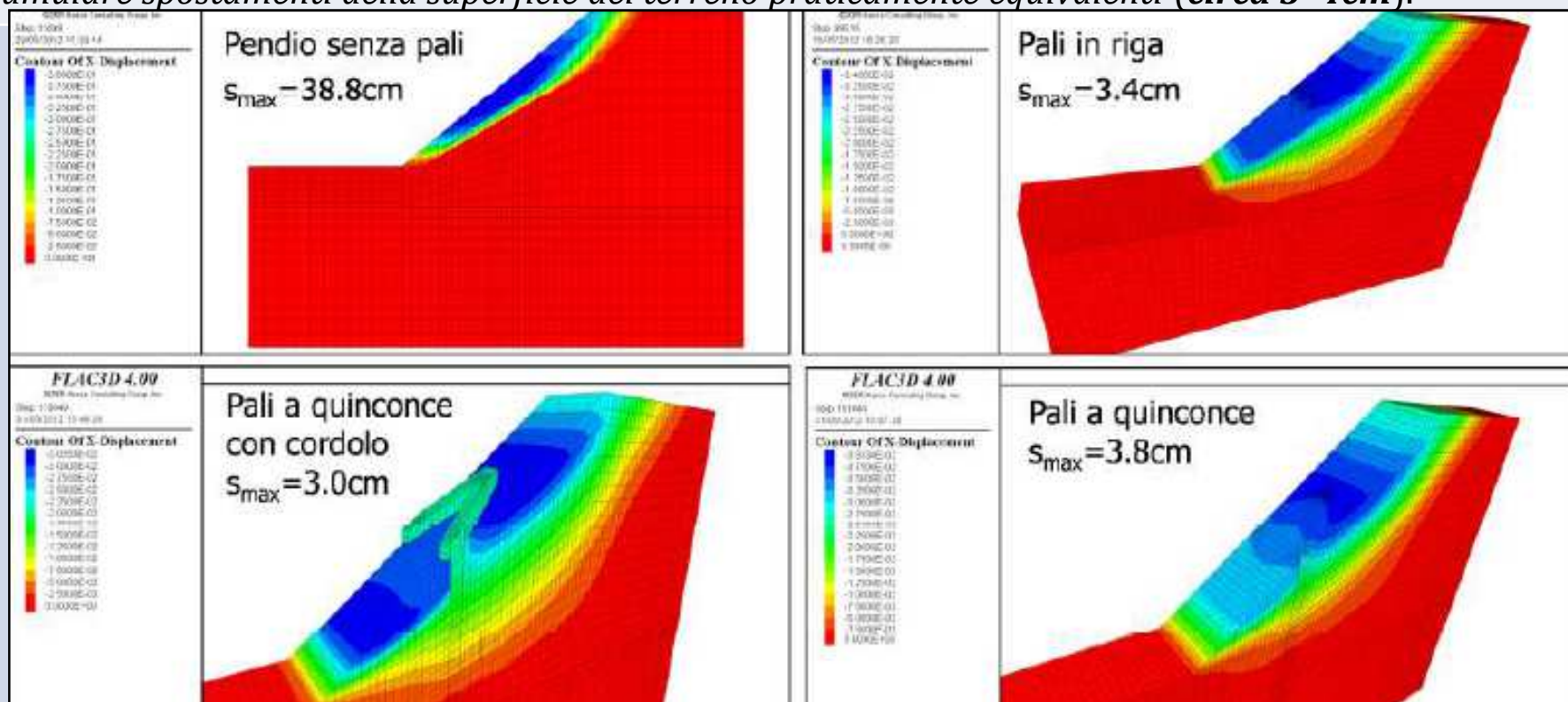
Nota: le lettere (m) e (v) stanno ad indicare, rispettivamente, la prima fila di pali a monte e la seconda fila di pali a valle; con la voce totale si indica il risultato complessivo dato dal contributo di entrambe le file di pali (monte e valle).



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR* ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

ESEMPIO DI CALCOLO

Considerando la riduzione degli spostamenti del terreno ($S_{MAX-TERRENO}$) per effetto della presenza dei pali, si può concludere che tutte le soluzioni relative allo stato limite ultimo ($Fs \approx 1.0$) portano a *cumulare spostamenti della superficie del terreno praticamente equivalenti (circa 3–4cm).*



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

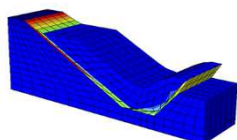
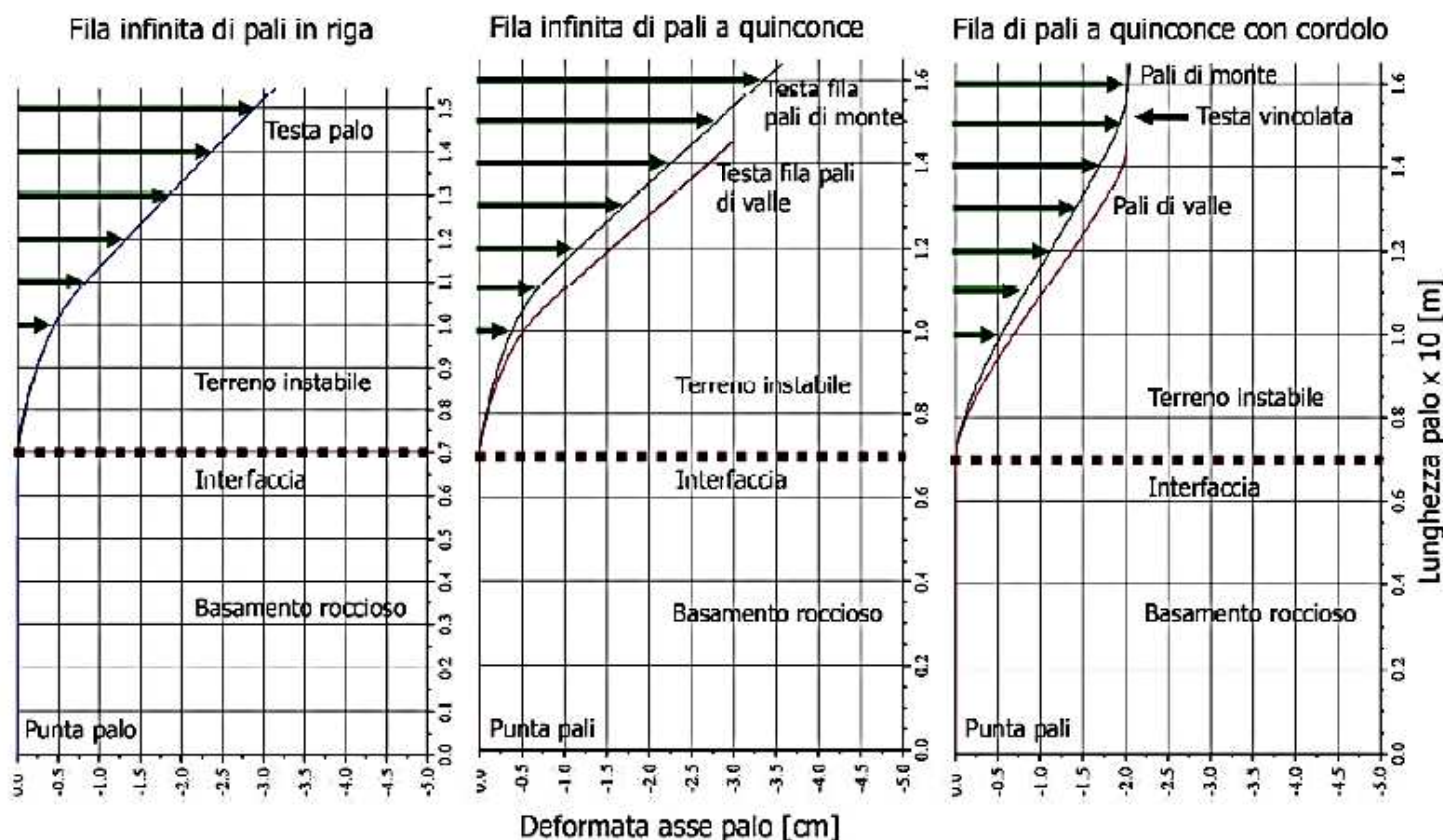
CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 93

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR* ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

L'analisi degli spostamenti dei pali riportati in figura evidenzia che la disposizione dei pali a quinconce e cordolo di collegamento, oltre a sviluppare il fattore di sicurezza maggiore, consente ai pali di subire lo spostamento minore, **circa 2 cm** a fronte di spostamenti di oltre **3cm** negli altri casi.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

I valori massimi di *sufficient arching* sono stati ottenuti per un punto ubicato ad una profondità di circa 1.0 m dalla testa dei pali e sono risultati compresi nell'intervallo **1-2** ed il valore migliore, **S.A. = 1.15**, e quello relativo alla configurazione di pali in riga.

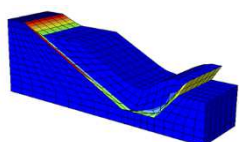
Al fine di valutare l'effetto arco nel suo complesso, per ogni configurazione dei pali si è individuato il fattore di trasferimento η (Yamin, 2007), che serve a quantificare la spinta del terreno trasmessa immediatamente a valle dei pali e che può essere espresso come:

$$\eta = \frac{F_{DOWN}}{F_{UP}}$$

dove:

- F_{DOWN} : è la risultante delle forze orizzontali (dir. Movimento) nella faccia del palo a valle, si può determinare con una doppia integrazione degli sforzi orizzontali (σ'_x), sullo spessore del modello (S) ed una seconda volta sulla porzione di palo al di sopra della superficie di potenziale rottura;
- F_{UP} : è la risultante delle forze orizzontali sul lato a monte del palo.

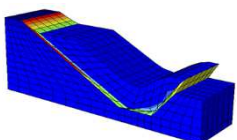
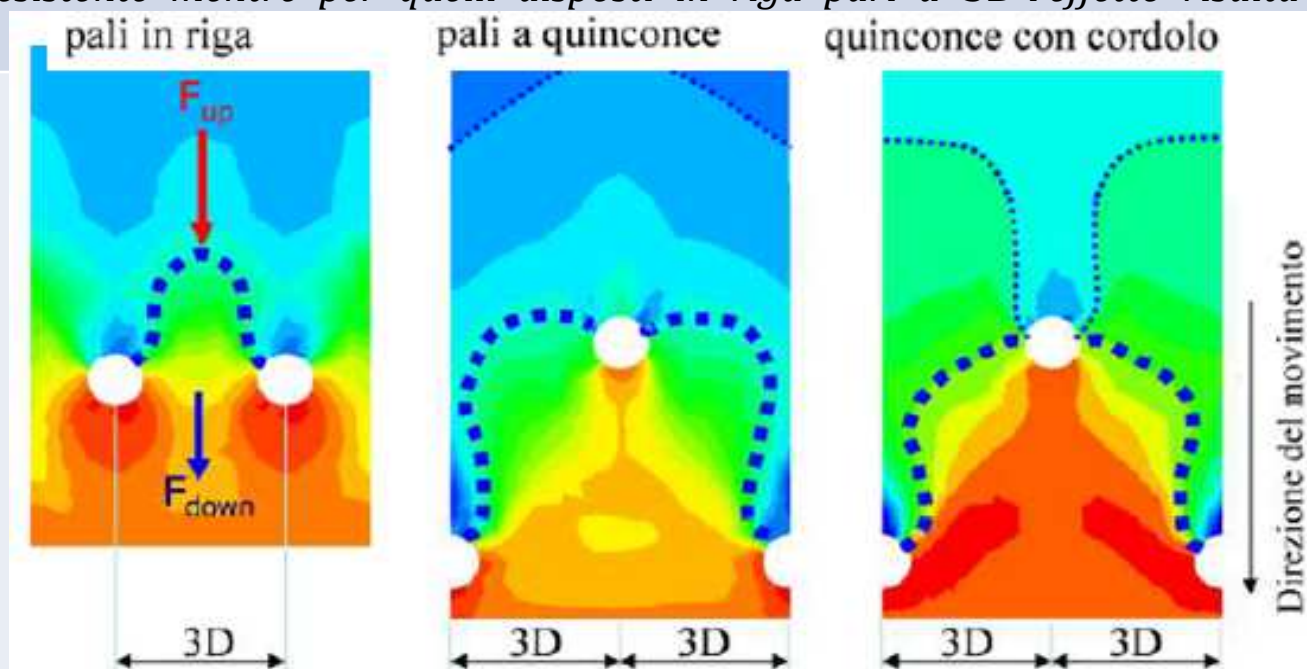
I risultati migliori in termini di riduzione della spinta a valle e di fattore di trasferimento sono stati ottenuti per la configurazione dei pali in riga, senza e con cordolo di collegamento, e pari rispettivamente a $F_{UP} - F_{DOWN} = 133 \text{ kPa}$ - $\eta = 0.387$.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

ANCORA SUI METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI O DISCRETI

Per i pali disposti a quinconce, sono stati ottenuti valori soddisfacenti solo per quelli collegati in testa da un cordolo con valori pari a $F_{UP} - F_{DOWN} = 116.9 \text{ kPa} - \eta = 0.410$. Nella conf. a quinconce senza cordolo, il diverso spostamento della testa dei pali fa sì che le riduzioni di spinta operate dalle due file siano indipendenti, infatti la riduzione totale della spinta (81.9 kN) risulta inferiore a quella della sola seconda fila di pali (93.8 kN). Questa riduzione di spinta osservabile per ambedue le configurazioni a quinconce è dovuta al fatto che la spaziatura fra i pali a valle, pari a $6D$ non consente il pieno sviluppo dell'arco resistente mentre per quelli disposti in riga pari a $3D$ l'effetto risulta sensibilmente più marcato.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

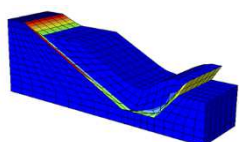
METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI- METODI AGLI SPOSTAMENTI

I metodi basati sugli spostamenti (modelli p-y) sono il miglior compromesso tra l'esigenza di calcoli non molto complessi e quello di rappresentare adeguatamente l'interazione tensionale deformativa dell'accoppiamento palo-terreno

- Permettono di calcolare tale interazione sulla base dell'accoppiamento elastico-elastoplastico tra palo e terreno, sulla base delle pressioni trasmesse al palo dal movimento relativo del terreno instabile.
- Quindi come per i metodi basati sulla pressione limite, non cerchiamo una forza resistente estrapolata da un modello complessivo del versante (metodo disaccoppiato).
- A differenza dei metodi basati sulla pressione il cui valore limite in fase di plasticizzazione è calcolato con l'ipotesi di palo rigido, nel metodo degli spostamenti si simula il comportamento dell'insieme dalle fase iniziale elastica a quella non lineare fino alla fase plastica tenendo conto che il palo è un elemento beam lineare o non.

In questo metodo il palo è modellato come una trave su suolo elastico lineare, non lineare ed elastoplastico (molle) soggetto:

1. *Spostamenti impressi dal terreno in movimento nella parte di palo passivo (tratto instabile);*
2. *Spostamenti impressi dalla deformazione del palo nella parte attiva (sotto la superficie di rottura)*



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI- METODI AGLI SPOSTAMENTI

Nella porzione di palo sovrastante la superficie di rottura ($z=0$), il comportamento dell'insieme palo terreno in movimento in grado di esprimere la capacità laterale del palo è espresso dalla seguente equazione differenziale:

$$EI \cdot \left(\frac{d^2 y_1}{dz^4} \right) = q(z) = p$$

In cui:

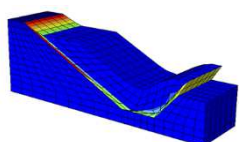
- EI rigidezza flessionale del palo;
- y_1 :spostamento del palo nella parte passiva;
- $q(z)$: pressione del terreno calcolata sul principio di deformazione plastica.

Al di sotto della superficie di rottura ($z<0$) palo attivo, l'equazione che governa la risposta del palo è la seguente equazione :

$$EI \cdot \left(\frac{d^2 y_2}{dz^4} \right) = -K_2 \cdot y_2$$

dove :

- K_2 : modulo di reazione orizzontale del terreno nella parte attiva;
- y_2 :spostamento del palo nella parte attiva ;



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI- METODI AGLI SPOSTAMENTI

Nella parte passiva, la pressione $q(z)$ è data secondo il modello $p - y$ o $p - \delta$ dalla seguente differenza tra spostamenti (spostamento relativo tra terreno e palo) che rappresenta l'accorciamento della molla ideale di coefficiente k_1 :

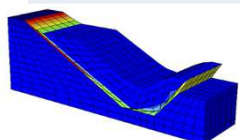
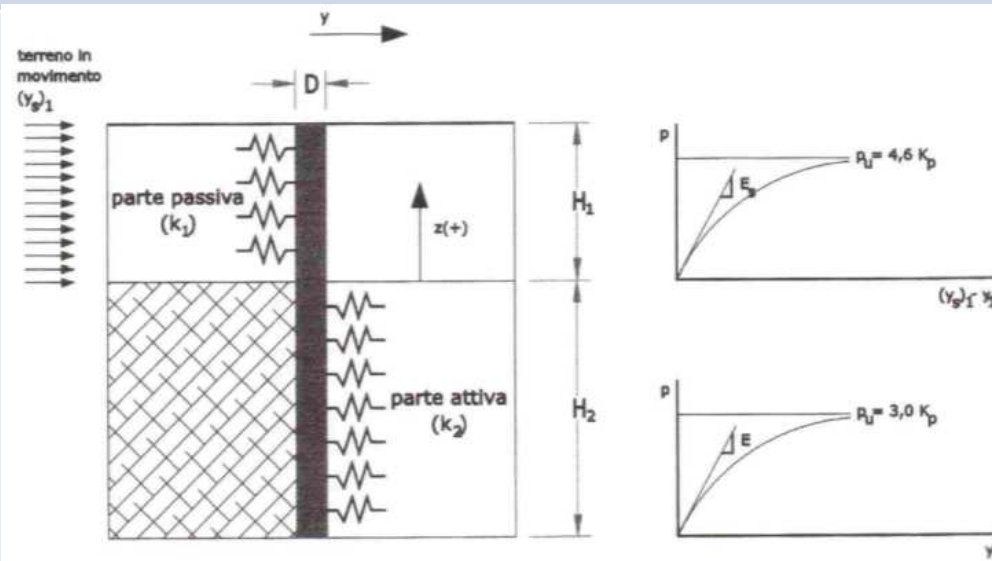
$$\delta_1 = (y_s)_1 - y_1$$

dove: $(y_s)_1$: è lo spostamento del terreno di *free-field*, prima dell'installazione del palo.

Pertanto l'equazione che regge il problema della parte passiva diventa:

$$EI \cdot \left(\frac{d^2 y_1}{dz^4} \right) = p = k_1 [(y_s)_1 - y_1] = k_1 \cdot \delta_1$$

La curva $p - \delta$ essere rappresentata anche da una iperbolica (Jeong e Ali, 2003), caratterizzata da una pressione ultima p_u (pressione passiva di Rankine K_p) e da una rigidezza tangente k_s . L'equazione può essere risolta o con metodi numerici FEM/FDM.



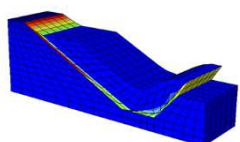
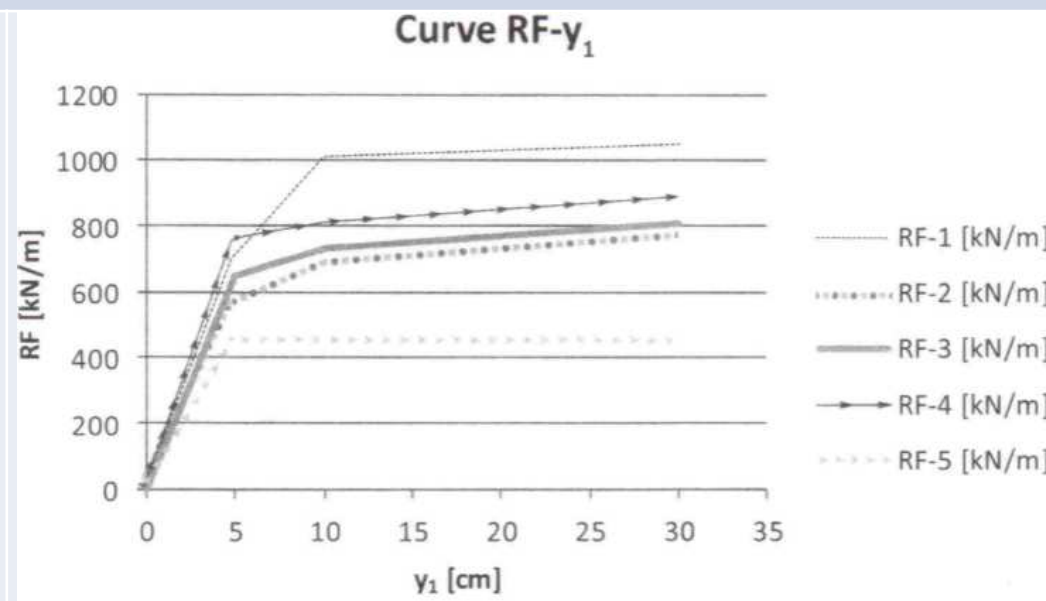
3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

METODI DI INTERAZIONE CON PALI DISTANZIATI- METODI AGLI SPOSTAMENTI

La difficoltà nell'utilizzo di questi metodi è insita nella corretta valutazione delle seguenti caratteristiche:

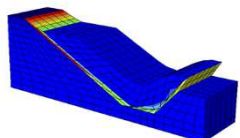
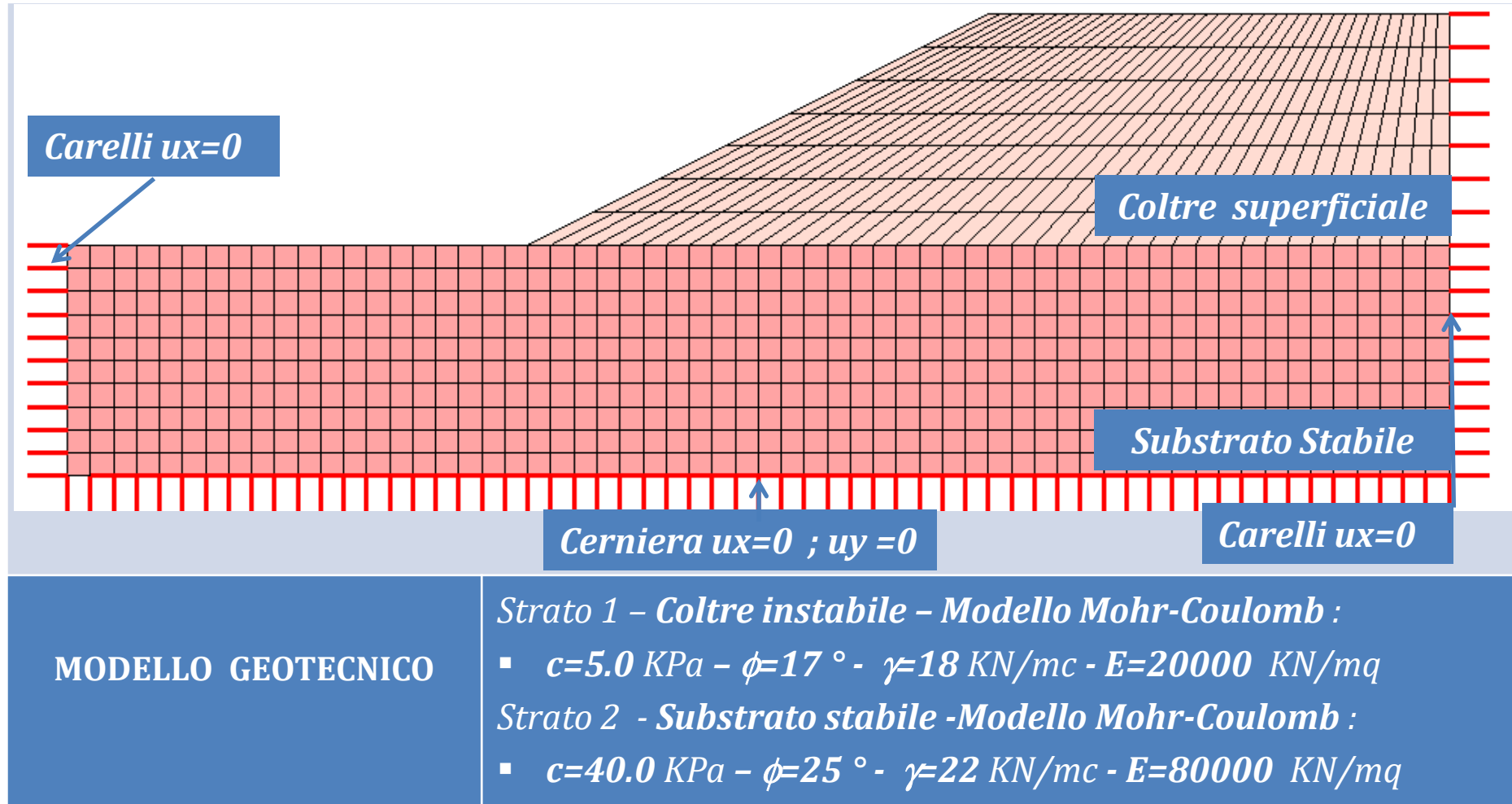
1. *Profilo degli spostamenti nel terreno instabile (spostamenti assoluti free-field), questo essendo in campo libero in assenza di rinforzi non consente la previsione dei flussi plastici che si innescano intorno al palo;*
2. *Profilo degli spostamenti del palo;*
2. *Modulo di reazione orizzontale del terreno instabile e stabile;*
3. *Pressione limite orizzontale dei terreni (stabile e non);*

Relativamente al campo di spostamenti nella parte instabile e nel palo si può fare riferimento a deformate inclinometriche o a modellazioni avanzate tipo FEM che possono essere :costanti, triangolari-trapezoidali. I valori di p_u possono essere ridotti in funzione dell'effetto arco o gruppo. Le costanti di sottofondo da letteratura in assenza di misurazioni specifiche.



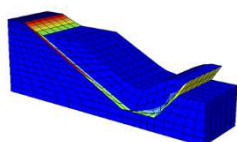
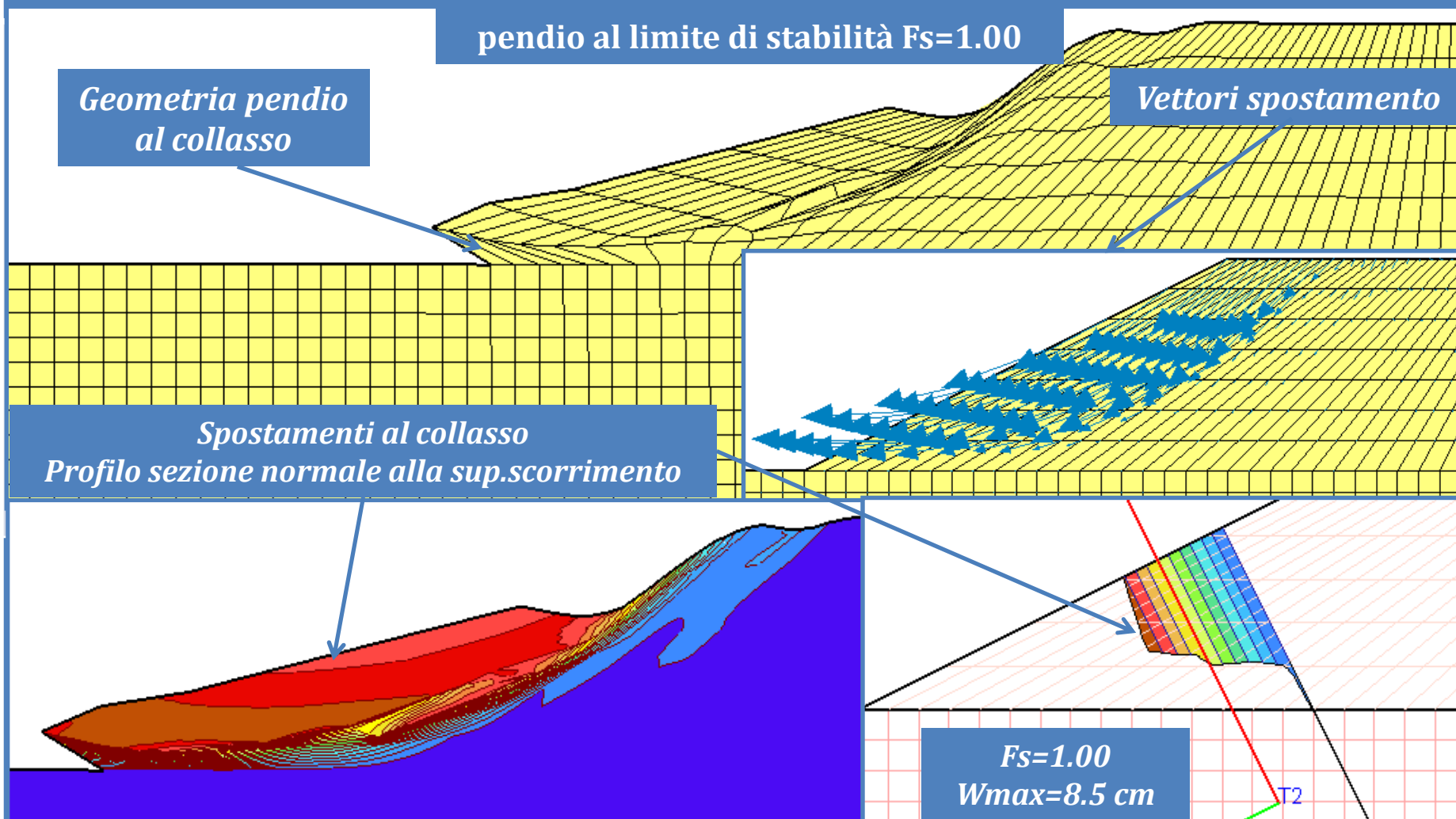
3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

METODI DI INTERAZIONE COMPLETI FEM – CASO DI STUDIO



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

METODI DI INTERAZIONE COMPLETI FEM – CASO DI STUDIO



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

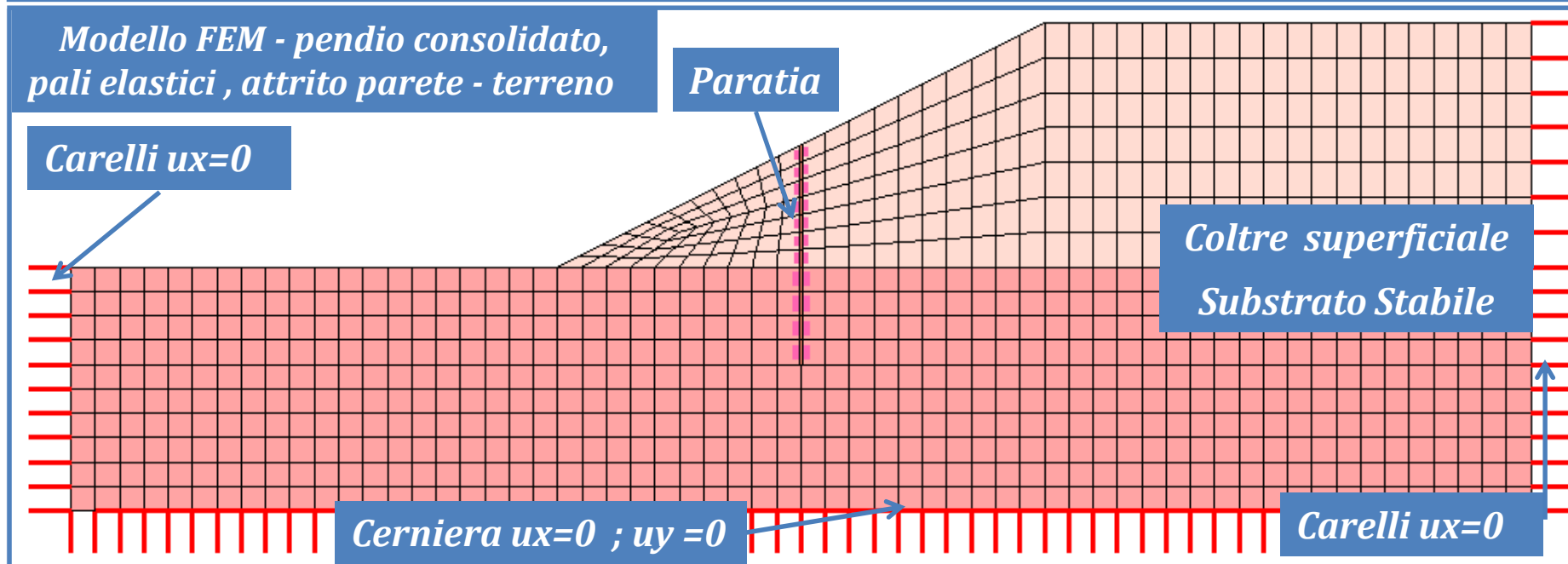
CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 102

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

METODI DI INTERAZIONE COMPLETI FEM – CASO DI STUDIO



MODELLO GEOTECNICO

Strato 1 – Coltre instabile – Modello Mohr-Coulomb :

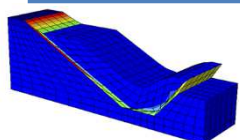
- $c=5.0$ KPa - $\phi=17^\circ$ - $\gamma=18$ KN/mc - $E=20000$ KN/mq

Strato 2 - Substrato stabile -Modello Mohr-Coulomb :

- $c=40.0$ KPa - $\phi=25^\circ$ - $\gamma=22$ KN/mc - $E=80000$ KN/mq

Paratia di sostegno: Pali $\phi 80$ -i=1.60m H=h_o+l_f=5.00+4.00=9.00 m

- *Pali trivellati in c.a. a comportamento lineare.*



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

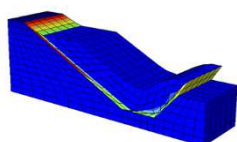
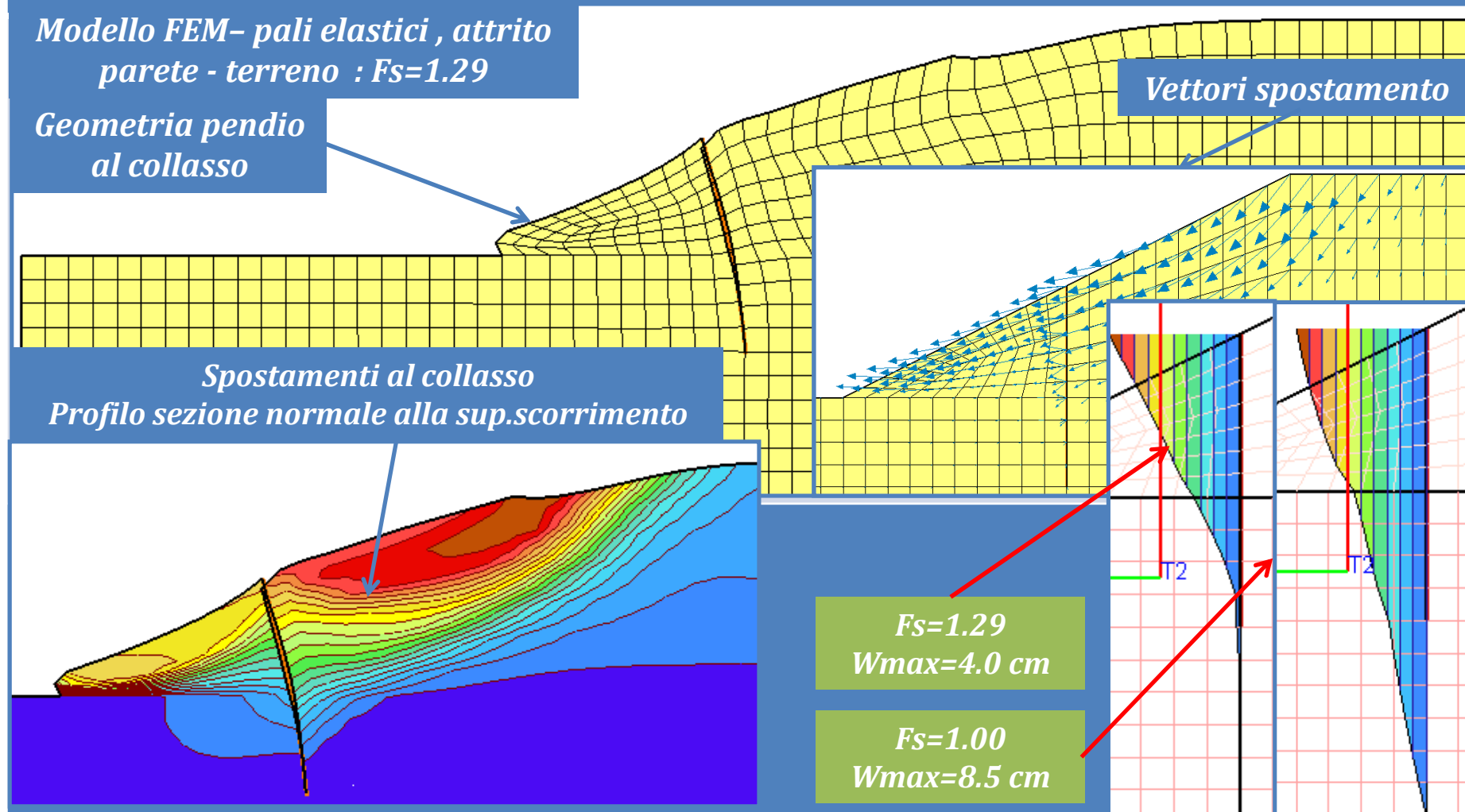
METODI DI INTERAZIONE COMPLETI FEM – CASO DI STUDIO

*Modello FEM– pali elastici , attrito
parete - terreno : $F_s=1.29$*

*Geometria pendio
al collasso*

Vettori spostamento

*Spostamenti al collasso
Profilo sezione normale alla sup.scorrimento*



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 104

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

METODI DI INTERAZIONE COMPLETI FEM – CASO DI STUDIO

*Modello FEM– pali inelastici, attrito
parete - terreno : $F_s=1.18$*

*Geometria pendio
al collasso*

Vettori spostamento

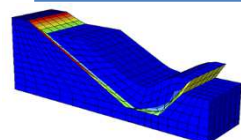
*Diagramma dei momenti
Zona plasticizzata*

Spostamenti al collasso

Profilo sezione normale alla sup.scorrimento

$F_s=1.00$
 $W_{max}=8.5 \text{ cm}$

$F_s=1.29$
 $W_{max}=6.0 \text{ cm}$



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

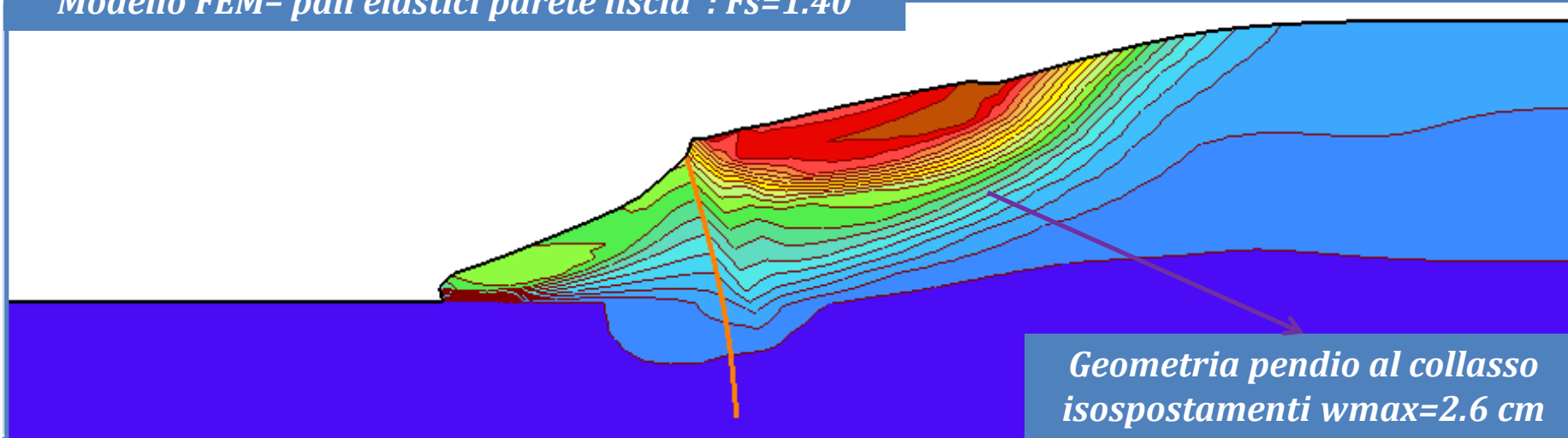
23 Settembre 2017

pag. 105

3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

METODI DI INTERAZIONE COMPLETI FEM – CASO DI STUDIO

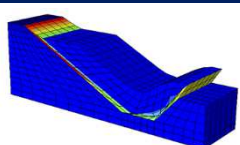
Modello FEM– pali elastici parete liscia : $F_s=1.40$



RIEPILOGO E CONCLUSIONI

- *Pendio originario $F_s=1.00 \rightarrow S_{MAX}=8.50\text{ cm}$;*
- *Pendio con paratia elastica ruvida : $F_s=1.29 \rightarrow S_{MAX}=4.0\text{ cm}$;*
- *Pendio con paratia elastica liscia : $F_s=1.40 \rightarrow S_{MAX}=2.60\text{ cm}$;*
- *Pendio con paratia inelastica ruvida $F_s=1.18 \rightarrow S_{MAX}=6.00\text{ cm}$;*

Dai risultati ottenuti si può evincere come progettare un'opera di consolidamento tipo paratia è molto complesso, in quanto i parametri in gioco vanno tenuti in debito conto al fine di ottenere un **grado di sicurezza affidabile e l'opera in condizioni di sicurezza.**



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

TIPOLOGIE DI OPERE

STRUTTURE DI SOSTEGNO SPECIALI – POZZI STRUTTURALI E DRENANTI

Il calcolo dei pozzi risulta molto complesso ed incerto rispetto a quello dei pali di fondazione essendo questo un'opera tozza con basso valore del rapporto altezza/dimensione di base.

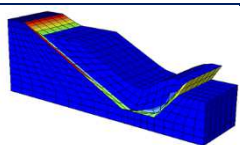
I pali per la loro snellezza, se carichi orizzontalmente interagiscono con il terreno solo con sollecitazioni normali che si esplicano lungo il fusto. Nel caso dei pozzi ai fini della stabilità, giocano un ruolo importante:

- ☐ *Le tensioni normali e tangenziali alla base del pozzo;*
- ☐ *Le tensioni tangenziali lungo la superficie laterale.*

Brandl (1985) ha esaminato il criterio di proporzionamento dei pozzi di fondazione. Nella classica ripartizione del carico limite fra la resistenza alla base e la resistenza laterale, lo stesso afferma che le teorie relative alle fondazioni superficiali ben si prestano per il calcolo della resistenza alla base. Inoltre mette in evidenza due interessanti aspetti caratteristici di queste opere, legati alle loro dimensioni:

- *La drastica riduzione della resistenza laterale all'aumentare del diametro del pozzo ;*
- *Il conseguente aumento dell'aliquota di carico gravante sulla base.*

Da quanto si evince non è possibile assimilare il comportamento meccanico dei pozzi a quello dei pali e all'uso delle formulazioni per questi ultimi. Analogamente non appare lecito attendere le differenti geometrie ed inerzie assimilare una cortina di pozzi a quello di una paratia.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

TIPOLOGIE DI OPERE

STRUTTURE DI SOSTEGNO SPECIALI – POZZI STRUTTURALI E DRENANTI

Un primo problema da affrontare nel calcolo dei pozzi è quello della valutazione delle spinte trasmesse dalla movimento franoso.

Se si ha che fare con una cortina di pozzi, il problema risulta del tutto simile a quello affrontato per le paratie. Il problema può essere ipotizzato piano e ogni pozzo sarà caricato da una forza $P = S \cdot i$ dove i è l'interasse dei pozzi.

Se invece la stabilizzazione viene eseguita adottando pozzi distanziati, il problema si complica in quando dovranno essere presi in conto gli effetti tridimensionali.

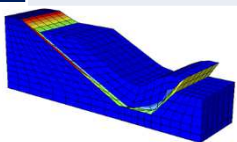
A tale proposito Brandl (1993) fa riferimento ad una larghezza di influenza b' che usualmente viene posta minore di tre volte il diametro. Lo stesso autore sulla base di osservazioni sperimentali suggerisce che:

- nella zona attiva b' venga assunto pari $1.2 - 2.5 \cdot D$;
- nella zona passiva prudenzialmente b' sarà pari a $1.0 - 1.5 \cdot D$.

In questo caso il pozzo verrà prudenzialmente proporzionato rispetto alla massima azione che la frana può esercitare su di esso, ossia:

$$P = b' \cdot S_p$$

Dove S_p è la spinta passiva calcolata nell'ipotesi bidimensionale.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

TIPOLOGIE DI OPERE

STRUTTURE DI SOSTEGNO SPECIALI – POZZI STRUTTURALI E DRENANTI

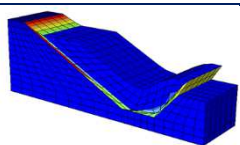
Si ipotizza, cioè che il terreno instabile possa subire importanti scorrimenti nell'intorno del pozzo e tali da mobilitare le condizioni di spinta passiva.

Il calcolo di un intervento di stabilizzazione con pozzi deve prevedere le seguenti fasi:

- *Verifica di stabilità globale dell'intervento per accertarsi che non sussistono, al di sotto del pozzo , superfici di potenziale scorrimento con margini di sicurezza inferiori a quelli previsti in progetto;*
- *Verifica della stabilità del pozzo sottoposto alla spinta del terreno instabile al di sopra della superficie critica di scorrimento;*
- *Verifica strutturale del pozzo;*

Nella stabilità del pozzo interverranno anche le reazioni esplicate alla base. La verifica viene prudenzialmente condotta in esercizio o stati limite e condizioni drenate. Nel calcolo delle sollecitazioni del pozzo lo stesso viene visto come corpo rigido è considerato un cinematismo consistente in una rotazione attorno all'asse della base.

In corrispondenza del baricentro di fondo, si verificherà un *cedimento verticale* ρ , *uno spostamento orizzontale* η *ed una rotazione* ω .Queste tre componenti di spostamento possono essere determinate dalle 3 equazioni di equilibrio dell'intero pozzo sottoposto ad azioni esterne.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

TIPOLOGIE DI OPERE

STRUTTURE DI SOSTEGNO SPECIALI – POZZI STRUTTURALI E DRENANTI

Il pozzo è soggetto all'azione nota P mentre alla base e sulla superficie laterale reagisce con solo tensioni normali (solo sup. Laterale) come da ipotesi cautelativa alla Brandl. Si ipotizzano comportamenti a molle lineari, non lineari elastiche ed elastoplastiche. Per un modello lineare del terreno non resistente a trazione il sistema di equazioni di equilibrio si semplifica è diventa:

$$\omega \cdot (A + B) + \eta \cdot C = M$$

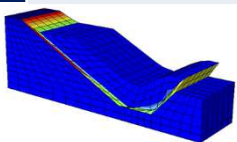
$$\omega \cdot D + \eta \cdot E = H$$

$$\rho \cdot V = N'$$

- H : componente orizzontale della spinta P alla base del pozzo;
- P : carico agente sul pozzo;
- N' : peso del pozzo alleggerito della sottospinta idraulica +componente verticale della spinta P ;
- M : momento di tutte le forze che si esplicano alla base;

Nella trattazione semplificata si sono fatte le seguenti ipotesi :

- *Il regime di pressioni neutre risulti uniforme nel tratto al di sotto della superficie critica e quindi non intervengono sulle equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale;*
- *Trascurando le tensioni tangenziali sulla superficie del pozzo tutto il carico N viene assorbito alla base;*



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

TIPOLOGIE DI OPERE

STRUTTURE DI SOSTEGNO SPECIALI – POZZI STRUTTURALI E DRENANTI

I coefficienti che intervengono nel sistema di equazioni rappresentano le rigidezze dello scheletro solido per le varie componenti di spostamento , ad esempio:

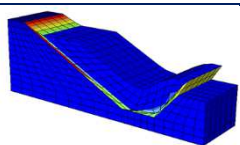
- *A e B rappresentano la coppia di reazione esplicata alla base e dalla superfice laterale per rotazione unitaria;*
- *C rappresenta la coppia di esplicata dalla superfice laterale per rotazione unitaria;*
- *D ed E rappresentano le reazioni orizzontali esplicate dalla superfice laterale del pozzo per rotazione e spostamento unitari;*
- *V rappresenta la reazione verticale della base del pozzo pe cedimento unitario.*

Se si fa riferimento ad un pozzo a sezione circolare di diametro **D** ed altezza **L** al di sotto della superfice critica e si assimila l'azione della superfice del pozzo a quella di un area rettangolare di lati **D** ed **L** si hanno i seguenti valori:

$$A = K_{v1} \cdot \pi D^2 / 64 \quad B = K_h \cdot B \cdot L^3 / 3 \quad C = K_h \cdot B \cdot L^2 / 2 \quad D = C \quad E = K_h \cdot B \cdot L \quad V = K_{v2} \cdot \pi D^2 / 4$$

I termini K_h , K_{v1} e K_{v2} rappresentano i moduli di reazione orizzontale e verticali del terreno già noti per il calcolo delle paratie.

Una volta risolto il sistema e determinato ω, η, ρ sarà possibile calcolare le pressioni d'interazione terreno-pozzo e le sollecitazioni per le verifiche strutturali.



3. INTERAZIONE STRUTTURA – PENDIO INSTABILE: *Meccanismi di trasferimento delle azioni, FS progetto, resistenza degli interventi, ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilità, metodi di calcolo per pali e pozzi i soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche GEO-STR*

TIPOLOGIE DI OPERE

STRUTTURE DI SOSTEGNO SPECIALI – POZZI STRUTTURALI E DRENANTI

Con riferimento alle figure sotto riportate , del modello geotecnico strutturale, *sul lembo superiore del pozzo, in corrispondenza della superficie critica potrà essere attinto il valore di plasticizzazione della tensione normale σ_h in un tratto Z_p* . In tal caso il calcolo andrà eseguito valutando in tale tratto le reazioni esplicate in campo plastico. In realtà i termini delle equazioni andranno calcolate sostituendo ad $L \rightarrow L - Z_p$ ed aggiungendo le sollecitazioni normali e flettenti H_p e M_p della zona plastica . A valle del calcolo bisognerà verificare se in quel tratto è stata raggiunta la reazione plastica. **Il metodo può essere facilmente esteso con la presenza di ancoraggi passivi ed attivi.**

