GEO 3
STUDIO DI CONSULENZA GEOLOGICA

OMUNI DI CAIRO MONTENOTTE - SAVONA

PROVINCIA DI SAVONA

PARCO EOLICO PIAN DEL MELO 9 MW

V480 – Procedimento di espressione della VIA Regionale relativo al progetto di "Realizzazione di un impianto eolico denominato "Parco eolico Pian del Melo - 9 MW", composto da due aerogeneratori, da realizzarsi in loc. Piandelmelo, nei Comuni di Savona (SV) e Cairo Montenotte (SV)", proponente: BH Wind S.r.l. - Pronuncia di Valutazione di Impatto Ambientale positiva con condizioni ambientali

CONDIZIONE 1 – SUOLO

settembre 2026

COMMITTENTE: **BH Wind s.r.l.**
Via Zara 5
23100 SONDRIO (SO)

BH WIND S.R.L. Via Zara, 5 23100 SONDRIO (SO) C.Fisc./Part. IVA: 01056740141

Marco Bissi
29/10/2026 16:40:11 UTC+0100

Geologo Danilo Grossi

ORDINE DEI GEOLOGI della LOMBARDIA
GROSSI DANILO nº 767

DANILO GROSSI
29.10.2026 16:37:24 GMT+01:00

Premessa

Il presente lavoro, eseguito su incarico della **Società BH Wind s.r.l.** di Sondrio (SO), costituisce la risposta alla richiesta di integrazioni formulata da Regione Liguria nell'ambito del procedimento *"V480 – Procedimento di espressione della VIA Regionale relativo al progetto di "Realizzazione di un impianto eolico denominato "Parco eolico Pian del Melo - 9 MW", composto da due aerogeneratori, da realizzarsi in loc. Piandelmelo, nei Comuni di Savona (SV) e Cairo Montenotte (SV)", proponente: BH Wind S.r.l. - Pronuncia di Valutazione di Impatto Ambientale positiva con condizioni ambientali".* In particolare, è stata data risposta alle seguenti richieste contenute nella:

Condizione 1 – suolo

- si preveda l'ipotizzata ricollocazione del cavidotto ai fini di non interferire con le aree P4 ricadenti nel Comune di Savona,
- si sviluppino le specifiche trattazioni di compatibilità previste dall'art. 16 c. 3quater (aree P3b) della Norma di attuazione del Piano di bacino per il rischio idrogeologico del Torrente Letimbro per le opere ricadenti nel territorio del comune di Savona;
- venga fatta una analisi dettagliata di specifiche precauzioni operative per le opere che lambiscono le aree Fa nel territorio del comune di Cairo Montenotte.

si preveda l'ipotizzata ricollocazione del cavidotto ai fini di non interferire con le aree P4 ricadenti nel Comune di Savona,

Tratto interferente con le aree P4 in comune di Savona

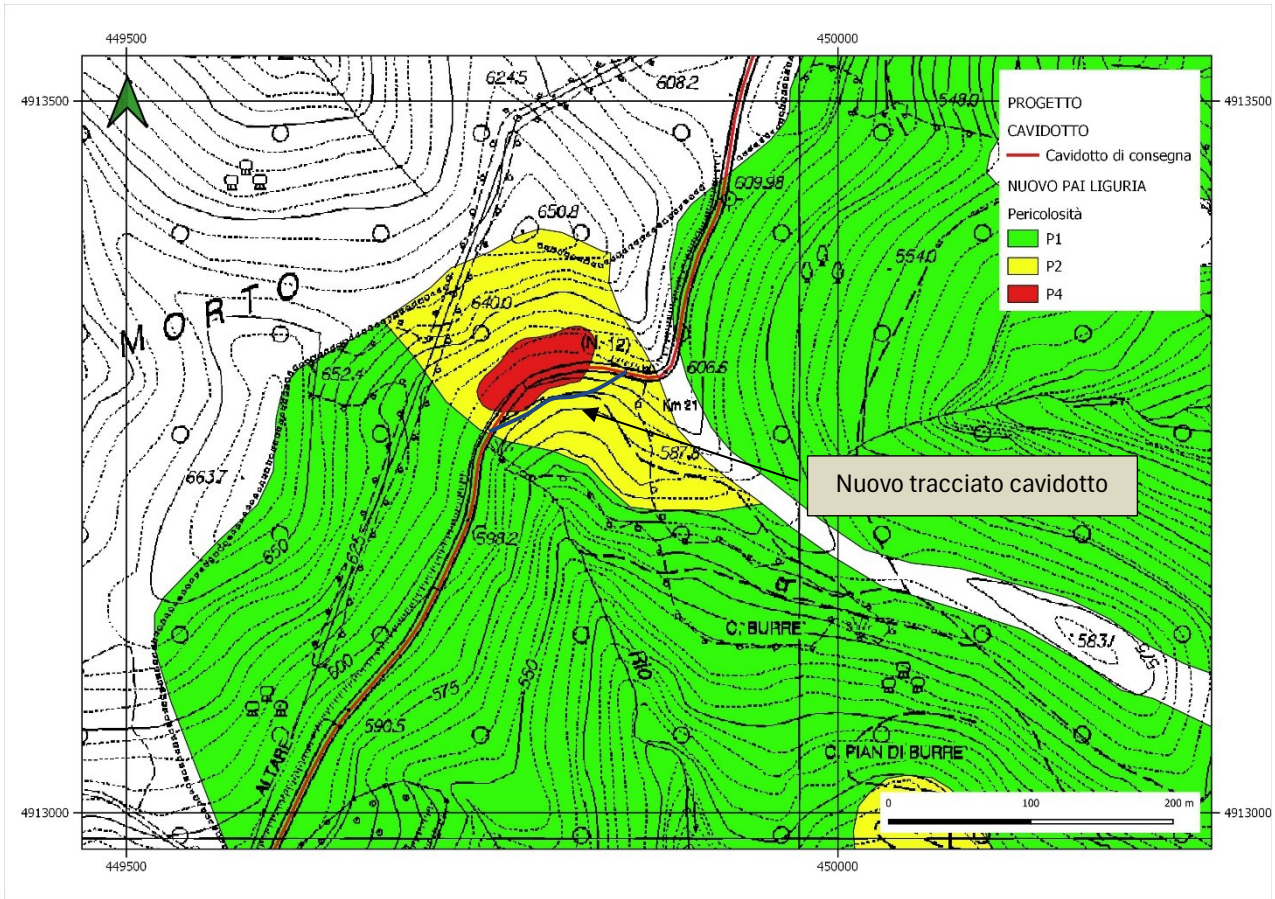
La zona posta in classe di Pericolosità P4 – *aree instabili interessate da dissesti di natura geomorfologica attivi*; *- area a pericolosità molto elevata* – identifica un tratto di scarpata a monte della strada provinciale situata nella parte sommitale del bacino del Rio Burre. Nel corso dei sopralluoghi realizzati non si sono rilevate situazioni di dissesto attive ed attualmente la scarpata è completamente vegetata, colonizzata dal bosco (foto 1) e costituita da conglomerato di Molare affiorante a bordo strada in corrispondenza del dosso a nord.

In accordo a quanto richiesto il cavidotto verrà ricollocato lungo la scarpata a valle della strada così da non interferire con le aree in P4 ed interessando solo terreni in classe P2.

In particolare, il cavidotto sarà posato inizialmente lungo la scarpata di valle della strada e quindi interrato sotto il sedime di una pista già esistente; gli scavi per la posa del cavidotto saranno ridotti al minimo ed estesi a profondità estremamente contenute, utilizzando la tipologia di scavo a sezione ristretta così da movimentare limitati volumi di terreno ed evitando di creare eccessivi accumuli temporanei. Al termine della posa gli scavi verranno completamente tombati ripristinando l'originario andamento del piano di campagna. In tale situazione non verranno create alterazioni morfologiche al terreno senza modificare le attuali condizioni di stabilità del versante.



foto 1

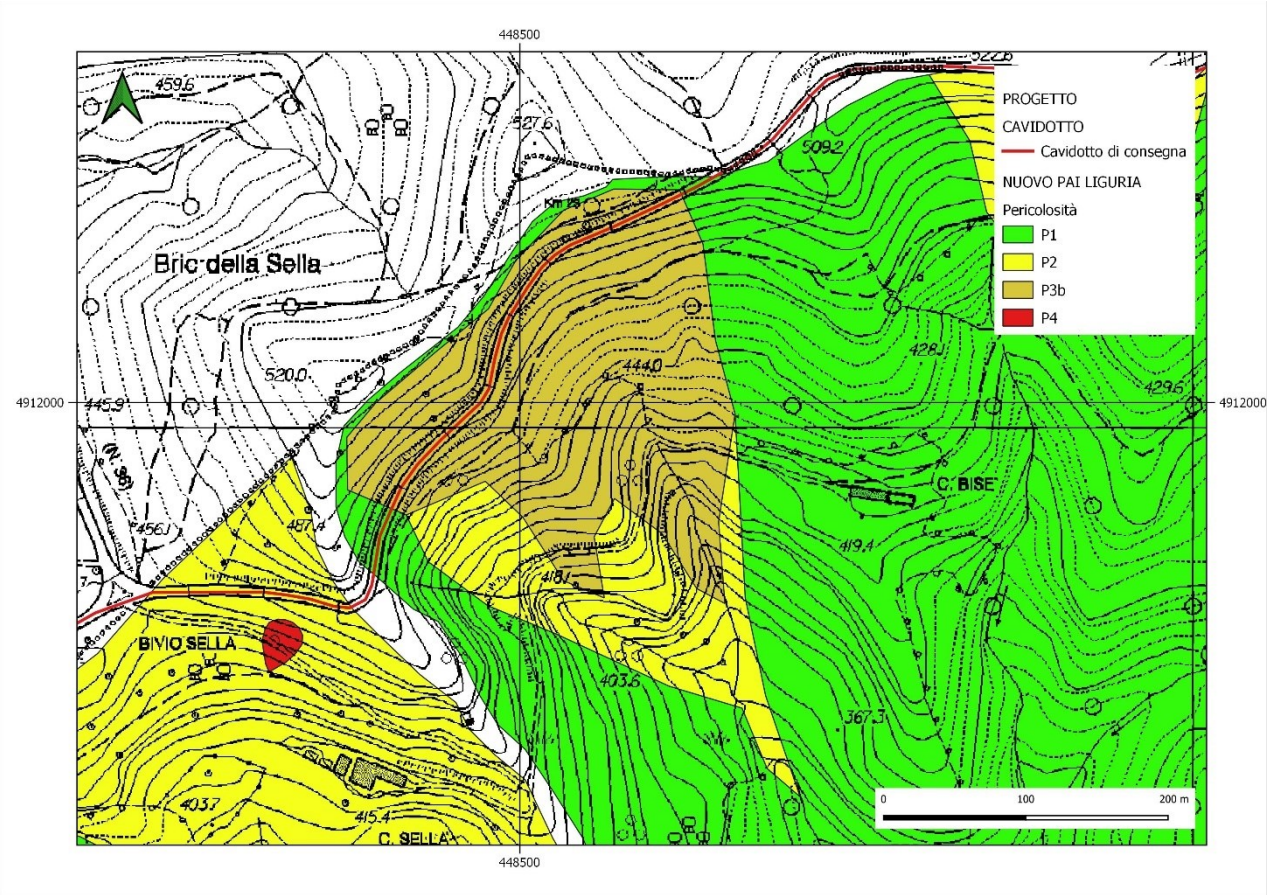


Carta Pericolosità PAI – area P4

si sviluppino le specifiche trattazioni di compatibilità previste dall'art. 16 c. 3quater (aree P3b) della Norma di attuazione del Piano di bacino per il rischio idrogeologico del Torrente Letimbro per le opere ricadenti nel territorio del comune di Savona;

Tratto interferente con le aree P3b in comune di Savona

La zona posta in classe di Pericolosità P3b – *aree potenzialmente instabili interessate da suscettibilità da dissesti di natura geomorfologica elevata - area a pericolosità elevata* –



Carta Pericolosità PAI – area P3b

Verifica di compatibilità prevista dall'art. 16 c. 3quater (aree P3b) della Norma di attuazione del Piano di bacino per il rischio idrogeologico del Torrente Letimbro.

Nel seguito viene riportato un estratto delle NdA del PAI:

Articolo 12, comma 2, lettera b, punto 2 delle Norme di Attuazione del Piano di Bacino.

suscettività al dissesto elevata (P_{g3}): comprendenti **(P_{g3a})** aree in cui sono presenti indicatori geomorfologici diretti, quali l'esistenza di frane quiescenti o di segni precursori o premonitori di movimenti gravitativi, ovvero **(P_{g3b})** aree, in cui sono

presenti indicatori indiretti valutabili dalla combinazione di elementi geomorfologici e di uso del suolo anche se prive al momento di movimenti gravitativi.

Come si legge dalla descrizione le aree $\mathbf{P_{g3b}}$ identificano zone poste non in frana attiva, prive quindi di movimenti gravitativi, ma considerate potenzialmente instabili solo dall'esame delle caratteristiche geomorfologiche.

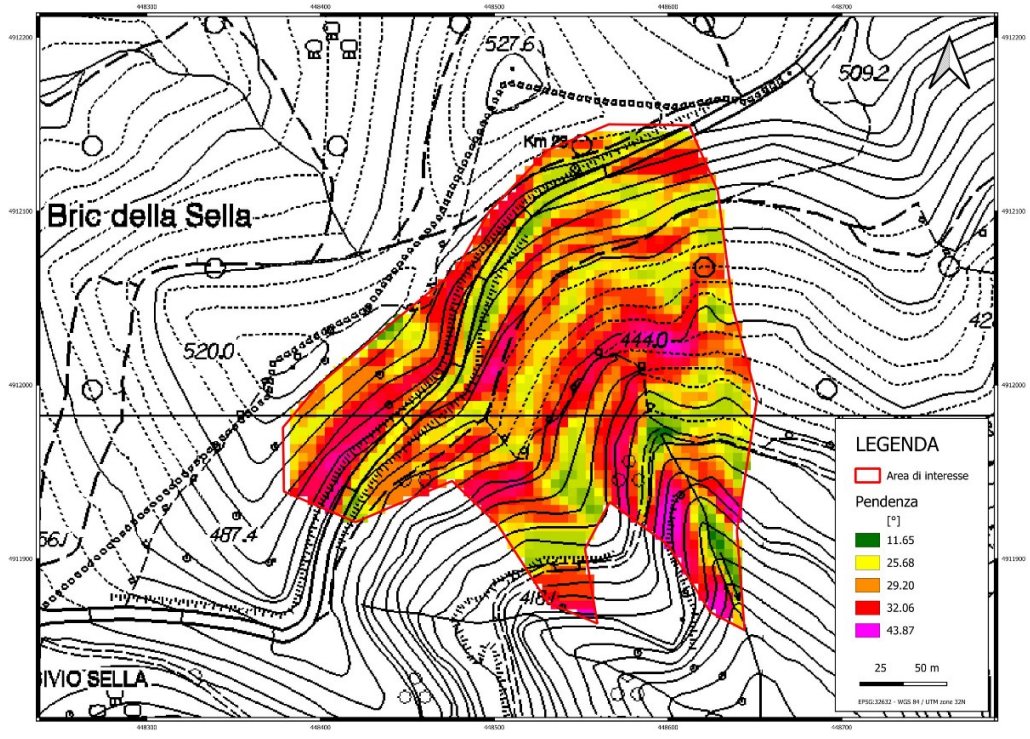
Inquadramento geologico-geomorfologico

L'area potenzialmente instabile P3b identifica la parte sommitale del bacino del Rio di Rise, estesa sino alla cresta spartiacque del Bric della Sella nelle cui vicinanze passa la strada. Si tratta di un versante impostato nel conglomerato della Formazione oligocenica di Molare – Bacino Terziario Piemontese, affiorante nella parte sudovest della scarpata e subaffiorante sotto un sottile spessore di terreni di copertura, nella parte nordest.

Dal punto di vista litologico la Formazione identifica conglomerati poligenici più o meno cementati, costituiti da clasti da centimetrici a decimetrici a bassa sfericità, da arrotondati a sub arrotondati, localmente alternati a livelli arenacei e marnosi. I clasti sono organizzati in strati poco definiti e discontinui: depositi poligenici costituiti prevalentemente da micascisti e quarziti.

In affioramento la roccia appare compatta con i clasti metamorfici arrotondati ben incassati nella matrice cementata così come evidenziato dalle seguenti foto 2 e 3 realizzate lungo scarpate a bordo strada.

Utilizzando il DTM della Regione Liguria, edizione 2023, con il software QGis, è stata effettuata la carta delle pendenze dell'area in esame che ha evidenziato, per la parte di versante a monte della strada, una pendenza media nell'ordine dei 30° e una massima di circa 40° in corrispondenza della parte basale della scarpata.



Carta delle pendenze



foto 2



foto 3

Situazioni di pericolosità

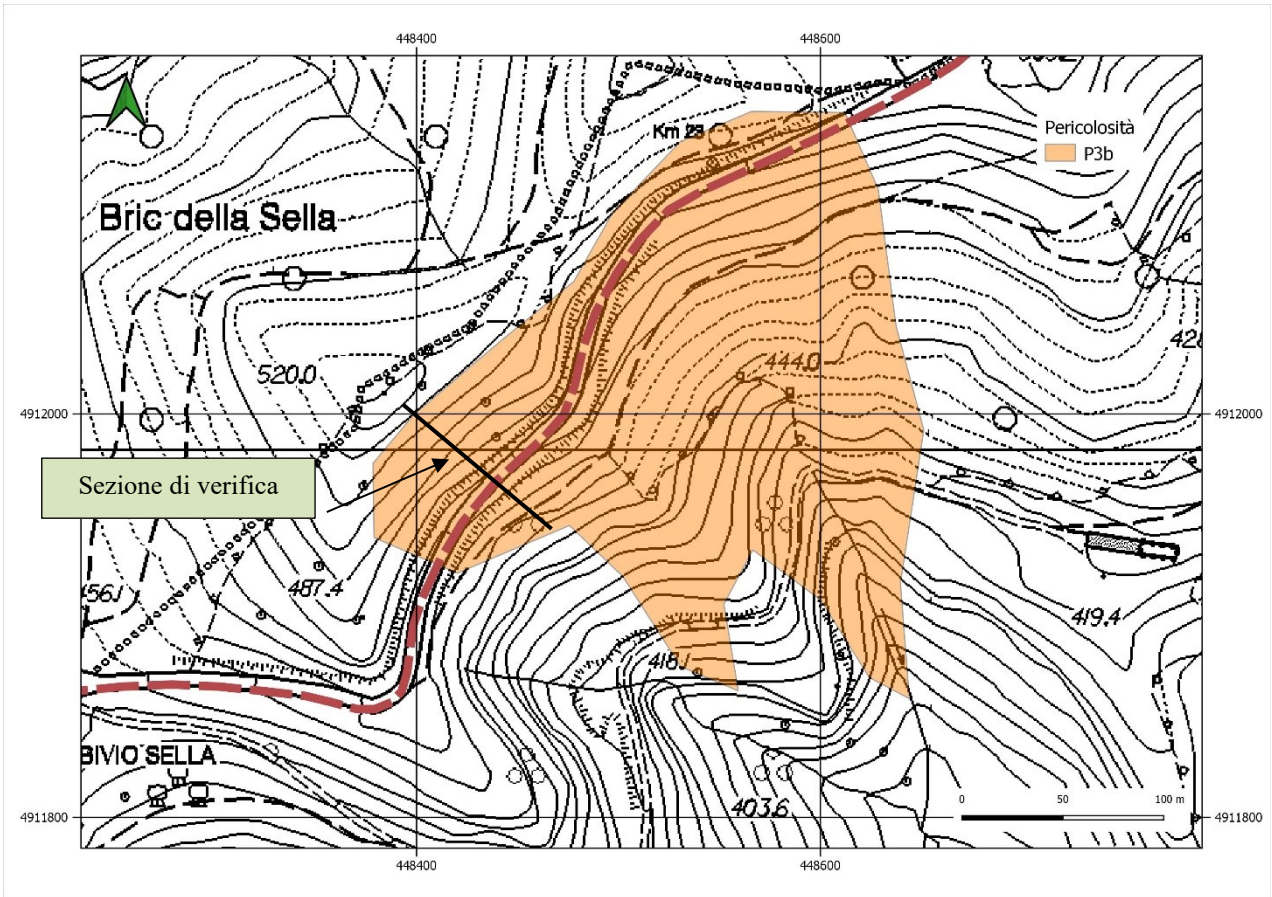
Con tutta probabilità la definizione dell'area di pericolosità, per altro non identificata come dissesto nella cartografia Geolffi, deriva dalla presenza della scarpata in roccia posta immediatamente a monte della strada.

Dall'esame geomorfologico si tratta, con tutta probabilità, di una scarpata generata da un fenomeno di scivolamento superficiale che ha interessato, in passato, il sottile strato di terreni di copertura che originariamente era sovrapposto al substrato roccioso. Dall'esame delle fotografie aeree passate (sino al 2004-2010) la scarpata appare sempre uguale senza evidenze di riattivazioni e/o estensioni in superficie.

Nella condizione attuale le situazioni di potenziale instabilità che possono interessare il versante a monte della strada derivano da:

- Fenomeni di scivolamento superficiale della scarpata;
- Fenomeni di rilascio di blocchi rocciosi, immersi nella matrice del conglomerato, che, data l'acclività del versante terminano la loro corsa sulla piattaforma stradale.

Utilizzando il software Slope 2026 di Geostru è stata effettuata una verifica di stabilità del versante con il metodo di Bishop, lungo una sezione significativa tratta dal DTM regionale.



Nelle verifiche sono stati utilizzati i seguenti parametri geotecnici medi di riferimento:

LITOZONA 1 – *substrato roccioso costituito da conglomerato*

- angolo di attrito interno	ϕ	= 37°
- peso di volume naturale	γ_n	= 20 ± 1 kN/mc
- peso di volume saturo	γ_s	= 22 ± 1 kN/mc
- coesione	**C**	= 80 KPa
- modulo edometrico	**E**	= 60000 KPa

Le verifiche di stabilità, eseguite in condizioni drenate, hanno fornito un valore minimo di Fattore di Sicurezza Fs = 2.03 quindi compatibile con le NTC 2018.

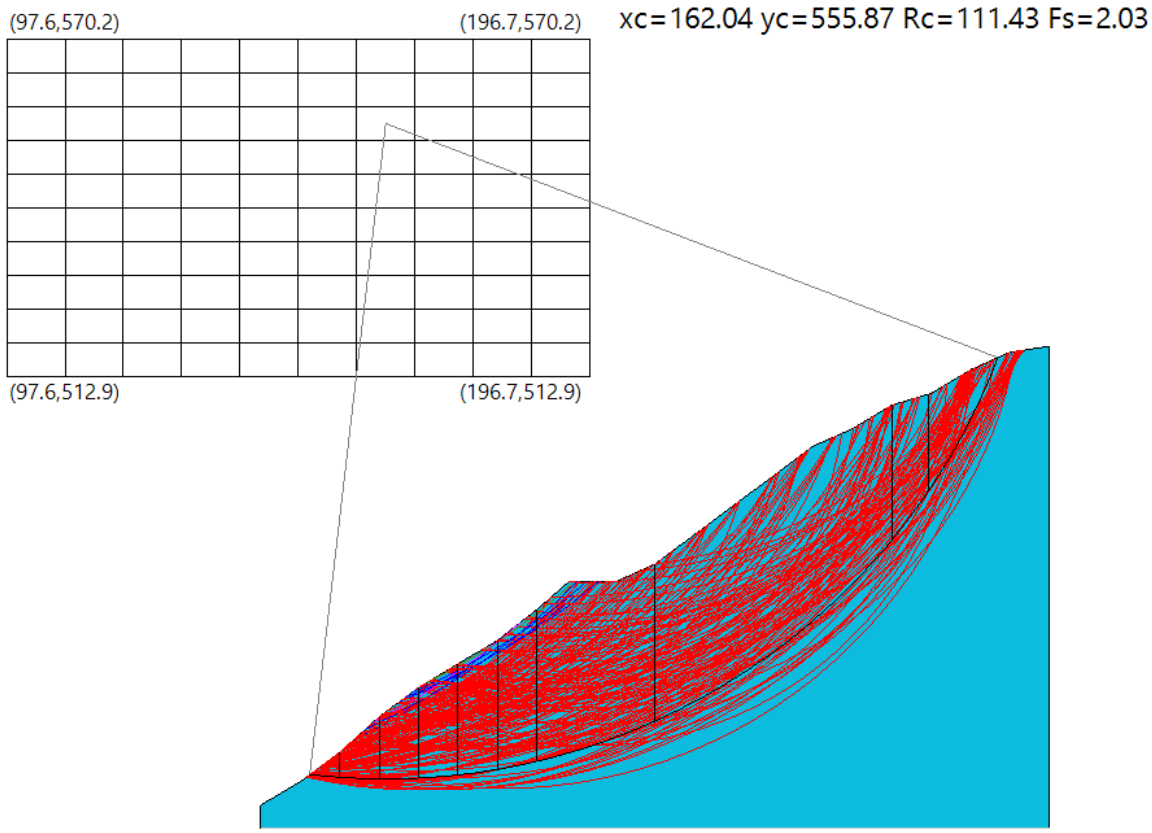




foto 4



foto 5



foto 6



foto 7 – situazione anni 2004-2010

Verifica aggravio grado di suscettività al dissesto dell'area

Le opere in progetto, costituite da un cavidotto interrato sotto la strada, sicuramente non vanno ad aggravare le attuali condizioni di suscettività al dissesto dell'area in quanto non comportano incrementi di carico lungo il versante e/o modifiche nell'attuale morfologia.

Modalità di posa del cavidotto

La posa del cavidotto sarà eseguita adottando rigorose metodologie di cantiere a basso impatto ambientale e operativo, che prevedono lo scavo a sezione ristretta e il mantenimento di una profondità di posa contenuta, unite a un accurato e tempestivo ripristino del manto esistente. L'intero intervento è stato progettato e sarà condotto in modo da escludere qualsiasi movimentazione di terra significativa o alterazione di tipo morfologico dei luoghi, preservando l'assetto originario del versante. Grazie a tali accorgimenti tecnici, i lavori non comporteranno in alcun modo modifiche sostanziali o pregiudizievoli per la stabilità geotecnica e idrogeologica dell'area, garantendo la piena integrità e sicurezza del contesto circostante per l'intera durata e conclusione delle opere.

venga fatta una analisi dettagliata di specifiche precauzioni operative per le opere che lambiscono le aree Fa nel territorio del comune di Cairo Montenotte.

<u>Area deposito temporaneo terreni di scavo</u>

A causa delle caratteristiche geomorfologiche delle due aree dove è prevista l'installazione degli aerogeneratori è stato necessario individuare un'area dove stoccare temporaneamente il materiale di scavo per poi riutilizzarlo nella formazione delle piazzole. E' stata, quindi, selezionata un'area già precedentemente destinata a uso di cantiere nell'ambito dei lavori per l'impianto "Surite del Cuculo", situata in prossimità del cantiere dell'impianto e attualmente impiegata come supporto logistico alle attività di costruzione.

Si tratta di un piazzale pianeggiante pavimentato in battuto stabilizzato, di facile accesso in quanto situato di fianco alla strada provinciale. In relazione allo stato di fatto della situazione geologica e alla documentazione disponibile, l'area di deposito temporaneo risulta posizionata:

- All'esterno di aree in dissesto PAI;
- All'esterno dell'area di Pericolosità P1 della Mappa PAI dissesti;
- All'esterno delle Aree a Rischio della Mappa PAI dissesti;
- All'esterno di aree a pericolosità idraulica e geomorfologica da frana -Provincia di Savona (PUC).

Precauzioni operative per le opere che lambiscono le aree Fa.

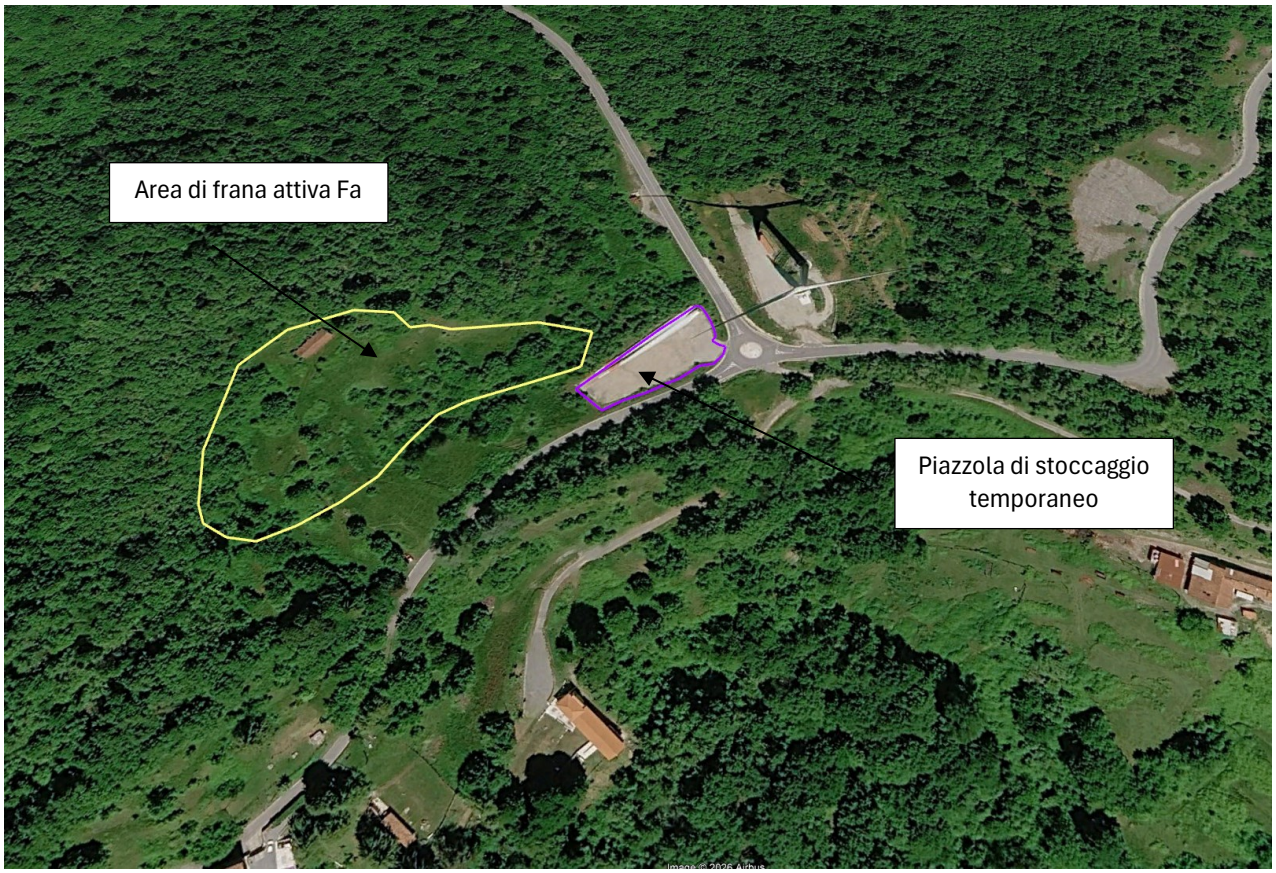
Si rileva come immediatamente ad ovest del piazzale viene riportato il perimetro di un'*"area di frana attiva Fa",* probabilmente originariamente tratta da GeoIffi, di cui, però, attualmente non ci sono evidenze sul terreno. La zona appare, infatti, ricolonizzata dalla vegetazione (aree a prato + aree a bosco) con un fabbricato all'interno che non evidenzia lesioni. Alla luce di tali valutazioni si ritiene di poter considerare tale area in dissesto per lo meno non più attiva ma quiescente o

stabilizzata. Probabilmente si tratta di un vecchio fenomeno di dissesto localizzato in corrispondenza della zona di testata di un piccolo riale che nasce poco a valle del fabbricato.

In relazione alla presenza dell'area Fa sono previste le seguenti precauzioni operative:

- Non sono previste opere o manufatti all'interno dell'area d'intervento;
- Il materiale verrà stoccato temporaneamente solo all'interno dell'attuale area pianeggiante già utilizzata come piazzola, senza richiedere la formazione di scavi e/o opere di sostegno;
- Il materiale verrà depositato in sponda destra del riale, completamente all'esterno del suo alveo attivo senza modificare le condizioni di deflusso dello stesso;
- Nel corso dei lavori sarà effettuato un periodico monitoraggio delle condizioni di deflusso in alveo del riale e di stabilità del versante a monte, mediante sopralluoghi sul posto al fine di rilevare eventuali situazioni di instabilità;
- Al termine dei lavori i terreni temporaneamente depositati verranno completamente rimossi ripristinando l'attuale situazione morfologica del sito.

Si tratta di una zona stabile e priva di fenomeni di dissesto.



Relazione di calcolo

Definizione

Per pendio s'intende una porzione di versante naturale il cui profilo originario è stato modificato da interventi artificiali rilevanti rispetto alla stabilità. Per frana s'intende una situazione di instabilità che interessa versanti naturali e coinvolgono volumi considerevoli di terreno.

Introduzione all'analisi di stabilità

La risoluzione di un problema di stabilità richiede la presa in conto delle equazioni di campo e dei legami costitutivi. Le prime sono di equilibrio, le seconde descrivono il comportamento del terreno. Tali equazioni risultano particolarmente complesse in quanto i terreni sono dei sistemi multifase, che possono essere ricondotti a sistemi monofase solo in condizioni di terreno secco, o di analisi in condizioni drenate.

Nella maggior parte dei casi ci si trova a dover trattare un materiale che se saturo è per lo meno bifase, ciò rende la trattazione delle equazioni di equilibrio notevolmente complicata. Inoltre è praticamente impossibile definire una legge costitutiva di validità generale, in quanto i terreni presentano un comportamento non-lineare già a piccole deformazioni, sono anisotropi ed inoltre il loro comportamento dipende non solo dallo sforzo deviatorico ma anche da quello normale. A causa delle suddette difficoltà vengono introdotte delle ipotesi semplificative:

1. Si usano leggi costitutive semplificate: modello rigido perfettamente plastico. Si assume che la resistenza del materiale sia espressa unicamente dai parametri coesione (c) e angolo di resistenza al taglio (φ), costanti per il terreno e caratteristici dello stato plastico; quindi si suppone valido il criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

2. In alcuni casi vengono soddisfatte solo in parte le equazioni di equilibrio.

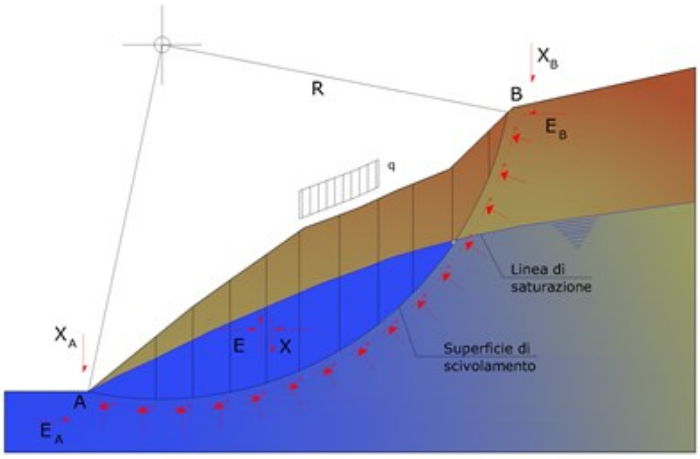
Metodo equilibrio limite (LEM)

Il metodo dell'equilibrio limite consiste nello studiare l'equilibrio di un corpo rigido, costituito dal pendio e da una superficie di scorrimento di forma qualsiasi (linea retta, arco di cerchio, spirale logaritmica); da tale equilibrio vengono calcolate le tensioni da taglio (τ) e confrontate con la resistenza disponibile (τ_f), valutata secondo il criterio di rottura di Coulomb, da tale confronto ne scaturisce la prima indicazione sulla stabilità attraverso il coefficiente di sicurezza:

$$F = \tau_f / \tau$$

Tra i metodi dell'equilibrio limite alcuni considerano l'equilibrio globale del corpo rigido (Culman), altri a causa della non omogeneità dividono il corpo in conci considerando l'equilibrio di ciascuno (Fellenius, Bishop, Janbu ecc.).

Di seguito vengono discussi i metodi dell'equilibrio limite dei conci.



Metodo dei conci

La massa interessata dallo scivolamento viene suddivisa in un numero conveniente di conci. Se il numero dei conci è pari a *n*, il problema presenta le seguenti incognite:

- n valori delle forze normali N_i agenti sulla base di ciascun concio;
- n valori delle forze di taglio alla base del concio T_i;
- (n-1) forze normali E_i agenti sull'interfaccia dei conci;
- (n-1) forze tangenziali X_i agenti sull'interfaccia dei conci;
- n valori della coordinata a che individua il punto di applicazione delle E_i;
- (n-1) valori della coordinata che individua il punto di applicazione delle X_i;
- una incognita costituita dal fattore di sicurezza F.

Complessivamente le incognite sono (6n-2).

Mentre le equazioni a disposizione sono:

- equazioni di equilibrio dei momenti n;

- equazioni di equilibrio alla traslazione verticale n;
- equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale n;
- equazioni relative al criterio di rottura n.

Totale numero di equazioni 4n.

Il problema è staticamente indeterminato ed il grado di indeterminazione è pari a :

$$i = (6n - 2) - (4n) = 2n - 2$$

Il grado di indeterminazione si riduce ulteriormente a (n-2) in quanto si fa l'assunzione che N_i sia applicato nel punto medio della striscia. Ciò equivale ad ipotizzare che le tensioni normali totali siano uniformemente distribuite.

I diversi metodi che si basano sulla teoria dell'equilibrio limite si differenziano per il modo in cui vengono eliminate le (n-2) indeterminazioni.

Metodo di Fellenius (1927)

Con questo metodo (valido solo per superfici di scorrimento di forma circolare) vengono trascurate le forze di interstriscia pertanto le incognite si riducono a:

- n valori delle forze normali N_i;
- n valori delle forze da taglio T_i;
- 1 fattore di sicurezza.

Incognite (2n+1).

Le equazioni a disposizione sono:

- n equazioni di equilibrio alla traslazione verticale;
- n equazioni relative al criterio di rottura;
- equazione di equilibrio dei momenti globale.

$$F = \frac{\Sigma\{ c_i \times l_i + (W_i \times \cos\alpha_i - u_i \times l_i) \times \tan\varphi_i \}}{\Sigma W_i \times \sin\alpha_i}$$

Questa equazione è semplice da risolvere ma si è trovato che fornisce risultati conservativi (fattori di sicurezza bassi) soprattutto per superfici profonde.

Metodo di Bishop (1955)

Con tale metodo non viene trascurato nessun contributo di forze agenti sui blocchi e fu il primo a descrivere i problemi legati ai metodi convenzionali. Le equazioni usate per risolvere il problema sono:

$$\sum F_y = 0, \quad \sum M_0 = 0 \qquad \textbf{Criterio di rottura}$$

$$F = \frac{\Sigma\left\{c_i \times b_i + \left(W_i - u_i \times b_i + \Delta X_i\right) \times \tan\varphi_i\right\} \times \dfrac{\sec\alpha_i}{1 + \tan\alpha_i \times \tan\varphi_i / F}}{\Sigma W_i \times \sin\alpha_i}$$

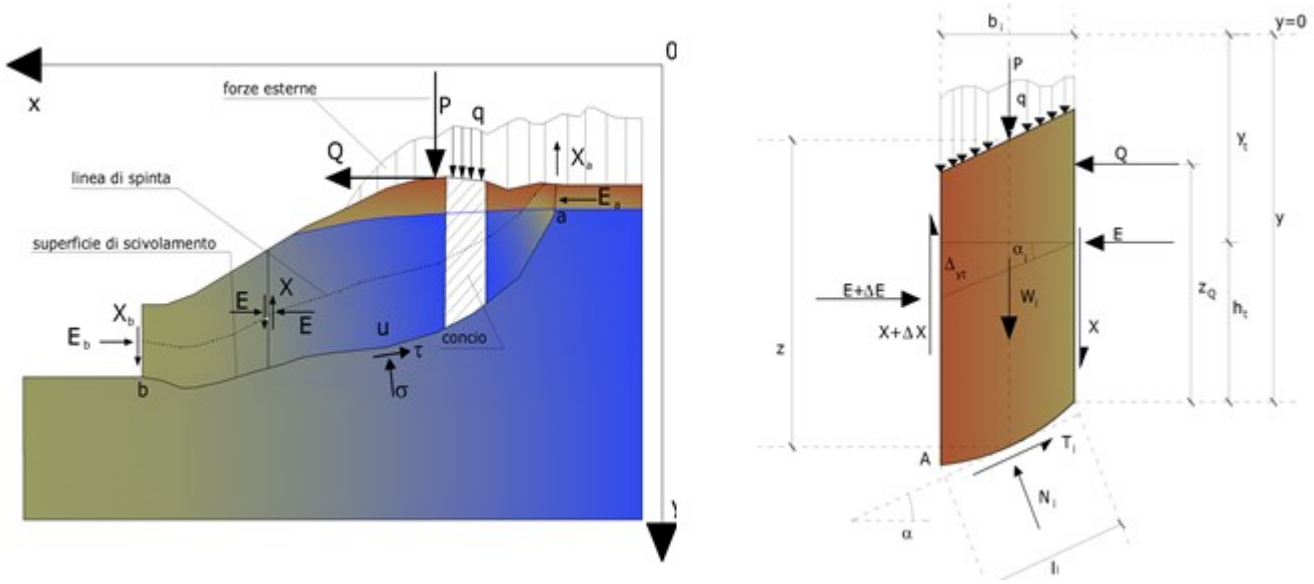
I valori di F e di ΔX per ogni elemento che soddisfano questa equazione danno una soluzione rigorosa al problema. Come prima approssimazione conviene porre $\Delta X = 0$ ed iterare per il calcolo del fattore di sicurezza, tale procedimento è noto come metodo di **Bishop ordinario,** gli errori commessi rispetto al metodo completo sono di circa 1 %.

Metodo di Janbu (1967)

Janbu estese il metodo di Bishop a superfici di scorrimento di forma qualsiasi.

Quando vengono trattate superfici di scorrimento di forma qualsiasi il braccio delle forze cambia (nel caso delle superfici circolari resta costante e pari al raggio). A tal motivo risulta più conveniente valutare l'equazione del momento rispetto allo spigolo di ogni blocco.

$$F = \frac{\Sigma\left\{c_i \times b + (W_i - u_i \times b_i + \Delta X_i) \times \tan\varphi_i\right\} \times \dfrac{\sec^2\alpha_i}{1 + \tan\alpha_i \times \tan\varphi_i / F}}{\Sigma W_i \times \tan\alpha_i}$$

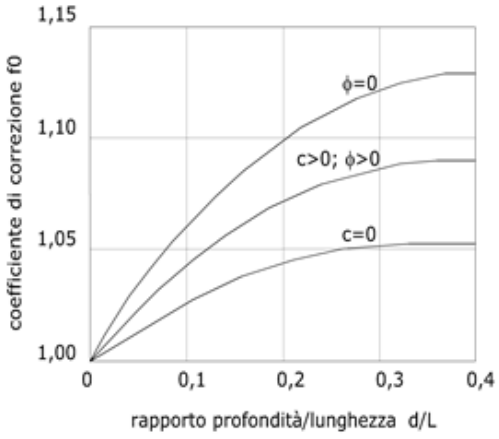


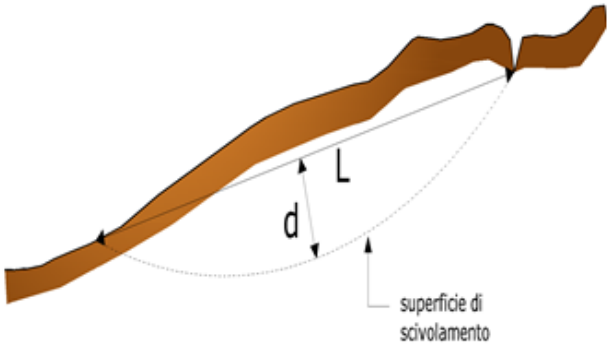
Azioni sul concio i-esimo secondo le ipotesi di Janbu e rappresentazione d'insieme dell'ammasso

Assumendo $\Delta X_i = 0$ si ottiene il metodo ordinario. Janbu propose inoltre un metodo per la correzione del fattore di sicurezza ottenuto con il metodo ordinario secondo la seguente:

$$F_{corretto} = f_0 \cdot F$$

dove f_0 è riportato in grafici funzione di geometria e parametri geotecnici. Tale correzione è molto attendibile per pendii poco inclinati.





Metodo di Bell (1968)

Le forze agenti sul corpo che scivola includono il peso effettivo del terreno, W, le forze sismiche pseudostatiche orizzontali e verticali K_xW e K_zW, le forze orizzontali e verticali X e Z applicate esternamente al profilo del pendio, infine, la risultante degli sforzi totali normali e di taglio σ e τ agenti sulla superficie potenziale di scivolamento.

Lo sforzo totale normale può includere un eccesso di pressione dei pori u che deve essere specificata con l'introduzione dei parametri di forza efficace.

In pratica questo metodo può essere considerato come un'estensione del metodo del cerchio di attrito per sezioni omogenee precedentemente descritto da Taylor.

In accordo con la legge della resistenza di Mohr-Coulomb in termini di tensione efficace, la forza di taglio agente sulla base dell'i-esimo concio è data da:

$$T_i = \frac{c_i L_i + (N_i - u_{ci} L_i)\tan\Phi_i}{F}$$

in cui:

F = il fattore di sicurezza;

$\mathbf{c_i}$ = la coesione efficace (o totale) alla base dell'i-esimo concio;

$\boldsymbol{\phi_i}$ = l'angolo di attrito efficace (= 0 con la coesione totale) alla base dell'i-esimo concio;

$\mathbf{L_i}$ = la lunghezza della base dell'i-esimo concio;

$\mathbf{u_{ci}}$ = la pressione dei pori al centro della base dell'i-esimo concio.

L'equilibrio risulta uguagliando a zero la somma delle forze orizzontali, la somma delle forze verticali e la somma dei momenti rispetto all'origine.

Viene adottata la seguente assunzione sulla variazione della tensione normale agente sulla potenziale superficie di scorrimento:

$$\sigma_{ci} = \left[C_1(1 - K_z)\frac{W_i \cos\alpha_i}{L_i} \right] + C_2 f(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$$

in cui il primo termine dell'equazione include l'espressione:

$$W_i \cos\alpha_i / L_i = \textbf{valore dello sforzo normale totale associato con il metodo ordinario dei conci}$$

Il secondo termine dell'equazione include la funzione:

$$f = \sin 2\pi\left(\frac{x_n - x_{ci}}{x_n - x_0}\right)$$

dove $\mathbf{x_0}$ ed $\mathbf{x_n}$ sono rispettivamente le ascisse del primo e dell'ultimo punto della superficie di scorrimento, mentre $\mathbf{x_{ci}}$ rappresenta l'ascissa del punto medio della base del concio i-esimo.

Una parte sensibile di riduzione del peso associata con una accelerazione verticale del terreno K_z g può essere trasmessa direttamente alla base e ciò è incluso nel fattore (1 - K_z).

Lo sforzo normale totale alla base di un concio è dato da:

$$N_i = \sigma_{ci} L_i$$

La soluzione delle equazioni di equilibrio si ricava risolvendo un sistema lineare di tre equazioni ottenute moltiplicando le equazioni di equilibrio per il fattore di sicurezza F, sostituendo l'espressione di N_i e moltiplicando ciascun termine della coesione per un coefficiente arbitrario C_3. Qualsiasi coppia di valori del fattore di sicurezza nell'intorno di una stima fisicamente ragionevole può essere usata per iniziare una soluzione iterativa.

Il numero necessario di iterazioni dipende sia dalla stima iniziale sia dalla desiderata precisione della soluzione; normalmente, il processo converge rapidamente.

Metodo di Sarma (1973)

Il metodo di Sarma è un semplice, ma accurato metodo per l'analisi di stabilità dei pendii, che permette di determinare l'accelerazione sismica orizzontale richiesta affinché l'ammasso di terreno, delimitato dalla superficie di scivolamento e dal profilo topografico, raggiunga lo stato di equilibrio limite (accelerazione critica K_c) e, nello stesso tempo, consente di ricavare l'usuale fattore di sicurezza ottenuto come per gli altri metodi più comuni della geotecnica.

Si tratta di un metodo basato sul principio dell'equilibrio limite e delle strisce, pertanto viene considerato l'equilibrio di una potenziale massa di terreno in scivolamento suddivisa in n strisce verticali di spessore sufficientemente piccolo da ritenere ammissibile l'assunzione che lo sforzo normale N_i agisce nel punto medio della base della striscia.

Le equazioni da prendere in considerazione sono:

- L'equazione di equilibrio alla traslazione orizzontale del singolo concio;
- L'equazione di equilibrio alla traslazione verticale del singolo concio;
- L'equazione di equilibrio dei momenti.

Condizioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale:

$$N_i \cos\alpha_i + T_i \sin\alpha_i = W_i - \Delta X_i$$

$$T_i \cos\alpha_i - N_i \sin\alpha_i = KW_i + \Delta E_i$$

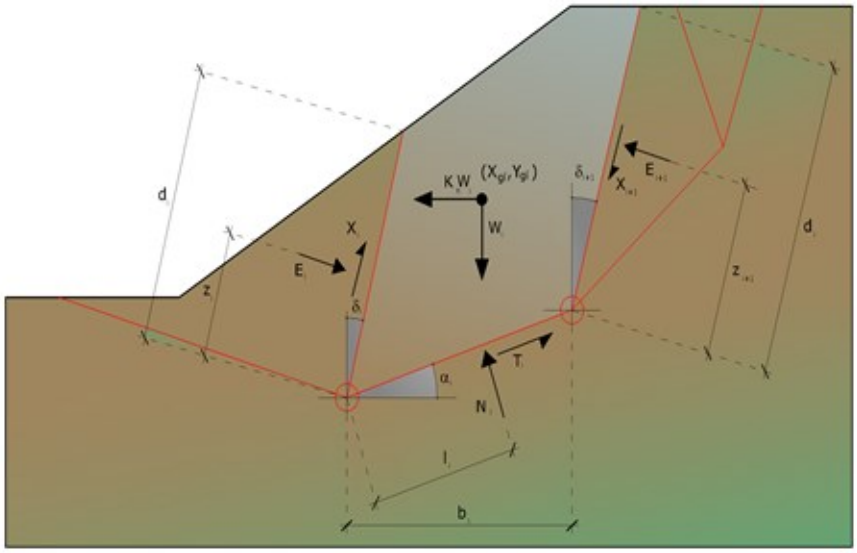
Viene, inoltre, assunto che in assenza di forze esterne sulla superficie libera dell'ammasso si ha:

$$\Sigma \Delta E_i = 0$$

$$\Sigma \Delta X_i = 0$$

dove E_i e X_i rappresentano, rispettivamente, le forze orizzontale e verticale sulla faccia i-esima del concio generico i.

L'equazione di equilibrio dei momenti viene scritta scegliendo come punto di riferimento il baricentro dell'intero ammasso; sicché, dopo aver eseguito una serie di posizioni e trasformazioni trigonometriche ed algebriche, nel **metodo di Sarma** la soluzione del problema passa attraverso la risoluzione di due equazioni:



Azioni sull' iesimo concio, metodo di Sarma

$$\sum \Delta X_i \cdot tg\left(\psi_i' - \alpha_i\right) + \sum \Delta E_i = \sum \Delta_i - K \cdot \sum W_i$$

$$\sum \Delta X_i \cdot \left[(y_{mi} - y_G) \cdot tg\left(\psi_i' - \alpha'\right) + \left(x_i' - x_G\right) \right] = \sum W_i \cdot (x_{mi} - x_G) + \sum \Delta_i \cdot (y_{mi} - y_G)$$

Ma l'approccio risolutivo, in questo caso, è completamente capovolto: il problema infatti impone di trovare un valore di **K** (accelerazione sismica) corrispondente ad un determinato fattore di sicurezza; ed in particolare, trovare il valore dell'accelerazione **K** corrispondente al fattore di sicurezza **F = 1** , ossia l'accelerazione critica.

Si ha pertanto:

K=Kc **Accelerazione critica** se F=1

F=Fs **Fattore di sicurezza in condizioni statiche** se K=0

La seconda parte del problema del Metodo di Sarma è quella di trovare una distribuzione di forze interne X_i ed E_i tale da verificare l'equilibrio del concio e quello globale dell'intero ammasso, senza violazione del criterio di rottura.

E' stato trovato che una soluzione accettabile del problema si può ottenere assumendo la seguente distribuzione per le forze X_i:

$$\Delta X_i = \lambda \cdot \Delta Q_i = \lambda \cdot (Q_{i+1} - Q_i)$$

dove Q_i è una funzione nota, in cui vengono presi in considerazione i parametri geotecnici medi sulla i-esima faccia del concio i, e λ rappresenta un'incognita.

La soluzione completa del problema si ottiene pertanto, dopo alcune iterazioni, con i valori di K_c, λ e F, che permettono di ottenere anche la distribuzione delle forze di interstriscia.

Metodo di Spencer (1967)

Il metodo è basato sull'assunzione:

1. le forze d'interfaccia lungo le superfici di divisione dei singoli conci sono orientate parallelamente fra loro ed inclinate rispetto all'orizzontale di un angolo θ;
2. tutti i momenti sono nulli $M_i = 0$ con i=1…..n.

Sostanzialmente il metodo soddisfa tutte le equazioni della statica ed equivale ametodo di Morgenstern e Price quando la funzione f(x) = 1. Imponendo l'equilibrio dei momenti rispetto al centro dell'arco descritto dalla superficie di scivolamento si ha:

1) $$\sum Q_i R \cos(\alpha - \theta) = 0$$

dove:

$$Q_i = \frac{\frac{c}{F_s}\left(W\cos\alpha - \gamma_w h l \sec\alpha\right)\frac{tg\alpha}{F_s} - W sen\alpha}{\cos(\alpha-\theta)\left[\frac{F_s + tg\varphi tg(\alpha-\theta)}{F_s}\right]}$$

forza d'interazione fra i conci;

R = raggio dell'arco di cerchio;

θ = angolo d'inclinazione della forza Q_i rispetto all'orizzontale.

Imponendo l'equilibrio delle forze orizzontali e verticali si ha rispettivamente:

$$\sum(Q_i \cos\theta) = 0$$

$$\sum(Q_i sen\theta) = 0$$

Con l'assunzione delle forze Q_i parallele fra loro, si può anche scrivere:

2) $$\sum Q_i = 0$$

Il metodo propone di calcolare due coefficienti di sicurezza: il primo (F_{sm}) ottenibile dalla 1), legato all'equilibrio dei momenti; il secondo (F_{sf}) dalla 2) legato all'equilibrio delle forze. In pratica si procede risolvendo la 1) e la 2) per un dato intervallo di valori dell'angolo θ, considerando come valore unico del coefficiente di sicurezza quello per cui si abbia:

$$F_{sm} = F_{sf}$$

Metodo di Morgenstern e Price (1965)

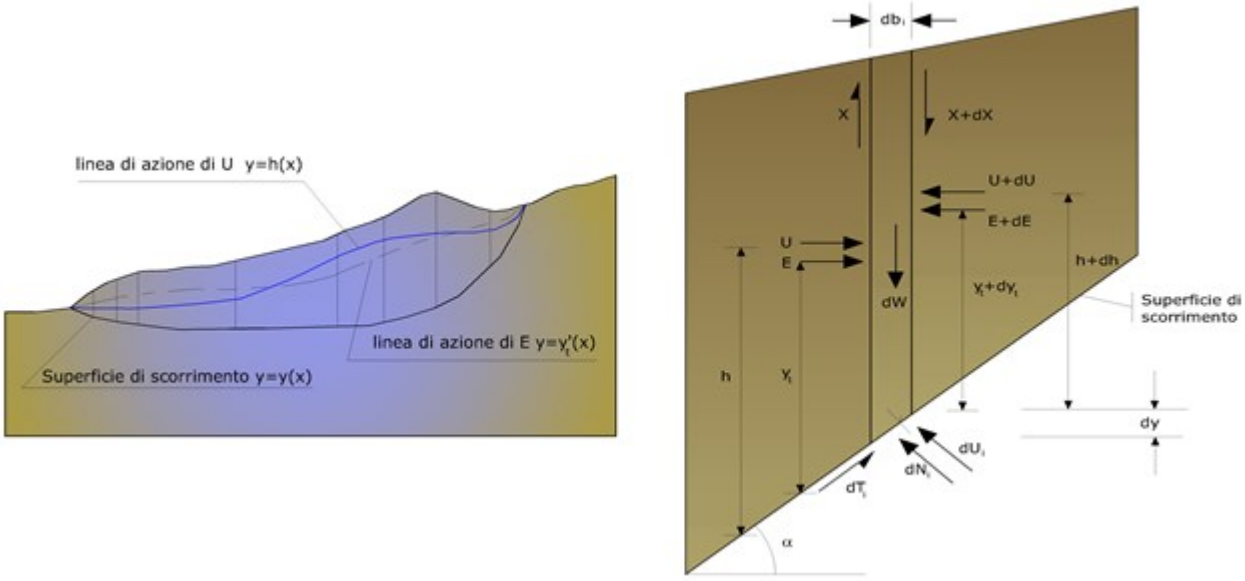
Si stabilisce una relazione tra le componenti delle forze di interfaccia del tipo X = λ f(x)E, dove λ è un fattore di scala e f(x), funzione della posizione di E e di X, definisce una relazione tra la variazione della forza X e della forza E all'interno della massa scivolante. La funzione f(x) è scelta arbitrariamente (costante, sinusoide, semisinusoide, trapezia, spezzata…) e influenza poco il risultato, ma va verificato che i valori ricavati per le incognite siano fisicamente accettabili.

La particolarità del metodo è che la massa viene suddivisa in strisce infinitesime alle quali vengono imposte le equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale e di rottura sulla base delle strisce stesse. Si perviene ad una prima equazione differenziale che lega le forze d'interfaccia incognite E, X, il coefficiente di sicurezza F_s, il peso della striscia infinitesima dW e la risultante delle pressioni neutra alla base dU.

Si ottiene la cosiddetta "**equazione delle forze**":

$$c'\sec^2\frac{\alpha}{F_s}+tg\varphi'\left(\frac{dW}{dx}-\frac{dX}{dx}-tg\alpha\frac{dE}{dx}-\sec\alpha\frac{dU}{dx}\right)=$$

$$=\frac{dE}{dx}-tg\alpha\left(\frac{dX}{dx}-\frac{dW}{dx}\right)$$



Azioni sul concio i-esimo secondo le ipotesi di Morgenster e Price e rappresentazione d'insieme dell'ammasso

Una seconda equazione, detta "**equazione dei momenti**", viene scritta imponendo la condizione di equilibrio alla rotazione rispetto alla mezzeria della base:

$$X=\frac{d\left(E_\gamma\right)}{dx}-\gamma\frac{dE}{dx}$$

queste due equazioni vengono estese per integrazione a tutta la massa interessata dallo scivolamento.

Il metodo di calcolo soddisfa tutte le equazioni di equilibrio ed è applicabile a superfici di qualsiasi forma, ma implica necessariamente l'uso di un calcolatore.

Valutazione dell'azione sismica

La stabilità dei pendii nei confronti dell'azione sismica viene verificata con il metodo pseudo-statico. Per i terreni che sotto l'azione di un carico ciclico possono sviluppare pressioni interstiziali elevate viene considerato un aumento in percento delle pressioni neutre che tiene conto di questo fattore di perdita di resistenza.

Ai fini della valutazione dell'azione sismica vengono considerate le seguenti forze:

$$F_H = K_x W$$
$$F_V = K_y W$$

Essendo:

- **F_H** e **F_V** rispettivamente la componente orizzontale e verticale della forza d'inerzia applicata al baricentro del concio;
- **W** peso concio;
- **K_x** coefficiente sismico orizzontale;
- **K_y** coefficiente sismico verticale.

Ricerca della superficie di scorrimento critica

In presenza di mezzi omogenei non si hanno a disposizione metodi per individuare la superficie di scorrimento critica ed occorre esaminarne un numero elevato di potenziali superfici.

Nel caso vengano ipotizzate superfici di forma circolare, la ricerca diventa più semplice, in quanto dopo aver posizionato una maglia dei centri costituita da m righe e n colonne saranno esaminate tutte le superfici aventi per centro il generico nodo della maglia $m \times n$ e raggio variabile in un determinato range di valori tale da esaminare superfici cinematicamente ammissibili.

Stabilizzazione di pendii con l'utilizzo di pali

La realizzazione di una cortina di pali, su pendio, serve a fare aumentare la resistenza al taglio su determinate superfici di scorrimento. L'intervento può essere conseguente ad una stabilità già accertata, per la quale si conosce la superficie di scorrimento oppure, agendo preventivamente, viene progettato in relazione alle ipotetiche superfici di rottura che responsabilmente possono essere assunte come quelle più probabili. In ogni caso si opera considerando una massa di terreno in movimento su un ammasso stabile sul quale attestare, per una certa lunghezza, l'allineamento di pali.

Il terreno, nelle due zone, ha una influenza diversa sull'elemento monoassiale (palo): di tipo sollecitativi nella parte superiore (palo passivo – terreno attivo) e di tipo resistivo nella zona sottostante (palo attivo – terreno passivo). Da questa interferenza, fra "sbarramento" e massa in movimento, scaturiscono le azioni stabilizzanti che devono perseguire le seguenti finalità:

1. conferire al pendio un coefficiente di sicurezza maggiore di quello posseduto;
2. essere assorbite dal manufatto garantendone l'integrità (le tensioni interne, derivanti dalle sollecitazioni massime trasmesse sulle varie sezioni del singolo palo, devono risultare inferiori a quelle ammissibili del materiale) e risultare inferiori al carico limite sopportabile dal terreno, calcolato, lateralmente considerando l'interazione (palo–terreno).

Analisi di stabilità dei pendii con : BISHOP (1955)

==========

Calcolo eseguito secondo	
Numero di strati	1.0
Numero dei conci	10.0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1.3
Analisi	Condizione drenata

Superficie di forma circolare

==========

Maglia dei Centri

==========

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	97.61 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	512.89 m
Ascissa vertice destro superiore xs	196.73 m
Ordinata vertice destro superiore ys	570.19 m
Passo di ricerca	10.0
Numero di celle lungo x	10.0
Numero di celle lungo y	10.0

==========

Vertici profilo

Nr	X (m)	y (m)
1	140.81	440.0
2	140.81	440.0
3	140.81	440.0
4	147.51	444.0
5	154.22	449.0
6	160.92	455.0
7	167.63	460.0
8	174.33	464.0
9	181.04	468.0
10	187.74	473.26
11	193.15	478.0
12	201.15	478.0
13	207.86	481.0
14	214.56	486.0
15	221.27	491.0
16	227.97	496.0
17	234.68	501.0
18	241.38	504.0
19	248.09	508.0
20	254.79	510.0
21	261.5	514.0
22	268.2	517.0
23	274.91	518.0

Coefficienti parziali azioni

==========

Sfavorevoli: Permanenti, variabili	1.0	0.0
Favorevoli: Permanenti, variabili	1.0	0.0

==========

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

==========

Tangente angolo di resistenza al taglio	1.0
Coesione efficace	1.0
Coesione non drenata	1.0
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

==========

Stratigrafia

Strato	Coesione (kN/m²)	Coesione non drenata (kN/m²)	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (kN/m³)	Peso unità di volume saturo (kN/m³)	Litologia
1	80		37	20	21	

Proprietà poligono

Risultati analisi pendio

==========

Fs minimo individuato	2.03
Ascissa centro superficie	162.04 m
Ordinata centro superficie	555.87 m
Raggio superficie	111.43 m