

Innovazioni tecnologiche nella stabilizzazione dei pendii: modelli costitutivi e simulazioni numeriche

Massimo Chiarelli, Ingegnere esperto in tecniche avanzate di scavo in sotterraneo – tunnelconsulting.it

Il presente articolo esplora le più recenti innovazioni tecnologiche nell'ambito della stabilizzazione dei pendii, con particolare attenzione all'applicazione di modelli costitutivi avanzati per la descrizione del comportamento meccanico dei materiali geotecnici. In particolare, si approfondisce l'impiego di modelli elastoplastici con softening per simulazioni numeriche che consentono di valutare e ottimizzare soluzioni di rinforzo in aree a rischio di frana. L'articolo discute approcci teorici, implementazioni numeriche, validazione sperimentale e casi applicativi, offrendo una panoramica esaustiva delle possibilità offerte dalla modellazione avanzata e dell'integrazione con dati sperimentali e di monitoraggio.

1. Introduzione

Nel contesto della progettazione geotecnica, la stabilizzazione dei pendii rappresenta una priorità fondamentale per la mitigazione del rischio idrogeologico. La crescente frequenza di eventi estremi legati ai cambiamenti climatici ha infatti reso evidente la vulnerabilità di molte infrastrutture a frane e smottamenti. Per i progettisti, ciò impone l'adozione di strumenti previsionali sempre più raffinati, capaci di valutare l'efficacia delle soluzioni di rinforzo in modo realistico e quantitativo.

L'evoluzione della modellazione numerica ha permesso di affiancare ai tradizionali metodi limite, basati su semplificazioni geometriche e ipotesi conservative, approcci più sofisticati fondati sulla meccanica del continuo. Tra questi, l'uso di modelli costitutivi elastoplastici con softening si è dimostrato particolarmente efficace nella simulazione di pendii naturali e artificiali soggetti a meccanismi di instabilità progressiva. Questi modelli permettono di rappresentare l'evoluzione del comportamento meccanico del terreno durante le fasi di caricamento, scarico e collasso, offrendo un supporto prezioso alla progettazione di opere di stabilizzazione su misura.

Nel presente contributo si esaminano i fondamenti teorici e numerici dei modelli avanzati, con un focus specifico sull'implementazione nei software di calcolo FEM e sulla loro applicazione in progetti reali. Attraverso casi studio emblematici del panorama italiano, si mostrano i vantaggi di una progettazione integrata che combina modellazione, sperimentazione e monitoraggio.

2. Modelli costitutivi per materiali geotecnici

2.1 Modelli elastoplastici classici

I modelli elastoplastici tradizionali (es. Mohr-Coulomb, Drucker-Prager) sono largamente utilizzati nella progettazione geotecnica. Tuttavia, essi presentano limitazioni significative nella rappresentazione del comportamento post-picco, particolarmente rilevante per materiali coesivi soggetti a softening. La linearizzazione della superficie di rottura e l'assenza di una rappresentazione realistica dell'evoluzione delle proprietà meccaniche possono portare a sottostimare o sovrastimare la sicurezza del pendio.

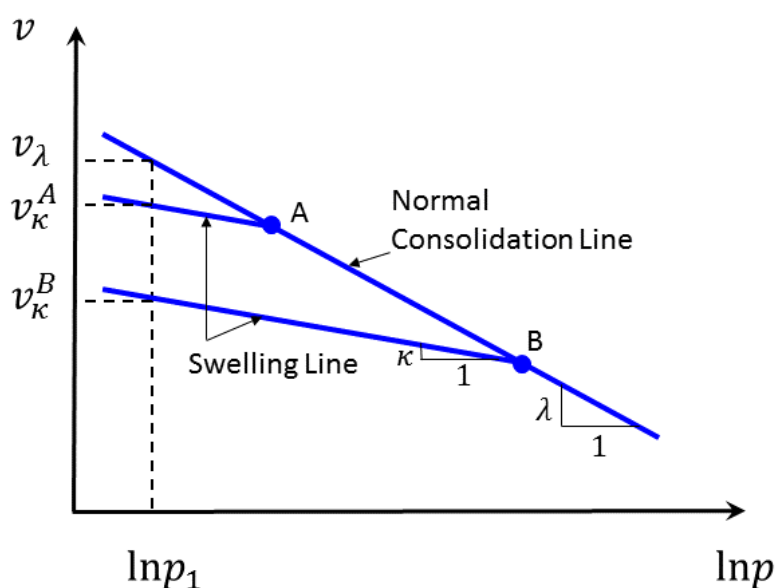


Figura 1- Linea di consolidazione normale (NCL) e swelling line: volumetric strains vs specific volume (ITASCA 2012)

2.2 Softening e localizzazione della deformazione

L'introduzione di meccanismi di softening nei modelli costitutivi consente di rappresentare la degradazione progressiva della resistenza del terreno. Tale comportamento è cruciale per simulare i fenomeni di localizzazione della deformazione (shear bands), spesso precursori del collasso. I modelli con softening possono essere combinati con tecniche di regolarizzazione numerica (es. gradient-enhanced plasticity) per evitare la dipendenza dalle dimensioni della mesh.

2.3 Modelli avanzati: Cam-Clay, Modello di Barcelona, HISS

Tra i modelli costitutivi avanzati maggiormente impiegati nella modellazione geotecnica figurano il Modified Cam-Clay, il modello di Barcellona per suoli parzialmente saturi e il modello HISS. Questi modelli offrono una rappresentazione più accurata del comportamento meccanico di materiali complessi quali argille sovraconsolidate, limi a bassa permeabilità e aggregati granulari compattati, superando le limitazioni dei modelli elastoplastici classici.

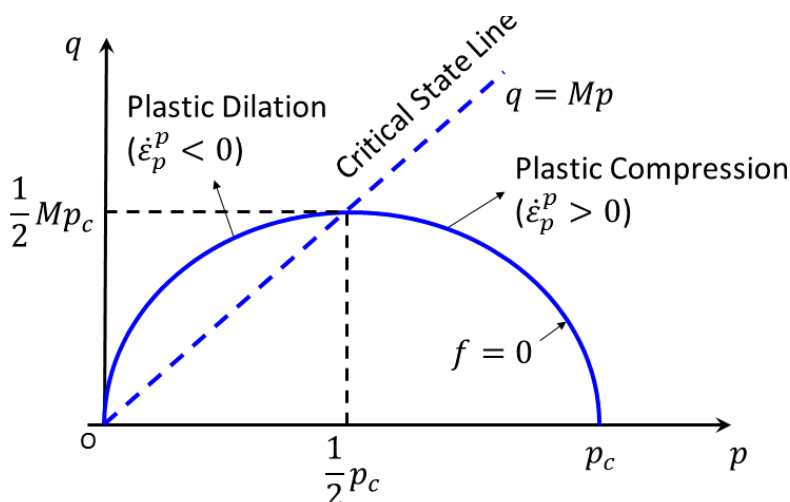


Figura 2 - Diagramma del modello Modified Cam-Clay (q - p) con yield surface ellittico (ITASCA 2012)

Il modello HISS (Highly Irregular Surface Shape), in particolare, consente di definire superfici di snervamento con geometria ellissoidale o non convenzionale nello spazio degli invarianti J1–J2, migliorando la capacità predittiva per materiali granulari con comportamento anisotropo o non associativo. È utile ricordare che lo spazio degli invarianti J1–J2 è un sistema di riferimento utilizzato in meccanica dei materiali (in particolare nella meccanica del continuo) per rappresentare lo stato di tensione (o sforzo) in modo indipendente dal sistema di coordinate.

L'adozione di tale modello permette una simulazione realistica del comportamento stress–strain–volume, inclusi gli effetti post-picco e il degrado di rigidità, cruciali per l'analisi della stabilità dei pendii in fase critica.

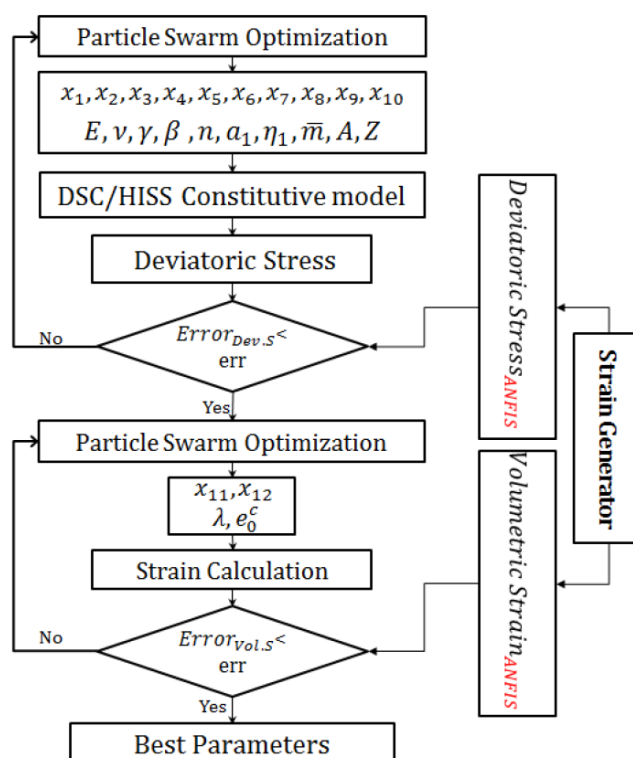


Figura 3 - Schema di calibrazione avanzata del modello DSC/HISS mediante PSO. Flusso logico: definizione dei parametri, applicazione iterativa, calcolo degli stress-deformazioni (Li et al., 2016).

La calibrazione dei parametri del modello HISS richiede l'utilizzo di prove di laboratorio avanzate (triassiali drenate e non drenate, cicliche, a carico controllato) e può essere supportata da tecniche di ottimizzazione automatica. In particolare, l'uso di algoritmi di intelligenza artificiale, come il Particle Swarm Optimization (PSO), ha mostrato notevoli vantaggi nella determinazione efficiente e robusta dei parametri costitutivi, riducendo il margine di errore tra dati sperimentali e simulazioni numeriche.

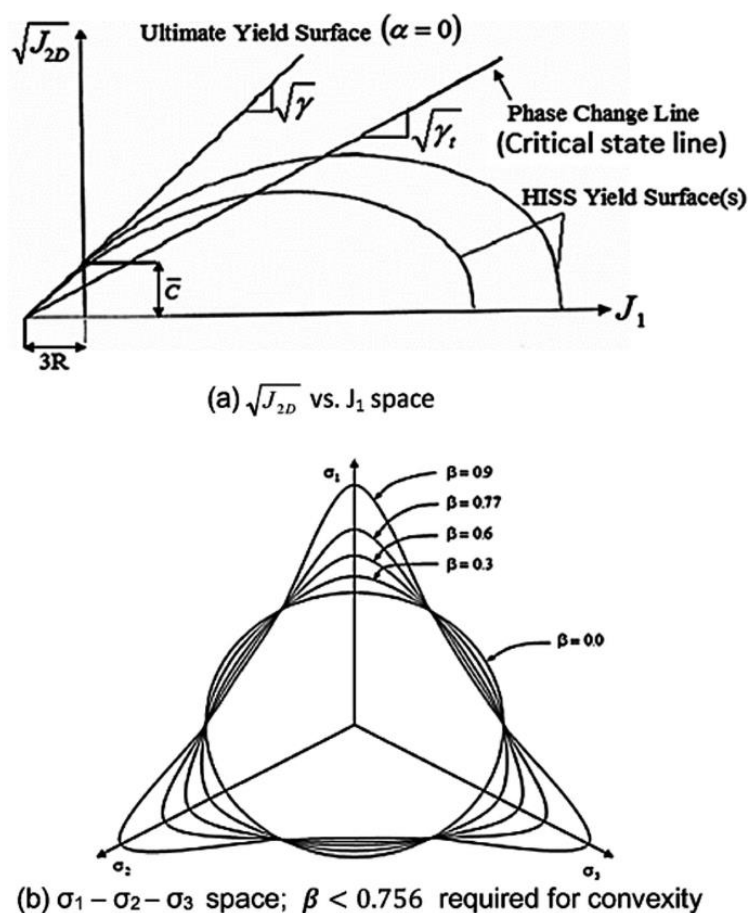


Figura 4 - Diverse forme della yield surface del modello HISS - Questo schema mostra le superfici di snervamento HISS con differenti parametri β , utili a illustrare come varia la forma e quindi la resistenza allo snervamento (Zhou et al., 2023).

3. Simulazioni numeriche: strumenti e approcci

3.1 Metodo degli Elementi Finiti (FEM)

Il FEM rappresenta lo strumento più diffuso per la modellazione numerica del comportamento dei pendii. Codici commerciali come PLAXIS, MIDAS GTS, FLAC, permettono l'integrazione di modelli avanzati in condizioni drenate o non drenate. Le analisi possono essere condotte in 2D o 3D, con rappresentazione dettagliata della stratigrafia, delle fasi costruttive e delle condizioni al contorno. La mesh deve essere accuratamente progettata per catturare correttamente i gradienti di deformazione e per evitare instabilità numeriche.

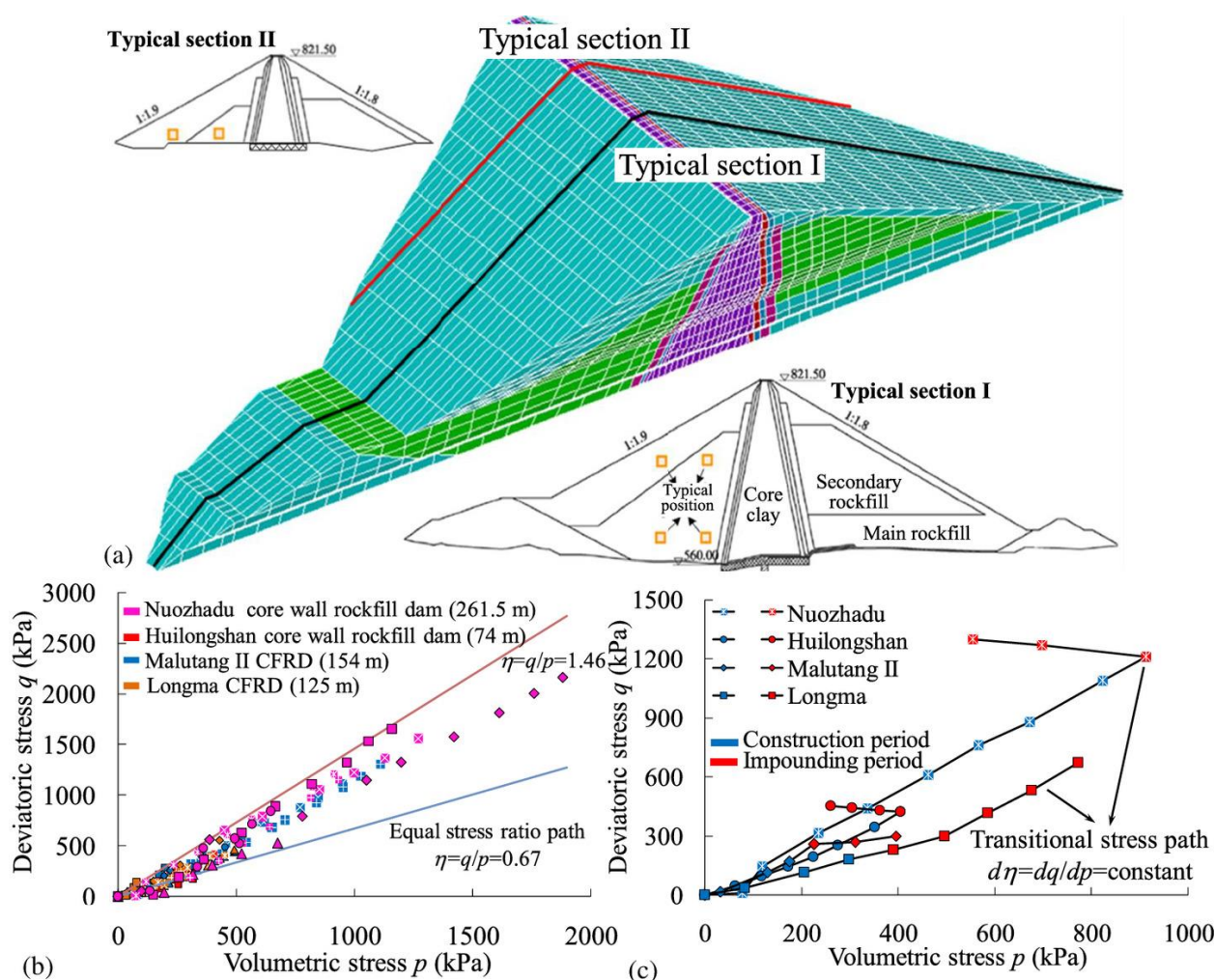


Figura 5 - Sezione FEM di una diga in rockfill con strati distinti (Ran et al., 2024).

3.2 Analisi in condizioni statiche e dinamiche

Le simulazioni numeriche possono essere condotte per valutare la stabilità del pendio in condizioni sia statiche (ad esempio post-pioggie o a lungo termine) che dinamiche (come eventi sismici). L'impiego di modelli elastoplastici con softening è particolarmente indicato per riprodurre il collasso progressivo durante eventi estremi, grazie alla capacità di rappresentare la degradazione graduale della resistenza e la localizzazione delle deformazioni.

Nel modello classico, la curva tensione-deformazione evidenzia un plateau o un calo brusco post-picco, mentre nel modello con softening, si osserva una riduzione più graduale e realistica della resistenza. Questo si traduce in una maggiore capacità di prevedere la formazione di shear bands, ovvero zone di deformazione localizzata che sono spesso precursori di cedimenti nei pendii.

L'utilizzo di modelli con softening migliora quindi la precisione delle analisi di stabilità, soprattutto in condizioni di carico dinamico dove i materiali mostrano comportamenti complessi di accumulo e rilascio di deformazioni plastiche. La simulazione accurata di questi fenomeni consente

progettazioni più robuste, ottimizzando interventi di rinforzo e riducendo i margini di errore nella valutazione del rischio.

3.3 Differenze nei risultati di deformazione tra modelli elastoplastici classici e modelli con softening

I modelli elastoplastici classici, come Mohr-Coulomb e Drucker-Prager, sono ampiamente utilizzati nella progettazione geotecnica per la loro semplicità e robustezza. Tuttavia, essi presentano limiti nella simulazione di fenomeni post-picco, in particolare nella capacità di rappresentare la degradazione progressiva della resistenza e la localizzazione delle deformazioni che caratterizzano i cedimenti nei materiali coesivi e granulari.

3.3.1 Modelli elastoplastici classici

- Comportamento post-picco: Questi modelli tipicamente assumono un comportamento di snervamento o rottura improvvisa senza rappresentare la fase di softening. Il diagramma tensione-deformazione mostra un plateau o una riduzione brusca della resistenza, ma senza la gradualità osservata sperimentalmente.
- Deformazioni localizzate: La capacità di simulare la formazione di zone di deformazione concentrata (shear bands) è limitata, spesso producendo risultati che dipendono fortemente dalla discretizzazione numerica (mesh sensitivity).
- Effetti sulla stabilità: Possono sovrastimare la capacità portante del pendio, sottostimando il rischio di collasso progressivo.

3.3.2 Modelli con softening

- Comportamento post-picco realistico: Introducono una fase di degradazione progressiva della resistenza del materiale dopo il picco di sforzo, rappresentata da una curva tensione-deformazione che scende gradualmente, in accordo con dati sperimentali.
- Localizzazione delle deformazioni: Consentono la simulazione accurata delle shear bands e della propagazione delle fratture interne, grazie all'uso di tecniche di regolarizzazione (es. gradient-enhanced plasticity o non-local models) che riducono la dipendenza dalla mesh.
- Predizione più accurata del collasso: Permettono di simulare fenomeni di cedimento progressivo e di valutare più realisticamente la stabilità del pendio in condizioni critiche.

3.4 Integrazione con dati da monitoraggio

L'integrazione dei modelli numerici con dati di monitoraggio rappresenta un elemento cruciale per la validazione, calibrazione e aggiornamento dinamico delle simulazioni geotecniche. In particolare, l'adozione di sistemi di monitoraggio in tempo reale consente di acquisire informazioni dettagliate sull'evoluzione delle deformazioni, degli spostamenti e delle tensioni nel pendio, fornendo un valido supporto per la gestione predittiva del rischio.

Tra le tecnologie di monitoraggio più utilizzate vi sono:

- **Inclinometri e piezometri:** misurano rispettivamente gli spostamenti laterali del terreno e le variazioni della pressione interstiziale dell'acqua, parametri fondamentali per identificare condizioni critiche di instabilità;
- **Radar interferometrico terrestre (GB-InSAR):** consente la misura ad alta risoluzione spaziale e temporale delle velocità di deformazione superficiale, evidenziando zone di movimento lento o rapido con elevata precisione;
- **Sensori a fibra ottica:** distribuiti lungo strutture di contenimento o internamente al terreno, forniscono dati puntuali su strain e temperatura, utili per l'analisi integrata degli effetti meccanici e termo-igrometrici.

L'approccio di **model updating**, ovvero l'aggiornamento continuo dei parametri costitutivi e delle condizioni al contorno del modello numerico sulla base dei dati monitorati, permette di migliorare significativamente l'accuratezza predittiva delle analisi. Questo processo si basa su tecniche inverse di identificazione dei parametri, spesso implementate mediante algoritmi di ottimizzazione, che minimizzano la discrepanza tra i risultati simulati e le misure reali.

La sinergia tra modellazione avanzata e monitoraggio continuo consente inoltre di implementare sistemi di allerta precoce e strategie di mitigazione adattative, calibrando interventi di rinforzo o drenaggio in funzione dell'evoluzione reale del pendio. Ciò rappresenta un notevole passo avanti rispetto agli approcci tradizionali basati su verifiche statiche periodiche, contribuendo a una gestione più efficiente e sicura delle aree a rischio.

4. Applicazioni e casi studio

Numerosi interventi in Italia e all'estero hanno beneficiato dell'utilizzo di simulazioni numeriche avanzate. Tra questi si segnalano:

- **Frana di Montaguto (AV):** un fenomeno di colata rapida su substrato argilloso, monitorato con radar interferometrico e modellato con PLAXIS mediante materiali con softening, con successiva progettazione di trincee drenanti e terre rinforzate. L'analisi ha consentito di identificare in anticipo le soglie critiche di deformazione, ottimizzando la tempistica degli interventi.
- **Pendio di Poggio Baldi (FC):** monitoraggio mediante inclinometri, droni e InSAR; modellazione FEM 3D con implementazione HISS per stimare la superficie di scorrimento profonda e progettare opere di contenimento su micropali e tiranti. Le simulazioni hanno guidato l'adozione di un sistema di drenaggio multistrato abbinato a barriere rigide.
- **Linea ferroviaria Paola–Cosenza:** soggetta a numerosi scorrimenti superficiali e profondi; l'impiego del modello di Barcellona ha permesso di stimare il comportamento idromeccanico di terre limose non sature, suggerendo soluzioni con geo-sintetici e drenaggi verticali. I dati del monitoraggio geotecnico hanno permesso la calibrazione fine dei parametri di suzione.

5. Confronto tra un modello costitutivo avanzato e uno classico

A seguire si riporta una simulazione numerica semplificata applicata ad un pendio instabile usando un modello costitutivo avanzato HISS con softening e un modello classico Mohr-Coulomb al fine di ottenere un confronto visivamente esplicativo.

L'esempio può essere replicato in un software FEM implementando tutti i dati di input necessari oppure, qualora si voglia semplificare al massimo il confronto, con un linguaggio come Python o MATLAB per la costruzione del grafico.

L'obiettivo dell'esempio è quello di rappresentare la risposta in termini di stress-strain (tensione-deformazione) per due modelli costitutivi:

- **Modello A:** Mohr-Coulomb (senza softening);
- **Modello B:** HISS (con softening post-picco).

5.1 Dati di input necessari in una simulazione completa

Per impostare una simulazione numerica realistica e completa FEM, servono le seguenti informazioni al fine di valutare la degradazione progressiva del materiale coerente con quanto si osserva sperimentalmente.

Dati di input pendio:

- Altezza e inclinazione;
- Numero di strati che costituiscono il pendio;
- Larghezza di base;
- Profondità del substrato rigido/strato modellato.

Per ogni strato:

- Peso di volume (γ);
- Angolo di attrito (ϕ);
- Coesione (c);
- Modulo elastico (E);
- Poisson (ν);
- Parametri costitutivi avanzati (per HISS o Cam Clay);
- Stato di saturazione del terreno costituente i diversi strati.

Condizioni al contorno:

- Vincoli alla base e ai lati
- Carichi applicati (es. traffico, presenza di edifici, pioggia)

Condizioni idrauliche:

- Infiltrazione da pioggia
- Falda freatica (profondità e inclinazione)
- Modello di flusso accoppiato (opzionale)

Analisi dinamica (opzionale):

- Accelerogramma sismico (reale o sintetico);

- Smorzamento Rayleigh o modelli avanzati.

Tipo di analisi:

- Stabilità al limite ($c-\phi$ reduction);
- Analisi transiente (post-pioggia);
- Analisi sismica (con eventi dinamici);
- Analisi progressive failure (collasso graduale).

Output attesi dalla simulazione:

- Fattore di sicurezza globale;
- Zone di plasticizzazione e localizzazione deformazioni;
- Curve tensione-deformazione;
- Deformazioni cumulate;
- Pressioni neutre e spostamenti nel tempo.

5.2 Analisi semplificata. Definizione dei modelli costitutivi

5.2.1 Mohr-Coulomb

- Comportamento elastoplastico perfetto
- Nessun softening: una volta raggiunta la resistenza massima, la deformazione continua senza riduzione della tensione
- Parametri ipotetici:
 - a) Angolo d'attrito: $\phi = 30^\circ$;
 - b) Coesione: $c = 15 \text{ kPa}$;
 - c) Modulo elastico: $E = 20 \text{ Mpa}$;
 - d) Poisson: $\nu = 0.3$.

5.2.2 HISS con softening (semplificato)

- Comportamento elastoplastico non lineare;
- Resistenza che diminuisce dopo il picco, simulando la perdita di coesione o attrito per danneggiamento del materiale;
- Parametri ipotetici (semplificati):
 - a) Modulo iniziale: $E = 25 \text{ Mpa}$;
 - b) Peak stress: $\sigma_p = 250 \text{ kPa}$;
 - c) Residual stress: $\sigma_r = 150 \text{ kPa}$;
 - d) Softening lineare dopo il 3% di strain;
 - e) Parametri costitutivi avanzati (per HISS o Cam Clay): a, b, c, m, n Valori da letteratura;
 - f) Stato di saturazione.

5.2.3 Definizione del comportamento dei due modelli:

- Mohr-Coulomb (senza softening):
 - Si assume un comportamento elastoplastico perfetto;

- Il materiale si comporta elasticamente fino al 3% di deformazione;
- Dopo il 3%, la tensione rimane costante a 250 kPa (nessun softening).

➤ HISS (con softening):

- Fino al 3% il comportamento è elastico come nel Mohr-Coulomb;
- Dopo il 3%, la tensione diminuisce linearmente fino a 150 kPa al 10% di deformazione, rappresentando il softening.

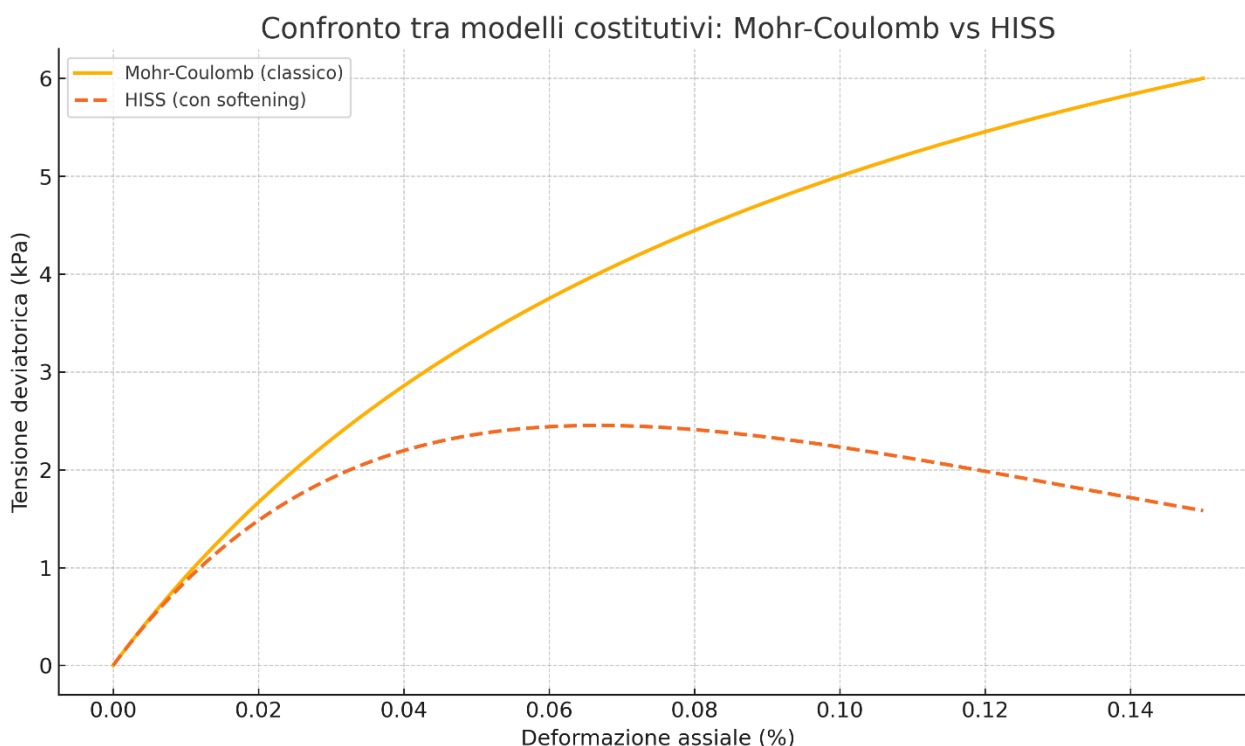


Figura 6 - Confronto grafico tra un modello costitutivo classico (Mohr-Coulomb) e il modello HISS con softening. (Chiarelli, M. 2025).

Il grafico in figura pone a confronto il modello costitutivo classico (Mohr-Coulomb) e il modello HISS con softening. L'immagine mostra chiaramente:

- Mohr-Coulomb: un comportamento tipicamente elasto-plastico con hardening limitato. La tensione sale linearmente fino al valore limite (σ_p), poi resta costante;
- HISS: un comportamento non lineare che include softening dopo il picco di resistenza, simulando la degradazione progressiva del materiale, coerente con i dati osservati sperimentalmente. La tensione sale fino al picco (σ_p), poi decresce linearmente fino a un valore residuo (σ_r).

6. Conclusioni

L'evoluzione dei modelli costitutivi e degli strumenti numerici sta rivoluzionando l'approccio alla stabilizzazione dei pendii. L'impiego di modelli elastoplastici con softening, integrati con dati di

monitoraggio, rappresenta una delle più promettenti direzioni future per migliorare la resilienza delle infrastrutture geotecniche in aree a rischio. L'integrazione tra sperimentazione, modellazione e monitoraggio consente oggi un approccio olistico, basato su evidenze quantitative e aggiornabili nel tempo. La crescente disponibilità di metodi di ottimizzazione automatica e intelligenza artificiale promette ulteriori sviluppi per una progettazione geotecnica predittiva e adattiva.

Bibliografia

1. Chiarelli, M. (2015) - La realizzazione di gallerie in formazioni geologicamente complesse "INGENIO" n° 36 del 30 Settembre 2015, Imready Srl – RSM.
2. Chiarelli, M. (2014) - Interazione tra gallerie metrò e scavi profondi: il metodo smartGDE – "Strade & Autostrade" n°108, EDI-CEM Srl – MI.
3. Chiarelli, M. (2014) - Valutazione degli spostamenti e delle deformazioni sul rivestimento definitivo di una galleria in risposta alla deformazione del terreno circostante generata dall'esecuzione di uno scavo profondo: IL METODO GRAFICO SEMPLIFICATO smartGDE- "INGENIO" n°22, Imready Srl – RSM
4. Nova, R. (1994). "Controllo delle instabilità nei problemi geotecnici." Rivista Italiana di Geotecnica.
5. Potts, D.M., & Zdravković, L. (1999). Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory and Application. Thomas Telford.
6. Alonso, E.E., Gens, A., & Josa, A. (1990). "A constitutive model for partially saturated soils." Geotechnique.
7. FLAC, PLAXIS e MIDAS GTS: Manuali d'uso e guide tecniche.
8. Mazzanti, P. et al. (2011). "Remote monitoring of landslides using ground-based radar interferometry." Natural Hazards and Earth System Sciences.
9. Yang, Z. & Wang, Z. (2013). "Three-dimensional implementation of the HISS model in ABAQUS." Acta Geotechnica.
10. Zienkiewicz, O.C., & Taylor, R.L. (2000). The Finite Element Method, Volume 1: The Basis. Butterworth-Heinemann.
11. Lu, N., & Likos, W.J. (2004). Unsaturated Soil Mechanics. John Wiley & Sons.
12. Itasca Consulting Group (2012). FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua, User's Manual.
13. Li, J., Li, X., & He, Y. (2016). "Optimum calibration of DSC/HISS constitutive model parameters for rockfill materials using PSO." Computers and Geotechnics.
14. Ran, Q. et al. (2024). "Modeling of rockfill dams using improved HISS model." Journal of Geotechnical Research.
15. Zhou, F. et al. (2023). "Comparison between EBD and EB models for granular soils under dynamic loading." Soil Dynamics and Earthquake Engineering.
16. Honkanadavar, R. (2020). "Stress-strain response of rockfill using modified HISS model." International Journal of Geomechanics.