

# LA TERRA RINFORZATA: CENNI RELATIVI AGLI ASPETTI MECCANICI, MATEMATICI, NORMATIVI E UN ESEMPIO APPLICATIVO

Lorenzo Frigo (lfrigo@geosintex.com)  
Ingegnere civile geotecnico-Geosintex srl

**ABSTRACT.** Il presente intervento riguarda la tecnologia delle terre rinforzate che consiste nel realizzare strutture di sostegno introducendo nel terreno, resistente a compressione, elementi piani sintetici stesi in orizzontale in grado di resistere a trazione. Dopo una descrizione dei possibili meccanismi di rottura che possono portare al collasso le strutture si passerà ad esaminare i metodi di calcolo ritenuti più idonei per dimensionare queste opere di sostegno. Tuttavia ci possono essere casi di geometria e stratigrafia complessi nei quali, oltre alle analisi all'equilibrio limite (con superficie di rottura di forma imposta) conviene condurre analisi numeriche nelle quali la superficie di rottura si sviluppa in modo naturale. Tutto questo deve essere condotto tenendo conto delle indicazioni date dagli attuali testi normativi di riferimento (NTC 2008, Eurocodici 7 e 8). La scelta dei parametri meccanici del terreno da utilizzare nelle analisi richiede notevole giudizio tecnico in modo da garantire la buona riuscita dell'opera di sostegno.

## 1. Introduzione

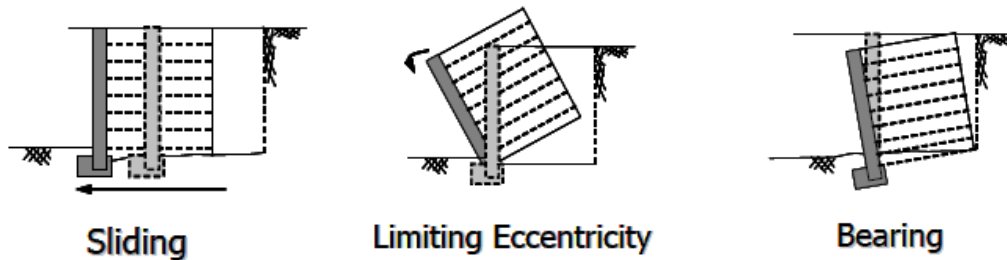
Le opere di sostegno dei terreni rappresentano un settore di notevole interesse per l'ingegneria geotecnica tanto da costituire un insegnamento unico negli attuali ordinamenti accademici. Nel corso degli ultimi 50 anni, grazie da un lato ad esigenze di tipo economico e dall'altro da una sempre più presente e diffusa attenzione all'impatto che le strutture realizzate hanno con l'ambiente circostante, si è diffusa l'idea di sostituire i tradizionali muri in conglomerato cementizio con opere nelle quali l'elemento che contrasta la spinta delle terre è inserito nel terreno a tergo del paramento a vista, terreno che viene "rinforzato" in quanto si introducono in un mezzo che resiste prevalentemente a compressione elementi con resistono a trazione. I primi esempi di utilizzo di questa tecnica risalgono, in epoca recente, a Henri Vidal (1966;1969) architetto e ingegnere francese il quale ha sviluppato questa tecnologia sia per la stabilizzazione dei pendii sia per realizzare veri e propri muri di sostegno, spalle di ponte, argini, rilevati stradali e altre strutture.

Con l'avvento dei prodotti geosintetici si sono ottenuti rinforzi con elevata resistenza alla corrosione e stabilità a lungo termine, buona interazione con il terreno in termini di attrito, limitati danneggiamenti durante la posa in opera. Inoltre scegliendo in modo adeguato il polimero si possono contenere le deformazioni entro valori ammissibili.

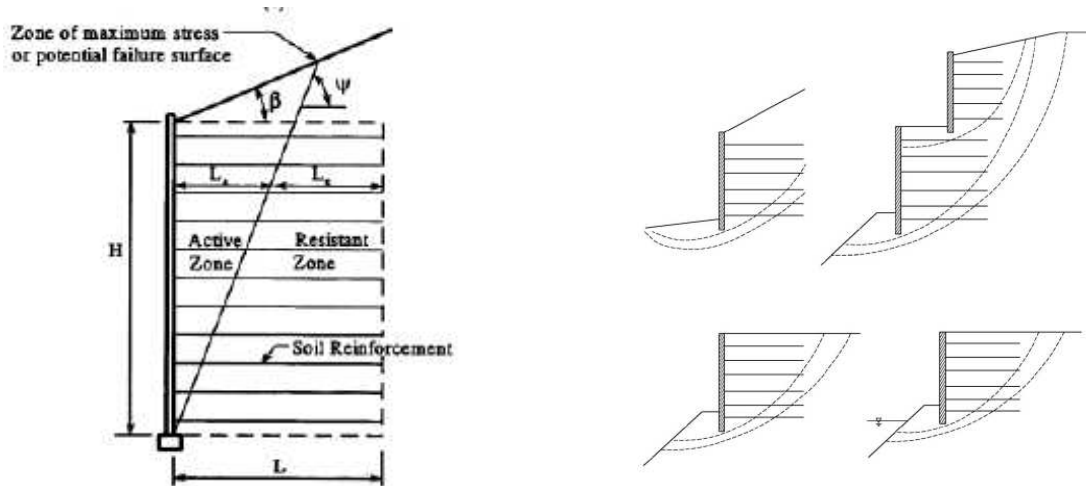
Come ogni opera di ingegneria le terre rinforzate, siano esse classificabili come muri rinforzati (convenzionalmente con inclinazione rispetto all'orizzontale  $\beta \geq 70^\circ$ ) oppure come pendii rinforzati ( $\beta < 70^\circ$ ), vanno progettate sia nei confronti degli stati limite ultimi che di esercizio con adeguati metodi di calcolo.

Un notevole contributo ad un ordinamento sistematico dei passi progettuali è stato realizzato dal U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration (FHWA) che nelle pubblicazioni FHWA-NHI-10-024 e FHWA-NHI-10-025 "Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I and II" riporta la più recente e consolidata prassi per il dimensionamento e inoltre, sempre tale agenzia, ha sviluppato softwares per rendere agevoli le calcolazioni.

Le verifiche agli stati limite ultimi, condotte secondo il metodo dell'equilibrio limite, riguardano la stabilità interna della struttura, esterna e globale. Particolare attenzione va posta al meccanismo di rottura "composta" nel quale la superficie di rottura taglia sia i rinforzi che il terreno a tergo. Si riportano di seguito degli schemi dei meccanismi di rottura elencati (*Figura 1*).



a)



b)

c)

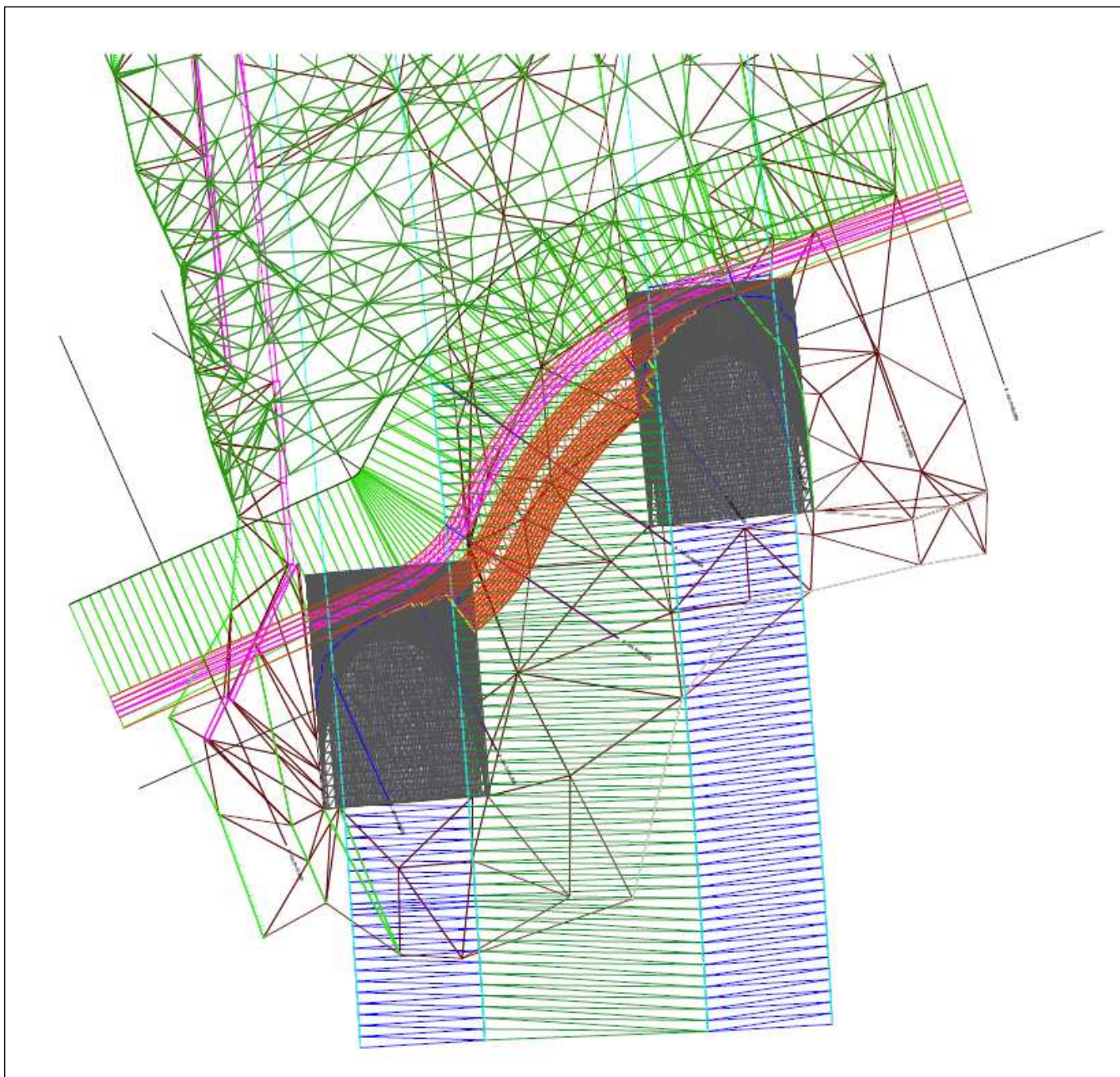
Figura 1. Meccanismi di rottura: a) Stabilità esterna, b) Stabilità interna, c) Stabilità globale.

Accanto a queste verifiche “tradizionali”, per le opere di notevole complessità geometrica o geotecnica, vengono affiancate analisi numeriche condotte sia in campo statico che sismico. In particolare riducendo opportunamente i parametri di resistenza meccanica del terreno descritto con il criterio di rottura di Mohr-Coulomb è possibile far sviluppare “naturalmente” la superficie di rottura e valutare il relativo fattore di sicurezza, senza che essa sia imposta a priori. Ci sono altri vantaggi: non si introducono assunzioni per la posizione e l’inclinazione forze interconco, si possono individuare meccanismi di rottura con superfici composte, l’interazione terreno-rinforzo viene modellata in modo realistico tenendo conto delle deformazioni del rinforzo e non solo come una forza applicata, la soluzione determina un meccanismo di rottura cinematicamente ammissibile.

La scelta dei parametri meccanici del terreno rappresenta un punto di notevole importanza per realizzare con successo un’opera in terra rinforzata. Cosa introdurre nei calcoli? Considerando il terreno alla Mohr-Coulomb si prenderanno i parametri di picco, critici o residui? La coesione apparente va considerato a meno? E che effetto ha? Che parametri utilizzare per le verifiche sismiche? Sono tutti aspetti da valutare attentamente in sede di progettazione sia delle indagini, sia delle opere.

Tutte queste verifiche devono, necessariamente, essere inserite in un adeguato quadro normativo. Gli Eurocodici 7 e 8, rispettivamente “Progettazione geotecnica” e “Progettazione delle strutture per la resistenza sismica” riportano le combinazioni di azioni, resistenze, fattori sicurezza per la progettazioni agli stati limite ultimi e danno indicazione per gli stati limite di esercizio. In Italia gli Eurocodici sono stati in parte recepiti dalle attuali Norme Tecniche delle Costruzioni (D.M. 14/01/2008) nelle quali è presente una classificazione sismica puntuale del territorio.

Un caso pratico terminerà l’esposizione: una terra rinforzata realizzata per l’autostrada A3 Salerno – Reggio Calabria. Si tratta di un pedio rinforzato di altezza  $h=10$  m realizzato per completare l’imbocco di due gallerie e al di sopra di esso è presente un pendio con inclinazione pari  $34^\circ$  e altezza  $h=10$  m. E’ un caso in cui la geometria è complessa e oltre alle analisi all’equilibrio limite (condotte con il codice ReSSA 3.0, ADAMA eng.) è stata eseguita un’analisi numerica alle differenze finite FDM (con il codice Flac -ITASCA). Figura 2



*Figura 2. Opera in terra rinforzata per l'Autostrada A3 SA-RC*