gli autori

FILIPPO CATANZARITI - MASSIMILIANO A. NART

TERRE RINFORZATE

Conoscere, scegliere, progettare e costruire

Con **GSRD 1.0** la suite di calcolo dedicata
alle verifiche di stabilità in condizioni statiche o sismiche

vai alla scheda del libro

contiene: **GSRD 1.0**
DOWNLOAD

della stessa collana

EPC EDITORE

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

Come scaricare i contenuti digitali

1. accedi alla sezione **My EPC**

   nel sito www.epc.it (inserisci le credenziali utilizzate per l'acquisto o effettua una nuova registrazione)

2. attiva il tuo **contenuto digitale**

   a) entra nella sezione **Contenuti digitali** cliccando su **I tuoi contenuti digitali**
   b) inserisci il **codice etichetta** che si trova *in fondo a questa pagina* e premi **Attiva**
   c) ne **La mia libreria** saranno attivi i contenuti predisposti per te, clicca su **Vedi contenuti** per installare il software GSRD (tasto **Install**)

codice etichetta
riportato sul libro cartaceo

EPC EDITORE

Per informazioni e chiarimenti
Servizio assistenza 06 33245273 - tecnico@epclibri.it

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

Filippo Catanzariti, Massimiliano A. Nart

TERRE RINFORZATE

Conoscere, scegliere, progettare e costruire

Con GSRD 1.0 la suite di calcolo dedicata
alle verifiche di stabilità in condizioni statiche o sismiche

EPC
EDITORE

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

TERRE RINFORZATE
ISBN: 978-88-9288-242-3

Copyright © 2023 EPC S.r.l. Socio Unico
EPC S.r.l. Socio Unico - Via Clauzetto, 12 - 00188 Roma - www.epc.it
Servizio clienti: Tel. 06 33245277/271 - clienti@epc.it
Redazione: Tel. 06 33245264/205

La traduzione, l'adattamento totale o parziale, la riproduzione o trasmissione in qualsiasi forma e/o con qualsiasi mezzo elettronico, meccanico o altro (compresi i microfilm, i film, le fotocopie), nonché la memorizzazione anche digitale su supporti di qualsiasi tipo (inclusi magnetici e ottici), i diritti di noleggio e di prestito, sono riservati per tutti i Paesi.
L'Editore si dichiara pienamente disponibile a soddisfare eventuali oneri derivanti da diritti di riproduzione del materiale protetto dai diritti d'autore, di cui non sia stato possibile reperire gli aventi diritto. Ci scusiamo per eventuali omissioni e saremo lieti di inserire gli opportuni riconoscimenti nelle edizioni successive.
L'Editore declina ogni responsabilità per eventuali errori, refusi o inesattezze nonché per eventuali danni risultanti dall'uso delle informazioni presenti nel volume, pur curato con la massima diligenza e attenzione.

Il codice QR che si trova sul retro della copertina, consente attraverso uno smartphone di accedere direttamente alle informazioni di questo volume.
Le stesse informazioni sono disponibili alla pagina:

https://www.epc.it/Prodotto/Editoria/Libri/Terre-rinforzate/5342

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

INDICE

Premessa **11**

Introduzione **13**

1.1 Definizione 13
1.2 Cenni storici 13
1.3 Muri e pendii rinforzati 15
1.4 Terra rinforzata e terra armata 16
1.5 Ambiti di impiego 17

CAPITOLO 2

Elementi costituivi **21**

2.1 I rinforzi 22
2.1.1 I rinforzi geosintetici 24
2.1.1.1 Tipologie 25
2.1.1.1.1 Geotessile 26
2.1.1.1.2 Geogriglia 28
2.1.1.1.3 Biotessile 29
2.1.1.1.4 Geostuoia 30
2.1.1.1.5 Geocella 31
2.1.1.1.6 Georete 31
2.1.1.1.7 Geospaziatore 32
2.1.1.1.8 Geonastro 33
2.1.1.1.9 Geocomposito 34
2.1.1.1.10 Geomembrana sintetica 34
2.1.1.1.11 Geomembrana bituminosa 35
2.1.1.1.12 Geocomposito bentonitico 36
2.1.1.2 Materia prima 36
2.1.1.2.1 Poliestere − PET 38
2.1.1.2.2 Poliolefine (PE e PP) 39
2.1.1.2.3 Poliammide (PA – Nylon) 40
2.1.1.2.4 Polivinilcloruro – PVC 41
2.1.1.3 Proprietà caratteristiche di un rinforzo geosintetico: dalla norma armonizzata alle proprietà essenziali 42

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

2.1.1.3.1 Calcolo della resistenza a trazione e allungamento di un geosintetico: la norma UNI EN ISO 10319:2015 45
2.1.1.3.2 Durabilità di un materiale geosintetico e prodotto affine (ISO/TS 13434:2020) 50
2.1.1.3.2.1 Fattori di decadimento di natura ambientale 55
2.1.1.3.2.2 Fattori di decadimento di natura chimica 56
2.1.1.3.2.3 Fattori di decadimento di natura biologica 56
2.1.1.3.2.4 Fattori di decadimento correlati ai carichi applicati (carichi di trazione e di compressione e fenomeno del creep, danneggiamento meccanico)..... 57
2.1.1.3.2.5 Procedura per la valutazione della durabilità 59
2.1.1.3.3 Durabilità di un geosintetico di rinforzo (allegato B della norma UNI EN 13251:2016)..... 61
2.1.1.4 Parametri che influenzano la resistenza a trazione di un rinforzo geosintetico nel breve e nel lungo periodo 63
2.1.1.5 La resistenza a trazione ammissibile di lungo termine di un rinforzo geosintetico (LTDS)..... 64
2.1.1.5.1 ISO/TR 20432:2007 65
2.1.1.5.1.1 Fattore riduttivo per danneggiamento meccanico durante la posa (RF_{ID})..... 68
2.1.1.5.1.2 Fattore riduttivo per carico applicato – effetto creep (RF_{CR}) 73
2.1.1.5.1.3 Fattore riduttivo per agenti atmosferici (RF_W) 79
2.1.1.5.1.4 Fattore riduttivo per composizione chimica e biologica del terreno (RF_{CH})..... 80
2.1.1.5.2 EBGEO (2010, Germania) 82
2.1.1.5.3 BS 8006-1 (2010, Inghilterra) 83
2.1.1.5.4 PWRC (2000, Giappone)..... 85
2.1.1.5.5 NF P94-270 (2020) e NF G38-064 (2016) (Francia) 86
2.1.1.5.6 FHWA-NHI-10-024 (2009, USA) 88
2.1.1.5.7 NGG (Nordic Geosynthetic Group) Nordic guidelines for reinforced soils and fills (2003) 90
2.1.1.5.8 GEOGUIDE 6 (2002, HONG KONG)..... 92
2.1.1.5.9 ISO/TR 18228-7 (2021, EU) 93
2.1.2 I rinforzi metallici 94
2.1.2.1 Tipologie 95
2.1.2.2 Materia prima 97
2.1.2.3 L'ETA di un rinforzo metallico ad uso strutturale: proprietà caratteristiche essenziali 99
2.1.2.3.1 Proprietà geometriche della rete 106
2.1.2.3.2 Resistenza a trazione nominale della rete a doppia torsione 106

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

2.1.2.3.3 Durabilità di un rinforzo metallico 108
2.1.2.3.3.1 La corrosione dei metalli 108
2.1.2.3.3.2 Fattori ambientali corrosivi 109
2.1.2.3.3.3 Tipologie di rivestimenti protettivi 111
2.1.2.3.3.4 Controlli e prove sui rivestimenti 113
2.1.2.4 Il concetto di resistenza a trazione ammissibile di lungo termine per un rinforzo metallico 114
2.1.2.4.1 Resistenza nominale e spessore di sacrificio 114
2.1.2.4.2 Resistenza a trazione ammissibile di lungo termine 115
2.1.2.4.2.1 BS 8006:2010 115
2.1.2.5.2.2 FHWA NHI-10-024 (2009) 119
2.1.2.5.2.3 GEOGUIDE 6 (2002, HONG KONG) 121
2.1.2.5.2.4 Linee guida per la certificazione di idoneità tecnica all'impiego e l'utilizzo di prodotti in rete metallica a doppia torsione (2013) 123
2.2 Il rilevato strutturale 124
2.2.1 Sistemi di classificazione dei terreni 127
2.2.1.1 USCS 128
2.2.1.2 ASSHO 130
2.2.1.3 Dalla CNR UNI 10006:2002 alla UNI 11531-1:2014 130
2.2.2 UNI EN 14475:2006 – proprietà essenziali del rilevato strutturale 135
2.2.3 Idoneità del terreno per rinforzi geosintetici 137
2.2.4 Idoneità del terreno per rinforzi metallici 139
2.2.5 Legge di resistenza a rottura di un terreno: il concetto di angolo di resistenza al taglio 141
2.2.5.1 UNI EN ISO 17892-10:2019 - prova di taglio diretto 143
2.3 Il paramento esterno 144
2.3.1 Paramento rigido 146
2.3.2 Paramento deformabile 148
2.3.3 Paramento compressibile 150
2.4 Ritentore dei fini al fronte 150
2.5 Drenaggio dell'opera 151

CAPITOLO 3

Principio di funzionamento 153

3.1 Tensione tangenziale di attrito equivalente (TTAE) per sfilamento (pullout) 156
3.1.1 Caso 1) il rinforzo geosintetico 156
3.1.2 Caso 2) il rinforzo metallico 161
3.2 Tensione tangenziale di attrito equivalente (TTAE) per scivolamento diretto (direct sliding) ... 163

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

3.2.1 Caso 1) il rinforzo geosintetico 163
3.2.2 Caso 2) il rinforzo metallico 164
3.3 Compatibilità deformativa 165

CAPITOLO 4
Modalità di posa 167

4.1 Posa in opera di terra rinforzata con rinforzo geosintetico 167
4.2 Posa in opera di terra rinforzata con rinforzo metallico 169

CAPITOLO 5
Meccanismi di collasso 173

5.1 Verifiche interne 175
5.1.1 Verifica della resistenza dei rinforzi 175
5.1.2 Verifica allo sfilamento 183
5.1.3 Verifica allo scorrimento (Direct Sliding) 187
5.1.4 Verifica del risvolto 189
5.2 Verifiche esterne – caso muri rinforzati 190
5.2.1 Verifica al ribaltamento 191
5.2.2 Verifica allo scorrimento lungo il piano di fondazione 193
5.2.3 Verifica a capacità portante 194
5.2.4 Verifica della stabilità globale 199

CAPITOLO 6
Inquadramento normativo nazionale − NTC 2018 201

6.1 Vita nominale e classi d'uso 202
6.2 Le azioni sulle costruzioni 203
6.2.1 Azioni elementari 204
6.2.2 Combinazione delle azioni 205
6.3 Le resistenze 206
6.4 Stati limite ultimi 206
6.5 Tipi di analisi 206
6.6 Le opere in terra rinforzata secondo le NTC 2018 208

CAPITOLO 7
Verifiche sismiche ai sensi delle NTC 2018 211

7.1 Azione sismica 211
7.2 Stati limite 211

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

7.3 Categoria del sottosuolo e condizioni topografiche 213
7.4 Metodi di analisi sismica 215
7.5 Stati limite da considerare nelle verifiche sismiche 216

CAPITOLO 8
Gli Eurocodici 217

8.1 Le origini 217
8.2 Obiettivi e principi degli EC 218
8.3 Recepimento nazionale degli EC 219
8.4 Eurocodice 7 (EN 1997): progettazione geotecnica 221
8.4.1 EN 1997-1 General Rules 222
8.4.2 Principi base 224
8.4.3 Verifica agli Stati Limite Ultimo 225
8.4.3.1 Le azioni di progetto 226
8.4.3.2 Le resistenze di progetto 227
8.4.3.3 Gli approcci progettuali 227
8.4.3.3.1 Approccio Progettuale 1 (DA-1) 228
8.4.3.3.2 Approccio progettuale 2 (DA-2) 229
8.4.3.3.3 Approccio progettuale 3 (DA-3) 230
8.4.4 Verifica agli Stati Limite di Esercizio 231
8.5 Verifica di opere di sostegno 231

CAPITOLO 9
Le appendici nazionali agli Eurocodici 233

CAPITOLO 10
Gli Eurocodici di seconda generazione 237

10.1 prEN 1990:2021 Basis of structural and geotechnical design 239
10.1.1 Classe di conseguenza (Consequence Class CC) 240
10.1.2 Situazioni di progetto (Design situations) 240
10.1.3 Verifiche allo Stato Limite Ultimo 241
10.1.3.1 Valore di progetto delle azioni F 242
10.1.3.2 Combinazioni delle azioni 243
10.1.3.3 Valore di progetto dell'effetto delle azioni E_d 245
10.1.3.4 Design Cases (DC) 246
10.1.3.5 I coefficienti parziali sulle azioni 247
10.1.3.6 Valore di progetto dei parametri del terreno 249
10.1.3.7 Valore di progetto delle resistenze 250

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

10.2 Eurocodice 7 (prEN 1997: Draft Novembre 2021) 251
10.2.1 Le categorie geotecniche 252
10.2.1.1 Classe di complessità geotecnica (Geotechnical Complexity Class GCC) 253
10.2.1.2 Classe di conseguenza (Consequence Class CC) 254
10.2.1.3 La categoria geotecnica (Geotechnical Category GC) 254

APPENDICE A

Piano di manutenzione 255

A.1 Piano di manutenzione dell'opera 255
A.2 Manuale d'uso 256
A.3 Manuale di manutenzione 256
A.3.1 Casserature Metalliche 256
A.3.2 Vegetazione 257
A.4 Programma di manutenzione 257
A.4.1 Sottoprogramma dei controlli 258
A.4.1.1 Casserature metalliche 258
A.4.1.2 Vegetazione 259
A.4.2 Sottoprogramma degli interventi 259
A.4.2.1 Casserature metalliche 259
A.4.2.1.1 Vegetazione 260

APPENDICE B

Software GSRD 1.0 (Geostru Soil Reinforcement Design) 261

B.1 Manuale utente 261
B.1.1 Introduzione al modello di calcolo 261
B.1.2 Menu Principale 262
B.1.3 Dati generali 263
B.1.4 Geometria 264
B.1.5 Sovraccarico 264
B.1.6 Parametri geotecnici 265
B.1.7 Azioni (A), coefficienti geotecnici (M) e resistenze (R) 265
B.1.8 Sisma 266
B.1.9 Rinforzi 266
B.1.10 Risultati 267

Bibliografia 269

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

PREMESSA

Le opere in terra rinforzata costituiscono, da alcuni decenni, una valida soluzione di intervento nell'ambito delle opere strutturali di competenza dell'ingegneria geotecnica, naturalistica ed ambientale. Combinando idonee caratteristiche delle sue due componenti principali, il terreno ed il rinforzo (sintetico o metallico), tale tecnologia costruttiva ha trovato largo impiego in diversi campi di applicazione, dalle opere di sostegno, ai rilevati previsti per il contenimento della caduta massi, agli interventi, in ambito idraulico, per la realizzazione di sopralzi arginali per la difesa idraulica del territorio sino alle opere accessorie tipiche dell'arredo urbano.

Il presente manuale si prefigge l'obiettivo di poter rappresentare per il progettista un valido e utile vademecum della tecnologia, affrontando sia argomenti prettamente teorici che di natura pratica.

Dopo un breve richiamo introduttivo di natura storiografica circa le origini della tecnologia, il manuale affronta e illustra, in modo dettagliato, le diverse componenti del sistema, non tralasciando di analizzare le modalità di installazione e i riferimenti normativi circa le verifiche di stabilità previste dalla normativa cogente italiana (NTC 2018).

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

1.1 Definizione

Spesso, per introdurre un argomento, si cerca di proporre al lettore la migliore definizione possibile presente in letteratura, che possa risultare chiara intuitiva ed esaustiva, in grado di poter inquadrare, con la giusta prospettiva, gli aspetti principali della tecnologia che saranno oggetto di approfondimento nel corso del manuale.

In base a questa premessa, la definizione che si è deciso di prendere in considerazione è contenuta all'interno della norma **UNI EN 14475**, e afferma che un'opera in terra rinforzata è "*una terra ingegnerizzata che incorpora strati discreti di rinforzo del terreno, posizionati generalmente in orizzontale, che sono disposti tra livelli successivi di terra durante la costruzione*".

In generale, l'operazione volta a "*rinforzare*" un terreno, nel senso di migliorarne le performance geotecniche, può essere condotta secondo tre modalità operative distinte:

1) includendo il rinforzo direttamente nel terreno indisturbato (**rinforzo in sito** – *soil nailing*);
2) riportando il terreno, compattandolo per strati, sopra lo strato di rinforzo (**rinforzo con rinterro** – terra rinforzata e terra armata);
3) miscelando il terreno con microelementi di rinforzo (fibre sintetiche) (**rinforzo per miscelazione**).

La tecnologia illustrata nel presente volume riguarda il sistema di rinforzo con rinterro.

1.2 Cenni storici

L'impiego di rinforzi all'interno del terreno, finalizzato a migliorarne il comportamento geotecnico, risale al periodo compreso tra il 3000 e 4000 a.c.

Le prime tracce risalgono al periodo della grande muraglia cinese, dello Ziggurat di Agar-Quf, e della torre di Dunhuang in Cina. L'epoca in cui si collocano storicamente queste prime esperienze vedevano coinvolti come elementi di rinforzo, materiali naturali, quali canne di bambù, rami di salice, juta, canapa o vimini.

Nel corso del secolo scorso, grazie all'intuizione del francese **Henry Vidal**, la tecnologia del rinforzo dei terreni mediante rinterro, è stata aggiornata e sviluppata industrialmente, diventando, oggi, un sistema largamente utilizzato in tutto il mondo delle costruzioni.

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

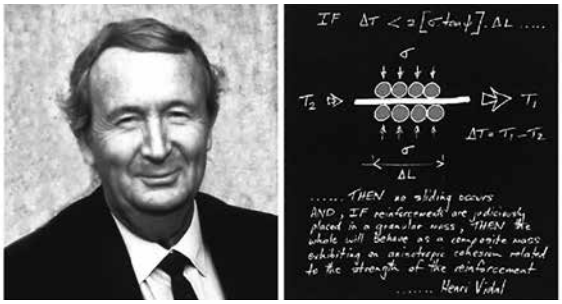


Figura 1.1 – *Henry Vidal ideatore della tecnologia della "Terre Armée"*

Nel 1963, Vidal brevetta il sistema denominato "*terre armèe"*. La tecnica consiste nell'impiego di bandelle nervate d'acciaio, poste all'interno del terreno, in grado di interagire con esso e migliorarne le sue caratteristiche geotecniche. Il primo muro in terra armata, viene realizzato nei Pirenei nel 1965.

Con l'introduzione, nel corso degli anni successivi, di nuovi materiali, derivati dalle materie plastiche (*geosintetici*), la tecnologia si diffonde molto più rapidamente. Nel 1869 Hyatt crea il primo rudimentale materiale plastico della storia, impastando cellulosa e canfora, per produrre palle da biliardo con nitrato di cellulosa. Nel 1926 inizia l'impiego del PVC come elastomero, mentre, nel corso 1933, l'ICI sintetizza il polietilene a bassa densità (LDPE), iniziando a produrlo, su scala industriale, a partire dal 1939.

Nel 1941 si produce per la prima volta il PET (poliestere), in Inghilterra, mentre, sempre nello stesso anno, in Germania, viene sintetizzato il nylon 6. Nel 1953, Ziegler sintetizza il Polietilene ad alta densità (HDPE), e nel corso dell'anno successivo (1954), insieme a Natta, anche il Polipropilene (PP).

Le produzioni industriali su larga scala si registrano in Francia alla fine degli anni '50 (1958). Si tratta dei primi rudimentali impianti di geotessili tessuti non tessuti a filo continuo in PET e PP.

Altri esempi di opere, si registrano in Inghilterra, nel corso degli anni 70. La tecnologia si sta diffondendo sempre più, e oltreoceano, negli Stati Uniti, a partire dal 1974 si realizzano altri rilevati rinforzati.

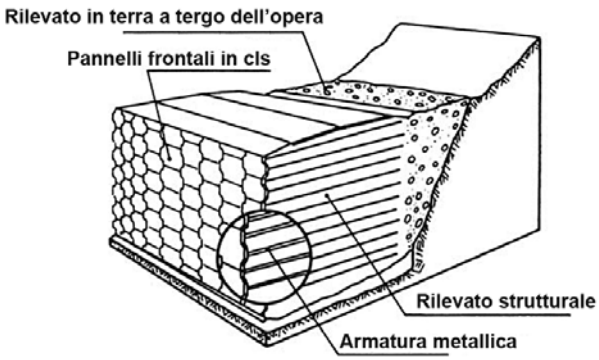


Figura 1.2 – *Sezione tipo della Terra Armata dotata di rinforzi lineari in bandelle metalliche*

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

Inizialmente gli elementi di rinforzo erano costituiti da geotessili tessuti e geotessili tessuti non tessuti, ma presto la tecnologia e le ricerche in ambito universitario finanziate dalle stesse industrie, prediligono l'impiego di elementi di rinforzo sintetici "*a maglia aperta*": le *geogriglie*.

In Italia, i primi esempi di terre rinforzate risalgono ai primi anni '80, precisamente nel 1986 presso la base NATO di Sigonella e a Modena, per la costruzione di un rilevato stradale.

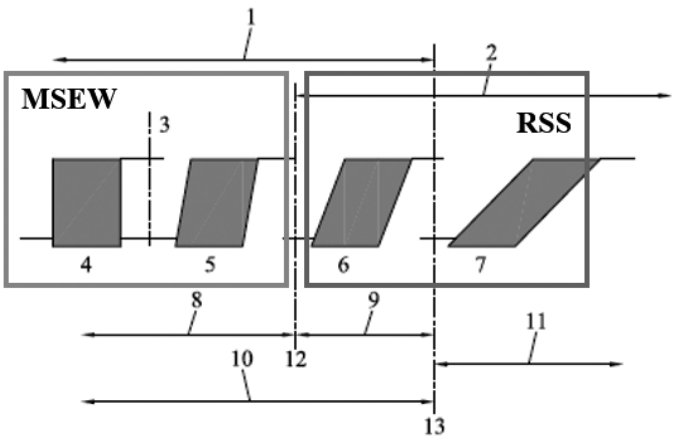
1.3 Muri e pendii rinforzati

La differente geometria delle opere, in termini di pendenza del paramento esterno (β), ha indotto la necessità di distinguere tra **muri** e **pendii rinforzati**.

Autorevoli e consolidate normative di settore hanno infatti evidenziato la necessità di distinguere gli interventi in ragione del valore del parametro β, introducendo due distinte classi di strutture:

– **Muri rinforzati** (MSEW [1]): $90° < \beta < 75°$

– **Pendii rinforzati** (RSS [2]): $75° < \beta < 45°$



LEGENDA

1) strutture di contenimento del terreno
2) pendii rinforzati
3) facciata verticale (α = 90°)
4) muro verticale
5) muro pendente
6) pendio ripido
7) pendio poco pronunciato
8) tipi particolari di paramento frontale: pannello in rete elettrosaldata, blocchi segmentali, gabbioni
9) tipi particolari di paramento frontale inclinato
10) tipi di paramento comuni
11) assenza del paramento, materiali per la protezione dall'erosione se richiesti
12) pendenza della facciata 4V:1H
13) pendenza della facciata 1V:1H

Figura 1.3 – *Tipologie di opere al variare dell'inclinazione del paramento esterno*

1. Acronimo anglosassone.
2. Acronimo anglosassone.

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

In funzione del tipo di opera da realizzarsi, alcune componenti e le verifiche di stabilità saranno differenti.

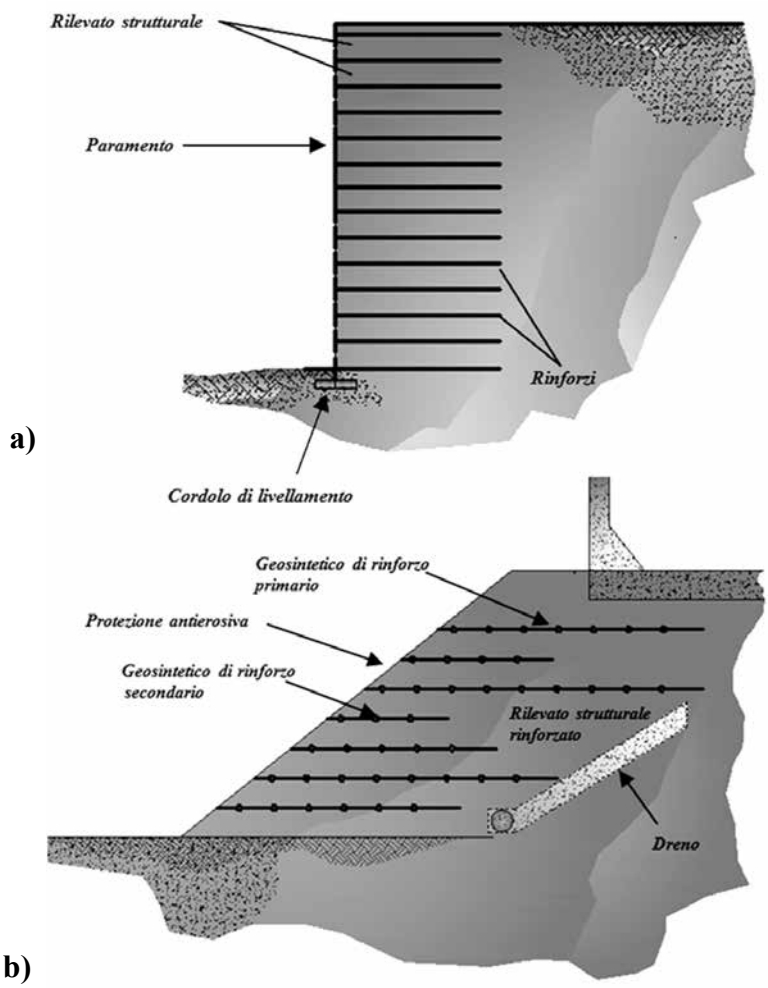


Figura 1.4 – *Elementi caratteristici di un muro in terra rinforzata (a) e di un pendio in terra rinforza (b)*

1.4 Terra rinforzata e terra armata

È consuetudine riferirsi ad un'opera in terra rinforzata, impiegando il termine *terra rinforzata* o *terra armata*, ritenendo i due vocaboli intercambiabili.

Dal punto di vista tecnico, non è così. La terra rinforzata dispone di un paramento permeabile alla vegetazione (in grado quindi di assumere le sembianze di un "giardino verticale"), mentre la terra armata, disponendo di un paramento in calcestruzzo, non ha tale possibilità, salvo in taluni casi prevedere l'inserimento in facciata di elementi decorativi tipo "fioriera" in grado di garantire la presenza di essenze vegetali pensili a livello puntuale.

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

La terra armata, inoltre, disponendo come unica tipologia di paramento il modello rigido in calcestruzzo (nei vari modelli in tutta altezza o a pannelli), può contare su un unico valore di inclinazione del fronte (90°), ciò che invece non accade per la terra rinforzata che può contare su un range di angoli di inclinazione decisamente più ampio, con valori compresi tra i 90° e i 45°.

Tabella 1.1 – Distinzione tra la tecnologia relativa alle terre rinforzate e quella delle terre armate

PROPRIETÀ	TERRA RINFORZATA	TERRA ARMATA
Paramento esterno rivegetabile	*Integralmente*	*Solo parzialmente con presenza di elementi puntuali*
Range di angoli di inclinazione	*$90° < \beta < 45°$*	*90°*
Tipo di paramento	*Casseri metallico o removibile*	*Pannello rigido in cls*

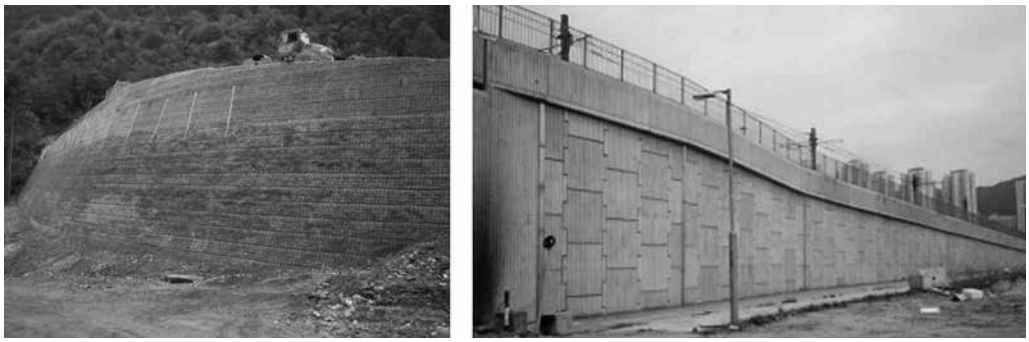


Figura 1.5 – *Opera in terra rinforzata (immagine di sinistra) e terra armata (immagine di destra)*

1.5 Ambiti di impiego

L'impiego della terra rinforzata, intesa sia nella sua accezione di muro o pendio rinforzato, trascorso ormai quasi più di mezzo secolo dal suo ingresso nel comparto delle opere civili, durante il quale si sono affinate le conoscenze sia dei materiali che del suo comportamento nel medio lungo periodo, rappresenta una valida soluzione progettuale in molti contesti, i principali dei quali sono:

- rilevati, controripe e sottoscarpe stradali;
- valli o tomi per la protezione dalla caduta massi;
- opere per la stabilizzazione di pendii in frana;
- rilevati ferroviari;
- spalle di ponti;
- mascheramenti di opere di sostegno verticali (paratie);
- barriere antirumore;
- sopralzi arginali per la difesa idraulica del territorio;
- argini per discariche;
- sbarramenti artificiali per invasi idrici.

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

Per ciascuno dei citati campi di intervento, è richiesto al progettista l'adozione di opportuni accorgimenti tecnici volti ad accogliere le specificità che ciascun ambito applicativo richiede (tipologia del paramento, del rinforzo o dell'elemento di ritenzione dei fini al fronte dell'opera). La natura chimica dei suoli, piuttosto che la natura dei carichi esterni applicati o l'eventuale gestione delle condizioni idrauliche al contorno, richiedono competenze specifiche da parte del tecnico incaricato della progettazione, chiamato ad adottare un corretto mix design finalizzato a trasferire negli elaborati esecutivi, le idonee caratteristiche che l'opera dovrà possedere.

Allargamento area a verde presso unità abitativa privata

Sopralzo arginale nell'ambito della difesa idraulica del territorio

Sottoscarpa stradale

Rilevati per ampliamenti in aree industriali

Aree di stoccaggio di terreni contaminati per interventi di bonifica

Rilevati stradali in prossimità delle spalle di ponte

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

Argini di contenimento presso impianti di stoccaggio rifiuti

Sopralzi arginali

Rilevati stradali in prossimità delle spalle di ponte

Tomi paramassi

Rilevati stradali bifacciali

Interventi in ambito agricolo

Pagine omesse dall’anteprima del volume

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

CAPITOLO 3

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Il meccanismo di interazione tra terreno e rinforzo è un legame costitutivo dipendente da diversi fattori, i principali dei quali sono:

– le caratteristiche strutturali, geometriche e meccaniche del rinforzo;

– le proprietà geomeccaniche del terreno;

– le condizioni di carico esterne.

Il modello analitico su cui si fonda il concetto del principio del rinforzo dei terreni, che giustifica l'efficacia dell'inclusione dei rinforzi all'interno del terreno, trova riscontro nel tradizionale criterio di rottura delle terre di *Mohr-Coulomb.*

Il comportamento del materiale composito (*terreno-rinforzo*), nella sua rappresentazione grafica sul piano di *Mohr,* viene assimilato ad un terreno dotato di coesione efficace apparente c'_r (Schlosser e Long, 1972).

$$c'_r = \frac{\sigma'_r \cdot \sqrt{K_p}}{2} = \frac{\sigma_s \cdot A_s}{2 \cdot \Delta B \cdot \Delta H \cdot K_a}$$

dove:

σ'_r = tensione efficace di confinamento equivalente sviluppata dal rinforzo

σ_s = resistenza a trazione del rinforzo

A_s = sezione trasversale del rinforzo

ΔB e ΔH interasse verticale e orizzontale del rinforzo

Il principio teorico da cui trae origine l'intuizione di poter migliorare, dal punto di vista geotecnico, un terreno, prevedendo al suo interno la presenza di opportuni rinforzi (metallici o sintetici), si basa sul concetto che i due elementi siano in grado di interagire tra di loro al fine di ottenere un materiale ibrido finale (terreno rinforzato) più prestazionale.

L'interazione e conseguentemente il trasferimento della sollecitazione dal terreno al rinforzo, avviene secondo tre differenti *meccanismi di interazione* (Jewell *et al*. 1984):

– *forza di attrito che si generano tra la superficie piena del rinforzo ed il terreno (sezione A);*

– *resistenza passiva che si genera negli elementi pieni del rinforzo posti trasversalmente rispetto alla direzione di sollecitazione (sezione B);*

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

– *forza d'attrito che si generano tra il terreno presente all'interno dell'apertura del rinforzo e quello circostante.*

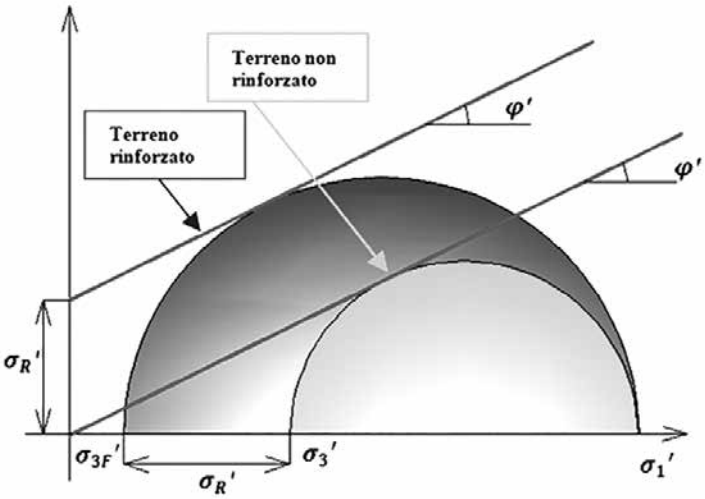


Figura 3.1 – *Rappresentazione del terreno rinforzato e non, sul piano di Mohr*

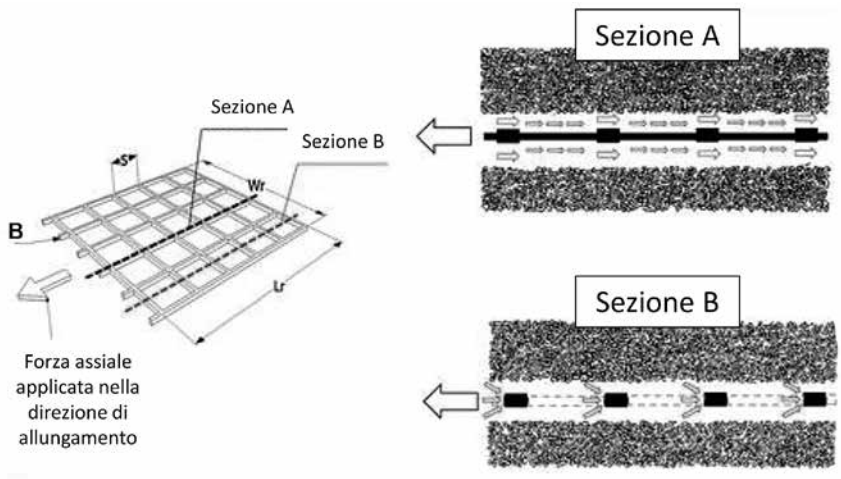


Figura 3.2 – *Meccanismi di interazione tra elementi di rinforzi sintetici a maglia aperta (geogriglie) e a maglia chiusa (geotessili tessuti tessuti)*

Affinché il trasferimento della sollecitazione dal terreno al rinforzo risulti efficace, è necessario che ciascun meccanismo deputato al trasferimento fornisca il suo contributo.

L'elemento di rinforzo deve poter disporre di alcune caratteristiche fondamentali quali:

– *idonee caratteristiche di resistenza a trazione e rigidezza*: si deve garantire che il rinforzo attivi adeguati livelli di resistenza a trazione, nel momento in cui il terreno, per effetto dei

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

carichi esterni applicati, richieda il suo contributo. Il conseguente livello deformativo (ε) che si genera all'interno del rinforzo, deve poi risultare compatibile con i valori deformativi che rendono l'opera funzionale. Nel caso in cui il livello deformativo generato non dovesse esserlo, sarebbe necessario da parte del progettista rivedere la scelta della tipologia del rinforzo da impiegarsi;

– *lunghezza sufficiente* perché l'opera in terra risulti sufficientemente ancorata alla parte stabile del pendio/terreno al fine di evitare l'insorgere di movimenti di tipo rotazionale o traslativo;
– *durabilità* da intendersi come mantenimento delle qualità fisico-meccaniche performanti nel tempo, in ragione della vita utile di progetto attribuita all'opera;
– *struttura geometrica* al fine di generare il miglior effetto stabilizzante possibile (scelta tra sistema a maglie aperte o chiuse).

Anche il terreno deve possedere delle idonee caratteristiche dipendenti dalla sua natura, dalla sua distribuzione granulometrica, dalla forma delle sue particelle, dalla densità, dal suo contenuto d'acqua, dalla coesione e dai parametri di rigidezza (come si è potuto appurare nel paragrafo dedicato al rilevato strutturale). L'attivazione dei tre meccanismi d'interazione dipende da quale *cinematismo di rottura* viene coinvolto e dalla geometria dell'elemento di rinforzo considerato (maglie aperte o chiuse). I cinematismi di rottura in grado di attivare i meccanismi di interazione tra terreno e rinforzo sono:

– **Sfilamento** (*pullout*);
– **Scivolamento diretto** (*direct sliding*).

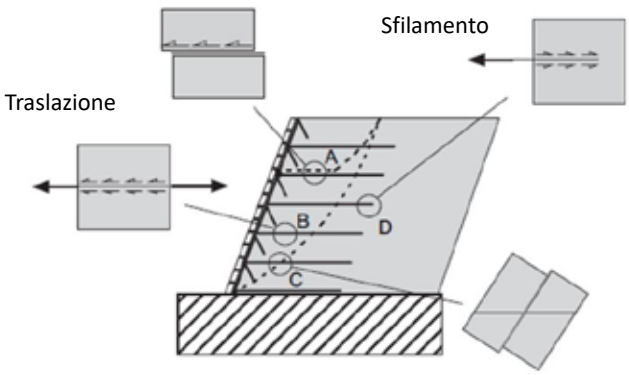


Figura 3.3 – *Meccanismi di interazione di un rinforzo in un'opera in terra rinforzata (Palmeira amd Michigan, 1989)*

L'inclusione all'interno della matrice solida (terreno) degli elementi di rinforzo determina, all'interfaccia, l'insorgere di tensioni tangenziali per effetto attritivo, definite *tensioni tangenziali di attrito equivalente* (T_R).

A seconda del cinematismo di rottura considerato, avremo:

– tensione tangenziale di attrito equivalente **(TTAE)** per **sfilamento;**
– tensione tangenziale di attrito equivalente **(TTAE)** per **scivolamento diretto.**

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

Le caratteristiche di attrito dell'interfaccia **terreno-rinforzo geosintetico** vengono determinate mediante prove di taglio diretto (TTAE per scivolamento diretto) e di resistenza allo sfilamento (TTAE per sfilamento o *pullout*).

La *prova di sfilamento* (*pullout*) è eseguita secondo le seguenti due norme internazionali:

– **ASTM D6706-1:2021** *"Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil";*

– **UNI EN 13738:2005** *"Geotessili e prodotti affini - Determinazione della resistenza allo sfilamento dal terreno".*

La *prova di taglio diretto* invece (direct sliding) è condotta secondo due protocolli internazionalmente riconosciuti:

– **ASTM D5321:2021** "*Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear*";

– **UNI EN ISO 12957-1:2019** "*Geosintetici - Determinazione delle caratteristiche di attrito - Parte 1: Prova di taglio diretto*".

Le caratteristiche di attrito dell'interfaccia invece terreno-rinforzo metallico (con o senza rivestimento polimerico) non hanno degli standard specifici a cui riferirsi per cui, per valutare le caratteristiche all'interfaccia terreno/rinforzo metallico vengono solitamente utilizzati gli stessi protocolli validi per i modelli sintetici.

Comprendere il fenomeno fisico che coinvolge l'interazione terreno/rinforzo è un passaggio chiave per una progettazione consapevole e in sicurezza delle opere in terra rinforzate. Per questa ragione si è volutamente approfondito nel corso dei paragrafi successivi alcuni aspetti tecnici di contorno del tema, per poter fornire spunti di riflessione e approfondimento autonomo.

3.1 Tensione tangenziale di attrito equivalente (TTAE) per sfilamento (pullout)

Nel corso di questo paragrafo vengono illustrate le formulazioni analitiche del coefficiente di sfilamento dal terreno sia nel caso di un rinforzo geosintetico che metallico, presentando le relative norme di rifermento **ASTM** e **EN ISO**.

3.1.1 Caso 1) il rinforzo geosintetico

La resistenza a sfilamento di un geosintetico rappresenta la tensione che si manifesta nel rinforzo a seguito del tentativo di sfilamento, generato dalle sollecitazioni trasmesse dal terreno al rinforzo, nella quota parte del rinforzo ancorato nella zona "*resistente*".

Analiticamente è tradotta mediante la seguente relazione matematica:

$$T_{Rp} = 2f_b\, L_r\, W_r\, \sigma'_n \tan\phi' = 2L_r\, \sigma'_n\, {}^{\mu s}/_{GSY}$$

dove:

T_{Rp} = resistenza di sfilamento (*pullout*) [kN/m]

W_r = larghezza del rinforzo [m]

L_r = lunghezza del rinforzo nella zona resistente [m]

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

σ'_n = tensione efficace ortogonale al piano del rinforzo [kPa]

f_b = coefficiente di attrito equivalente per sfilamento (*pullout*) [ad.]

ϕ' = angolo di attrito interno del terreno [°]

μ_s/GSY = coefficiente di attrito apparente dell'interfaccia terreno/geosintetico

Con f_b definito dalla seguente relazione:

$$f_b = \alpha_S * \left(\frac{\tan(\delta)}{\tan(\phi')}\right) + \left(\frac{\alpha_b * B}{S}\right) * \left(\frac{\sigma'_b}{\sigma'_n}\right) * \frac{1}{2 * \tan(\phi')}$$

dove:

α_s = frazione solida della superficie del rinforzo

α_b = quota parte della larghezza del rinforzo capace di mobilitare resistenza passiva

S = distanza tra gli elementi trasversali capaci di mobilitare resistenza passiva

B = spessore degli elementi trasversali

σ'_b = pressione limite passiva lungo la direzione di sfilamento

σ'_n = pressione verticale esercitata sul rinforzo

δ = angolo di attrito all'interfaccia tra rinforzo geosintetico e terreno

ϕ' = angolo di attrito interno del terreno

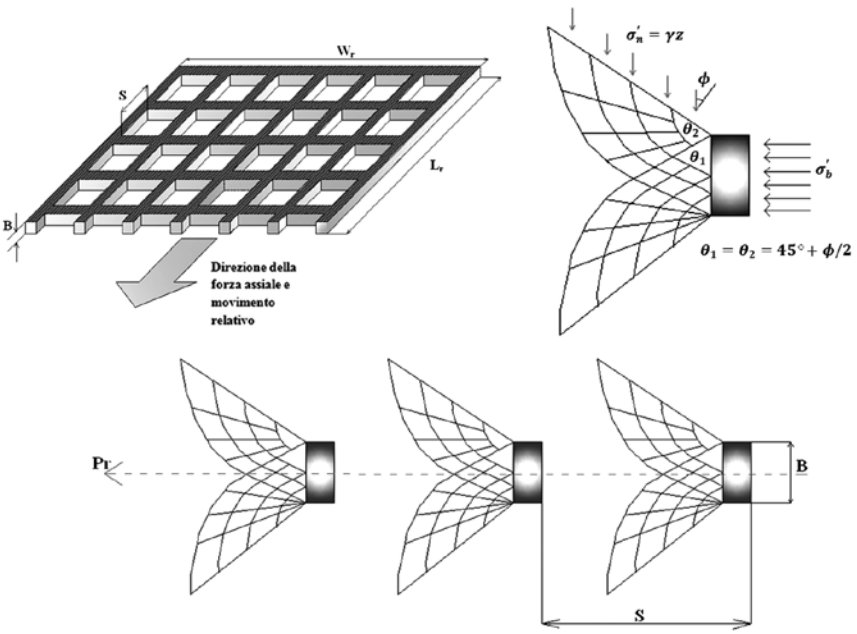


Figura 3.4 – *Rappresentazione grafica delle interazioni che si innescano nel corso del processo di sfilamento di un rinforzo dal terreno*

Pagine omesse dall’anteprima del volume

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

APPENDICE B

SOFTWARE GSRD 1.0
(Geostru Soil Reinforcement Design)

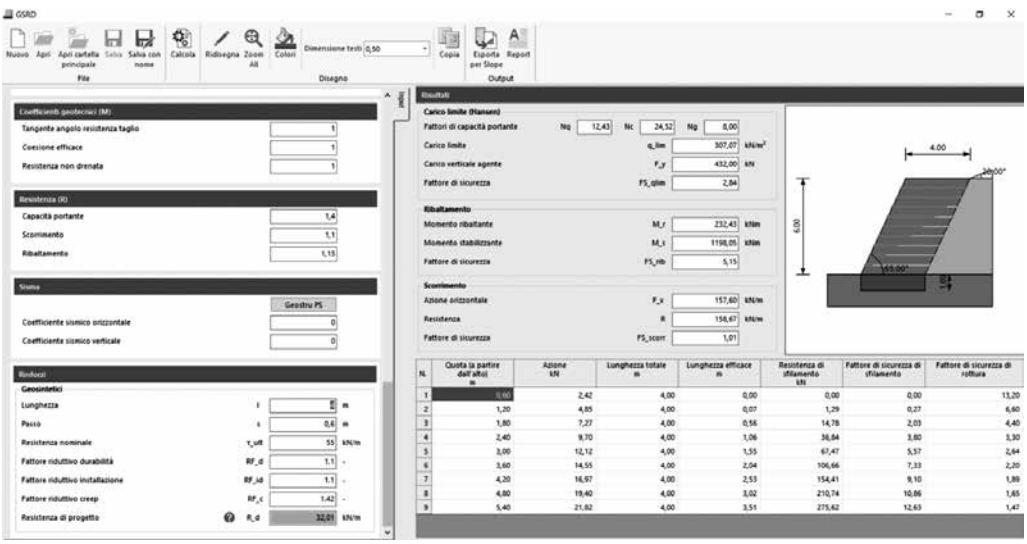
B.1 Manuale utente

B.1.1 Introduzione al modello di calcolo

Il modello di calcolo **GSRD 1.0**, analizza la stabilità delle opere in terra rinforzata, eseguendo i controlli relativamente ai cinematismi di rottura inerenti la capacità portante, il ribaltamento e lo scorrimento.

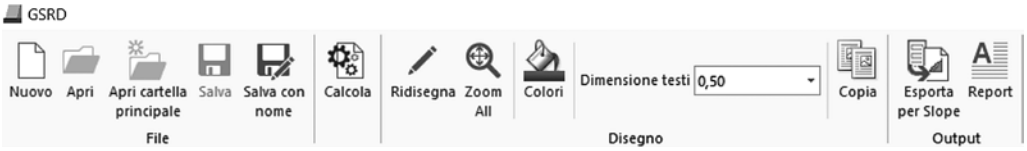
Il programma non esegue la verifica di stabilità globale, ma consente l'esportazione del file prodotto dal modello di calcolo, rendendolo compatibile con l'applicativo della geostru SLOPE® dedicato alla stabilità dei pendii.

Oltre alle verifiche di natura esterna, la suite GSRD 1.0 implementa i controlli sui rinforzi, in termini di resistenza allo sfilamento e alla rottura.



Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

B.1.2 Menu Principale



Il menu principale è costituito dalle seguenti unità:

IMMAGINI	CATEGORIA	DESCRIZIONE
Nuovo	File	il comando **Nuovo** consente la creazione di un nuovo file, azzerando i valori precedentemente inseriti dall'utente all'interno delle maschere inserimento dati
Apri		il comando **Apri** consente l'apertura di un file precedentemente salvato sul quale l'utente ha necessità di riprendere il calcolo o modificarne i dati di input
Apri cartella principale		il comando **Apri cartella principale** consente di aprire un file che è stato salvato nella cartella predefinita del programma all'interno del quale sono contenuti alcuni esempi di calcolo precompilati
Salva		il comando **Salva** consente all'utente di eseguire il salvataggio del file su cui sta lavorando al fine di non perdere i dati fino a quel momento inseriti
Salva con nome		il comando **Salve con nome** consente di salvare il file di lavoro in un'apposita area di lavoro nel PC associando un predeterminato nome
Calcola		il comando **Calcola** consente di eseguire i controlli per cui il programma è stato concepito nel momento in cui l'utente ha completato l'inserimento dei dati di input richiesti dal modello di calcolo
Ridisegna	Disegno	il comando **Ridisegna** consente di aggiornare la geometria della sezione analizzata laddove l'utente abbia apportato delle modifiche nel corso dell'elaborazione
Zoom All		il comando **zoom all** consente di avere una visione generale della sezione laddove l'utente avesse eseguito un ingrandimento specifico di un particolare
Colori		il comando **Colori** consente di modificare il colore attribuito alle tre aree pertinenti la sezione di progetto (Fondazione, rilevato strutturale, terreno a tergo)
Dimensione testi 0,50		il comando **Dimensione testi** consente di modificare le dimensioni dei testi presenti all'interno del modello di calcolo
Copia		il comando **Copia** consente di eseguire una copia della sezione grafica ricostruita dal programma a seguito dell'inserimento dei dati di input geometrici da parte dell'utente
Report	Output	il comando **Report** produce la relazione di calcolo riportando i risultati dell'elaborazione condotte dal modello

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

B.1.3 Dati generali

La scheda **Dati Generali** consente all'utente di inserire una breve descrizione dell'opera che si intende dimensionare, richiedendo poi di seguire due scelte, la prima relativamente al tipo di approccio di calcolo che vorrà seguire, e la seconda relativamente alla normativa.

Per quanto riguarda l'approccio di calcolo il programma consente di scegliere tra progetto e verifica *(vedi figura precedente).*

- **Progetto:** consente al programma di definire automaticamente, per ogni livello di rinforzo, la lunghezza minima in grado di soddisfare sia la verifica di sfilamento che la verifica a rottura;
- **Verifica:** consente all'utente di controllare se le dimensioni e la tipologia di rinforzo ipotizzato risulti idoneo rispetto a quanto richiesto dalla normativa selezionata, in termini di fattore di sicurezza;

Per quanto riguarda invece la scelta della normativa di riferimento per poter eseguire la verifica di calcolo, il programma consente all'utente di scegliere tra le seguenti opzioni:

- **Utente:** è l'utente che definisce le condizioni di calcolo, definendo i fattori da assumersi per i carichi e per i parametri geotecnici;
- **NTC 2018 (A1+M1+R3):** il programma imposta i controlli secondo quando stabilito dalle NTC 2018, in base alla combinazione di calcolo A1+M1+R3;
- **Eurocodice 7/8 (A1+M1+R2):** il programma imposta i controlli secondo quando stabilito dagli Eurocodici 7 e 8, in base alla combinazione di calcolo A1+M1+R2;

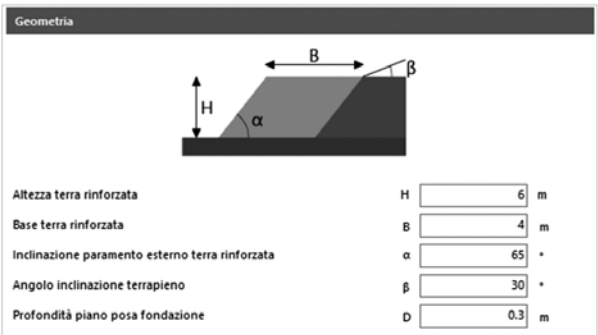
Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

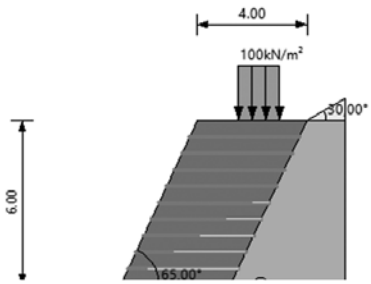
B.1.4 Geometria

La maschera **Geometria** richiede i dati di input principali per poter stabilire la configurazione spaziale della sezione da verificare.

I valori ritenuti ragionevoli da considerare da parte dell'utente per quanto attiene l'inclinazione del paramento esterno della terra rinforzata sono compresi tra 45° e 90°.

Nel momento in cui l'operatore inserisce tali dati all'interno della maschera, nella parte superiore destra del programma automaticamente verrà rappresentata graficamente la geometria correlata ai valori dei parametri inseriti.

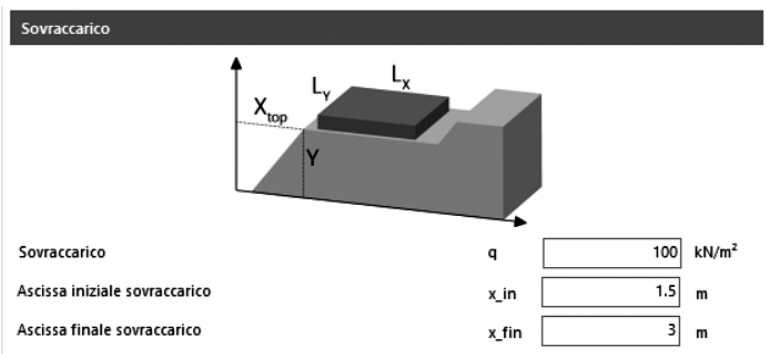




B.1.5 Sovraccarico

La gestione del **Sovraccarico** considerato per la verifica prevede l'inserimento del suo valore nominale, espresso in kN/m², indicandone il valore della ascissa iniziale (x_in) e finale (x_fin) della relativa striscia di carico associata.

Non è previsto l'inserimento di carichi puntuali



Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

B.1.6 Parametri geotecnici

I parametri geotecnici vengono gestiti attraverso la maschera di inserimento, riportata nell'immagine sottostante. Per quanto attiene il terreno rinforzato vengono richiesti il peso specifico del terreno di riempimento (γ_t), il valore dell'angolo di resistenza al taglio (φ_t) e l'angolo di attrito terreno-rinforzo (δ). Il calcolo del parametro relativo all'angolo di attrito terreno rinforzo (δ) è stato ipotizzato essere deducibile mediante la seguente assunzione analitica, comprensibilmente semplificativa del fenomeno fisico a cui si riferisce tale parametro:

$$f_b = \tan(\delta) / \tan(\varphi_t)$$

dove:

f_b = coefficiente di attrito per scorrimento assunto in fase cautelativa pari a 0,6

δ = angolo di attrito terreno-rinforzo [°]

φ_t = angolo di resistenza al taglio [°]

Per le restanti due categorie di terreno richieste dalla maschera di inserimento dati (terreno spingente posto a tergo della struttura) e terreno di fondazione, vengono richieste all'utente di inserire nuovamente i parametri geotecnici di riferimento (peso specifico, angolo di resistenza al taglio e coesione) salvo richiedere per il terreno di Fondazione anche l'angolo di resistenza al taglio terreno-fondazione (φ_t). Tale valore può essere assunto pari a 2/3 φ_t.

B.1.7 Azioni (A), coefficienti geotecnici (M) e resistenze (R)

Per quanto attiene la compilazione della maschera dei dati di input relativa alle azioni (A), ai coefficienti geotecnici (M) e alle resistenze ®, esso avviene automaticamente nel momento in cui l'utente seleziona una delle due normative previste dal programma (NTC 2018 oppure Euro-

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

codice 7/8), altrimenti deve essere inserita manualmente, avendo l'utente deciso di personalizzare la verifica, inserendo autonomamente i valori richiesti.

Azioni (A)	
Peso muro	1
Spinta terreno	1
Spinta sismica	1
Carichi	1
Coefficienti geotecnici (M)	
Tangente angolo resistenza taglio	1
Coesione efficace	1
Resistenza non drenata	1
Resistenza (R)	
Capacità portante	1
Scorrimento	1
Ribaltamento	1

B.1.8 Sisma

Voi nel caso in cui si volesse eseguire la verifica sismica dell'opera è possibile gestirla inserendo i coefficienti di spinta orizzontale verticale relativamente allo stato limite valutato dall'utente

Nel caso in cui l'utente non conoscesse tali parametri, potrebbe avvalersi del pulsante **geostru PS**. Cliccando su tale pulsante, l'operatore viene collegato ad una pagina web specifica che gli consentirà di stimare il valore numerico dei due coefficienti, introducendo i dati al contorno richiesti dalla normativa.

Sisma	
	Geostru PS
Coefficiente sismico orizzontale	0
Coefficiente sismico verticale	0

B.1.9 Rinforzi

La maschera dei rinforzi, nella versione del programma 1.0, consente la gestione dei soli elementi geosintetici. L'utente dovrà inserire la lunghezza di ancoraggio (lunghezza - **l**), la spaziatura verticale dei rinforzi (passo – **s**), la resistenza nominale a trazione in direzione longitudinale (resistenza nominale – $\boldsymbol{\tau_{ult}}$), il fattore riduttivo legato alla durabilità ($\mathbf{RF_d}$), il fattore riduttivo correlato al danno che il rinforzo potrebbe subire durante la sua installazione ($\mathbf{RF_{id}}$) ed il fattore riduttivo per creep ($\mathbf{RF_c}$). Il modello GSRD 1.0 assume per il calcolo della resistenza di progetto ($\mathbf{R_d}$) la seguente relazione:

$$R_d = \frac{\tau_{ult}}{\left(RF_d * RF_{id} * RF_c\right)}$$

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

Rinforzi

Geosintetici

Lunghezza	l	5	m
Passo	s	0,6	m
Resistenza nominale	τ_ult	80	kN/m
Fattore riduttivo durabilità	RF_d	1.15	-
Fattore riduttivo installazione	RF_id	1.04	-
Fattore riduttivo creep	RF_c	1.42	-
Resistenza di progetto	R_d	47,11	kN/m

B.1.10 Risultati

Nel momento in cui l'utente ha ultimato l'inserimento dei dati di input, digitando il pulsante della barra principale degli strumenti **Calcola**, nella parte destra del modello vengono riportati i risultati, in termini di:

– Carico limite (secondo la teoria di B. Hensen);

– Ribaltamento;

– Scorrimento.

Risultati

Carico limite (Hansen)

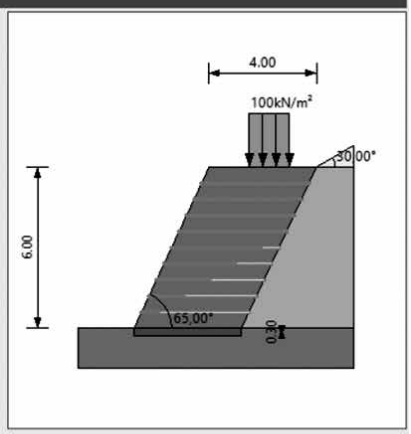
Fattori di capacità portante	Nq	25,35	Nc	38,97	Ng	22,83
Carico limite			q_lim	858,86	kN/m²	
Carico verticale agente			F_y	415,20	kN	
Fattore di sicurezza			FS_qlim	8,27		

Ribaltamento

Momento ribaltante	M_r	382,83	kNm
Momento stabilizzante	M_s	1308,84	kNm
Fattore di sicurezza	FS_rib	3,42	

Scorrimento

Azione orizzontale	F_x	225,71	kN/m
Resistenza	R	259,45	kN/m
Fattore di sicurezza	FS_scorr	1,15	



N.	Quota (a partire dall'alto) m	Azione kN	Lunghezza totale m	Lunghezza efficace m	Resistenza di sfilamento kN	Fattore di sicurezza di sfilamento	Fattore di sicurezza di rottura
1	0,60	9,83	4,00	0,00	0,00	0,00	4,79
2	1,20	15,18	4,00	0,00	0,00	0,00	3,10
3	1,80	17,63	4,00	0,00	0,00	0,00	2,67
4	2,40	19,38	4,00	0,00	0,00	0,00	2,43
5	3,00	21,32	4,00	0,59	28,14	1,32	2,21
6	3,60	23,62	4,00	1,27	69,39	2,94	1,99
7	4,20	26,23	4,00	1,95	120,83	4,61	1,80
8	4,80	29,07	4,00	2,64	183,07	6,30	1,62
9	5,40	32,08	4,00	3,32	256,41	7,99	1,47

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

Nella parte inferiore del riquadro **Risultati** viene riportata una tabella, in formato Excel, da cui si possono evincere le seguenti informazioni:

NOME COLONNA	SIGNIFICATO DEL PARAMETRO
Quota (a partire dall'alto) [m]	indica la quota del rinforzo partendo dalla sommità della sezione analizzata ed incrementando il valore in ragione del passo che l'utente ha inserito in fase di inserimento dati di input
Azione = A [kN]	indica lo sforzo a cui il rinforzo geosintetici è sottoposto al variare della quota
Lunghezza totale = L_{tot} [m]	tale parametro dipende dall'opzione che l'utente ha deciso di scegliere durante l'inserimento dei dati di input (verifica o progetto). Nel caso in cui l'utente avesse scelto l'opzione **verifica**, il valore risulterebbe costante, mentre se avesse optato per l'opzione **progetto**, tale valore varierebbe.
Lunghezza efficace = L_{eff} [m]	costituisce la quota parte di rinforzo intercettata dal cuneo attivo di spinta. Pertanto, nel momento in cui tale valore risultasse essere pari a = 0, significherebbe che il cuneo di spinta non interseca il rinforzo
Resistenza di sfilamento = R_{sfil} [kN]	
Fattore di sicurezza di sfilamento [-]	il fattore di sicurezza lo sfilamento (FS_{sfil}) viene calcolato dividendo il valore della resistenza allo sfilamento (R_{sfil}) per l'azione (A) esercitata sull'iesimo rinforzo. $FS_{sfil} = R_{sfil} / A$
Fattore di sicurezza di rottura [-]	il fattore di sicurezza alla rottura (FS_{rott}) viene calcolato dividendo il valore della resistenza di progetto (R_d) per l'azione (A) esercitata sull'iesimo rinforzo. $FS_{rott} = R_d / A$

Pagine omesse dall’anteprima del volume