



# TERRE RINFORZATE

progettare con geogriglie a bassa deformazione



# Enkagrid® PRO

---

## TERRE RINFORZATE

### progettare con geogriglie a bassa deformazione

La sensibilità crescente verso l'ambiente e la possibilità di realizzare opere con costi e tempi di esecuzione contenuti hanno contribuito alla grande diffusione delle terre rinforzate spesso in alternativa al tradizionale cemento armato.

Le conoscenze tecniche acquisite associate all'elevata qualità dei materiali disponibili consentono oggi di poter utilizzare tale tecnologia in molti campi dell'ingegneria civile, ambientale e geotecnica.

La **Harpo seic**, presente in questo mercato da più di trent'anni, offre materiali di altissima qualità tecnica ed un servizio di assistenza qualificato a Progettisti, Enti ed Imprese interessate ad utilizzare i nostri sistemi.

# CONCETTI GENERALI

## IL PRINCIPIO DELLA TERRA RINFORZATA

La pendenza di un rilevato tradizionale in terra è condizionata dalle caratteristiche geomeccaniche del terreno utilizzato. In particolare nel caso di un terreno granulare asciutto la pendenza massima  $\beta$  che il rilevato può raggiungere è pari all'angolo di attrito  $\varphi'$  del terreno stesso. Per la realizzazione di pendii più ripidi o al fine di garantire un margine di sicurezza più ampio, si inseriscono degli elementi di rinforzo creando così una terra rinforzata.

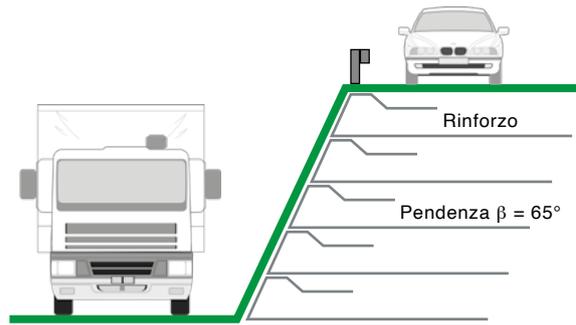


Fig. 1b: Rilevato rinforzato

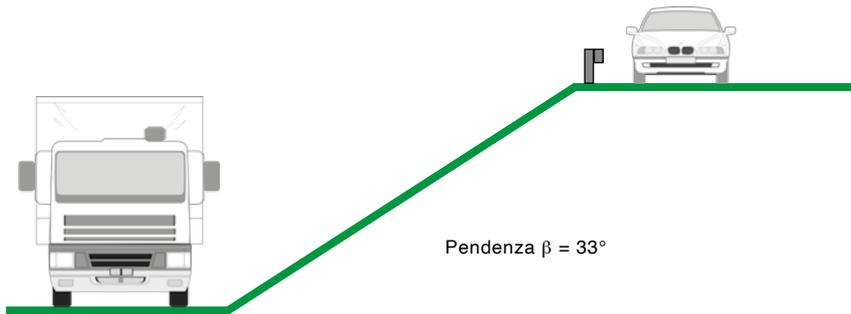


Fig. 1a: Rilevato tradizionale

Considerando una potenziale superficie di scivolamento lungo la scarpata del caso A, la stabilità di ogni singola striscia di terreno può essere valutata considerando il rapporto tra la forza stabilizzante  $F_{stab} = W \cos \beta \operatorname{tg} \varphi' = F_N \operatorname{tg} \varphi'$  e la forza instabilizzante  $F_T = W \sin \beta$ . Qualora non vengano soddisfatte le condizioni di equilibrio, all'interno del terreno possono essere inseriti degli elementi di rinforzo di resistenza  $F_{rinf}$  (caso B). La presenza del rinforzo all'interno del terreno incrementa la forza stabilizzante per ogni singola striscia di un valore  $F_{rinf} (\cos \beta \operatorname{tg} \varphi' + \sin \beta)$ .

### Caso A) Scarpata senza rinforzi

$$F_{stab} = W \cos \beta \operatorname{tg} \varphi' = F_N \operatorname{tg} \varphi'$$

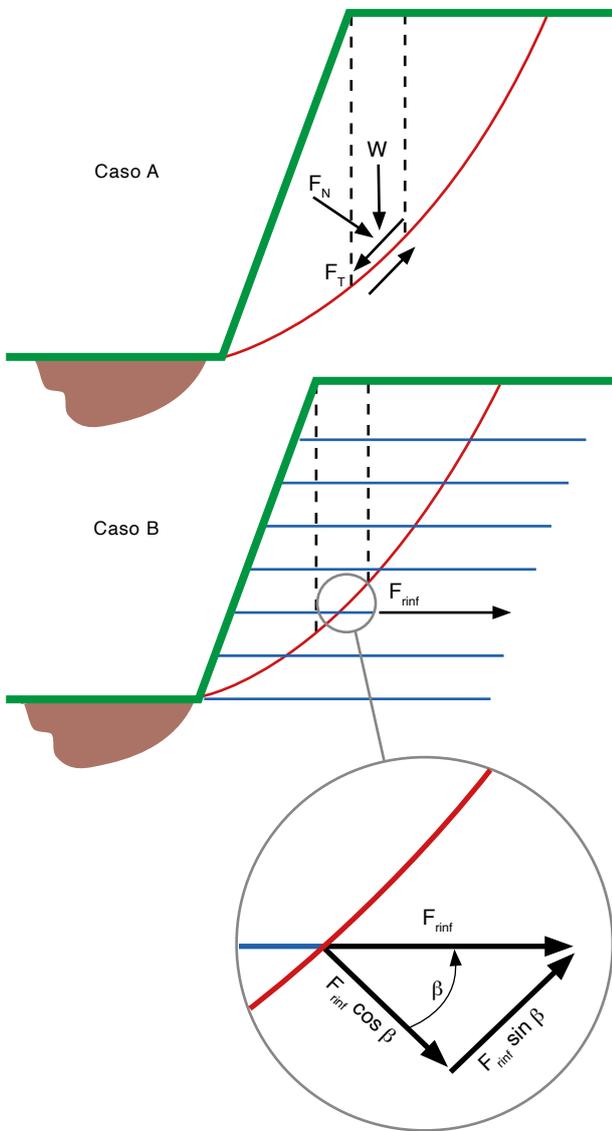
dove  $F_{stab}$  = forza stabilizzante  
 $W$  = peso singola striscia di terreno  
 $\beta$  = pendenza scarpata  
 $\varphi'$  = angolo di attrito efficace  
 $F_N$  = componente di  $W$  normale alla superficie di scivolamento  
 $F_T$  = componente di  $W$  tangenziale alla superficie di scivolamento

### Caso B) Scarpata con rinforzi

$$\begin{aligned} F_{stab} &= F_N \operatorname{tg} \varphi' + F_{rinf} \cos \beta \operatorname{tg} \varphi' + F_{rinf} \sin \beta = \\ &= F_N \operatorname{tg} \varphi' + F_{rinf} (\cos \beta \operatorname{tg} \varphi' + \sin \beta) \end{aligned}$$

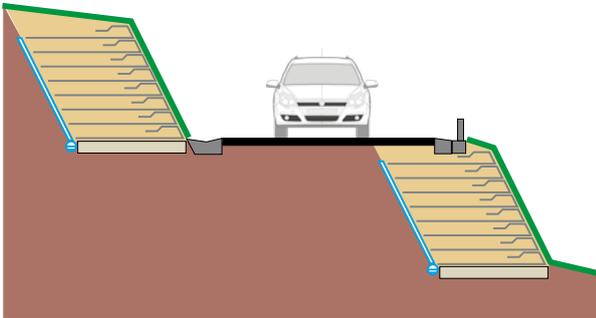
dove  $F_{rinf}$  = resistenza a trazione di progetto del rinforzo



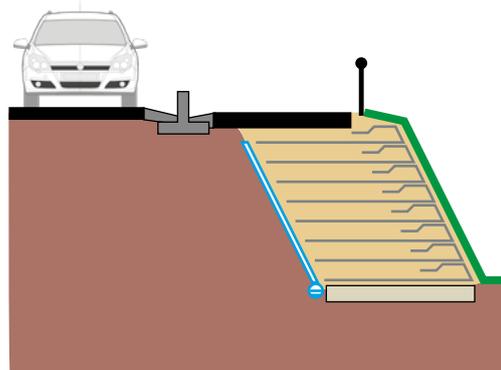


# PRINCIPALI CAMPI DI APPLICAZIONE

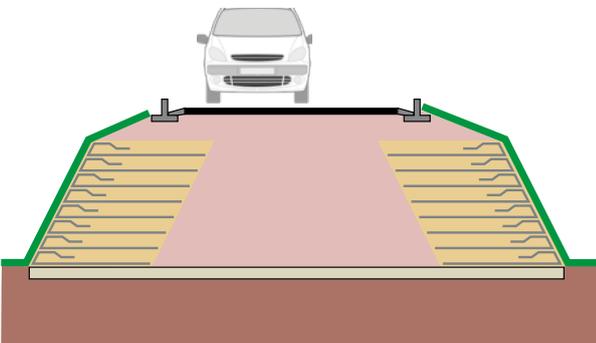
La tecnica delle terre rinforzate offre soluzioni ottimali in molti campi di applicazione.



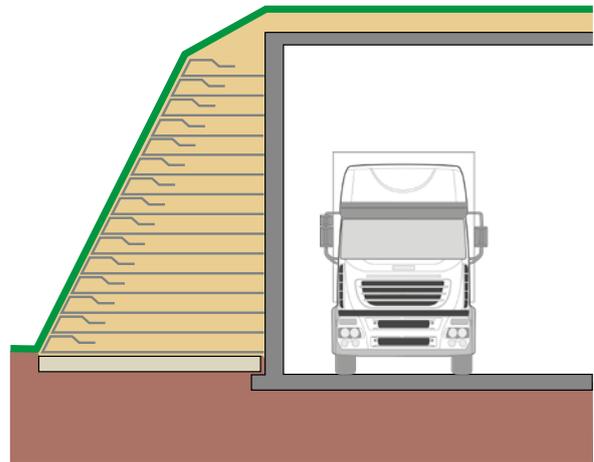
Opera di sostegno di contrripa e sottoscarpa



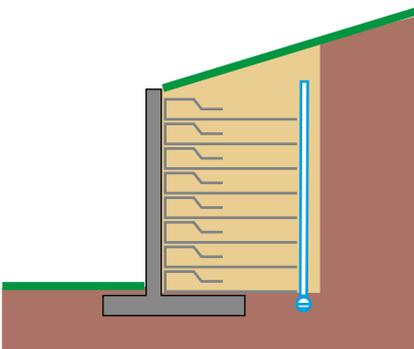
Ampliamento sede stradale



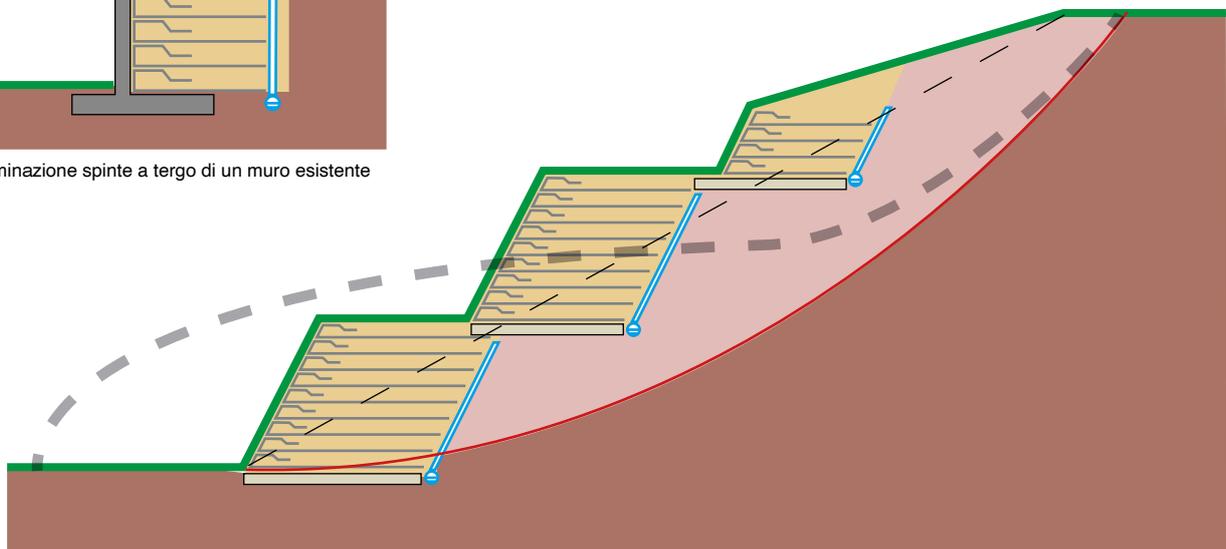
Rilevato stradale con riduzione d'ingombro delle scarpate



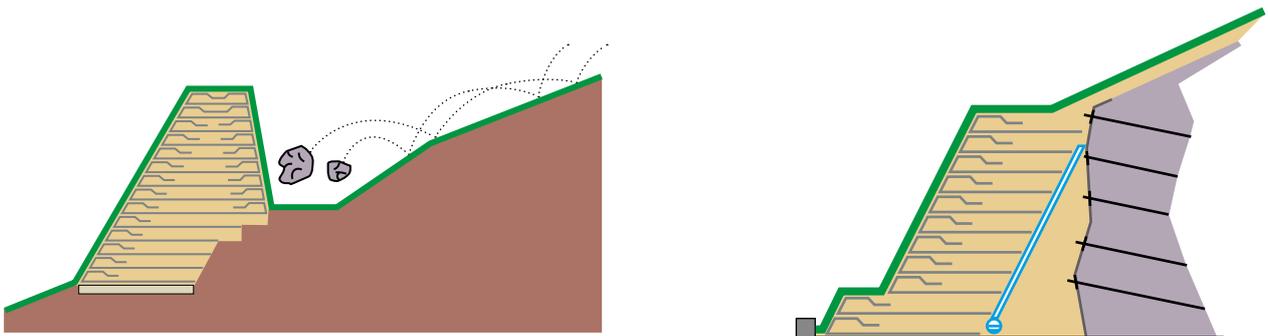
Mascheramento strutture in c.a.



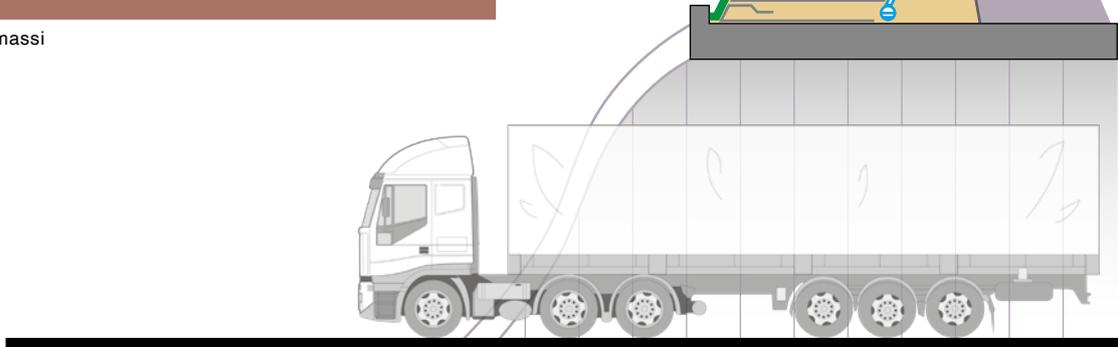
Eliminazione spinte a tergo di un muro esistente



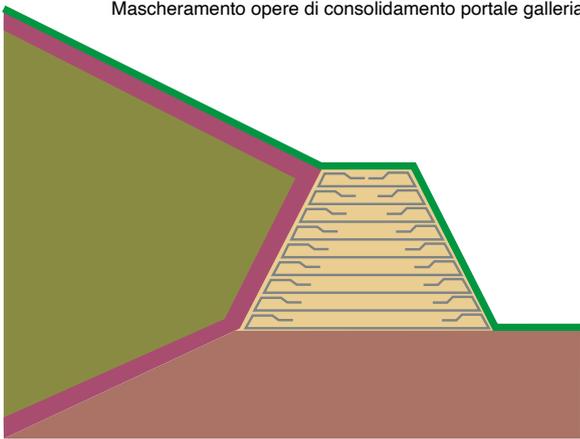
Ripristino di un pendio franato



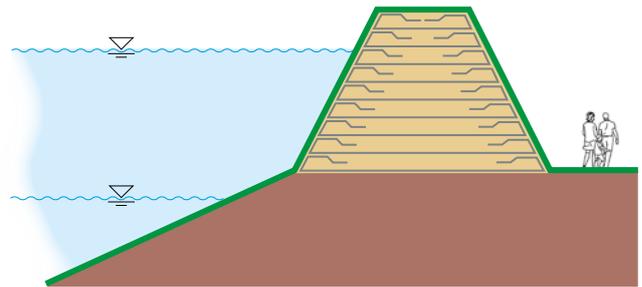
Vallo paramassi



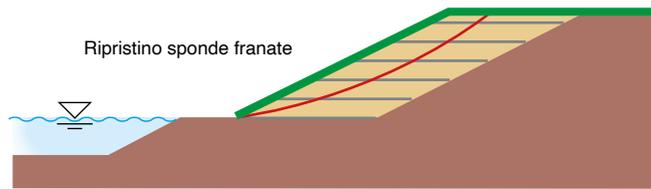
Mascheramento opere di consolidamento portale galleria



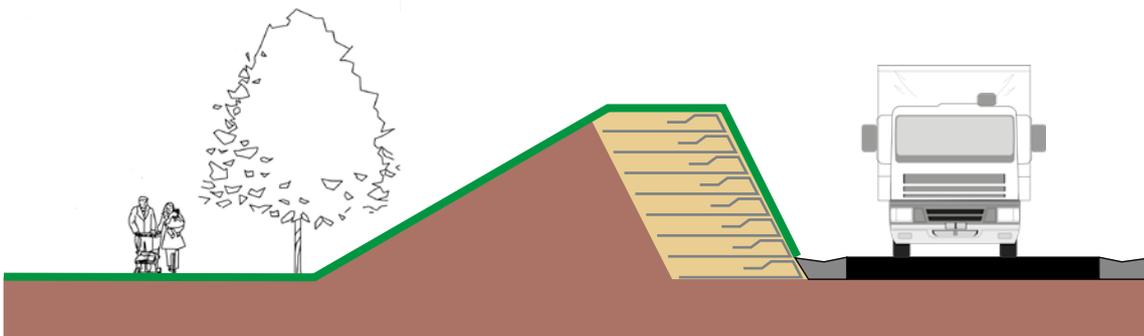
Argine discarica



Argine fluviale



Ripristino sponde franate



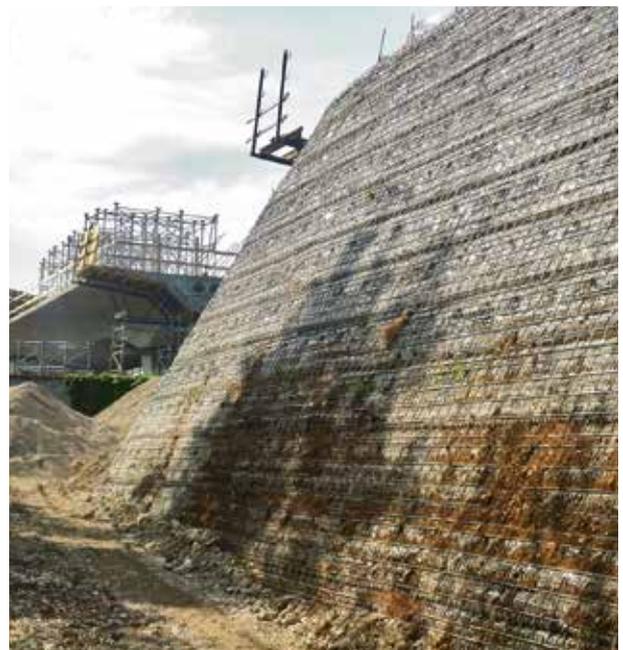
Barriera antirumore

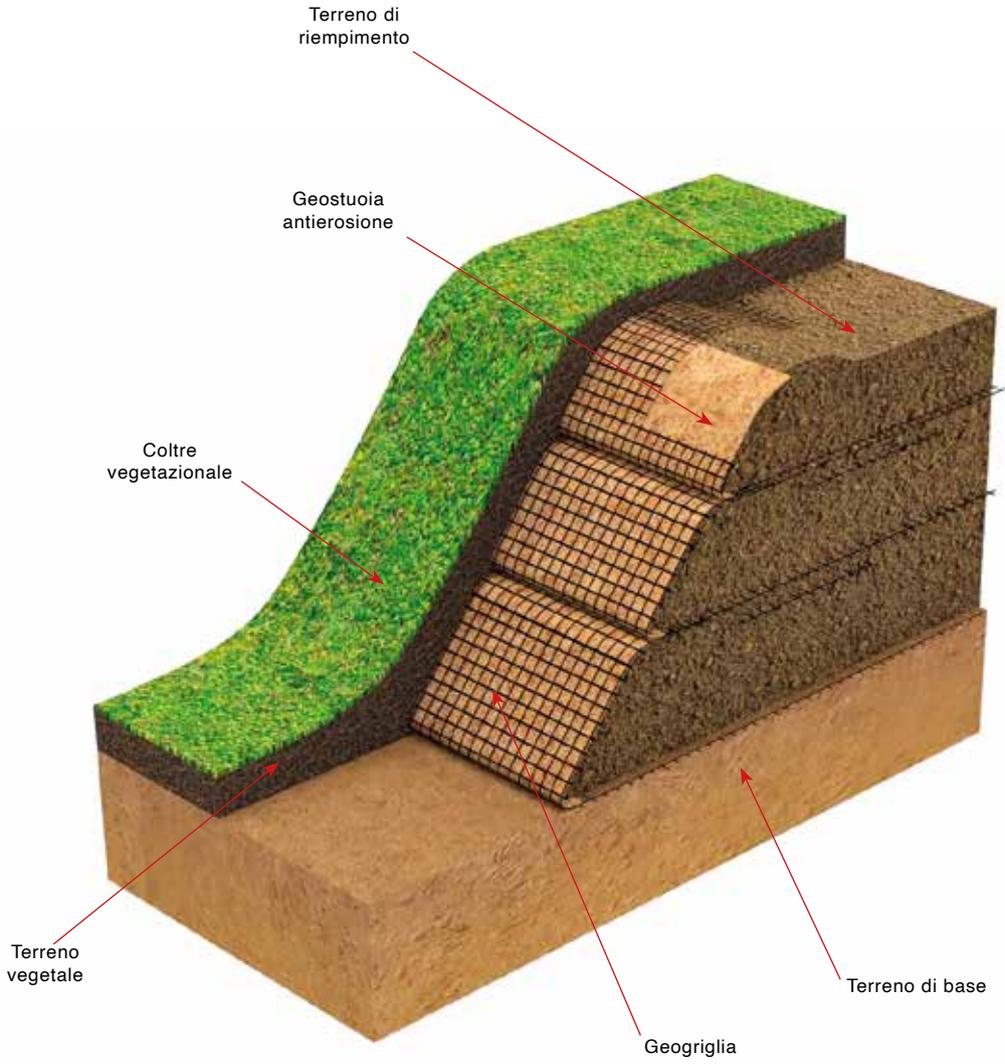


# GLI ELEMENTI COSTITUENTI UNA TERRA RINFORZATA

La realizzazione di una terra rinforzata prevede principalmente l'utilizzo dei seguenti materiali:

- il terreno
- il rinforzo
- l'elemento antierosivo
- il drenaggio
- la vegetazione





# ENKAGRID® PRO - TERRE RINFORZATE

## IL TERRENO

Una terra rinforzata può essere realizzata con gran parte dei terreni presenti in natura; le caratteristiche del riempimento utilizzato condizionano la scelta dei rinforzi sia in termini di resistenza che di geometria. Per tale motivo generalmente si utilizzano terreni prevalentemente granulari, ben gradati al fine di ottenere una adeguata compattazione e caratterizzati da buoni valori di attrito e permeabilità. Nella zona frontale, al fine di favorire la crescita della vegetazione, si posa generalmente uno strato di terreno ricco in componente umica (terreno vegetale).

La buona resistenza meccanica e chimica dell'**Enkagrid® PRO** consente il suo utilizzo anche in condizioni estreme quali ad esempio nella realizzazione di rilevati con pietrame o con terreni trattati a calce, come confermato dalle ricerche e dalle certificazioni BONAR BV. Studi eseguiti per applicazioni fluviali ed in discarica hanno inoltre evidenziato che utilizzando l'**Enkagrid®** nella realizzazione di argini in argilla, la presenza della geogriglia non inficia la funzione di barriera pseudo-impermeabile (non costituendo via preferenziale per l'infiltrazione dell'acqua al suo interno).

## LA GEOGRIGLIA DI RINFORZO

La scelta ed il dimensionamento del rinforzo costituiscono uno dei punti essenziali nella progettazione di una terra rinforzata. Per l'esecuzione di tutte le verifiche è indispensabile conoscere il comportamento del rinforzo a breve ed a lungo termine sia in termini di resistenza che di deformazione. E' necessario inoltre conoscere l'interazione rinforzo/terreno ed il potenziale danneggiamento meccanico e chimico legati alle condizioni in fase di posa ed ambientali di esercizio.

L'**Enkagrid® PRO** è una geogriglia monoassiale in nastri estrusi di poliestere (PET) ad elevato modulo elastico, disponibile con resistenze comprese tra 40 e 180 kN/m. L'**Enkagrid®** viene diffusamente impiegato nel rinforzo di scarpate, pendii, muri di sostegno, rilevati ed in tutte le applicazioni ove venga richiesto l'inserimento di rinforzi ad elevate prestazioni. I nastri dell'**Enkagrid® PRO** vengono saldati tra loro mediante tecnologia laser e trattati in modo specifico per proteggerli dalla degradazione dei raggi U.V..

## Caratteristiche a breve termine

La geogriglia **Enkagrid® PRO** viene fornita in un'ampia gamma di resistenze in grado di soddisfare il dimensionamento di opere in terra rinforzata per altezze anche superiori ai 20 m. La sua rigidità consente di ottenere elevati valori di resistenza anche a basse deformazioni.



	Unità	PRO 40	PRO 60	PRO 90	PRO 120	PRO 180	Norme
Resistenza a trazione <sup>1</sup>	kN/m	44	70	102	127	197	EN ISO 10319
Resistenza a trazione <sup>2</sup>	kN/m	40	64	95	120	188	EN ISO 10319
Resistenza al 2% dell'allungamento <sup>2</sup>	kN/m	17	26	42	48	72	EN ISO 10319
Resistenza al 5% dell'allungamento <sup>2</sup>	kN/m	33	51	81	87	140	EN ISO 10319
Allungamento a rottura <sup>2</sup>	%	6	6	6	6	6	EN ISO 10319

1) 95% del livello di confidenza = valore medio + tolleranza

2) valore medio

## Caratteristiche a lungo termine

Le caratteristiche meccaniche a breve termine di un rinforzo costituiscono un punto di partenza essenziale per il suo dimensionamento. Per conoscere però quale sarà il suo comportamento nel medio/lungo termine è essenziale avere a disposizione le sue specifiche "curve isocrone". Tali curve consentono di individuare con chiarezza il comportamento nel tempo di una specifica geogriglia e quindi comprendere il suo livello qualitativo e la sua affidabilità. Esaminando il grafico di fig. 2 si può osservare come l'**Enkagrid® PRO** presenti una bassa deformazione complessiva ed una bassissima deformazione post costruttiva.

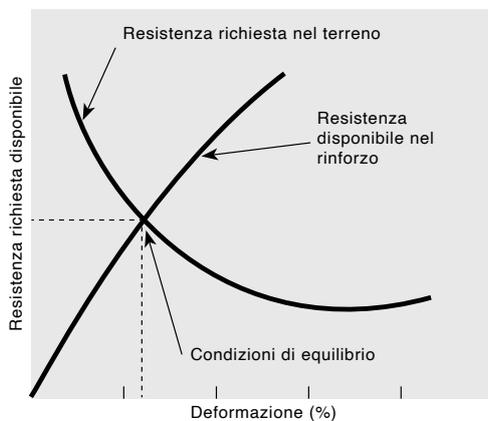


Fig. 3

## Il Concetto della Compatibilità Deformativa e degli Stati Limite

L'interazione rinforzo-terreno presuppone che il rinforzo ed il terreno contribuiscano simultaneamente con le relative resistenze di progetto. Tale condizione si manifesta quando entrambi, raggiungendo una medesima deformazione, collaborano assieme per la stabilità del volume di terra rinforzata (Fig. 3).

L'utilizzo di un rinforzo ad elevata deformazione richiederà una deformazione elevata anche del terreno che si troverà in condizioni di resistenza residua, mentre un rinforzo a deformazione limitata consentirà di sfruttare al meglio le caratteristiche del terreno stesso evitando una sua "rottura" (Fig. 4).

Sulla base di tali concetti, risulta importante poter valutare le potenziali deformazioni della struttura in fase costruttiva e post costruttiva. Pertanto è logico prevedere, a parità di resistenza, che rinforzi a maggior deformazione (10-13%) creeranno delle deformazioni nel terreno ben superiori rispetto all'utilizzo di rinforzi con deformazione marcatamente inferiore come l'**Enkagrid® PRO** (6%). A tal riguardo è stato eseguito uno studio dall'Università degli Studi di Genova da cui è emerso in modo evidente che la rigidità di un rinforzo condiziona le deformazioni del corpo in terra rinforzata anche in modo significativo (Fig. 5).

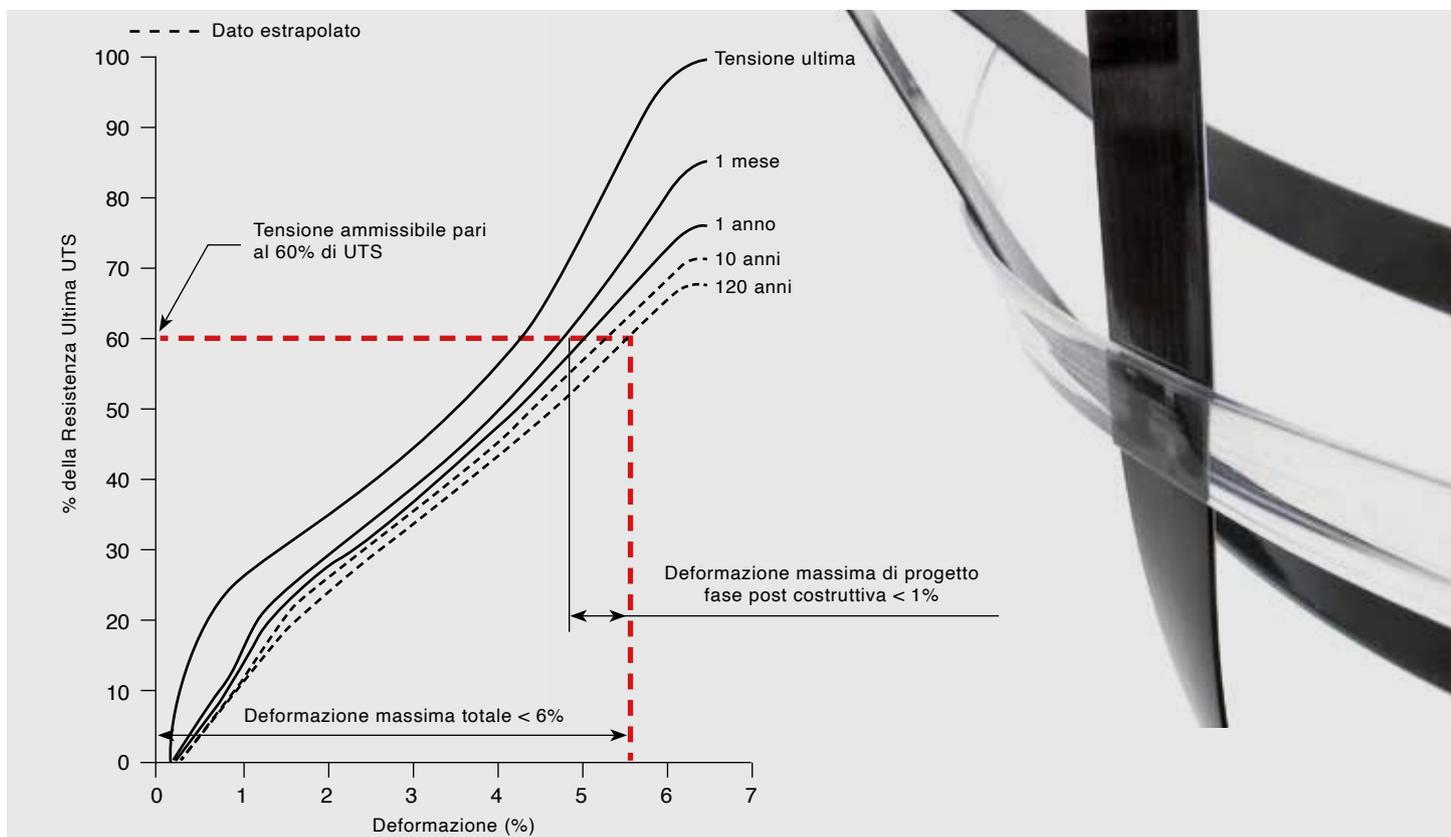


Fig. 2: Curve isocrone **Enkagrid® PRO**: esempio di valutazione della deformazione totale ed in fase post costruttiva

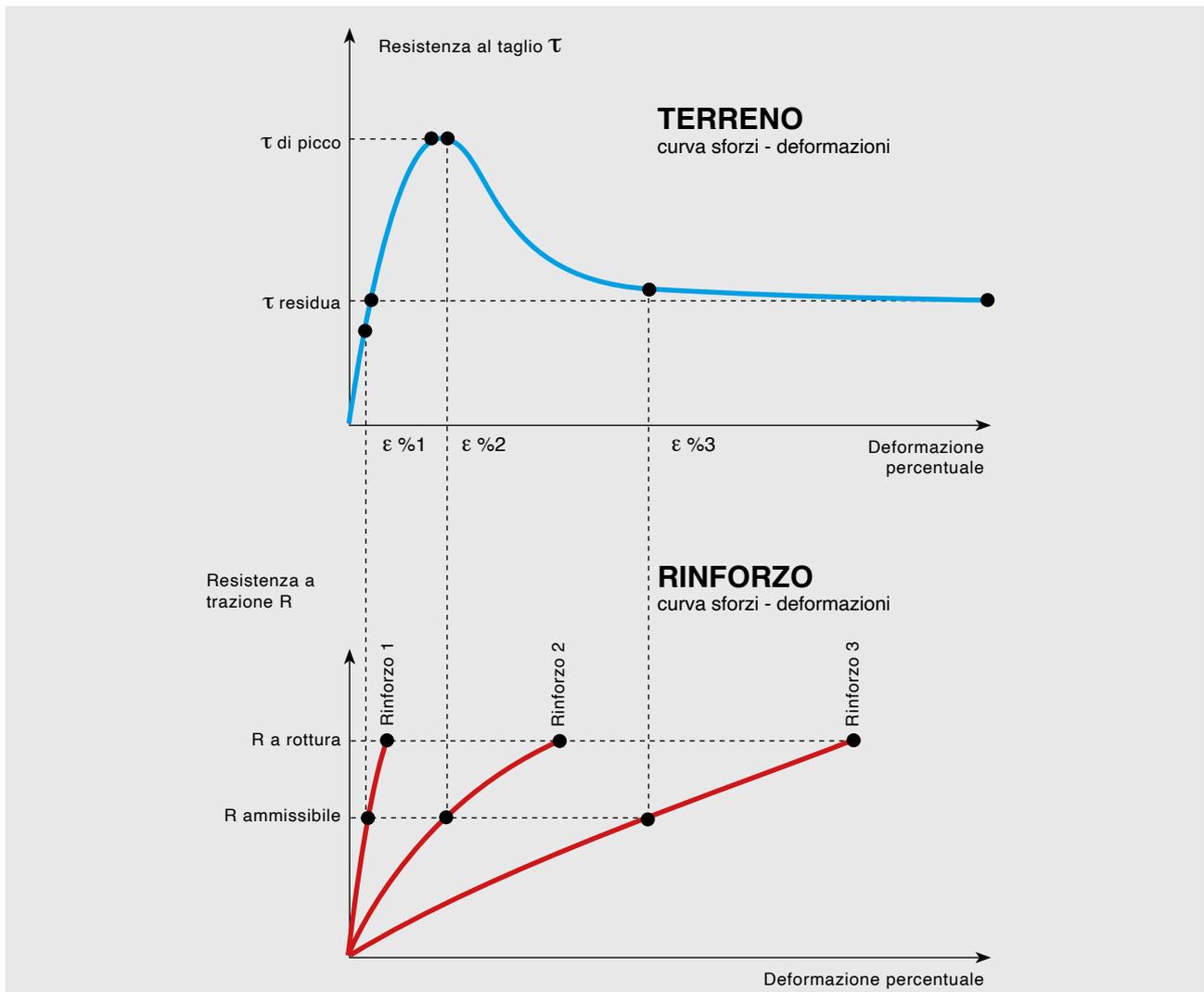


Fig. 4: Compatibilità deformativa terreno/rinforzo

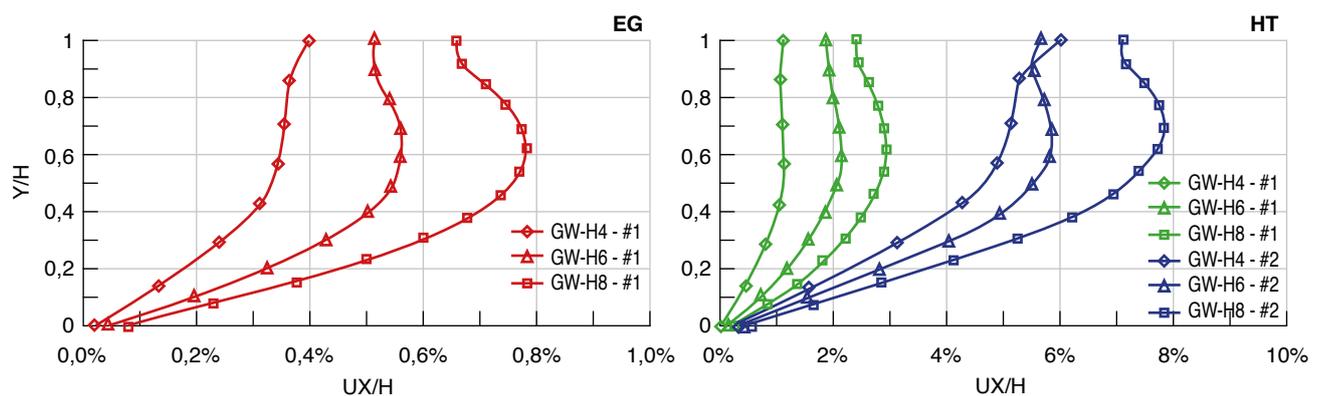
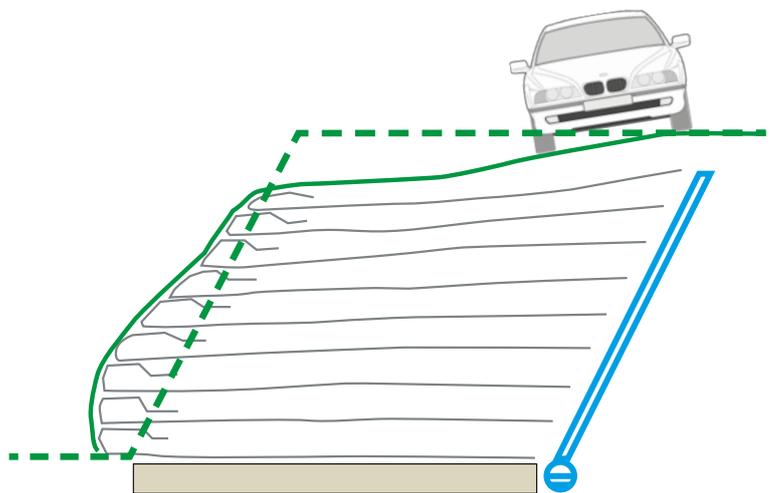


Fig. 5: deformazioni orizzontali per una terra rinforzata; a sinistra con una geogriglia tipo **Enkagrid® PRO** (EG) a bassa deformazione ed a destra con una geogriglia in PET di pari resistenza a trazione ma con deformazione a rottura superiore al 12% (HT).

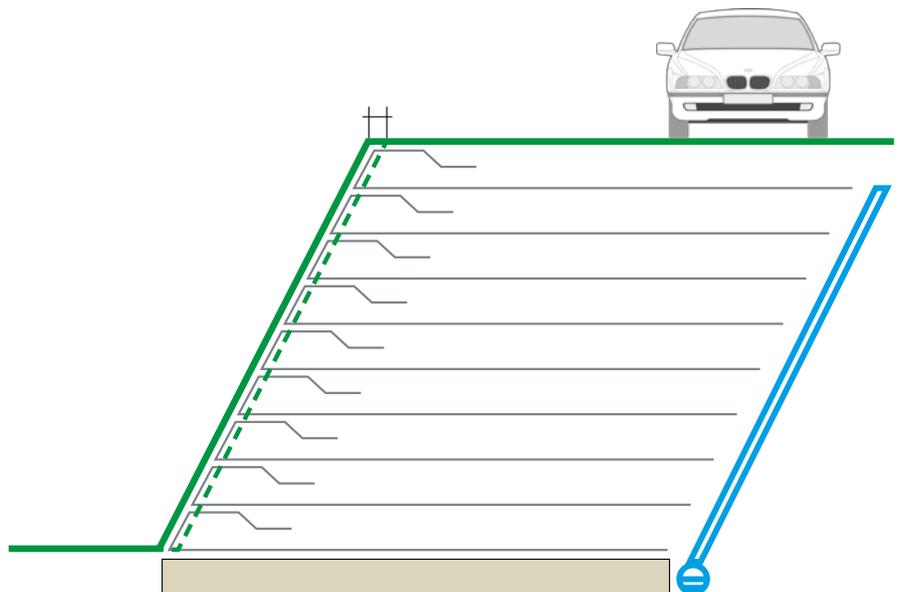
La conoscenza della deformazione del rinforzo sia a breve che a lungo termine consente di valutare quali potranno essere gli effetti sull'opera in terra rinforzata. L'analisi è quindi fondamentale per poter dimensionare un'opera allo Stato Limite Ultimo (condizione di collasso della struttura) ed allo Stato Limite di Servizio (condizione di perdita di funzionalità).



DEFORMAZIONE ELEVATA  
perdita dello stato di servizio



DEFORMAZIONE LIMITATA  
mantenimento dello stato di servizio



Verifica allo Stato Limite di Servizio (SLS) per due geogriglie a diversa deformazione

# IL COMPORTAMENTO MECCANICO DI ALCUNI POLIMERI

Nel mercato mondiale dei rinforzi sintetici vengono utilizzati diversi tipi di polimero fra i quali i più diffusi sono il polipropilene (PP), il polietilene ad alta densità (HDPE) e il poliestere (PET). Tra i tre polimeri, quello che offre le migliori caratteristiche di resistenza meccanica è indubbiamente il poliestere, seguito dal polipropilene e per ultimo dal polietilene. Tale aspetto, riconosciuto dalla Comunità Scientifica mondiale, può essere esemplificato nei due grafici di fig. 6, in cui si evidenzia il comportamento deformativo dei diversi materiali sottoposti a carico costante (creep) rispettivamente al 20% (a) ed al 60% (b) del carico di rottura. Dai grafici si può osservare ad esempio come il poliestere mantenga un comportamento lineare anche per percentuali di carico ben superiori al polietilene, mentre quest'ultimo per carichi del 60% subisce delle deformazioni molto marcate.

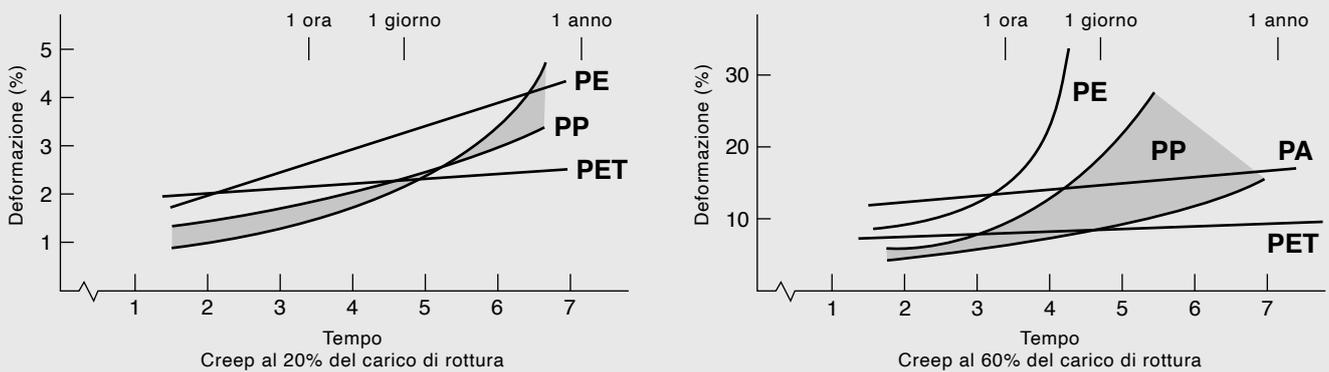


Fig. 6: deformazione a carico costante di alcuni polimeri (estratto da "Design with Geosynthetics" di Robert Koerner)

Un altro confronto utile per comprendere la differenza tra i diversi rinforzi e polimeri riguarda la deformazione a breve e lungo termine. Geogriglie con proprietà meccaniche accettabili nel breve termine possono subire deformazioni anche marcate nel tempo. Il comportamento di uno specifico rinforzo risulta fondamentale per valutare gli effetti del suo utilizzo sull'opera in terra; in base alla sua durata di progetto, questa analisi assume particolare importanza ad esempio nelle opere strategiche che richiedono una vita utile di almeno 100 anni. Anche in questo caso si osserva come in generale il poliestere presenta valori di modulo elevati ed in particolare l'Enkagrid® PRO ha un comportamento nettamente superiore agli altri materiali esaminati come evidenziato nel grafico di fig. 7.

## Confronto deformazione a breve e lungo termine tra alcune geogriglie di rinforzo

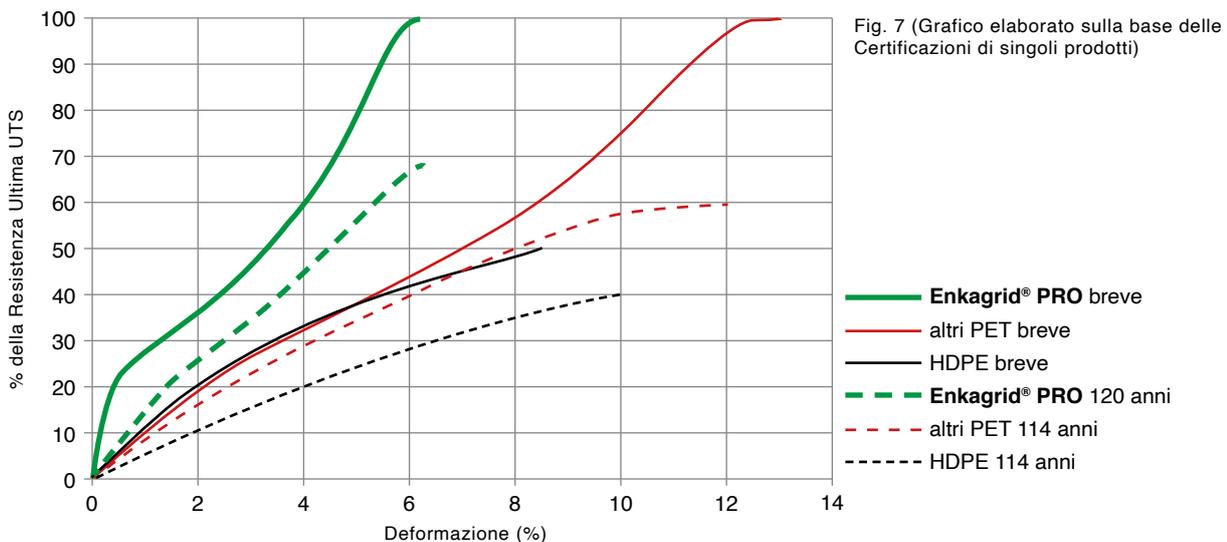


Fig. 7 (Grafico elaborato sulla base delle Certificazioni di singoli prodotti)

Esaminati i punti principali che condizionano il comportamento a breve e lungo termine di un geosintetico di rinforzo, è possibile calcolare la sua resistenza e la sua deformazione per la vita utile della terra rinforzata mediante l'inserimento di specifici fattori di riduzione. Al fine di garantire la validità, tali fattori di riduzione vengono certificati da Enti riconosciuti (es. BBA, SKZ, ecc.) sulla base di opportuni test di laboratorio. Progettando con l'**Enkagrid® PRO** è possibile avvalersi di diversi certificati fra i quali il più restrittivo è il BBA (British Board of Agreement), Ente Certificatore Inglese.

In base alla resistenza ultima  $t_{ult}$  (UTS) di una specifica geogriglia ed alle condizioni di progetto, è possibile calcolare la massima resistenza di progetto  $t_{des}$  di un determinato rinforzo utilizzando i suoi specifici fattori di sicurezza parziali:

$$t_{des} = P_c / [(f_m) \cdot (f_d) \cdot (f_e)]$$

dove:

- ( $P_c$ ): resistenza del rinforzo  $t_{ult}$  ridotta per effetti di creep in base alla vita utile dell'opera e dimensionata in base alle curve isocrone (vedi fig. 2)
- ( $f_m$ ): fattore di riduzione parziale per incertezza di produzione ed estrapolazione dati: può essere considerato come fattore di sicurezza globale
- ( $f_d$ ): fattore di riduzione parziale dovuto al danneggiamento meccanico del geosintetico in fase di posa da parte del terreno compattato
- ( $f_e$ ): fattore di riduzione parziale per il chimismo del terreno

Un esempio di confronto nel calcolo della tensione ammissibile tra geogriglie di rinforzo per una terra rinforzata con vita utile di 100 anni utilizzando una ghiaia sabbiosa.

Tipologia Geogriglia	Resistenza Ultima UTS (kN/m)	Deformazione a rottura (%)	Fattori di riduzione per le stesse condizioni di progetto				Tensione di progetto $t_{des}$ (kN/m)
			$P_c$	$f_m$	$f_d$	$f_e$	
Estrusa in HDPE	<b>60</b>	<b>13</b>	0.41 x UTS	1,0	1,0	1,0	<b>24,60</b>
Tessuta in PET	<b>60</b>	<b>13</b>	0.60 x UTS	1,2	1,1	1,0	<b>27,27</b>
Enkagrid PRO	<b>60</b>	<b>6</b>	0.68 x UTS	1,09	1,05	1,0	<b>35,65</b>

Esaminando la deformazione si osserva che, rispetto all'**Enkagrid® PRO** le altre geogriglie hanno una deformazione più che doppia.

## LE FASI REALIZZATIVE

La realizzazione di una terra rinforzata può essere semplificata nelle seguenti fasi:

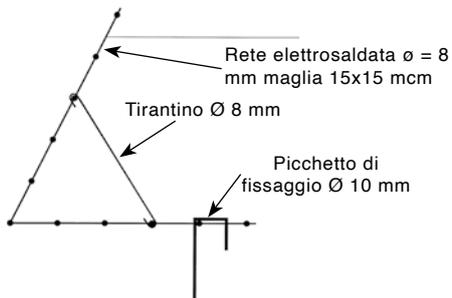
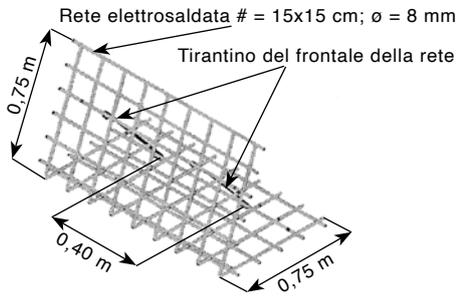
- regolarizzazione del terreno in sito e preparazione del piano di posa
- posa del sistema drenante
- realizzazione della terra rinforzata
- realizzazione delle opere a verde

La realizzazione di un idoneo piano di posa, stabile e sub-orizzontale, costituisce la base per una corretta realizzazione. Per la fase di regolarizzazione del terreno, eseguibile mediante le usuali macchine movimento terra, sarà opportuno valutare l'idoneità del terreno di fondazione prevedendo eventuali opere di drenaggio o di bonifica (ad esempio realizzando uno strato in ghiaia avvolto con idoneo geotessile). Si dovrà inoltre verificare che la scarpata provvisoria a tergo si mantenga stabile per il tempo di realizzazione della terra rinforzata (tempo di autosostentamento). Qualora le caratteristiche meccaniche del terreno non dessero sufficienti garanzie si potrà procedere mediante scavo a conci, eseguendo una nuova riprofilatura o con interventi di stabilizzazione provvisoria. Definito il fronte del terreno a tergo, su questo potrà essere posato il sistema drenante **Enkadrain**<sup>®</sup>, ed il tubo collettore **Greendrain** alla base. Si passa quindi alla realizzazione dei singoli strati rinforzati, generalmente con spessori variabili tra 50 e 70 cm. Poiché generalmente il fronte della terra rinforzata ha una pendenza superiore a quella di natural declivio del terreno, si rende necessaria la posa di un cassero per contenere il terreno durante la compattazione. Per la realizzazione del cassero la **Harpo seic** propone due soluzioni alternative:



## Cassero a perdere

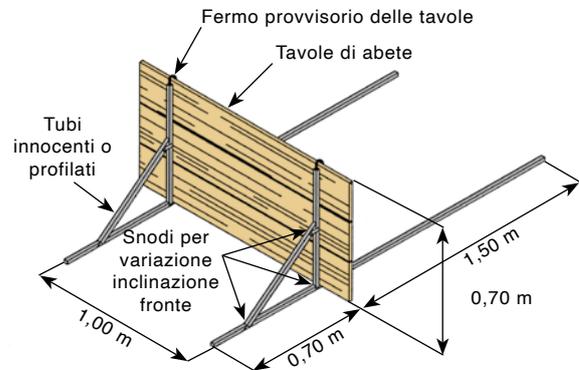
Cassero realizzato in rete elettrosaldata e mantenuto nella struttura della terra rinforzata;



p.s.: schema tipo per singolo strato di spessore 60 cm inclinato  $63,43^\circ$  rispetto all'orizzontale. Le dimensioni sono indicative e possono variare in base allo spessore dei singoli strati.

## Cassero removibile

Cassero utilizzato per la realizzazione dello strato e successivamente sfilato ed utilizzato per gli strati sovrastanti.



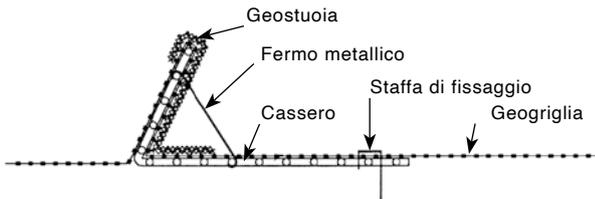
p.s.: le dimensioni sono indicative e possono variare in base allo spessore dei singoli strati.



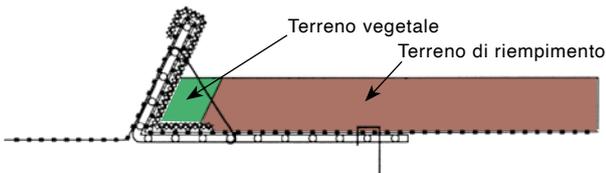
Le due modalità operative possono essere riassunte negli schemi a seguire.

### Schema per la realizzazione di una terra rinforzata con cassero a perdere

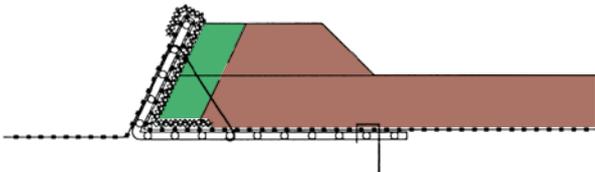
**Passo 1**  
posizionamento dei casseri, della geogriglia e della geostuoia



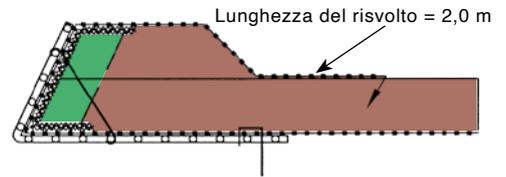
**Passo 2**  
compattazione del primo livello di riporto (spessore = 25 ÷ 30 cm)



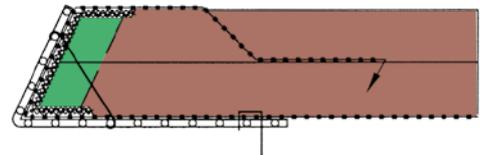
**Passo 3**  
riempimento del materiale fino al completamento dello strato



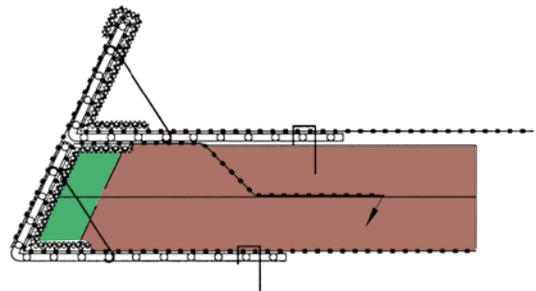
**Passo 4**  
risvolto della geostuoia e della geogriglia



**Passo 5**  
riempimento finale e completamento del primo strato

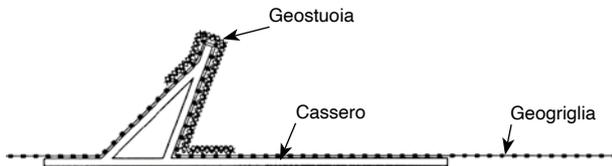


**Passo 6**  
posizionamento in sommità e prosecuzione del ciclo

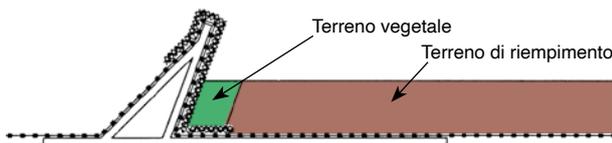


## Schema per la realizzazione di una terra rinforzata con cassero rimovibile

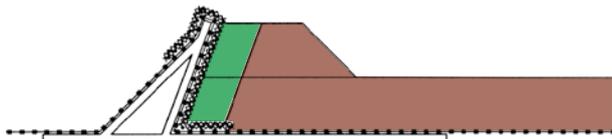
**Passo 1**  
posizionamento dei casseri, della geogriglia e della geostuoia



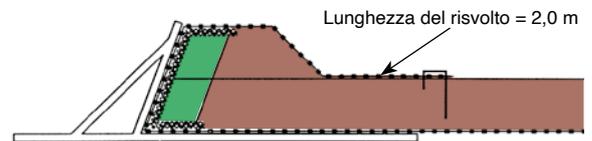
**Passo 2**  
compattazione del primo livello di riporto (spessore = 25 ÷ 30 cm)



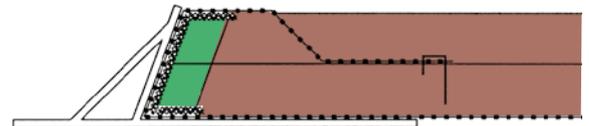
**Passo 3**  
riempimento del materiale fino al completamento dello strato



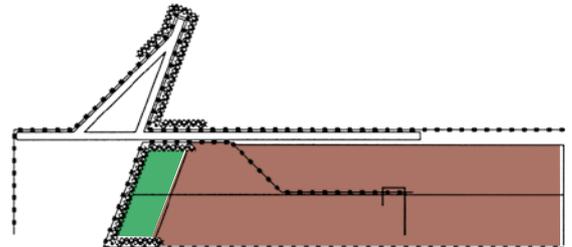
**Passo 4**  
risvolto della geostuoia e della geogriglia



**Passo 5**  
riempimento finale e completamento del primo strato



**Passo 6**  
sfilamento del cassero, posizionamento in sommità e prosecuzione del ciclo



## LE CERTIFICAZIONI

Per garantire al Progettista ed all'Impresa la massima affidabilità tecnica delle geogriglie **BONAR BV**, l'**Enkagrid® PRO** è dotato di una serie di certificazioni riconosciute a livello europeo e mondiale.





Design APG Trieste - settembre 2022

**Enka<sup>®</sup>solutions**

 **Harpo**  
TRIESTE 1897

**Harpo spa**  
tel. +39 040 3186611  
info@harpogroup.it  
harpogroup.it

**sede legale**  
via torino, 34  
34123 trieste  
italia

**sede operativa**  
via caduti sul lavoro, 7  
z.i. noghere 34015 muggia  
trieste italia