

OPERE IN TERRA RINFORZATA: PARAMETRI DI PROGETTO E REALIZZAZIONI IN AMBITO MONTANO ED IDRAULICO

Ing. Pierpaolo Fantini
Huesker S.r.l., Trieste
p.fantini@huesker.it

Ing. Alberto Simini
Huesker S.r.l., Trieste
a.simini@huesker.it

1. L'IMPORTANZA DELLE CERTIFICAZIONI DEI GEOSINTETICI UTILIZZATI PER IL RINFORZO DEI TERRENI

I geosintetici di rinforzo impiegati nelle opere di ingegneria sono, a tutti gli effetti, vere e proprie armature che svolgono una funzione strutturale. Vengono utilizzati in numerose tipologie di intervento, tra cui: nelle terre rinforzate, nel rinforzo alla base di rilevati per evitare problemi di instabilità globale, come elemento di rinforzo sulla testa dei pali per evitare l'effetto di punzonamento degli stessi nel corpo dei rilevati, nell'attraversamento di zone soggette alla formazione di cavità, nel rinforzo delle sovrastrutture stradali e dei conglomerati bituminosi e, più recentemente, nella realizzazione di pali portanti in sabbia incapsulati con geotessili tubolari.

Questi materiali, destinati a lavorare a trazione, possono essere sottoposti a sollecitazioni di vario tipo: permanenti e accidentali, statiche o dinamiche, ad attacchi chimici, ambientali, a danneggiamenti meccanici, ecc. Naturalmente queste sollecitazioni devono essere considerate nell'arco di tempo che inizia dal momento in cui il geosintetico viene posato e finisce con la vita utile prevista dell'opera stessa. Per questa ragione, la funzionalità e la sicurezza delle opere è direttamente legata alle prestazioni del rinforzo nelle condizioni di esercizio, sia a breve che a lungo termine.

Risulta evidente, quindi, l'importanza che riveste la corretta valutazione in fase di calcolo delle tensioni e delle deformazioni ammissibili dei geosintetici da parte dei progettisti come pure la verifica di queste prestazioni da parte della Direzione Lavori.

Dato che la tensione di progetto a lungo termine è il dato che viene utilizzato nei calcoli di stabilità, è di fondamentale importanza per il progettista conoscere quale sarà la tensione d'esercizio del geosintetico di rinforzo durante la vita utile dell'opera, dopo che sia stato sottoposto ad azioni meccaniche, fisiche ed ambientali. In altre parole, il progettista deve avere la garanzia che le ipotesi effettuate in fase progettuale si verifichino nella realtà.

Tra le normative europee più avanzate in questo settore possiamo citare il British Standard 8006 e l'EBGEO. Tali normative richiedono che, per calcolare la tensione di progetto a lungo termine, vengano applicati una serie di fattori di riduzione sulla tensione caratteristica di rottura a breve

termine del geosintetico di rinforzo considerato. Nella norma BS 8006, tali fattori tengono conto: a) della vita utile dell'opera, b) della deformazione per creep del materiale (deformazione viscosa nel tempo sotto carico costante), c) dell'extrapolazione dei dati e della variabilità della produzione, d) del danneggiamento meccanico durante le fasi di posa, e) degli effetti ambientali (chimici e biologici).

L'affidabilità e la provenienza dei fattori di riduzione da applicare è di rilevante importanza poiché una sopravvalutazione della tensione di esercizio a lungo termine potrebbe condurre alla realizzazione di opere sottodimensionate e con fattori di sicurezza inferiori a quelli richiesti dalla legge, vanificando di conseguenza i presupposti progettuali e aumentando il fattore di rischio.

Esistono numerosi istituti di prove indipendenti che, in maniera autorevole, certificano le prestazioni dei materiali da costruzione. Tali certificati contengono dati importanti sulle caratteristiche dei materiali nel tempo e sugli effetti durante la posa.

2. VALORI CARATTERISTICI

Mentre nel caso dell'acciaio e del calcestruzzo l'utilizzo di valori caratteristici di resistenza (f_{yk} e R_{ck}) è ormai un fatto recepito e consolidato per i progettisti, le DL e le imprese stesse, nel caso dei geosintetici ancora oggi rimane una certa ambiguità nei valori dichiarati dai fornitori.

Quindi, il primo aspetto da verificare è che i valori dichiarati dai produttori siano valori caratteristici e non valori medi; in altre parole, le resistenze, gli allungamenti e i fattori di sicurezza adottati devono essere valori caratteristici con un limite di confidenza minimo del 95 %. Ad esempio, per una resistenza a trazione maggiore di 35 kN/m, solo il 5 % dei risultati delle prove effettuate su tutta la campionatura potrebbe essere inferiore a 35 kN/m. Nel caso in cui si dichiarasse invece un valore medio, ben il 50 % dei valori ottenuti da prove sui materiali potrebbe risultare inferiore a quanto dichiarato.

E' evidente, quindi, come il valore medio risulti meno cautelativo rispetto al corrispondente valore caratteristico, e come ciò sia altrettanto valido per quanto riguarda i fattori di sicurezza.

3. TENSIONE DI PROGETTO A LUNGO TERMINE DI UN GEOSINTETICO DI RINFORZO

La normativa BS 8006 : 1995 (ANNEX A) prescrive quali sono i fattori di riduzione parziali da applicare sulla tensione nominale (caratteristica) dei geosintetici di rinforzo per il calcolo della tensione di progetto. Secondo tale normativa, si ha che:

$$T_D = T_B / f_m$$

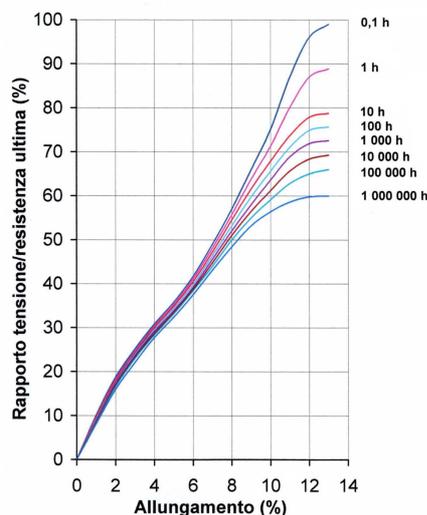
T_D = tensione di progetto a lungo termine

T_B = tensione del rinforzo considerando solo l'effetto di creep per la vita utile o di esercizio scelta per il geosintetico. Per esempio, per una vita utile di 120 anni, questa tensione assume un valore di circa il 60% della tensione caratteristica a breve termine nel caso di geogriglie realizzate in fibre di poliestere ad elevato modulo, e intorno al 38%-40% della stessa per geogriglie in polietilene ad alta densità.

E' da considerare che, a differenza dell'acciaio nel cemento armato, la maggiore suscettibilità dei geosintetici all'effetto di creep richiede un'approfondita valutazione.

Per determinare T_B è necessario fare uso delle curve isocrone relative al geosintetico considerato, avallate da un istituto di prove accreditato. Tali curve rappresentano la diminuzione di resistenza e di modulo elastico del geosintetico nel tempo sulla base dei dati disponibili dalle prove effettuate.

Per esempio, nel grafico seguente vengono riportate le curve isocrone delle geogriglie Fortrac[®], prodotte dalla Huesker Synthetic. Sull'asse delle ordinate si riporta il rapporto adimensionale tra tensione ultima e tensione applicata, mentre sull'asse delle ascisse l'allungamento in percentuale. Ogni curva è riferita ad una precisa durata di applicazione del carico.



Curve isocrone delle geogriglie Fortrac[®]

Il fattore di riduzione f_m è composto da due fattori parziali

$$f_m = f_{m1} \times f_{m2}$$

dove

f_{m1} = fattore di riduzione parziale correlato alle proprietà intrinseche del materiale

f_{m2} = fattore di riduzione parziale correlato alla posa e agli effetti ambientali

A loro volta f_{m1} e f_{m2} si compongono di due fattori:

$$f_{m1} = f_{m11} \times f_{m12}$$

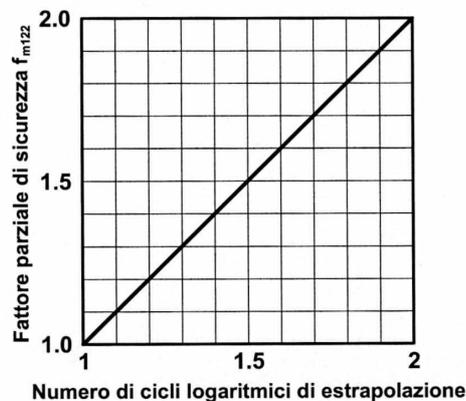
$$f_{m2} = f_{m21} \times f_{m22}$$

dove

f_{m11} = fattore di riduzione parziale che tiene conto di quanto il processo di produzione e la sua variabilità influenzano la resistenza del geosintetico. Questo fattore è strettamente legato al

controllo di qualità del processo di produzione (ISO 9001:2000) e all'uso di valori caratteristici con il 95% come limite di confidenza minimo.

f_{m12} = fattore di riduzione parziale correlato all'estrapolazione dei dati disponibili da prove di laboratorio. Si valuta il volume di dati disponibili da prove per lo sviluppo statistico (sub fattore f_{m121}) e la successiva estrapolazione di questi dati sulla vita utile prevista del rinforzo (sub fattore f_{m122}). Il fattore f_{m122} descrive l'affidabilità dell'estrapolazione dei dati raccolti sui materiali che vengono utilizzati in opere la cui vita utile è superiore alla durata delle prove effettuate. La norma citata stabilisce che, quando si estrapola un ciclo logaritmico (per esempio da 10 anni di prove a 100 anni di vita utile prevista), il fattore f_{m122} può essere assunto pari a 1; se invece si estrapolano due cicli logaritmici (da 1 anno di prove a 100 anni di vita utile), tale fattore deve essere assunto pari a 2, come indicato nel grafico a fianco.



Determinazione del fattore f_{m122}

f_{m21} = fattore di riduzione parziale riferito al danneggiamento meccanico del geosintetico di rinforzo prima della posa e durante la stessa (sub fattore f_{m211}) e a come tale danneggiamento influenzi il comportamento a lungo termine del materiale (sub fattore f_{m212}).

f_{m22} = fattore di riduzione parziale che tiene conto dell'influenza degli effetti ambientali (agenti chimici presenti nel terreno, temperatura, ecc.) sul geosintetico di rinforzo.

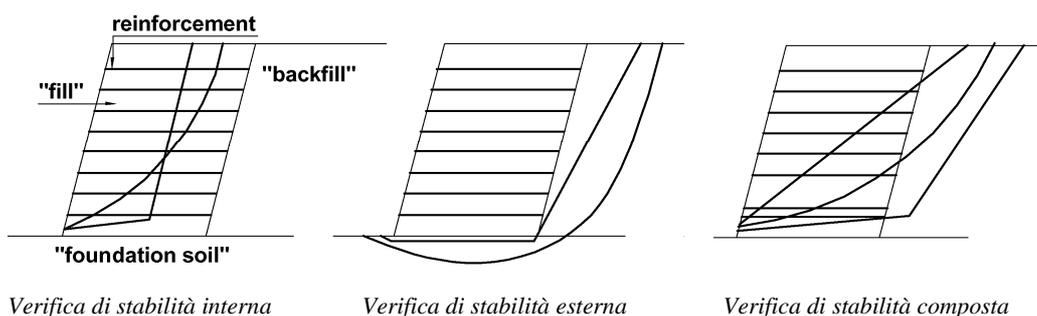
Attualmente, per risolvere problematiche geotecniche particolari, i progettisti hanno la possibilità di adottare geosintetici di rinforzo prodotti su misura che non fanno parte della gamma di prodotti standard e quindi carenti, almeno in parte, di certificazioni specifiche. In questi casi la normativa prevede che, in assenza di prove ad hoc, si possa far uso dei dati disponibili per la stessa famiglia di prodotti purché ci si mantenga dal lato della sicurezza. Per esempio, se fosse prodotta una geogriglia con una resistenza di 1000 kN/m in fibre di poliestere, sarebbe possibile utilizzare le curve isocrone, il coefficiente di estrapolazione e il fattore di riduzione per effetti ambientali relativi alla famiglia del prodotto, purché venga realizzata utilizzando le stesse materie prime, lo

stesso metodo e macchinari di produzione e lo stesso controllo di qualità delle geogriglie certificate. Per i fattori di riduzione per danneggiamento meccanico, invece, si consente l'adozione dei valori relativi alle analoghe geogriglie di resistenza minore.

4. LE VERIFICHE DI STABILITÀ DELLE TERRE RINFORZATE

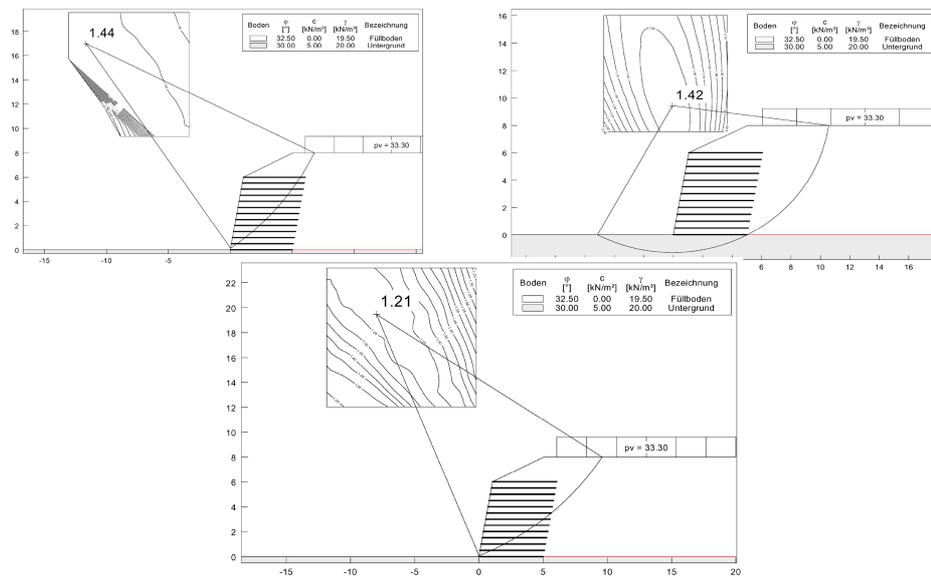
Le verifiche di stabilità di strutture in terra rinforzata si effettuano secondo i metodi "classici" che si applicano alle verifiche di stabilità dei pendii (Bishop, Janbu, Spencer, ecc.), considerando in aggiunta l'azione delle forze resistenti delle geogriglie di rinforzo presenti. Spesso si effettua una distinzione rigorosa tra le verifiche di stabilità esterne e le verifiche di stabilità interne alla terra rinforzata. Le verifiche di stabilità esterne considerano unicamente meccanismi di rottura che non intersecano la terra rinforzata, ma che si sviluppano all'esterno dell'armatura e del terreno di riempimento. Per la verifica di stabilità interna si considerano invece superfici di scivolamento che interessano unicamente la terra rinforzata.

Una distinzione formale di questo tipo tra le verifiche di stabilità ha come conseguenza il fatto che spesso si esaminano meccanismi di rottura che si sviluppano in una zona molto ristretta (solo all'interno oppure solo all'esterno della terra rinforzata). L'analisi dei possibili meccanismi di rottura che si sviluppano parzialmente all'esterno e parzialmente all'interno delle strutture armate, in molti casi è trascurata.



Proprio questi meccanismi di rottura – denominati "composti" o "compound mode" – rappresentano spesso la forma di rottura più probabile e pertanto forniscono il fattore di sicurezza minimo della struttura. Trascurare questi meccanismi porta ad un sottodimensionamento critico delle opere e quindi ad un rischio di cedimento elevato.

Si vedano, a titolo di esempio, i fattori di sicurezza ottenuti nelle verifiche di stabilità interna, esterna e composta per una terra rinforzata "tipo", di seguito riportate:



Le verifiche di stabilità interna ed esterna danno come risultato un fattore di sicurezza al di sopra del minimo richiesto dalla normativa ($FS_{\min} = 1.30$), mentre la verifica di stabilità composta porta ad un fattore di sicurezza molto più basso, inferiore al minimo consentito dalla normativa.

Dal punto di vista estetico, i rilevati in terra rinforzata appaiono come stabili, indipendentemente dal fatto che abbiano un fattore di sicurezza globale di 1.40 o di 1.04. Nel secondo caso il margine di sicurezza è esiguo e ci si trova vicino alle condizioni di equilibrio limite. Ciò significa che, in caso di azioni aggiuntive anche di lieve entità (sovraccarichi, spinte idrauliche, ecc.) oppure se vengono meno alcune delle ipotesi effettuate in sede progettuale, possono verificarsi danni o addirittura il collasso della struttura.

E' opportuno pertanto sottolineare che nell'ambito di una seria progettazione devono essere considerate tutte le possibili superfici di scivolamento per determinare il meccanismo di rottura più sfavorevole; possono essere prese in considerazione sia superfici di scivolamento cilindriche che piane, logaritmiche o circolari o poligonali, purché si effettuino verifiche di stabilità interne, esterne e soprattutto composte.

5. VALIDITA' DELLE CERTIFICAZIONI

Come è stato già espresso in precedenza, i valori dichiarati dai produttori devono essere supportati da certificazioni emesse da istituti indipendenti accreditati. Tra quelli più noti possiamo citare: BBA (British Board of Agrément), TBU (Institut für Textile Bau- und Umwelttechnik GmbH), TRI (Texas Research International) e SKZ (Würzburg).

In molti casi questi certificati sono soggetti a rinnovi periodici, per cui è necessario verificare che gli stessi siano ancora validi. Per questo motivo, le aziende che producono materiali coperti da tali certificazioni devono periodicamente dimostrare di aver mantenuto o migliorato lo standard qualitativo dei prodotti.

Un'altra situazione si può presentare quando un'azienda commercializza, con proprio marchio, geosintetici prodotti da altre aziende. In tali casi è essenziale la dimostrazione della rispondenza con i prodotti di origine.

E' opportuno inoltre evidenziare che i certificati di prova sui geosintetici che un produttore presenta sono riferiti a materiali provenienti da specifici stabilimenti di produzione. La differenza tra prodotti che escono da diversi stabilimenti può infatti anche essere rilevante, in quanto ci sono diversità nei processi produttivi, nei materiali, nei macchinari, ecc. Questo significa che, da un punto di vista tecnico, il prodotto finale può non essere lo stesso e che quindi i geosintetici possono avere un comportamento meccanico diverso.

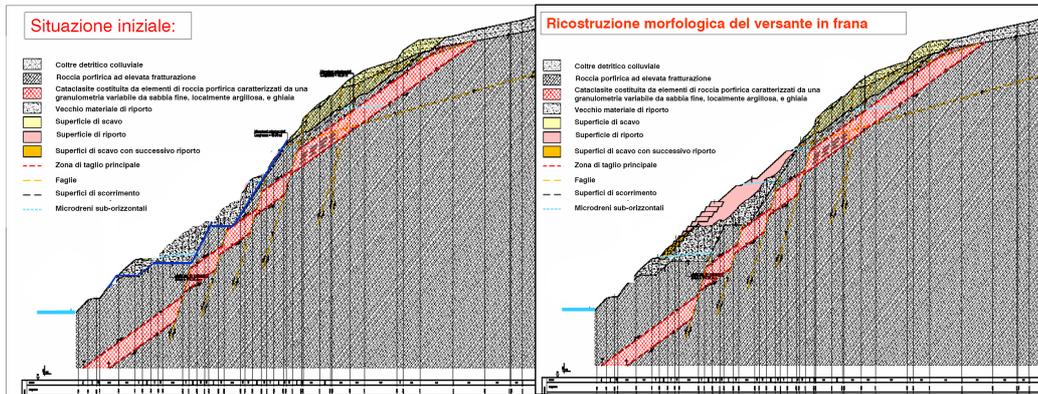
6. ESEMPI DI TERRE RINFORZATE IN AMBITO MONTANO E IDRAULICO

6.1. LONA-LASES (TN): STABILIZZAZIONE DI UN VERSANTE IN FRANA

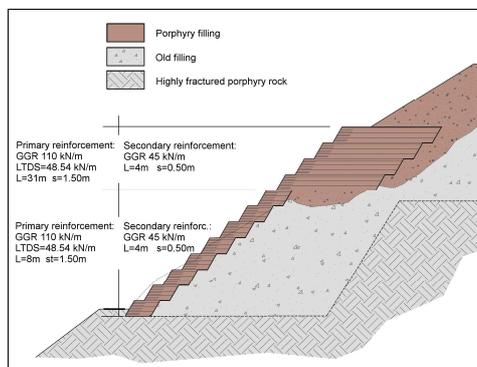
Il versante del monte Gorsa, dopo numerosi anni di attività estrattiva del porfido, è stato interessato negli ultimi anni da un imponente fenomeno franoso nella zona sovrastante la strada provinciale SP71 ed il lago di Lases, con grave rischio per l'adiacente area abitata.

Per la stabilizzazione del versante, la soluzione adottata dai progettisti è stata basata principalmente sui seguenti punti:

- Ricostruzione morfologica del versante in frana mediante la rimozione del terreno in sommità del versante e trasporto al piede per ripristinare l'azione di contenimento e per riportare lo stato tensionale di compressione dell'ammasso roccioso alle condizioni precedenti l'attività estrattiva del porfido
- Esecuzione di una struttura in terra rinforzata con geogriglie in PET a rivestimento polimerico al piede del versante con pendenza di 60° ed in grado di sopportare l'elevato carico soprastante. L'altezza della terra rinforzata è di 60 m a banche sovrapposte di 5 m ciascuna e berme di 3 m. La lunghezza complessiva di ca. 100 m
- Efficace sistema di drenaggio del corpo della frana per evitare incrementi delle pressioni neutre lungo la superficie di scorrimento del corpo di frana
- Sistema di monitoraggio con: 5 inclinometri, 6 piezometri a tubo aperto, 3 estensimetri, 2 assestimetri a magneti, 62 caposaldi di monitoraggio



La soluzione proposta prevedeva la realizzazione di terre rinforzate di altezza variabile fino ad un massimo 60 m, realizzate mediante rilevati sovrapposti di 5 m l'uno. All'interno di ogni singolo rilevato da 5 metri sono previste quattro strati di griglie di rinforzo "principali", spaziate di 1,5 m, e sei griglie "secondarie" di resistenza inferiore, spaziate di 0,5 m, aventi unicamente la funzione di rendere stabile il fronte della terra rinforzata. Per minimizzare l'entità dello scavo, garantendo nel contempo la stabilità dell'opera sia con verifiche tensio-deformative che secondo il metodo dell'equilibrio limite, le lunghezze previste delle griglie di rinforzo sono state scelte pari ad 8 metri nella parte basse del rilevato e pari a 16 m (o in alcune zone pari a 31 m) nella parte superiore del rilevato. Come terreno di riempimento è stato utilizzato il materiale grossolano e spigoloso presente in loco, mentre sul fronte della terra rinforzata è stato posato uno strato di 20-30 cm di terreno vegetale, in modo da facilitare l'attecchimento della vegetazione. Per impedire il dilavamento, la fuoriuscita del terreno e l'insorgere di fenomeni erosivi superficiali, sul fronte della terra rinforzata è stata posata una biorete antierosione in fibre di juta, posizionata tra la geogriglia ed il cassero a perdere in rete elettrosaldata.



Sezione tipo della terra rinforzata



Vista della terra rinforzata dal piede

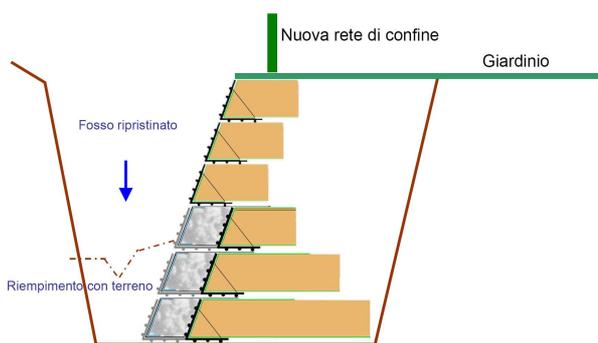
6.2. OFFAGNA (AN): RICOSTRUZIONE DI UNA SCARPATA FLUVIALE

A seguito dell'alluvione di Osimo Stazione e della frazione di San Biagio del Settembre 2006, una vasta zona all'interno del Comune di Offagna ha subito eventi di tipo erosivo dovuti al forte ingrossamento dei corsi d'acqua a regime torrentizio.

In particolare alcune proprietà private sono state interessate da fenomeni come quelli riportati nella foto a fianco.



Per la ricostruzione di tali scarpate, la soluzione adottata è stata quella riportata nella figura che



segue, ovvero una terra rinforzata che, nel tratto potenzialmente a contatto con il corso d'acqua (circa metà rilevato), presenta le seguenti caratteristiche:

- casseri zincati, in modo da evitare problemi di corrosione
- elementi di rinforzo costituiti da geotessili in poliestere (anziché

geogriglie) per evitare la fuoriuscita del terreno di riempimento, specialmente in caso di rapido abbassamento del livello dell'acqua

- fronte realizzato con ghiaia grossolana per ridurre gli effetti del dilavamento dovuti alla corrente



Vista della terra rinforzata a lavori ultimati

7. CONCLUSIONI

Nel presente articolo è stato illustrato come le strutture in terra rinforzata, una delle tecniche di ingegneria naturalistica per la realizzazione di opere di sostegno, associano l'elemento strutturale di rinforzo ad una copertura vegetativa frontale per evitare l'insorgere di fenomeni erosivi superficiali. Particolare attenzione deve essere riposta nella progettazione e nel dimensionamento dei rinforzi utilizzati in termini di tensione di progetto a lungo termine, di verifica della stabilità interna, esterna e composta e nella corretta interpretazione delle certificazioni di qualità dei materiali impiegati.

8. BIBLIOGRAFIA

- British Standard BS 8006:1995. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.
- BBA – British Board of Agrément. Road and Bridges, Certificate No 01/R125.
- Eurocode EC7 - Geotechnical Design - General rules.
- D.M. LL.PP. 11.03.1988. Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. Istruzioni per l'applicazione.
- Reinforced steep vegetated slope 60 m height for landslide stabilization in Lona Lases (Trento-Italy), Dalla Torre, Benigni, Cesarini Sforza, Fantini, IGS Yokohama 2006.