



# **L'USO DELLE GEOGRIGLIE IN APPLICAZIONI STRADALI E FERROVIARIE**

## 1. INTRODUZIONE

Il concetto del rinforzo del terreno non è certo nuovo. Lo Ziggurat di Agar-Quf (*Fig. 1*), 5 km a nord di Baghdad, è stato costruito circa 3000 anni fa utilizzando mattoni d'argilla rinforzati con stuoie di fibre vegetali intrecciate. La Grande Muraglia cinese (*Fig. 1*) è stata costruita con strati di argilla mista a ghiaia, rinforzati con rami e fibre vegetali.

Il concetto moderno di terreno rinforzato è stato postulato da Casagrande, che ha idealizzato il problema nella forma di un terreno soffice rinforzato con membrane ad alta resistenza, stese orizzontalmente a strati equidistanti.

Il rapido sviluppo della tecnologia nel campo dei polimeri ha permesso la produzione di una grande varietà di Geosintetici, e in conseguenza la crescita di molti sistemi di rinforzo diversi. Infine l'avvento delle Geogriglie, che combinano un'elevata resistenza a trazione con ottime caratteristiche di interazione con il terreno, sia nei meccanismi di taglio diretto che in quelli di sfilamento, ha permesso l'utilizzo di qualsiasi tipo di terreno, anche di quelli marginali e di bassissimo costo, consentendo così il rapido sviluppo delle tecniche di rinforzo del terreno in tutto il mondo.

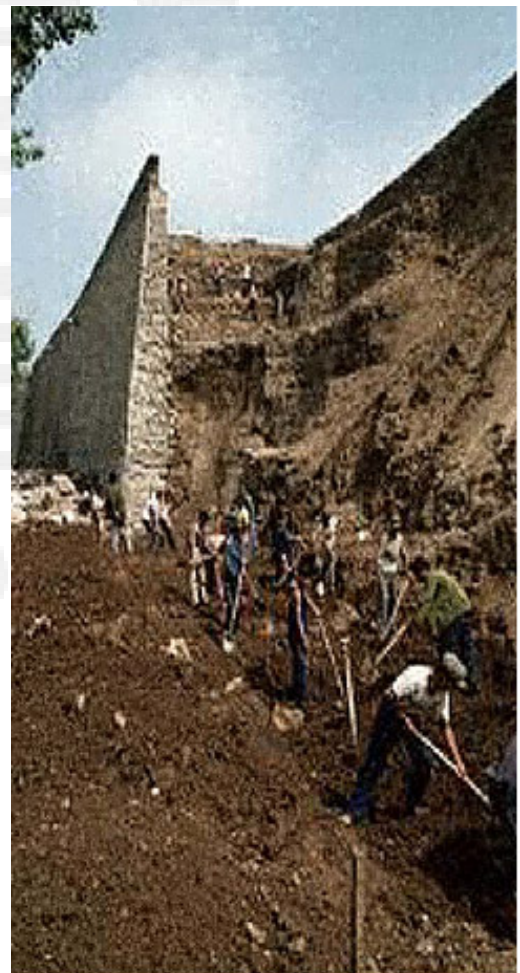


Figura 1: Esempi storici di strutture in terra rinforzata: lo Ziqqurat di Agar-Quf (Iran) e la Grande Muraglia Cinese

Il terreno rinforzato è un materiale composito, in cui si combinano la resistenza a compressione del terreno e la resistenza a trazione dei rinforzi. La sinergia tra le caratteristiche dei due componenti migliora le caratteristiche globali del materiale composito, così come avviene con calcestruzzo e barre d'acciaio. Però, mentre tra calcestruzzo e acciaio il trasferimento degli sforzi avviene sia per adesione chimica che per interazione meccanica, il trasferimento degli sforzi tra terreno e Geosintetici di rinforzo può avvenire solo per interazione meccanica, cioè per attrito e incastro. Da qui discende l'efficacia delle Geogriglie come elementi di rinforzo, in quanto l'interazione con il terreno avviene sia per attrito sulla superficie piena sia per incastro dei granuli nelle aperture e per conseguente resistenza passiva contro le barre della Geogriglia.

Oltre a ciò, le Geogriglie sono in grado di fornire forze di trazione molto elevate con piccoli allungamenti, il che consente di ottenere strutture inerentemente flessibili ma poco deformabili. Le caratteristiche strutturali delle terre rinforzate dipendono comunque anche dal grado di compattazione del terreno, che deve essere sufficientemente elevato da consentire l'interazione ottimale con le Geogriglie, dal sistema costruttivo prescelto, e dalla qualità e precisione della posa in opera.

Non si deve poi dimenticare che le terre rinforzate costituiscono in genere opere strutturali, volte a sopportare carichi elevati, talvolta sismici o ciclici; perciò queste opere devono essere adeguatamente progettate in tutte le componenti, assicurando i dovuti Fattori di Sicurezza contro tutti i possibili meccanismi di rottura e la dovuta "distanza" rispetto a tutti gli stati limite ultimi e di esercizio.

Negli ultimi venti anni, cioè da quando, all'inizio degli anni '80, il terreno rinforzato con Geosintetici ha avuto un massiccio impulso tecnico e commerciale, sono state realizzate migliaia di opere in tutto il mondo. Ciò ha permesso da un lato lo sviluppo dei vari sistemi di costruzione, dall'altro lo sviluppo di metodi di calcolo e verifica, validati sia da prove di laboratorio che da esperienze sul campo.

I Geosintetici sono di sicuro uno dei campi, nell'intera Ingegneria Civile, in cui c'è stata la maggior profusione di risorse economiche e intellettuali per la ricerca, sia teorica che applicata.

Le caratteristiche fisiche, meccaniche, idrauliche, di durabilità dei Geosintetici sono state studiate e analizzate con una precisione e una velocità che vanta pochi uguali nell'Ingegneria Civile, tanto che sono stati sviluppati oltre 50 metodi di prova per misurare tutte le fondamentali proprietà di questi materiali.

Pertanto oggi il Progettista dispone da un lato di una massa di dati estremamente copiosa a cui attingere per risolvere anche i problemi più complessi, dall'altro può specificare con grande dettaglio i materiali congeniali al progetto, con tutte le prove che consentano un controllo di qualità mirato e accurato.

I Geosintetici, e le Geogriglie in particolare, costituiscono quindi prodotti con caratteristiche ingegnerizzate, ripetibili e affidabili, cui si possono applicare con sicurezza metodi tecnici e scientifici per il calcolo e la verifica delle varie componenti strutturali.

Tale affidabilità ha consentito uno sviluppo esponenziale del numero di applicazioni e di progetti di terre rinforzate con Geogriglie, sia per la costruzione di muri e pendii ripidi, sia per la stabilizzazione di terreni soffici e per il rinforzo basale.

Strade e ferrovie sono i settori che più hanno beneficiato, e continueranno a beneficiare, delle superiori caratteristiche tecniche e dei costi contenuti delle terre rinforzate con Geogriglie.

Alpe Adria Textil<sup>®</sup>, che è stato uno dei pionieri in Italia nello sviluppo dei Geosintetici di rinforzo e delle loro applicazioni, vuole qui esporre quindi lo stato dell'arte sull'uso delle Geogriglie in applicazioni stradali e ferroviarie.

## 2. I PRINCIPI BASILARI DEL TERRENO RINFORZATO

Possiamo utilizzare un modello molto semplice per spiegare i principi su cui si basano le tecniche delle terre rinforzate.

Consideriamo l'elemento di terreno in *Fig. 2.a*, supposto parte di una massa praticamente infinita di terreno. L'applicazione di uno sforzo verticale  $\sigma_v$  provoca una deformazione dell'elementino e richiama lo sforzo orizzontale  $\sigma_h$  a causa della compressione laterale subita dal terreno adiacente.

L'elementino è perciò soggetto a una dilatazione orizzontale, contrastata solo dalla resistenza a compressione del terreno all'intorno. Se però l'elementino è attraversato da uno strato di rinforzo resistente a trazione, come in *Fig. 2.b*, all'applicazione dello sforzo verticale consegue sia l'espansione laterale dell'elementino stesso, sia l'estensione del rinforzo. Questa genera una forza di trazione  $T$  nel rinforzo, che a sua volta produce uno sforzo orizzontale  $\sigma_h^*$ .

Questo sforzo fornisce un'azione di confinamento sull'elementino, resiste agli sforzi orizzontali generati dal carico verticale e riduce così le deformazioni orizzontali. Perciò l'inclusione di una Geogriglia nella massa di terreno riduce gli sforzi e le deformazioni applicati al terreno stesso; dall'altro lato, lo sforzo verticale può essere aumentato rispetto a quello applicabile al solo terreno, a pari o minori deformazioni.

Considerando ora gli sforzi di taglio, come mostrato in *Fig. 3* in un terreno non coesivo si ha

$$(\tau_{yx})_{\max} = \sigma_y \cdot \tan \phi_{\max}$$

dove:

- $\phi_{\max}$  = angolo di resistenza al taglio del terreno.
- $(\tau_{yx})_{\max}$  = sforzo di taglio resistente nel terreno.

Quando l'elemento di terreno è attraversato da un rinforzo, come mostrato in *Fig. 4*, lo stato di sforzo viene modificato, perché la forza di trazione  $T$  genera due ulteriori termini di resistenza al taglio: la componente tangenziale  $T \cdot \sin \theta$  genera direttamente uno sforzo di taglio, mentre la componente normale  $T \cdot \cos \theta$  genera lo sforzo  $\tau_{yxr}$  attraverso l'angolo di resistenza al taglio del terreno.

Si ha quindi:

$$(\tau_{yxr})_{\max} = \sigma_{yr} \cdot \tan \phi_{\max} + (T / A_s) \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi_{\max} + (T / A_s) \cdot \sin \theta$$

dove:

- $A_s$  = area dell' elementino di terreno.
- $(\tau_{yxr})_{\max}$  = sforzo di taglio resistente nel terreno rinforzato.

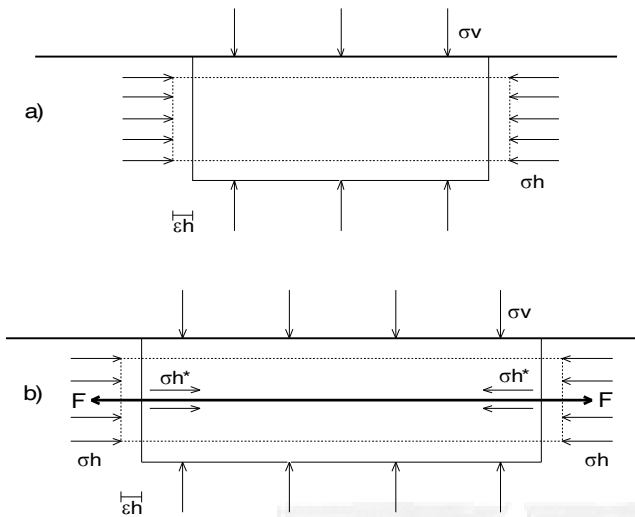


Figura 2: Sforzi e deformazioni in un elementino di terreno soggetto a sforzo verticale: a) senza rinforzo; b) con rinforzo.

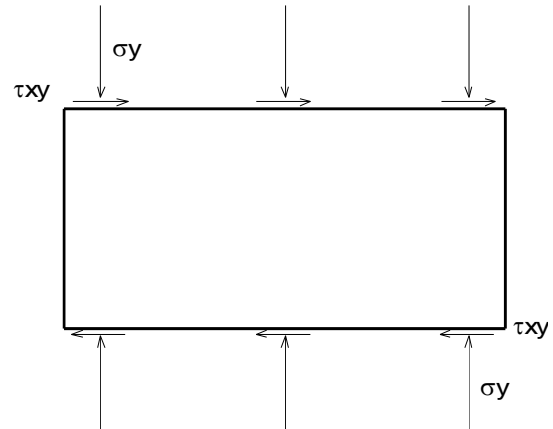


Figura 3: Sforzi di taglio in un elemento

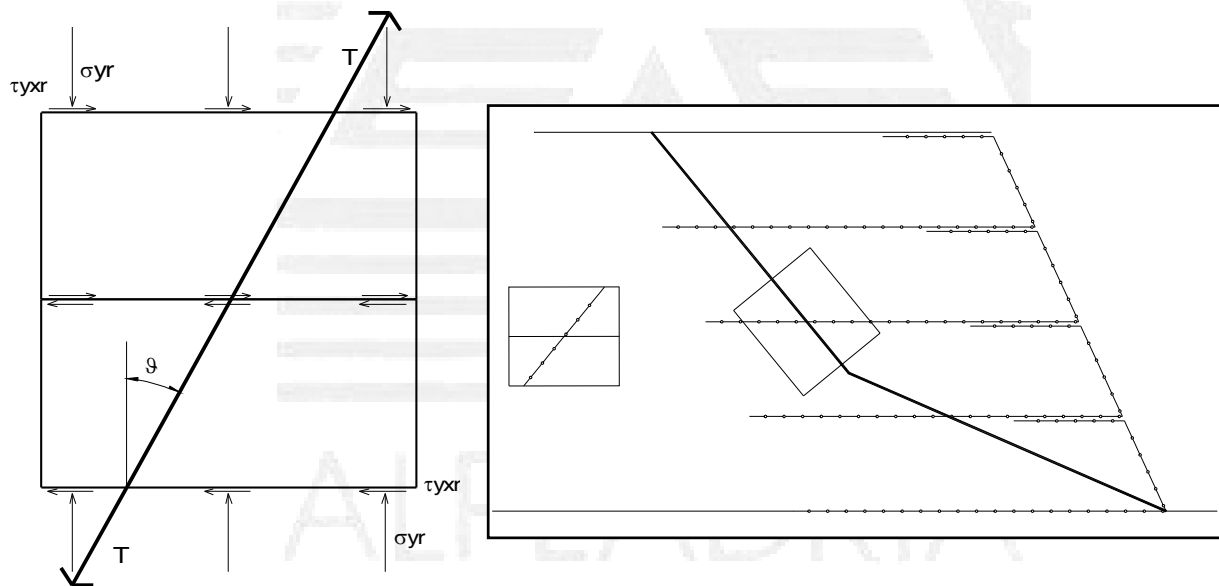


Figura 4: Sforzi di taglio in un elemento di terreno attraversato da un rinforzo

Pertanto lo sforzo normale sull'elementino viene incrementato del fattore:

$$\hat{\sigma}_y = (T / A_s) \cdot \cos \theta$$

mentre lo sforzo di taglio resistente del terreno aumenta anch'esso in funzione della resistenza a trazione T.

Le superiori caratteristiche del terreno rinforzato, come visto in termini di resistenza a sforzi verticali e di taglio, di minor deformazione e maggior flessibilità e duttilità, trovano larga applicazione sia per strutture di sostegno che per sistemi di rinforzo di base. Occorre allora analizzare le proprietà dei materiali di rinforzo e come queste influiscono sulle caratteristiche del terreno rinforzato.

### 3. RINFORZO METALLICO E POLIMERICO

Il primo sistema di terra rinforzata è stato la "Terre Armee", inventato dal francese Henry Vidal, che utilizzava barre d'acciaio come rinforzi del terreno. Negli anni i rinforzi hanno poi assunto anche forma di teli e griglie, sia metallici che polimerici (Fig. 5).

Le barre, metalliche o polimeriche, vanno installate con spaziatura verticale e orizzontale predeterminata, mentre teli e griglie coprono in genere l'intera superficie orizzontale da rinforzare, in modo che solo la spaziatura verticale deve essere determinata.

La spaziatura e la lunghezza dei rinforzi dipendono dalle loro caratteristiche meccaniche (che a loro volta dipendono fondamentalmente dal materiale di cui sono costituiti e dal procedimento di produzione) e di interazione con il terreno (che dipendono essenzialmente dalla forma del rinforzo).

Come già accennato, i rinforzi più efficaci, dal punto di vista dell'interazione con il terreno, sono sicuramente quelli con struttura a griglia.

Tra i materiali polimerici, i più utilizzati sia per la produzione di Geogriglie (struttura a griglia) che di Geotessili (struttura a telo pieno), sono il Poliestere (PET) e le poliolefine, in particolare Polietilene ad Alta Densità (HDPE) e Polipropilene (PP). Vengono però utilizzati anche fibre aramidiche, fibre di carbonio, e altri materiali ad elevato modulo elastico.

Tutti i rinforzi polimerici sono soggetti, in misura maggiore o minore a seconda del polimero e del processo produttivo, a creep di trazione, a degradazione chimica, biologica e solare, a danneggiamento meccanico (in maniera comunque molto inferiore a quella cui sono soggetti i rinforzi metallici); di questi processi, che tendono a diminuire la resistenza ammissibile dei materiali, si deve tener conto in fase di progetto e specifica.

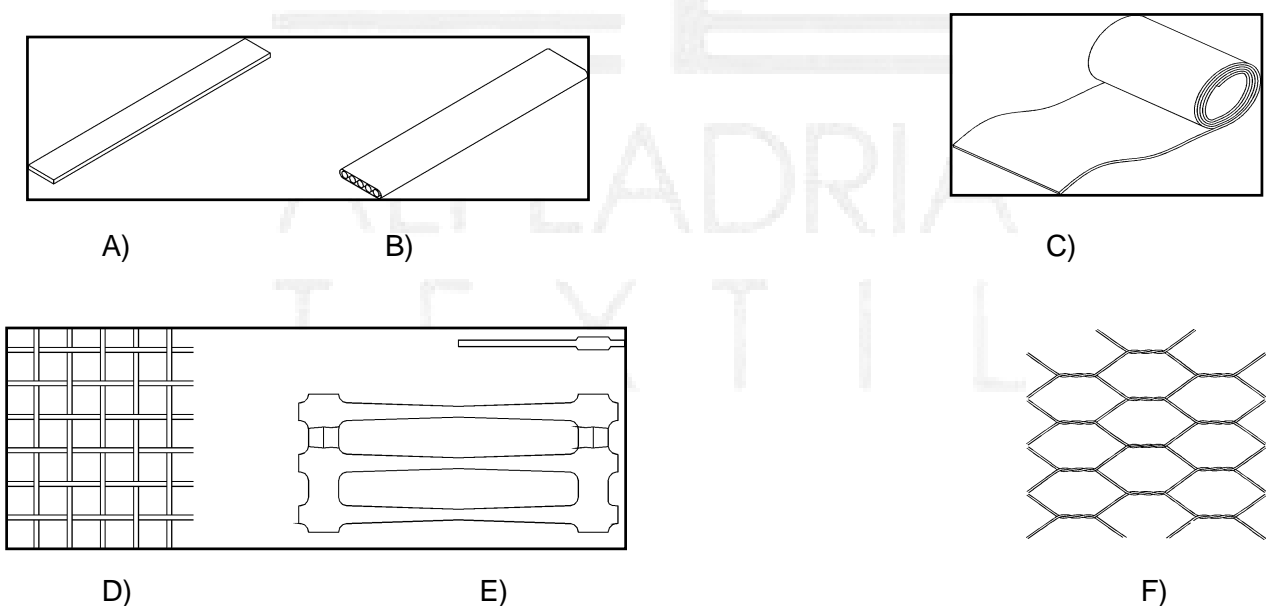


Figura 5: Alcune forme delle inclusioni di rinforzo del terreno: A) barre d'acciaio; B) barre polimeriche; C) Geotessili (teli pieni); D) Geogriglie tessute; E) Geogriglie estruse; F) reti d'acciaio.

### 3.1. IL POLIESTERE (PET)

Il Poliestere (*Fig. 6*) nella sua forma più comune è un polimero di condensazione di un acido dibasico e di un dialcol.

Il gruppo esterico  $\text{CO}_2$ , legame polimerico importante, può essere sottoposto all'idrolisi in condizioni di elevata alcalinità o acidità. Nel Poliestere il gruppo aromatico piano irrigidisce la struttura base del polimero ed aumenta la sua flessibilità caratteristica. Di conseguenza i Poliesteri sono impiegati sia come fogli di plastica sia come fibre. Quindi il poliestere ha catene principali di idrocarburi contenenti legami esteri, da cui deriva il nome.

La struttura presentata nella *Fig 6* viene detta Polietilene Tereftalato o PET, poiché è formato da gruppi di etilene e da gruppi di tereftalato.

I gruppi estere nella catena del Poliestere sono polari, cioè l'atomo di ossigeno ha una carica negativa ed il carbonio ha una carica positiva. Le cariche positive e negative dei diversi gruppi esteri si attraggono l'una con l'altra. Questo permette ai gruppi esteri delle catene vicine di allinearsi una con l'altra in forma cristallina. Questa caratteristica permette di ottenere fibre molto sottili di PET, ad alta tenacità.

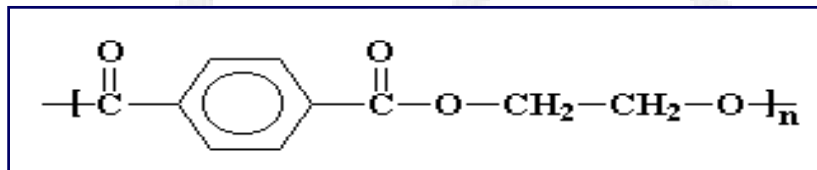


Figura 6: Polietilene tereftalato (PET)

Le fibre di PET possono poi essere composte in fili ad alta resistenza, che possono essere a loro volta tessuti, a trama – ordito o in catena, per produrre Geotessili e Geogriglie di caratteristiche meccaniche molto elevate.

Geotessili e Geogriglie prodotti con fili di PET ad alto modulo elastico possiedono resistenze a trazione molto elevate con eccellenti proprietà in termini di creep molto basso.

Come detto, il PET è sensibile alla degradazione chimica dovuta all'idrolisi, sia in ambienti molto acidi ( $\text{pH} < 2$ ) sia in ambienti fortemente alcalini ( $\text{pH} > 12$ ).

La resistenza alla degradazione chimica è influenzata dal peso molecolare  $M_w$  e dal gruppo carbossilico finale (CEG) del PET utilizzato per le fibre: maggiore è  $M_w$  e minore è il CEG e migliori sono le caratteristiche delle fibre e dei fili.

Nella *tabella 1* vengono presentati i valori medi delle principali caratteristiche dei polimeri più utilizzati per la realizzazione dei Geosintetici.

Tabella 1: Principali caratteristiche dei polimeri più utilizzati per la realizzazione dei Geosintetici.

	POLIETILENE AD ALTA DENSITA' (HDPE)	POLIPROPILENE (PP)	POLIESTERE (PET)	POLIAMMIDE (PA)
Densita' (Kg/mc)	950	910	1380	1140
Tasso di ripresa d'umidita' (%)	< 0,05	< 0,05	0,4	6,5
Temperatura di fusione (°C)	125	165	250	250
Temperatura di rammollimento (°C)	110	140	220 – 240	230
Tenacita' (N/Tex)	0,4 – 0,6	0,4 – 0,65	0,4 – 0,8	0,4 – 0,8
Allungamento a trazione per fibre non ritorte (%)	20 – 50	15 – 50	10 – 25	20 – 40
Resistenza a:				
- Acidi	Eccellente	Eccellente	Buona	Sufficiente
- Basi	Eccellente	Eccellente	Sufficiente	Buona
- Solventi clorurati ed aromatici	Sufficiente	Sufficiente	Buona	Buona
- Agenti ossidanti	Scarsa	Buona	Buona	Sufficiente
- Raggi UV	Scarsa	Scarsa	Sufficiente	Sufficiente
- Funghi	Eccellente	Buona	Sufficiente	Buona
- Insetti	Eccellente	Sufficiente	Sufficiente	Sufficiente
- Vermi	Eccellente	Sufficiente	Sufficiente	Sufficiente
- Riscaldamento secco	Sufficiente	Sufficiente	Buona	Sufficiente
- Riscaldamento umido	Sufficiente	Sufficiente	Sufficiente	Buona
- Abrasione	Buona	Buona	Eccellente	Eccellente

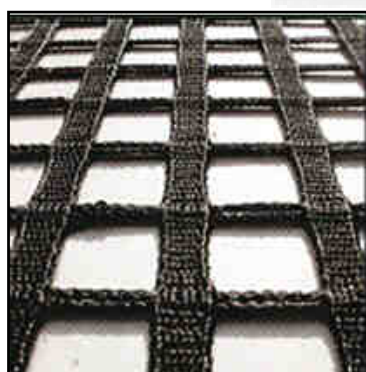
### 3.2. ARTER® E MACRIT®

Alpe Adria Textil è stata la prima azienda italiana a produrre Geotessili e Geogriglie basati su fili di PET ad alta tenacità.

La gamma dei Geosintetici Alpe Adria comprende i seguenti prodotti:

ARTER®: è una Geogriglia tessuta con tecnologia D.O.S. (Directionally Oriented Structure, vedi Fig. 8) prodotta con maglia in catena e inserimento di trama.

Nella struttura DOS l'allungamento è dovuto solo alla deformazione dei fili, mentre non c'è in pratica deformazione della struttura della Geogriglia, in quanto tutti i fili sono diritti e paralleli. Le Geogriglie ARTER® si differenziano in: ARTER® GTS (Fig. 7.A), che è ricoperta con polimero EVA (Etil Vinil Alcol), e ARTER® GT (Fig. 7.B), non ricoperta.



A)



B)

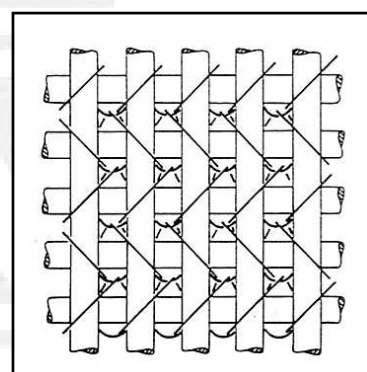
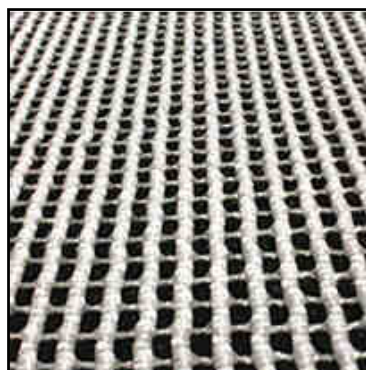


Figura 8: La struttura D.O.S.

Figura 7: Le geogriglie ARTER®: A) ARTER® GTS; B) ARTER® GT.

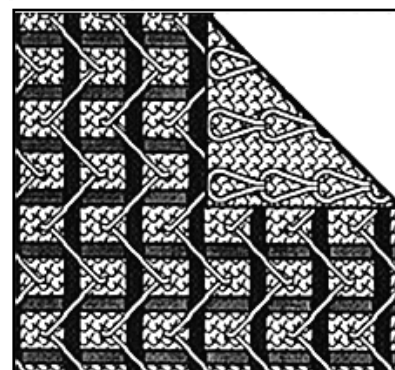
MACRIT®: è un geocomposito costituito da un Geotessile nontessuto accoppiato a una Geogriglia DOS monoassiale o biassiale (Fig. 9); la Geogriglia ha le stesse caratteristiche di ARTER GTS, mentre il Geotessile provvede le funzioni di drenaggio, separazione e filtrazione.



A)



B)



C)

Figura 9: I geocompositi MACRIT®: due dei prodotti disponibili (A e B) e la loro struttura (C)

ARTER® GTS e ARTER® GTS A (Geogriglie): sono entrambi ricoperti con EVA (Fig. 10) e sono stati specificamente ingegnerizzati per il rinforzo dell'asfalto.

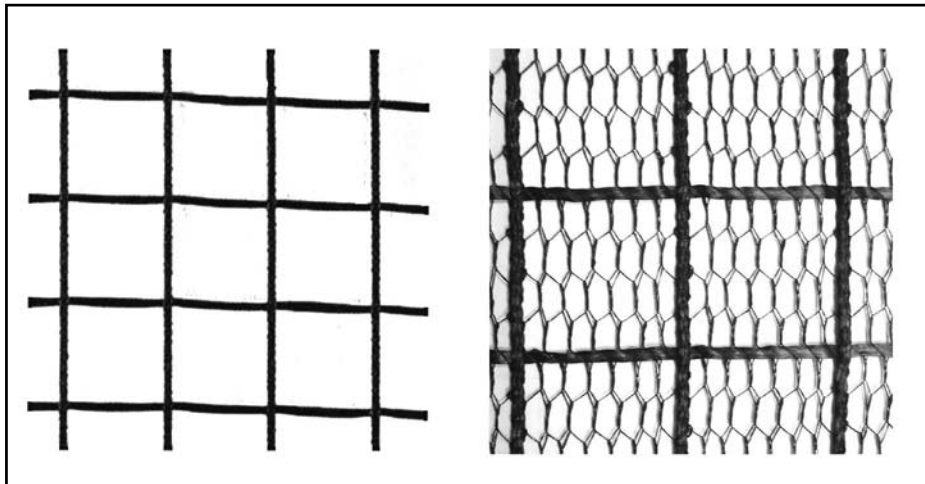


Figura 10: ARTER® GTS e ARTER® GTS A sono adatti al rinforzo dell'asfalto.

MULTIAXIAL: è una Geogriglia con struttura D.O.S. multiassiale, prodotta con maglia in catena in trama. E' un prodotto unico al mondo e rappresenta la Geogriglia tecnologicamente più avanzata disponibile sul mercato, grazie ai fili sia ortogonali che diagonali, che forniscono elevata capacità di rinforzo multiassiale e grande stabilità dimensionale.

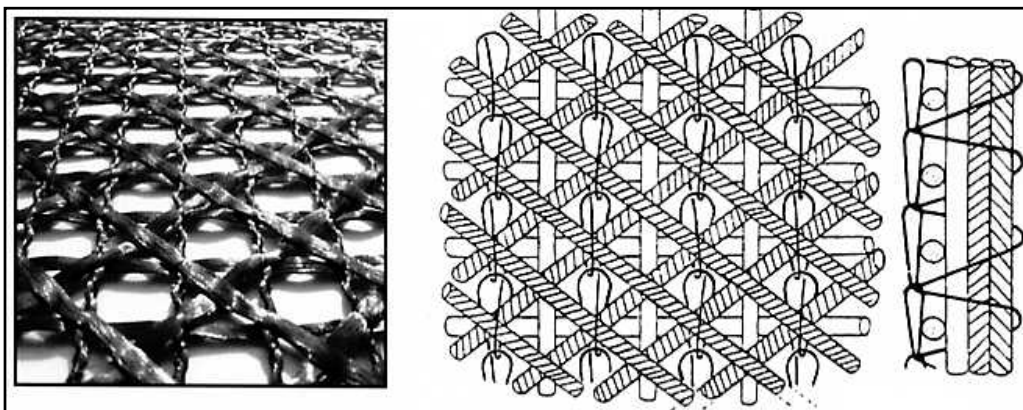


Figura 11: MULTIAXIAL è una Geogriglia con fili sia ortogonali che diagonali.

Tutti i Geosintetici Alpe Adria sono prodotti con componenti della migliore qualità. In particolare i fili di Poliestere ad alta tenacità assicurandole più elevate caratteristiche tecniche.

Le ottime proprietà di creep dei Geosintetici Alpe Adria sono state dimostrate da test di creep e di rottura a creep eseguiti sui fili di Poliestere ad alta tenacità con il metodo SIM (Stepped Isothermal Method).

Questo test viene eseguito applicando dapprima un carico costante ai fili, in un ambiente mantenuto a una temperatura di riferimento. Dopo un tempo prefissato e senza rilasciare il carico, la temperatura viene aumentata rapidamente. Questa procedura viene ripetuta con successivi salti di temperatura. Il numero, l'altezza e la durata dei salti di temperatura sono prefissati in modo da poter ottenere una "curva madre" dell'allungamento di creep e del modulo di creep su un tempo sufficientemente lungo.

E' allora possibile l'estrapolazione dei risultati a 1.000.000 di ore (115 anni).

Ciò consente di determinare le proprietà di creep dei fili di Poliestere lungo tutta la vita di progetto di un'opera di ingegneria civile.

Le "curve madri" dei fili di Poliestere utilizzati per la produzione dei Geosintetici Alpe Adria vengono mostrate nella Fig. 12, relativa a un carico applicato pari al 60 % della resistenza a trazione.

Si può notare che, anche con un carico così elevato, l'allungamento di creep non supera il 9 % dopo 100 anni.

Inoltre il CEG di questi fili di poliestere è sempre nell'intervallo 15 – 25 meq/kg, mentre Mw risulta sempre superiore a 50,000 g/mol: questi valori assicurano la migliore resistenza chimica dei fili e confermano le elevatissime caratteristiche tecniche dei Geosintetici Alpe Adria e quindi la possibilità di utilizzarli in qualunque progetto di terre rinforzate.

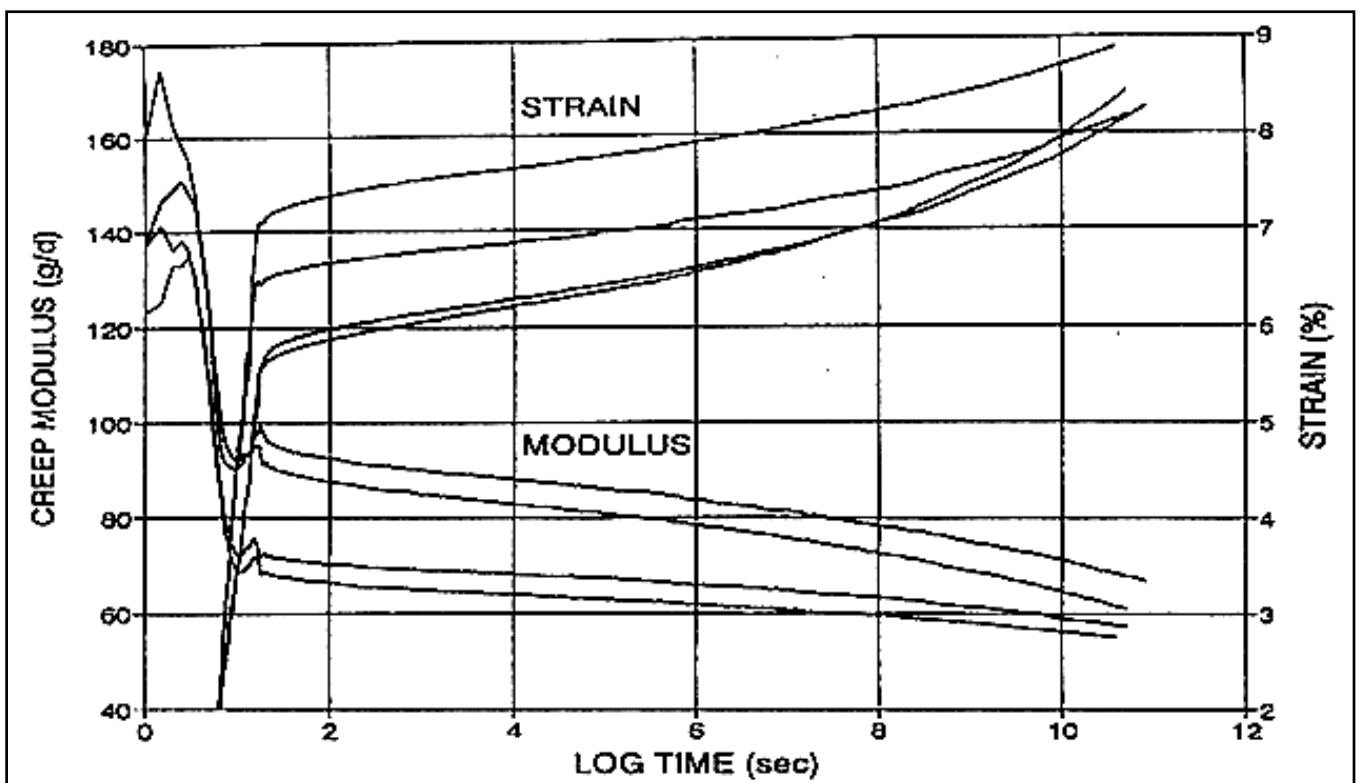


Figura 12: Risultati dei test SIM sui fili di PET utilizzati per i Geosintetici Alpe Adria®

## 4. MURI E PENDII RIPIDI IN TERRA RINFORZATA

Muri e pendii ripidi in terra rinforzata sono strutture stabilizzate internamente. Diversamente dalle strutture a gravità, le strutture stabilizzate internamente richiedono strati di rinforzo stesi orizzontalmente nella massa di terreno ed estesi al di là della superficie di rottura potenziale. Il trasferimento degli sforzi dai rinforzi al terreno e viceversa avviene per attrito e/o per resistenza passiva.

La rigidità tensionale del rinforzo influenza l'entità delle deformazioni di taglio nel terreno necessarie a mobilitare le forze di trazione nel rinforzo stesso. Un rinforzo a elevata rigidità produce rapidamente le forze di trazione, anche a un livello di deformazione inferiore a quello necessario per raggiungere la resistenza a taglio di picco del terreno. Invece un rinforzo a bassa rigidità richiede maggiori deformazioni prima di poter fornire le forze di trazione necessarie alla stabilità, perciò si può raggiungere o superare la resistenza a taglio di picco del terreno.

Le proprietà di interazione del rinforzo con il terreno sono altrettanto importanti: la resistenza di ancoraggio viene generata infatti per attrito, per adesione, o per resistenza passiva contro gli elementi trasversali dei rinforzi. Quando il terreno viene separato tra la faccia superiore e inferiore di una striscia o un foglio di rinforzo (es. nel caso di un Geotessile), il meccanismo di interazione è solo di tipo frizionale, e la resistenza di ancoraggio può essere valutata in base a un meccanismo di taglio diretto.

Nel caso delle Geogriglie, invece, il terreno si incastra nelle aperture dei rinforzi e perciò l'interazione con il terreno avviene sia per attrito sulla superficie piena, sia per incastro e conseguente resistenza passiva contro le barre trasversali.

Lo sviluppo dei rinforzi polimerici ha consentito la possibilità di utilizzare terreni marginali e addirittura rifiuti per la realizzazione di opere in terra rinforzata, con grande diminuzione dei costi di costruzione. La mancanza di terreno granulare in molte aree del mondo ha costretto all'uso di terreni fini e coesivi, dove il rinforzo con Geosintetici ha consentito la costruzione di opera di grandi dimensioni e importanza, altrimenti praticamente irrealizzabili.

### 4.1 IL PROGETTO DI PENDII RIPIDI E MURI IN TERRA RINFORZATA

Per un terreno uniforme c'è un angolo limite  $\beta_{lim}$  fino al quale un pendio non rinforzato risulta stabile. Nel caso di un terreno non coesivo tale angolo è pari all'angolo di attrito del terreno:

$$\beta_{lim} = \phi$$

Un pendio con inclinazione maggiore dell'angolo limite è un pendio ripido: per costruire un pendio ripido è necessario aggiungere delle forze per garantire la stabilità. Il metodo più semplice è quello di introdurre dei rinforzi nel terreno, in grado di fornire forze orizzontali.

Le forze necessarie, che devono essere distribuite all'interno della massa di terreno, possono essere sommate in un'unica forza risultante orizzontale, che può essere espressa con un'espressione simile a quella della spinta attiva di Rankine:

$$T = 1/2 \cdot K \cdot \gamma \cdot H^2$$

dove:

- $H$  = altezza del pendio [m]
- $\gamma$  = peso di volume del terreno [kN/m<sup>3</sup>]
- $K$  = coefficiente di pressione orizzontale equivalente, che dipende dall'inclinazione del pendio
- $\beta$ , dai parametri  $c$  e  $\phi$  del terreno, e dal coefficiente di pressione interstiziale  $ru = u/(\gamma \cdot z)$ .

Nel caso di facciata verticale il coefficiente  $K$  è uguale al coefficiente di spinta attiva  $K_a$ ; quando  $\beta$  è compreso tra  $\phi$  e  $90^\circ$ ,  $K$  assume un valore tra 0 e  $K_a$ .  
 Il coefficiente  $K$  può essere valutato per mezzo di un'analisi di stabilità basata su un meccanismo di rottura a due blocchi, come mostrato in *Fig. 13*.

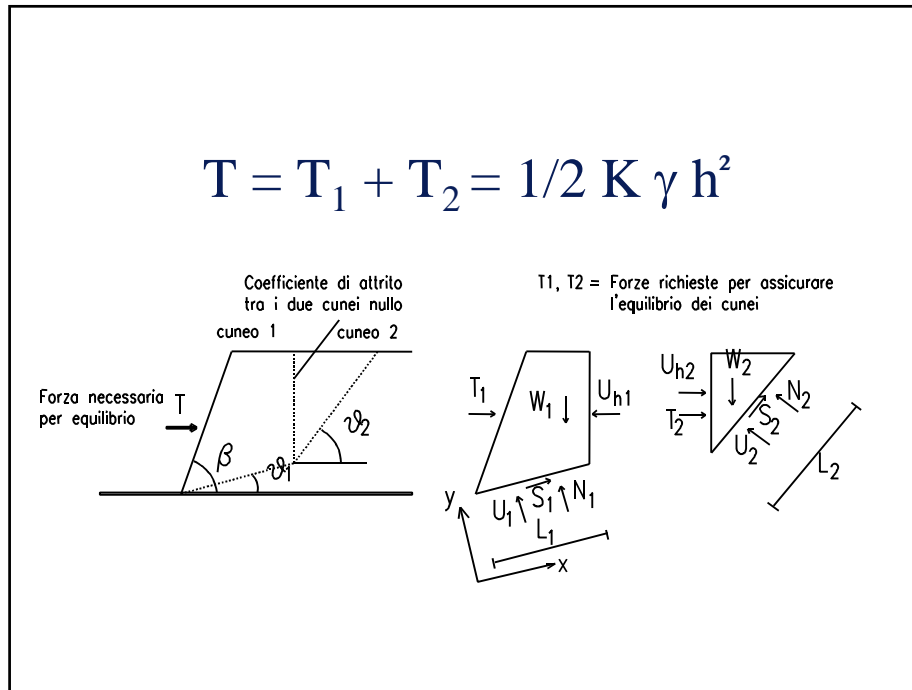


Figura 13: Meccanismo di rottura a due blocchi

Il progetto di un pendio ripido rinforzato deve tenere conto dei seguenti criteri:

- la resistenza localmente richiesta per la stabilità non deve superare la resistenza ammissibile del Geosintetico presente in quella porzione di terreno (*Fig. 14*);

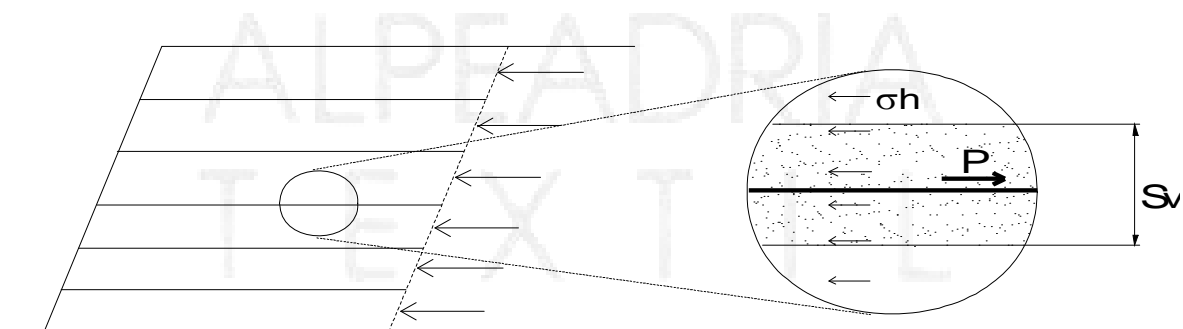


Figura 14: Criteri di progetto: la resistenza localmente richiesta non deve superare la resistenza ammissibile

- non deve avvenire lo scivolamento del blocco rinforzato lungo nessuno degli strati di rinforzo (Fig. 15);

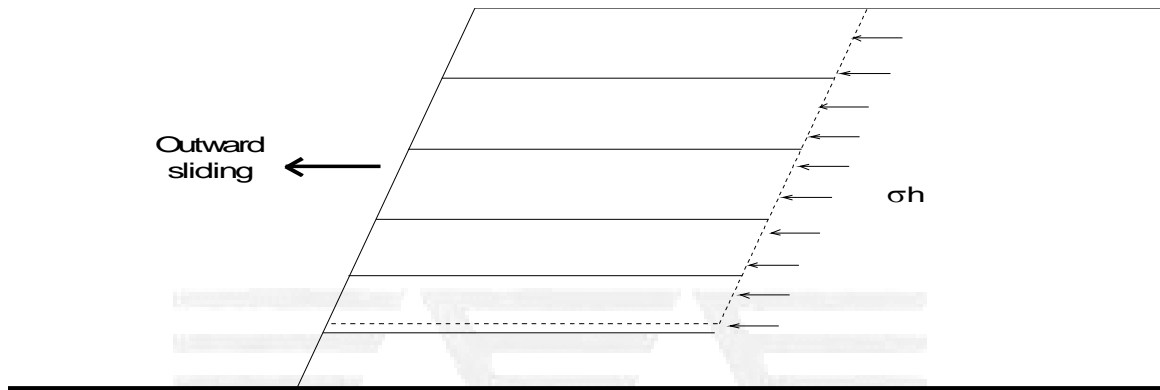


Figura 15: Criteri di progetto: non deve avvenire lo scivolamento del blocco rinforzato

- la resistenza a trazione totalmente disponibile deve essere superiore alla resistenza totale richiesta per la stabilità (Fig. 16);
- la lunghezza del rinforzo oltre la superficie di scivolamento potenziale deve essere tale da non consentire lo sfilamento del rinforzo dal terreno (Fig. 16);

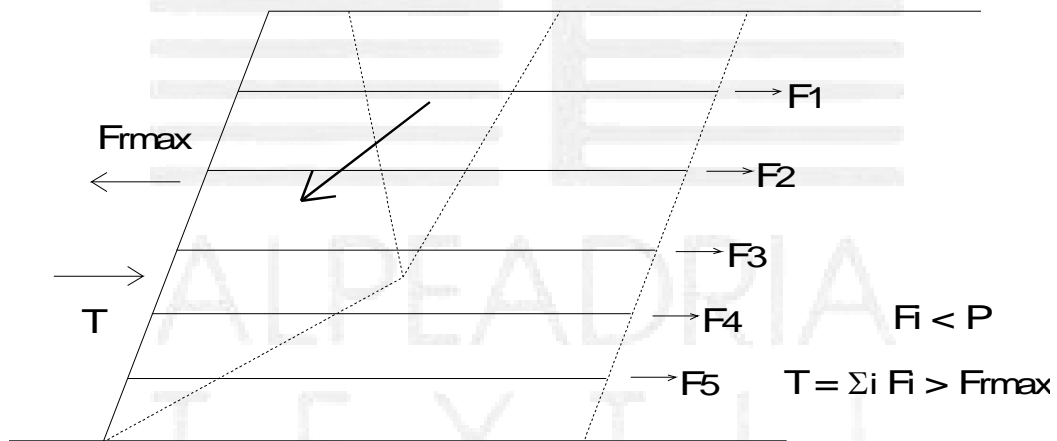


Figura 16: Criteri di progetto: la resistenza totale richiesta non deve superare la resistenza totale disponibile; la lunghezza del rinforzo oltre la superficie di rottura deve essere tale da non consentire lo sfilamento del rinforzo dal terreno.

- tutta la base deve essere compressa, perciò la risultante delle forze deve ricadere all'interno del nocciolo centrale di inerzia della base (Fig. 16).

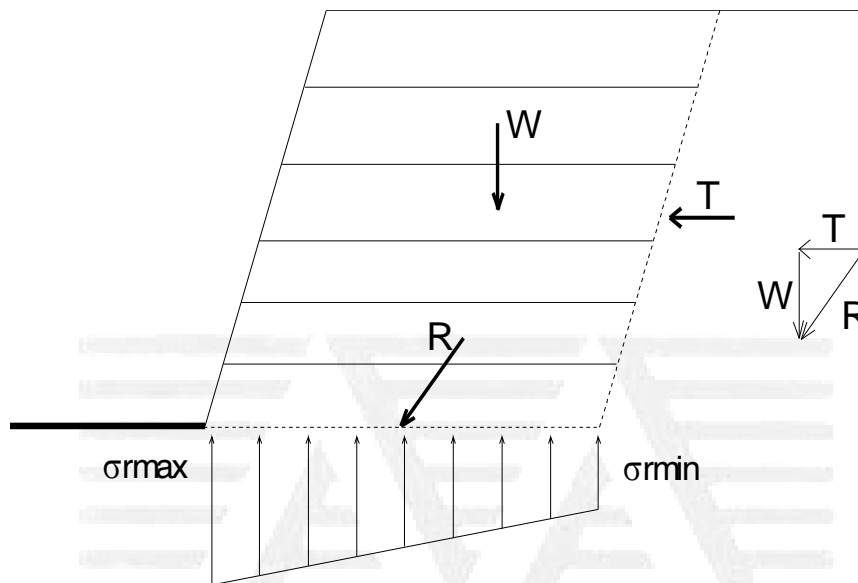


Figura 17: Criteri di progetto: la risultante deve cadere nel nocciolo centrale d'inerzia della base

Per mezzo dell'applicazione sistematica dell'analisi di stabilità a due blocchi, e tenendo conto dei criteri di progetto sopra esposti, è possibile ottenere diagrammi di progetto, come quelli mostrati in Fig. 18, che permettono di ottenere il coefficiente di spinta K, la lunghezza dei rinforzi alla base del pendio (dove il meccanismo critico è lo scivolamento lungo la base) e la lunghezza del rinforzo in cresta (dove il meccanismo critico è lo sfilamento del rinforzo dalla massa di terreno). Questi diagrammi permettono di tener conto dell'inclinazione del pendio, dell'angolo di attrito del terreno e del coefficiente di pressione interstiziale ru.

Questi diagrammi permettono di eseguire molto rapidamente i calcoli di progetto di un pendio in terra rinforzata.

Ovviamente è possibile utilizzare metodi più sofisticati, inclusi metodi agli elementi finiti e alle differenze finite, specialmente in caso di geometrie complesse e di terreni stratificati con caratteristiche differenti per ogni strato. Ma nella maggior parte dei casi i diagrammi di progetto costituiscono un metodo rapido e sufficientemente preciso per ottenere la disposizione necessaria degli strati di rinforzo e le loro caratteristiche.

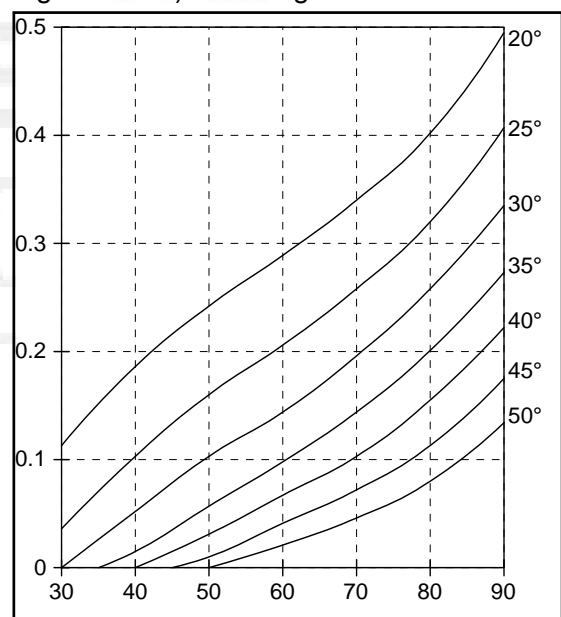


Figura 18: Diagrammi di progetto dei pendii ripidi rinforzati, per  $r_u = 0.0$

I muri in terra rinforzata vengono progettati in base a tre tipi di analisi di stabilità (vedi Fig. 19):

- stabilità esterna, in cui il blocco di terreno rinforzato viene considerato come un blocco rigido, a cui vengono applicati i criteri di stabilità delle opere di sostegno a gravità, cioè scivolamento lungo la base, rotazione, capacità portante; questa analisi permette di definire la lunghezza minima degli strati di rinforzo;
- stabilità interna: gli strati di rinforzo vengono progettati in termini di spaziatura verticale, lunghezza e resistenza a trazione, in modo da assicurare un prefissato Fattore di Sicurezza contro la rottura per strappo dei rinforzi e per sfilamento dei rinforzi dal terreno;
- stabilità globale, in cui tutte le possibili superfici di rottura vengono analizzate, comprese quelle che passano in tutto o in parte sotto e dietro il blocco rinforzato.

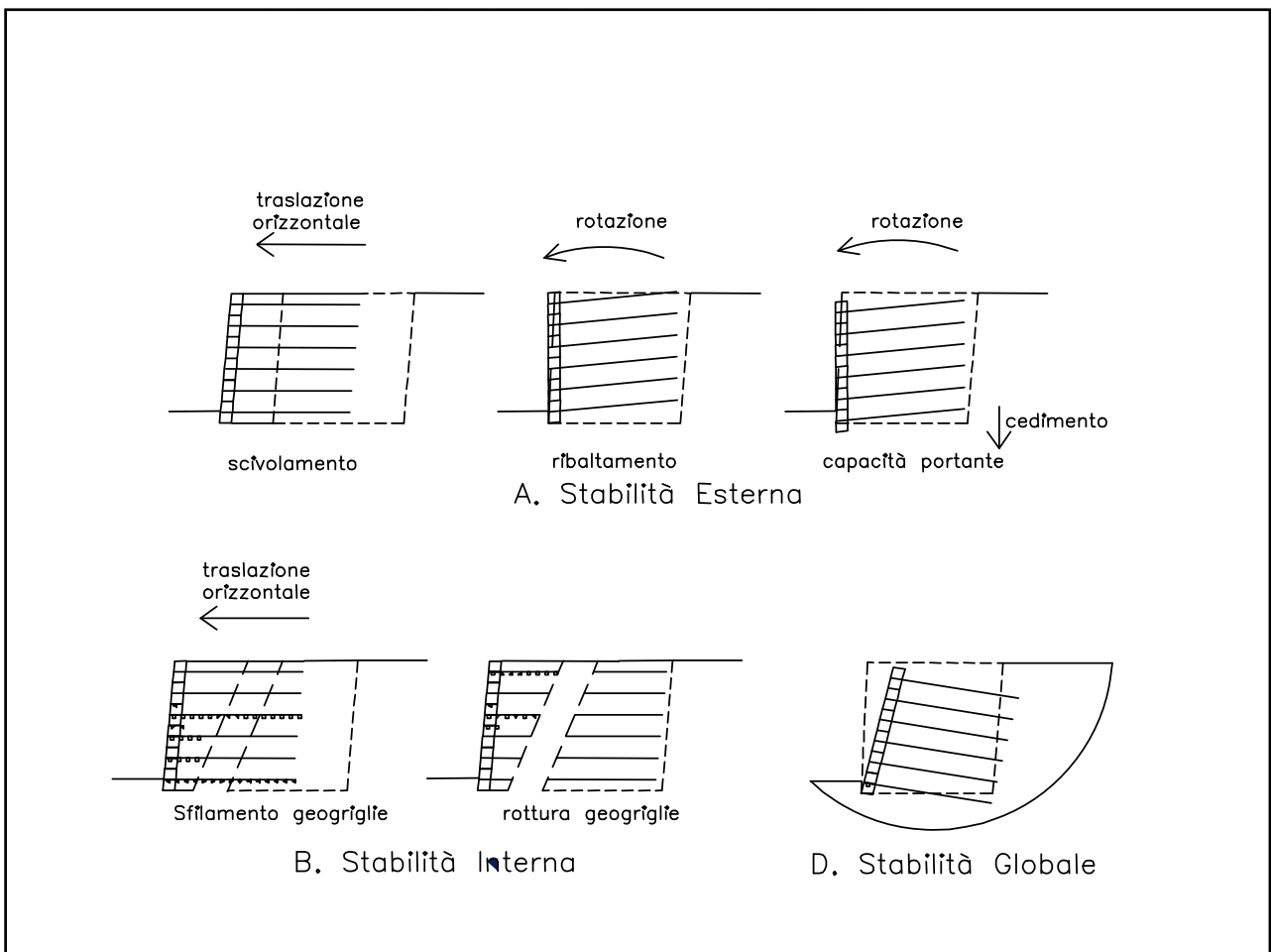


Figura 19: Analisi di stabilità per i muri in terra rinforzata: A) stabilità esterna; B) stabilità interna; D) stabilità globale

Il progetto di muri e pendii in terra rinforzata richiede la definizione della *Resistenza Ammissibile a Lungo Termine*  $T_{allow}$  dei rinforzi.  $T_{allow}$  va calcolata, per un prefissato Geosintetico, con l'equazione:

$$T_{allow} = \frac{LTDS}{FS_{damage} \times FS_{chemical} \times FS_{biological}}$$

La resistenza a lungo termine LTDS viene determinata in base a prove di creep di trazione eseguite a diverse temperature, i cui risultati possono essere estrapolati fino a 1,000,000 di ore (120 anni circa).

I fattori di Sicurezza parziali  $FS_{chemical}$  e  $FS_{biological}$  vengono determinati comparando la resistenza massima a trazione dei rinforzi prima e dopo il contatto prolungato con sostanze chimiche o biologiche aggressive.

Il valore di  $FS_{damage}$  viene determinato come il rapporto tra la resistenza massima a trazione di campioni vergini con la resistenza a trazione di campioni danneggiati secondo una procedura standardizzata.

La Resistenza di Progetto  $T_{des}$  si ottiene infine applicando il Fattore di Sicurezza  $FS_{design}$ , che dipende dalla difficoltà e importanza del progetto:

$$T_{des} = T_{allow} / FS_{design}$$

$FS_{design}$  è generalmente compreso nell'intervallo tra 1.25 e 1.50.

Le Geogriglie ARTER® e i Geocompositi MACRIT® vengono prodotti con fili di PET fino a resistenze di 600 kN/m.

La *Tabella 2* mostra la scheda tecnica di uno di questi Geosintetici di rinforzo.

ARTER® e MACRIT® presentano eccellenti proprietà in termini di basso creep, elevata resistenza chimica e biologica, e buona resistenza ai danni da costruzione.

La *Tabella 3* e la *Tabella 4* mostrano i valori consigliati dei Fattori di Sicurezza parziale per questi prodotti.

La LTDS di tutte le Geogriglie ARTER® e di tutti i Geocompositi MACRIT® si può assumere pari a:

$$LTDS = 0.66 T_{ult}$$

Dove  $T_{ult}$  è la resistenza massima misurata in un test di trazione a larga banda (**EN ISO 10319**), anch'essa riportata nelle schede tecniche dei prodotti.

Dati Tecnici (valori nominali)

Technical data sheet (nominal data listed)

Technische daten (Nennwerte)

<b>GTS/ 200-30-30</b>					
					<b>TEST</b>
Struttura	Structure	Struktur		<b>K D.O.S.</b>	
Composizione	Composition	Zusammensetzung		<b>PET EVA</b>	
Massa areica	Mass per unit area	Masse pro Flächeneinheit	<b>g/m<sup>2</sup></b>	<b>620</b>	<b>UNI EN 965</b>
Resistenza a trazione longitudinale	Tensile strenght M.D.	Zugfestigkeit längs	<b>kN/m</b>	<b>200</b>	<b>UNI EN ISO 10319</b>
Deformazione longitudinale	Elogation M.D.	Dehnung längs	<b>%</b>	<b>12</b>	<b>UNI EN ISO 10319</b>
Resistenza a trazione trasversale	Tensile strenght C.D.	Zugfestigkeit quer	<b>kN/m</b>	<b>30</b>	<b>UNI EN ISO 10319</b>
Deformazione trasversale	Elongation C.D.	Dehnung quer	<b>%</b>	<b>12</b>	<b>UNI EN ISO 10319</b>
Resistenza longitudinale al 2% di deformazione	Strenght at 2% elongation	Festigkeit längs bei 2% Dehnung	<b>kN/m</b>	<b>50</b>	<b>UNI EN ISO 10319</b>
Resistenza longitudinale al 3% di deformazione	Strenght at 3% elongation	Festigkeit längs bei 3% Dehnung	<b>kN/m</b>	<b>75</b>	<b>UNI EN ISO 10319</b>
Resistenza longitudinale al 5% di deformazione	Strenght at 5% elongation	Festigkeit längs bei 5% Dehnung	<b>kN/m</b>	<b>135</b>	<b>UNI EN ISO 10319</b>
Resistenza longitudinale al 10% di deformazione	Strenght at 10% elongation	Festigkeit längs bei 10% Dehnung	<b>kN/m</b>	<b>&lt;200</b>	<b>UNI EN ISO 10319</b>
Apertura di maglia	Mesh size	Maschenweite	<b>mm</b>	<b>30</b>	
Larghezza del rotolo	Roll width	Rollebreite	<b>m</b>	<b>2,65</b>	
Lunghezza del rotolo	Roll lenght	Rollelänge	<b>m</b>	<b>100</b>	

Tabella 2: La scheda tecnica della Geogriglia ARTER® GTS/200-30-30

<b>Type of soil</b>	<b>Particle size</b>	<b>FS<sub>damage</sub> for ARTER®</b>	<b>FS<sub>damage</sub> for MACRIT®</b>
Silt and clay	< 0,06 mm	1,00	1,00
Pulverized fuel ashes		1,00	1,00
Fine and medium sand	0,06 - 0,6 mm	1,10	1,15
Coarse sand and fine gravel	0,6 - 6 mm	1,20	1,25
Crushed gravel, ballast, sharp stones	6 - 60 mm	1,30	1,40

Tabella 3: FS<sub>danneggiamento</sub> per differenti tipi di terreno

<b>pH of the soil</b>	<b>FS<sub>biological</sub></b>	<b>FS<sub>chemical</sub></b>	<b>FS<sub>chemical</sub> for MACRIT®</b>
PH < 2	1,00	1,30	1,40
2 < PH < 12	1,00	1,00	1,10
PH > 12	1,00	1,30	1,40

Tabella 4: FS<sub>chemical</sub> e FS<sub>biological</sub>

La differenza maggiore tra i due tipi di prodotto è che MACRIT® comprende un Geotessile nontessuto, che fornisce le funzioni di separazione, drenaggio e filtrazione.

Quando il terreno di costruzione è autodrenante, le geogriglie ARTER® sono il rinforzo più adatto; quando invece il terreno è fine o a bassa permeabilità, i Geocompositi MACRIT® forniscono sia l'azione di rinforzo che quella di drenaggio interno del terreno, assicurando così un maggior grado di stabilità.

La Fig. 20 mostra esempi di pendii ripidi e muri in terra rinforzata con Geogriglie ARTER® e Geocompositi MACRIT®.



Figura 20: Esempi di pendii ripidi e muri in terra rinforzata con Geogriglie ARTER® e Geocompositi MACRIT®.

## 5. I GEOSINTETICI NELLE BASI STRADALI E FERROVIARIE

Le basi stradali e ferroviarie sono soggette a rotture dovute a deficienze strutturali, che possono avvenire al termine della vita di progetto dell'opera o prematuramente. Lo sviluppo di deformazioni permanenti nel materiale della base e della sottobase, a causa del passaggio ripetuto dei mezzi, può degenerare in ormaie di profondità eccessiva. In questi casi un Geosintetico di rinforzo può essere interposto nella base stradale per migliorarne le caratteristiche strutturali.

In altri casi il materiale della base e della sottobase può mescolarsi con il terreno del substrato, con il conseguente deterioramento delle caratteristiche meccaniche e frizionali dell'aggregato. In questa situazione un Geosintetico di separazione/filtrazione può garantire l'integrità strutturale dell'aggregato della base e la capacità portante della strada.

I Geosintetici di rinforzo possono essere utilizzati per ridurre lo spessore delle basi, a pari vita utile di progetto; alternativamente lo spessore viene mantenuto inalterato e i Geosintetici vengono utilizzati per estendere la vita utile di progetto e diminuire i costi di manutenzione.

I Geosintetici possono essere utilizzati anche durante la costruzione di strade e ferrovie su terreni molto soffici, dove le funzioni di separazione e rinforzo fornite dai Geosintetici consentono la realizzazione delle vie di accesso e delle piattaforme necessarie al transito dei mezzi di cantiere.

I Geosintetici (in particolare Geogriglie e Geotessili) utilizzate nelle basi stradali e ferroviarie possono assolvere quattro funzioni diverse: rinforzo, separazione, filtrazione, drenaggio.

**Rinforzo:** la funzione di rinforzo è riferita alla capacità dei Geosintetici di aumentare il supporto del traffico veicolare, dove i carichi applicati alla base possono essere dovuti sia alle attività di costruzione che al traffico giornaliero. La funzione di rinforzo si differenzia poi nelle funzioni di confinamento laterale e di membrana tesa.

**Confinamento laterale:** il confinamento dell'aggregato della base si sviluppa per interazione frizionale con il Geosintetico di rinforzo, posto all'interfaccia inferiore o a metà spessore della base stessa (Fig. 21). In realtà il confinamento laterale è il risultato di quattro diversi meccanismi d'interazione.

Come mostrato in Fig. 21, il traffico veicolare produce un movimento laterale dell'aggregato; sforzi di trazione vengono allora generati mentre l'aggregato subisce movimenti orizzontali verso l'esterno e verticali verso il basso. Questo movimento laterale dell'aggregato permette lo sviluppo di deformazioni verticali permanenti, che si traducono nella formazione di ormaie. L'interposizione di un Geosintetico nella base permette lo sviluppo di un'interazione frizionale tra l'aggregato e il Geosintetico stesso, nel momento stesso in cui l'aggregato tenta di muoversi lateralmente.

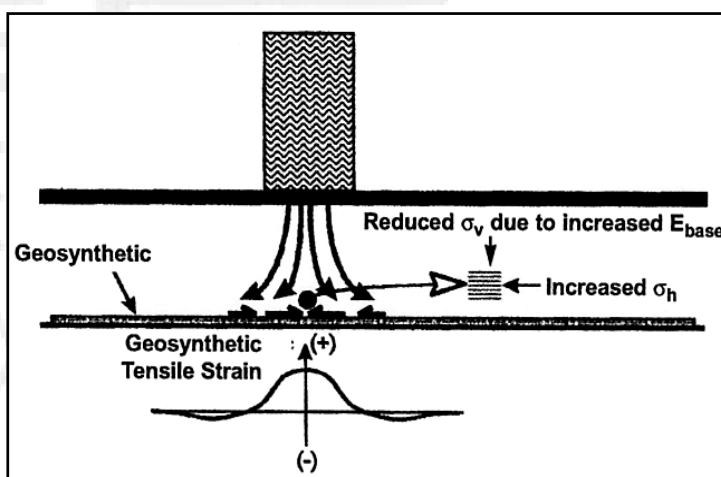


Figura 21: Il meccanismo di confinamento laterale

Gli sforzi di trazione vengono allora trasferiti dall'aggregato al Geosintetico che, avendo una ben maggior rigidezza tensionale dell'aggregato, fa sì che avvengano solo deformazioni laterali molto minori. Pertanto il primo meccanismo di rinforzo riduce considerevolmente le deformazioni orizzontali, il che si traduce in molto minori deformazioni verticali della superficie stradale.

Lo sforzo di taglio sviluppato tra il Geosintetico e l'aggregato produce un aumento degli sforzi orizzontali nella porzione inferiore della base, che a sua volta produce un aumento dello sforzo globale medio agente sull'aggregato.

Dal momento che i terreni granulari in genere mostrano un aumento del modulo elastico all'aumentare dello sforzo medio agente, l'aggregato della base diviene più rigido quando tra il Geosintetico e la base si sviluppa un'interazione frizionale adeguata.

Questo secondo meccanismo, cioè un aumento del modulo elastico della base dovuta all'azione di confinamento laterale operata dal geosintetico, produce anch'esso una diminuzione delle deformazioni verticali della base.

Quindi questo meccanismo controlla sostanzialmente la formazione di ormaie sulla superficie stradale; ma allo stesso tempo l'aumento del modulo elastico dell'aggregato risulta anche in una diminuzione delle deformazioni elastiche dinamiche in direzione verticale, dovute al passaggio dei mezzi: pertanto questo meccanismo riduce anche i fenomeni di fatica nell'asfalto, prolungandone così la vita utile.

L'aumento del modulo elastico della base favorisce la distribuzione degli sforzi sul sottofondo, riducendo in tal modo i cedimenti differenziali della base stessa. Infatti questo terzo meccanismo riduce gli sforzi verticali nella base e nel sottofondo al di sotto delle ruote dei mezzi in transito: ciò si traduce in minori deformazioni verticali nei due strati. La distribuzione di carico più uniforme fa sì che la deformata della superficie stradale abbia una curvatura minore.

La presenza del Geosintetico nello strato di base produce un notevole cambiamento dello stato di sforzo e deformazione nel terreno del sottofondo. Come visto sopra l'aumento del modulo elastico della base conduce a una riduzione dello sforzo verticale nel sottofondo. Allo stesso modo anche lo sforzo di taglio trasmesso dalla base al sottofondo risulta diminuito. Questo quarto meccanismo, la diminuzione dello sforzo di taglio nel sottofondo, accoppiato alla diminuzione dello sforzo verticale, risulta in un minor sforzo globale e quindi a minori deformazioni verticali nel sottofondo.

**Membrana tesa:** la capacità del Geosintetico di agire come una membrana tesa produce sia confinamento laterale dell'aggregato, sia aumento della capacità portante, sia supporto di tipo membranale.

Per elevati carichi sulla ruota, che provocano uno stato di imminente rottura a taglio del sottofondo e di conseguenza ormaie molto larghe e profonde sulla superficie stradale, la deformata del Geosintetico risulta come mostrato in Fig. 22.

E' chiaro che la tensione sviluppata nel Geosintetico produce verso l'alto una azione di supporto del carico e verso il basso una azione di confinamento del terreno del sottofondo. Il supporto membranale del carico della ruota riduce gli sforzi verticali applicati al sottofondo, mentre il confinamento aumenta la resistenza del sottofondo agli sforzi di taglio, e di conseguenza aumenta la capacità portante.

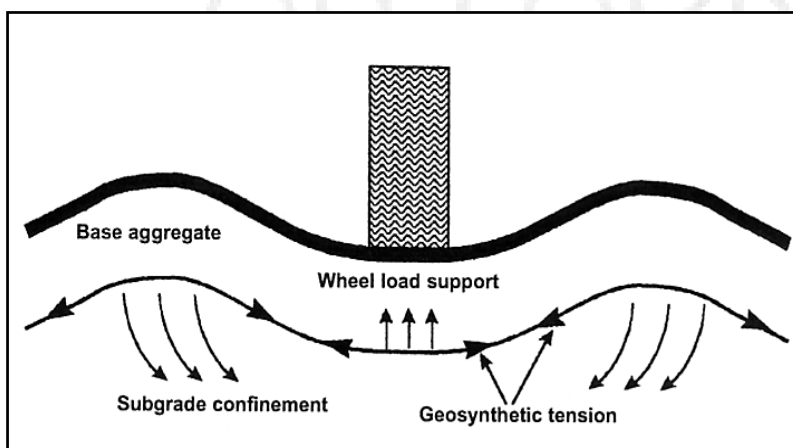


Figura 22: Il meccanismo di membrana tesa

L'azione di rinforzo dipende dalla profondità delle ormaie sviluppate. Inizialmente il carico applicato può eccedere la resistenza del sottofondo, producendo così delle ormaie sulla superficie stradale. Man mano che l'ormaia si approfondisce, il Geosintetico aumenta il proprio stato di trazione e sopporta sempre più carico. Questo processo continua finché lo sforzo sul sottofondo diminuisce a valori sostenibili. A questo punto il sistema diviene stabile e l'ormaia raggiunge una profondità costante.

Perciò questo meccanismo richiede significative deformazioni della superficie stradale, che si ottengono in generale nei casi di sottofondo molto cedevole e/o di traffico molto pesante.

Inoltre il traffico deve essere canalizzato (cioè le ruote devono passare sempre lungo la stessa linea) per poter sviluppare ormaie significative dopo un numero ristretto di passaggi.

**Separazione:** in molte situazioni la frazione fine del terreno di sottofondo può contaminare lo strato di base di una strada pavimentata o non pavimentata, così come il ballast di una massicciata ferroviaria, sia durante la costruzione che in esercizio. La contaminazione dell'aggregato della base causa una riduzione della resistenza, della rigidità e delle caratteristiche drenanti, promuovendo così deformazioni e rotture anticipate. Inoltre la contaminazione con particelle fini rende la base o il ballast più suscettibili al rigonfiamento da gelo.

Il fenomeno di contaminazione è molto più gravoso nelle ferrovie, dove i carichi ciclici rapidi causati dal passaggio delle ruote dei treni produce un'azione di "pompaggio" che causa una rapida risalita delle particelle fini dal sottofondo nella base e perfino nel ballast, con un conseguente rapido decadimento della capacità portante.

La funzione di separazione (vedi Fig. 23) si riferisce alla capacità di un Geosintetico di fornire una separazione fisica tra i materiali a diversa granulometria della base e del sottofondo, sia durante le fasi di costruzione che durante la vita operativa della strada o della ferrovia. La funzione si esplica impedendo il rimescolamento delle particelle di diversa granulometria. Le azioni meccaniche che producono il rimescolamento derivano dalle forze applicate durante la costruzione e l'esercizio, che provocano un movimento verso il basso dei granuli di dimensione maggiore e un movimento verso l'alto delle particelle più fini. Se il sottofondo risulta particolarmente soffice e cedevole durante la costruzione, la combinazione del primo strato di base relativamente sottile con macchine pesanti comporta in genere che il potenziale per il rimescolamento risulta maggiore durante le fasi di costruzione. Allora un Geosintetico di separazione adeguatamente selezionato permette di mantenere "pulita" la base, preservandone così la resistenza e la capacità drenante.

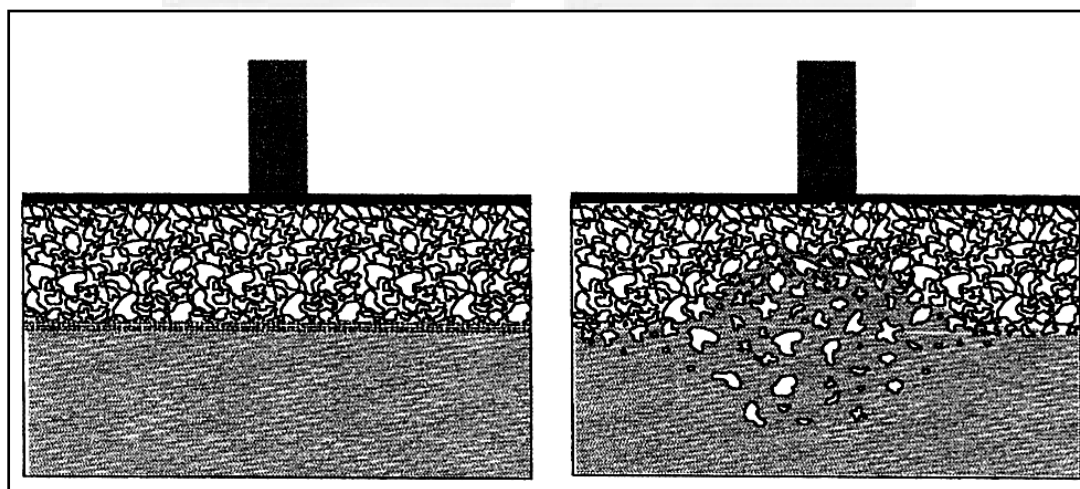


Figura 23: La funzione di separazione dei Geosintetici.

La resistenza e il modulo elastico del Geosintetico di separazione devono solo garantire la sopravvivenza del materiale durante la costruzione e l'esercizio. Un opportuno Geosintetico separatore garantisce che la base stradale nella sua interezza continuerà a fornire il supporto strutturale ai carichi veicolari, mentre il Geosintetico stesso, in quanto solo separatore e quindi di scarse proprietà meccaniche, non può contribuire al supporto strutturale. Mentre invece un Geosintetico separatore dotato anche di notevole resistenza e modulo elastico a trazione è in grado di fornire sia la funzione di separazione che quella di rinforzo, come sopra esposto.

**Filtrazione:** questa funzione si riferisce alla capacità di un Geosintetico di filtrare le particelle fini di un terreno, bloccandone il movimento verso strati a granulometria maggiore, e di permettere al contempo il passaggio dell'acqua.

Il flusso dell'acqua dal sottofondo verso la base è in genere prodotto da un eccesso di pressioni interstiziali generato dal traffico veicolare. Le particelle fini che rimangono sospese nell'acqua vengono allora filtrate dal Geosintetico mentre l'acqua fluisce dal sottofondo verso la base. Quando la funzione di filtrazione è necessaria, occorre selezionare un Geotessile con caratteristiche tali da evitare il proprio intasamento a opera delle particelle fini, pur continuando ad agire come filtro.

La vasta letteratura disponibile dimostra come sia i Geotessili che le Geogriglie abbiano la capacità di rinforzare la base di strade non pavimentate attraverso il meccanismo di membrana tesa. C'è anche evidenza che il meccanismo di confinamento laterale, per basse profondità di ormaia, è fondamentale per migliorare le caratteristiche delle strade non pavimentate. I dati sperimentali mostrano che questo meccanismo è possibile con un Geotessile, ma che è il meccanismo predominante con le Geogriglie.

La necessità del rinforzo aumenta al diminuire della resistenza del sottofondo, all'aumentare del peso e del numero di passaggi dei veicoli, e all'aumentare delle prestazioni e della vita utile richieste per la strada o la ferrovia.

Lo spessore della base e il fatto che il traffico sia canalizzato o casuale indicheranno il tipo di Geosintetico più appropriato.

Uno strato di base molto spesso può minimizzare i fenomeni di risalita delle particelle fini, ma al contempo può sviluppare fino al 50 % della profondità delle ormaie solo per deformazione dell'aggregato della base stessa. In questa situazione una Geogriglia che fornisca un adeguato confinamento laterale al bordo inferiore della base è sicuramente il Geosintetico più adatto.

Nel caso di traffico casuale è improbabile che si sviluppi una profondità di ormaia sufficiente a mobilitare il meccanismo di membrana tesa. Anche in questo caso una Geogriglia, in grado di fornire confinamento laterale all'aggregato della base, è la scelta più appropriata.

Nel caso di spessore della base modesto, traffico canalizzato e notevole profondità di ormaia ammissibile (come in una strada non pavimentata di accesso a un cantiere), il meccanismo di membrana tesa è il più adatto a migliorare le caratteristiche della base. Sia le Geogriglie che i Geotessili tessuto ad elevato modulo elastico sono appropriati per questa situazione.

Nei casi in cui le Geogriglie risultano più adatte a fornire la funzione di rinforzo, può essere necessario accoppiarle con un Geotessile per ottenere anche le funzioni di separazione, filtrazione e drenaggio.

La Fig. 24 mostra schematicamente i risultati di una ricerca condotta negli Stati Uniti nel 1996: si notano chiaramente i vantaggi derivanti dall'inclusione di una Geogriglia nella base, e i maggiori vantaggi derivanti dall'inclusione di un Geocomposito Geogriglia - Geotessile.

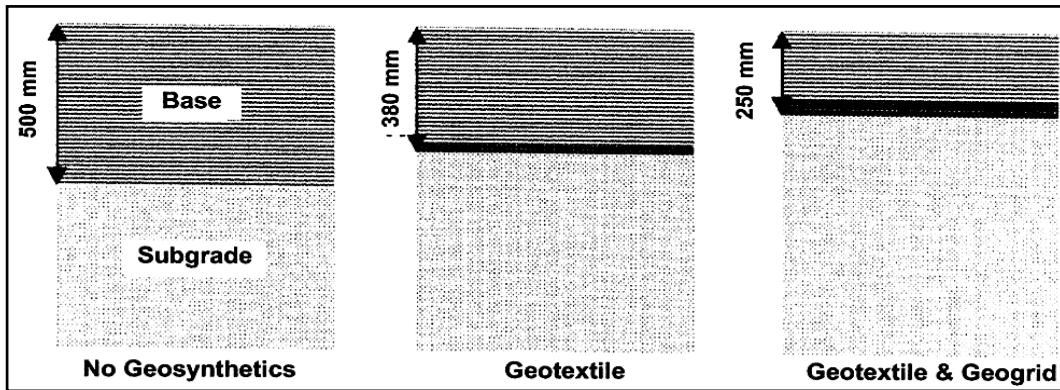


Figura 24: Strada non pavimentata realizzata negli Stati Uniti nel 1996. Ogni sezione ha raggiunto una profondità di ormaia di 75 mm dopo 2000 passaggi di un veicolo con peso complessivo di 185 kN.

Le geogriglie ARTER® e i geocompositi MACRIT®, con le loro eccellenti caratteristiche tecniche, forniscono un'ottima soluzione in entrambi i casi.

La Fig. 25 mostra l'uso di ARTER® e MACRIT® per il rinforzo del ballast di una massicciata ferroviaria.



Figura 25: ARTER® e MACRIT® utilizzati per il rinforzo del ballast di una massicciata ferroviaria

## 6. RILEVATI RINFORZATI ALLA BASE

Il rinforzo alla base dei rilevati viene utilizzato per aumentarne la resistenza e prevenirne la rottura causata da sforzi di taglio e deformazioni eccessivi.

La maggior parte dei metodi di progetto e verifica dei rilevati rinforzati alla base utilizzano uno schema di equilibrio limite, in cui occorre valutare un Fattore di Sicurezza globale. Questi metodi possono essere impostati come analisi agli stati limite semplicemente aumentando il peso del terreno e i carichi con appropriati Fattori di carico, e diminuendo le caratteristiche del terreno e la resistenza dei rinforzi con appropriati Fattori di riduzione applicati a ciascun materiale.

Il Fattore di riduzione del rinforzo va applicato alla resistenza a trazione del Geosintetico e deve avere un valore rapportato al tipo di rinforzo e alla durata per la quale il rinforzo stesso deve esplicare la sua funzione.

Ci sono due meccanismi di interazione terreno - Geosintetico che richiedono considerazione:

- scivolamento del terreno sul Geosintetico;
- sfilamento del rinforzo dal terreno.

### 6.1 RILEVATI RINFORZATI SU TERRENI MOLTO SOFFICI

Le tecniche utilizzate per il rinforzo di rilevati su terreni molto soffici si possono dividere in due categorie:

- uso del rinforzo per controllare la stabilità iniziale del rilevato, senza controllarne i cedimenti; queste tecniche includono: rinforzo alla base del rilevato (*Fig. 26.a*); rinforzo alla base più dreni verticali (*Fig. 26.b*); "materassi" di base (*Fig. 26.c*);
- uso del rinforzo come parte di un sistema di stabilizzazione della fondazione del rilevato, in grado di controllare sia la stabilità che i cedimenti (*Fig. 26.d*).

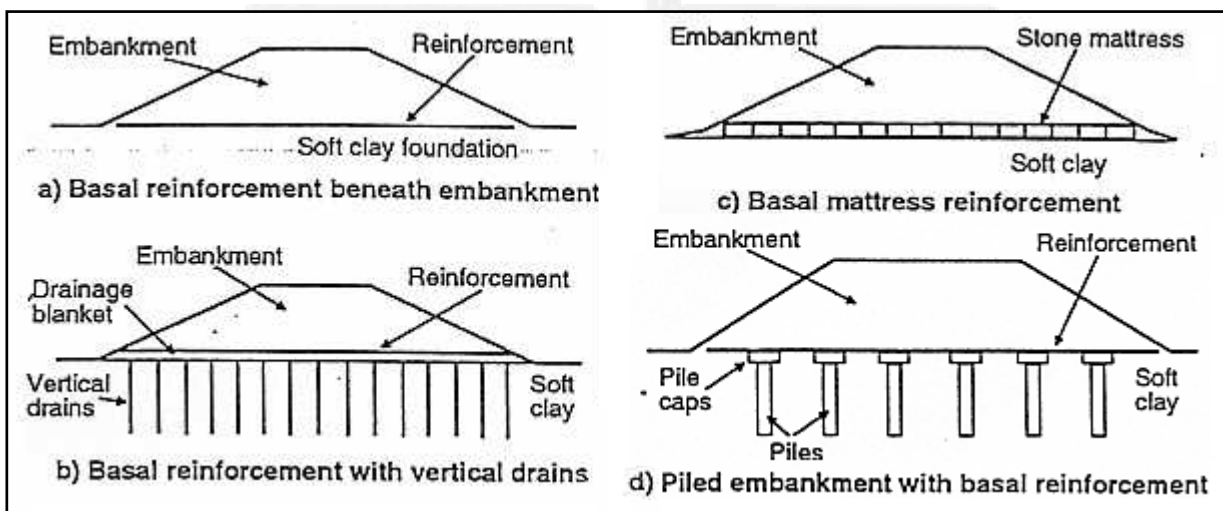


Figura 26: Tecniche usate per il rinforzo di rilevati su terreni molto soffici

## 6.2 USO DI GEOSINTETICI DI RINFORZO PER CONTROLLARE LA STABILITA' DEL RILEVATO

La stabilità di un rilevato su terreno soffice è governata principalmente dalla resistenza al taglio della fondazione, mentre la costruzione del rilevato è un problema di capacità portante. Il rinforzo viene allora posizionato al livello del piano di fondazione del rilevato, in modo da prevenire la rottura a taglio sia nel terreno del sottofondo che in quello del rilevato stesso. In tal caso la riduzione dei cedimenti differenziali assume importanza secondaria.

La stabilità di un rilevato in genere è più critica durante la costruzione che in esercizio, in quanto la bassa permeabilità dei terreni soffici in genere non permette la consolidazione totale nei normali tempi di costruzione. Alla fine della costruzione il carico del rilevato grava completamente sul terreno sottostante, ma l'aumento di resistenza dovuto alla consolidazione parziale può risultare insufficiente per la stabilità.

Quando invece la consolidazione è terminata, l'aumento della resistenza al taglio del terreno di fondazione risulta in genere sufficiente a garantire la stabilità del rilevato, per cui il rinforzo perde la sua funzione. Perciò durante il periodo che va dalla fine della costruzione alla consolidazione totale il Geosintetico di rinforzo deve fornire una resistenza di progetto (calcolata, come detto sopra, applicando Fattori di riduzione parziali) che deve essere uguale o superiore al carico di progetto.

Il rinforzo alla base del rilevato deve evitare i movimenti orizzontali del terreno, l'estrusione del terreno di fondazione e la rottura globale rotazionale.

La forza stabilizzante viene generata nel rinforzo dagli sforzi di taglio trasmessi sia dal terreno di fondazione che dal terreno del rilevato, che pongono in tensione il Geosintetico di rinforzo.

Gli stati limite ultimi che occorre considerare sono (vedi Fig. 27):

- stabilità locale del rilevato;
- stabilità rotazionale del rilevato;
- estrusione del terreno di fondazione;
- stabilità globale.

Gli stati limite di servizio comprendono:

- deformazione eccessiva del rinforzo;
- cedimento del terreno di fondazione.

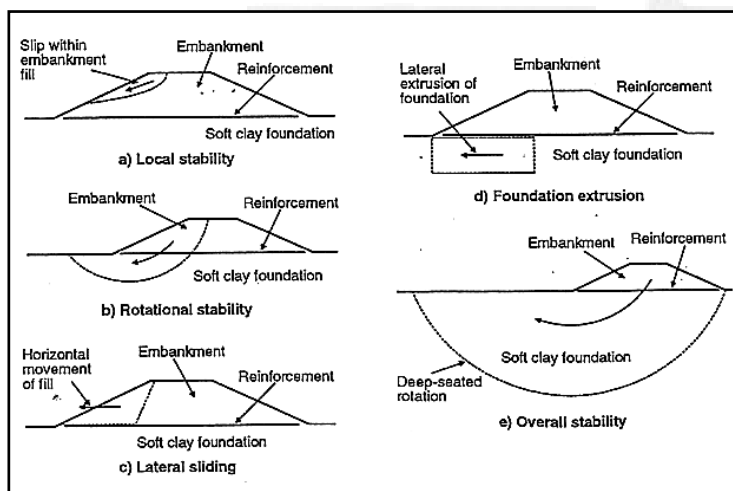


Figura 27: Stati limite ultimi e di servizio per il progetto del rinforzo alla base del rilevato

## 6.3 USO DI GEOSINTETICI PER CONTROLLARE LA STABILITA' E I CEDIMENTI DEL RILEVATO

Esistono varie tecniche per aumentare la resistenza al taglio di terreni soffici e per controllare i cedimenti di consolidazione alla fine della costruzione: drenaggio verticale, jet grouting, pali, sostituzione del terreno.

La tecnica che permette di costruire un rilevato di qualunque altezza (assicurando con altre tecniche, quali ad esempio le Geogriglie di rinforzo, la stabilità delle pareti) con la velocità di costruzione voluta, assicurando anche il controllo dei cedimenti post costruzione, è quella dei pali. In tal caso il rinforzo basale può essere usato per connettere le teste dei pali distribuendo così il carico del rilevato. Ciò consente di massimizzare i benefici economici dei pali realizzati nei terreni soffici (Fig. 26 d).

Nel progetto di una palificata si assume normalmente che tutto il carico del rilevato venga trasferito tramite i pali a uno strato di terreno solido sottostante. Di conseguenza le caratteristiche del rilevato e del terreno soffice devono essere considerate nella scelta del tipo di palo e del metodo di costruzione.

Il terreno tra i pali risulta avere una rigidezza molto minore di quella dei pali stessi. Pertanto il carico del rilevato può provocare cedimenti e deformazioni tra palo e palo. Un Geosintetico di rinforzo steso sopra le teste dei pali permette di distribuire il carico in modo uniforme, garantendo una portanza adeguata anche tra palo e palo. Una progettazione adeguata del rinforzo permette anche di diradare i pali e di diminuire la dimensione delle teste, garantendo così anche un notevole risparmio sui costi di costruzione. Inoltre il rinforzo è in grado di bilanciare le spinte orizzontali alle estremità del rilevato, eliminando così la necessità di realizzare pali inclinati ai bordi della palificata.

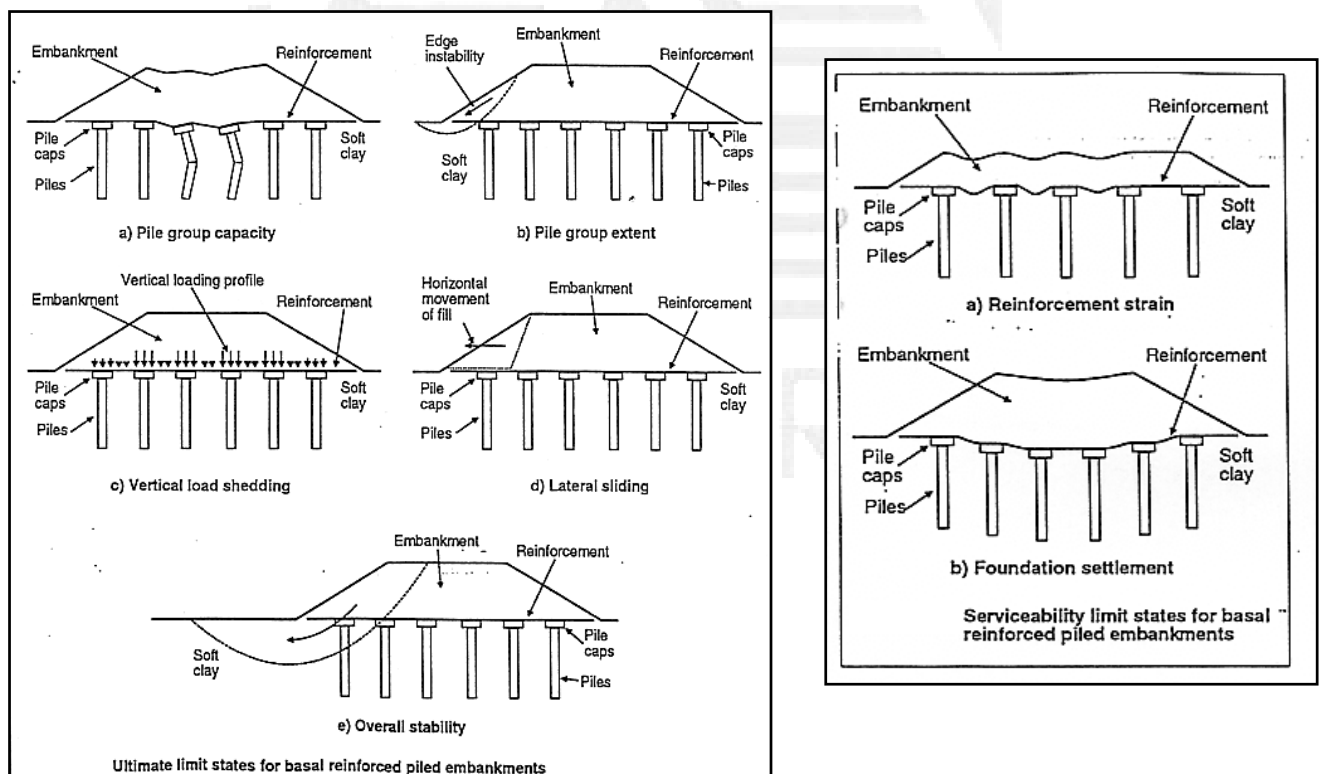


Figura 28: Stati limite ultimi e di servizio per il progetto di un Geosintetico di rinforzo sopra i pali.

Gli stati limite ultimi che vanno considerati in questa applicazione sono:

- capacità portante di gruppo della palificata;
- estensione della palificata;
- distribuzione del carico verticale tra palo e palo;
- stabilità allo scivolamento orizzontale del rilevato;
- stabilità globale del rilevato e della palificata.

Gli stati limite di esercizio sono:

- allungamento eccessivo e/o forze di trazione eccessive nel rinforzo;
- cedimento della palificata.

La resistenza di progetto  $T_r$  del Geosintetico di rinforzo sarà:

- in direzione longitudinale al rilevato la massima resistenza a trazione necessaria a trasferire il carico del rilevato sulle teste dei pali,  $T_{rp}$ ;
- in direzione trasversale allo sviluppo del rilevato, la massima resistenza a trazione sarà la somma di quella necessaria a trasferire il carico del rilevato sulle teste dei pali,  $T_{rp}$ , e di quella necessaria per resistere allo scivolamento orizzontale,  $T_{ds}$ .

$T_{rp}$  deve essere calcolata tenendo conto dell'effetto arco tra due pali adiacenti, come mostrato in Fig. 29.A, in base allo schema mostrato in Fig. 29.B.

Per garantire che la resistenza ammissibile del Geosintetico non venga mai superata durante l'intera vita utile del rinforzo, deve essere verificata la condizione seguente:

$$T_d / f_n > T_r$$

Dove  $T_d$  è la resistenza ammissibile del Geosintetico e  $f_n$  è un Fattore di Sicurezza che tiene conto dell'importanza dell'opera e delle conseguenze economiche di una rottura del rilevato.

Tenendo conto dei criteri esposti in precedenza per la definizione della resistenza ammissibile dei Geosintetici di rinforzo, e svolgendo i calcoli di progetto per tutti gli stati limite qui sopra menzionati, si possono ottenere resistenze a trazione richieste estremamente elevate.

La resistenza ammissibile necessaria arriva in alcuni casi a superare 1.000 kN/m.

Pertanto i Geosintetici utilizzati per questo tipo di applicazione devono essere della massima qualità e con le più elevate caratteristiche tecniche.

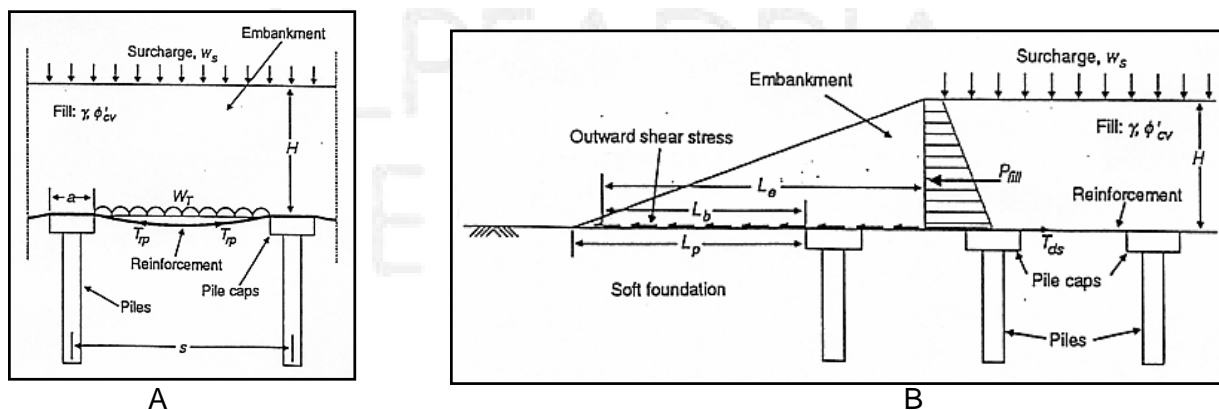


Figura 29: Schemi per il calcolo di  $T_{rp}$  (A) e di  $T_{ds}$  (B)

Le geogriglie MULTIAXIAL e ARTER<sup>®</sup>, e i geocompositi MACRIT<sup>®</sup>, possono essere prodotti con fili di Poliestere ad alta tenacità, raggiungendo resistenze a trazione fino a 600 kN/m e resistenze ammissibili fino a 400 kN/m.

Quando queste resistenze non sono sufficienti, MULTIAXIAL, ARTER<sup>®</sup> e MACRIT<sup>®</sup> possono essere prodotti con fibre a cristalli liquidi (VECTRAN), raggiungendo così resistenze estremamente elevate, fino a 1.650 kN/m, e praticamente senza alcun creep. La resistenza ammissibile di questi Geosintetici può pertanto raggiungere i 1.200 kN/m, che rappresenta l'attuale limite superiore della tecnologia dei Geosintetici.

## 7. IL RINFORZO DELL'ASFALTO

L'asfalto è da lungo tempo il materiale più utilizzato per le pavimentazioni stradali. Tuttavia anche negli strati di asfalto nuovi c'è evidenza di rotture di riflessione. Queste sono prodotte principalmente a causa di forze eccessive indotte nell'asfalto da variazioni di temperatura e dal traffico. In uno strato di asfalto steso su una base di cemento, le rotture di riflessione avvengono a causa dei movimenti orizzontali delle singole lastre di cemento, che si espandono e si contraggono a causa dei cicli diurni o stagionali di temperatura. Questi movimenti producono sforzi elevati nello strato di asfalto sopra i giunti delle lastre di cemento, causando così la comparsa delle fratture.

I geosintetici per il rinforzo dell'asfalto vengono utilizzati per migliorare le caratteristiche di strade esistenti e per la costruzione di nuove strade, specialmente su sottofondi cedevoli. Il rinforzo aumenta la resistenza a trazione dello strato di asfalto, e garantisce una distribuzione migliore degli sforzi orizzontali su un'area allargata.

Il danneggiamento e le fratture dell'asfalto possono essere significativamente ritardati o addirittura prevenuti utilizzando le Geogriglie Arter<sup>®</sup> GTS A.

Questi Geosintetici di rinforzo sono stati ingegnerizzati appositamente per prevenire le rotture negli strati di asfalto assorbendone gli sforzi di trazione. Infatti la Geogriglia è prodotta con fili di PET a elevato modulo ed elevata resistenza alle alte temperature, mentre la ricopertura con EVA (Etil Vinil Alcool) assicura un'eccellente adesione con l'asfalto.

Le pavimentazioni flessibili necessitano di manutenzione quando si sviluppano buche e fratture. La riabilitazione di strati fessurati con un nuovo strato di asfalto sopra quello ammalorato è raramente una soluzione durevole. Le fratture del vecchio strato presto si propagano a quello nuovo, e il problema si ripete. Questa è la ragione per cui queste vengono chiamate fratture di riflessione.

Invece è possibile interporre un Geosintetico di rinforzo tra lo strato vecchio e quello nuovo di asfalto: le Geogriglie ARTER<sup>®</sup> vengono fissate allo strato di asfalto sottostante per mezzo di una mano di bitume spruzzato sull'asfalto ammalorato, in modo da migliorare la connessione con il nuovo strato di asfalto. Le Geogriglie, impregnate di bitume, migliorano la vita del nuovo strato e ritardano la formazione delle fratture di riflessione, attraverso l'azione di rinforzo e di assorbimento delle tensioni che risalgono dallo strato ammalorato. L'impregnazione con il bitume previene la percolazione dell'acqua anche nel caso che si formi comunque una fessura nel nuovo strato asfaltico.

L'azione di rinforzo avviene quando la Geogriglia è in grado di fornire forze di trazione significative alla pavimentazione. Il rinforzo tiene insieme i bordi delle fessure dell'asfalto ammalorato, impedendone i movimenti orizzontali al passare del traffico.

I possibili benefici derivanti dall'uso delle Geogriglie ARTER<sup>®</sup> includono:

- una diminuzione di 30 - 50 mm dello spessore dello strato di usura;
- un notevole ritardo nell'apparizione delle fratture di riflessione;
- un aumento sostanziale della vita utile della pavimentazione.

Invece la Geogriglia di rinforzo ARTER® tiene uniti i lembi delle fratture sottostanti e dissipa gli sforzi generati lungo la propria lunghezza. Se il rinforzo si allungasse sotto tali sforzi di trazione, permetterebbe alla frattura di aprirsi ulteriormente. Perciò il rinforzo deve avere notevole rigidità a trazione, in modo che gli allungamenti siano minimi.

Per prevenire l'apertura delle fessure, la Geogriglia deve anche controllare i movimenti orizzontali dell'asfalto, pertanto anche l'interfaccia Geogriglia - asfalto deve avere notevole rigidità, ma ciò può avvenire solo se l'interazione tra Geogriglia e asfalto, sia a taglio diretto che a sfilamento, è di elevata qualità.

ARTER® GTS A viene prodotto con fili di PET ad alta tenacità, e sono quindi in grado di fornire tutta la resistenza a trazione, la rigidità e la resistenza a sfilamento necessarie per un ottimale rinforzo dell'asfalto.

Test di laboratorio e in sito confermano le eccellenti caratteristiche di ARTER® GTS A per il rinforzo delle pavimentazioni asfaltiche.

Come esempio, un programma di ricerca indipendente condotto in Slovacchia ha valutato 15 diversi Geosintetici per il rinforzo dell'asfalto, inclusi Geotessili nontessuti, Geotessili tessuti, Geogriglie estruse, Geogriglie tessute e Geocompositi.

Una parte importante della valutazione era costituita da prove finalizzate a misurare l'adesione tra asfalto e Geosintetici. Perciò cilindri di asfalto rinforzato sono stati campionati da un tratto sperimentale di strada e sottoposti a prove di taglio diretto lungo l'interfaccia asfalto – Geosintetico mediante l'apparecchiatura schematicamente rappresentata in Fig. 30.

I risultati hanno dimostrato che ARTER® GTS A (con maglia da 30 mm x 30 mm) ha la miglior adesione con l'asfalto tra i 15 Geosintetici provati.

Questa eccellente adesione deriva dalla ricopertura di EVA di ARTER® GTS A, che fonde quando l'asfalto viene posato ad alta temperatura, in tal modo "incollando" la Geogriglia sia allo strato inferiore che a quello superiore di asfalto.

Centinaia di installazioni coronate da successo provano che ARTER® GTS A costituisce al giorno d'oggi lo stato dell'arte nei Geosintetici di rinforzo dell'asfalto.

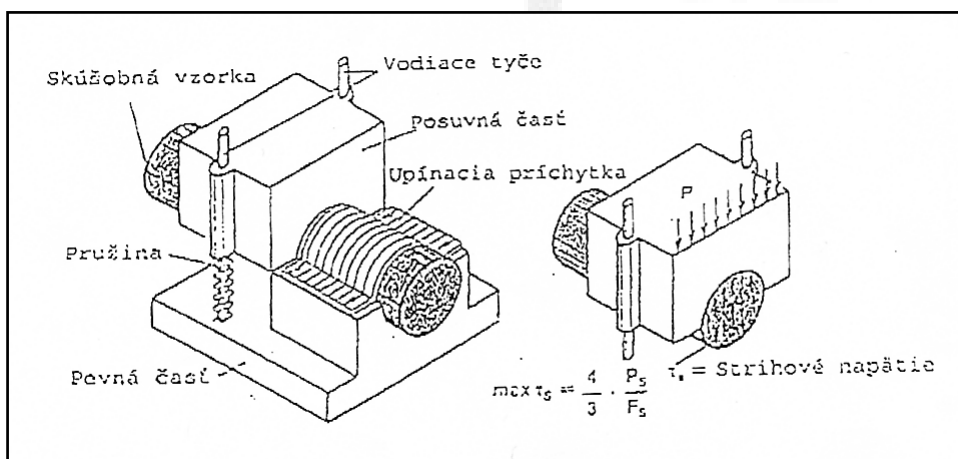
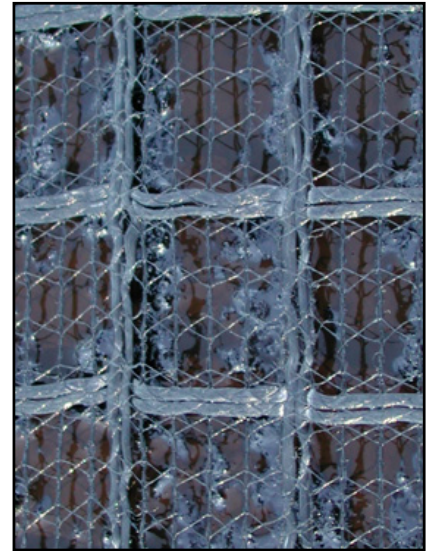


Figura 30: Schema della prova di misura dell'adesione Geosintetici – asfalto



La fig. 31 mostra alcune fasi della posa in opera di ARTER® GTS A.