



# Opere di sostegno in terra rinforzata

Ing. Rinaldo Uccellini  
Officine Maccaferri Italia Srl

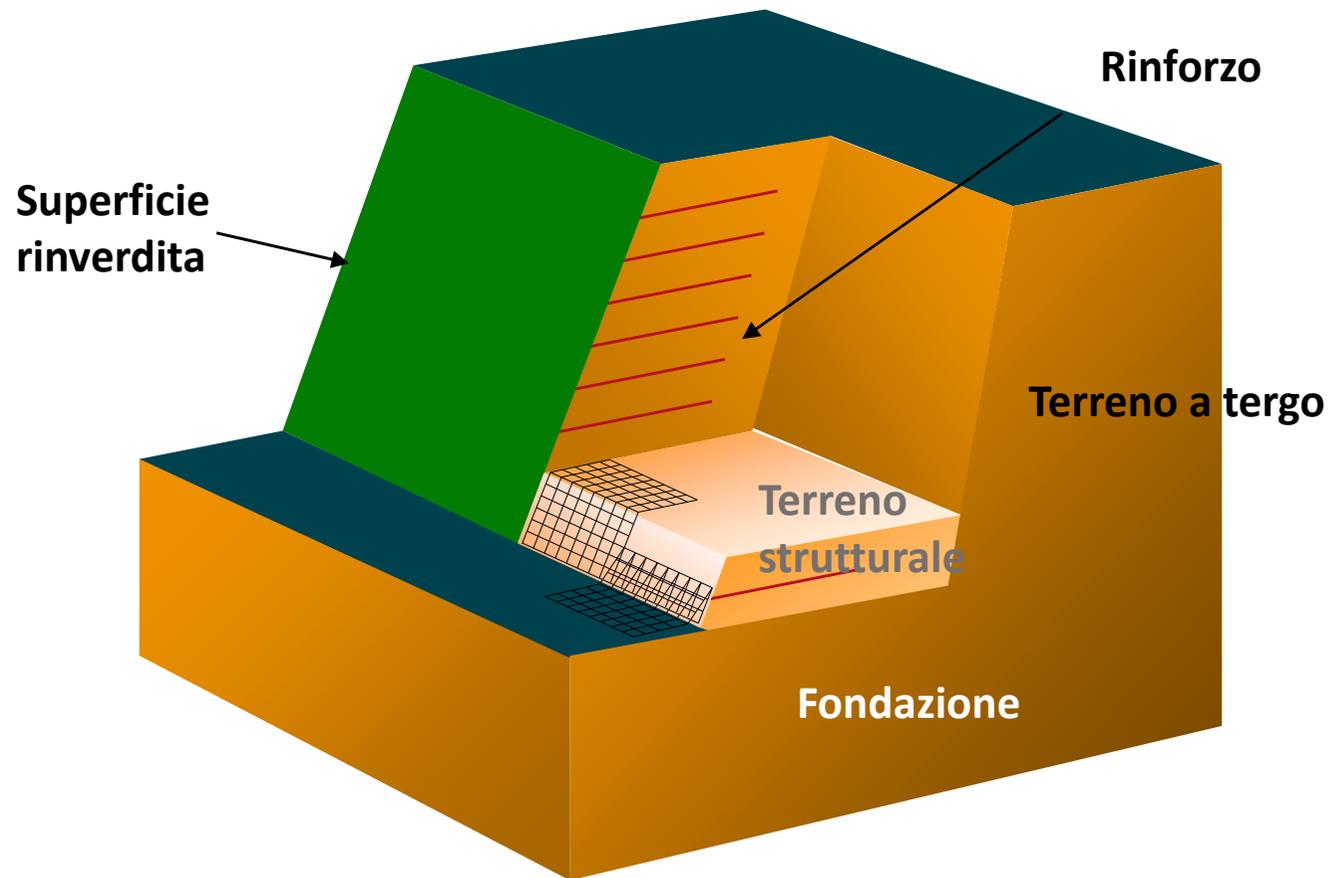
**MACCAFERRI**



# SOMMARIO

- **Introduzione alle terre rinforzate (TR)**
- **Caratteristiche dei rinforzi**
- **Le soluzioni Maccaferri**
- **Applicazione della NTC 2008/18 alle TR**
- **Modelli di calcolo**
- **Il software Macstars W**

# LE TERRE RINFORZATE



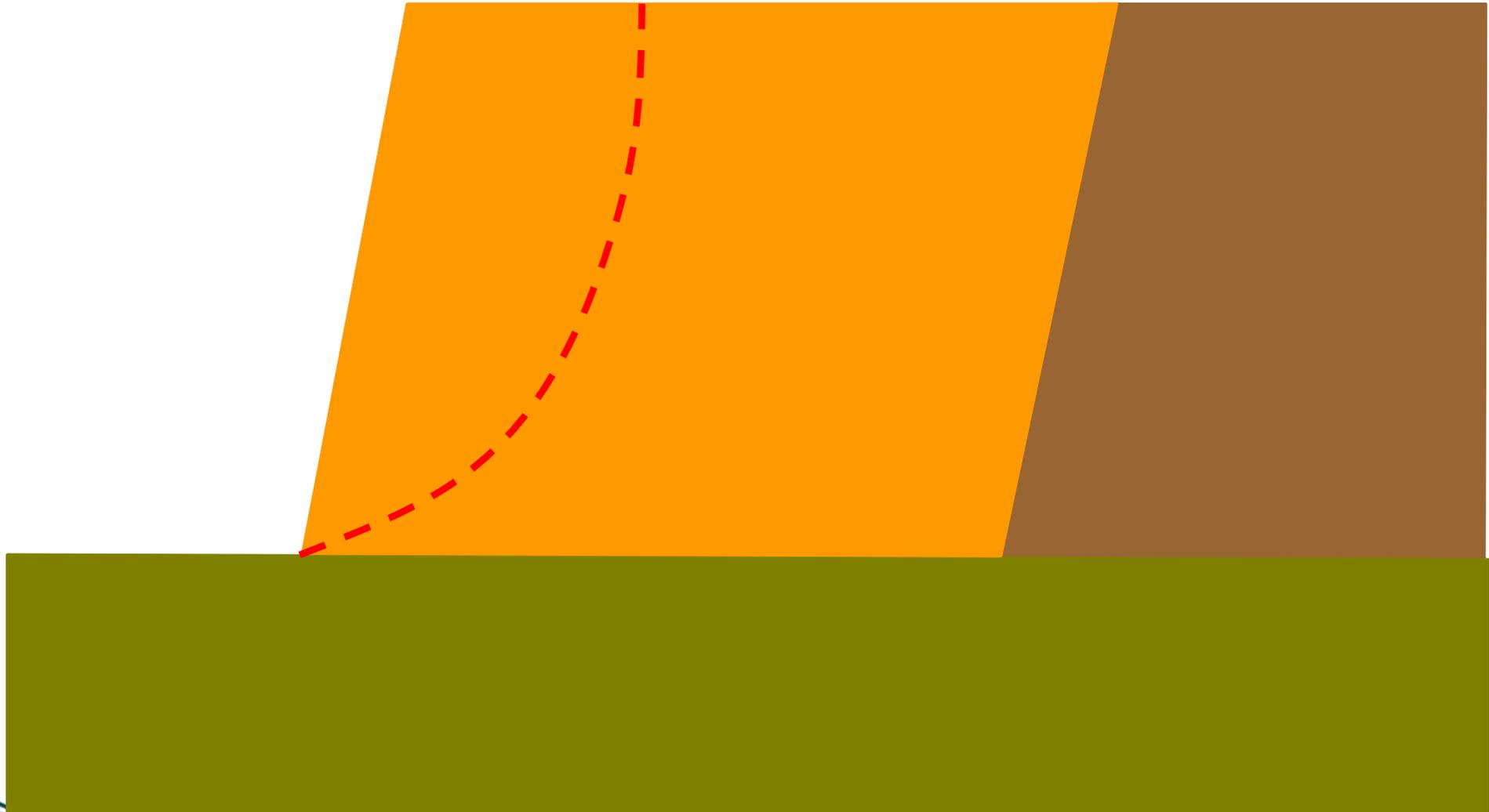
## STORIA

Il rinforzo dei terreni è un sistema di miglioramento delle caratteristiche di resistenza meccanica del terreno con origini antiche:

- tra il 3000 ed il 600 a.C. i Sumeri edificarono la Ziqqurat di Agar-Quf con stuoie di canne stese su letti orizzontali di sabbia e ghiaia
- La Grande Muraglia cinese presenta tratti con strati di miscele di ghiaie e sabbia rinforzati con tamerici
- Nel 1965 Henry Vidal realizzò in Francia il primo muro rinforzato mediante bandelle nervate d'acciaio e paramento in lamiera sagomata



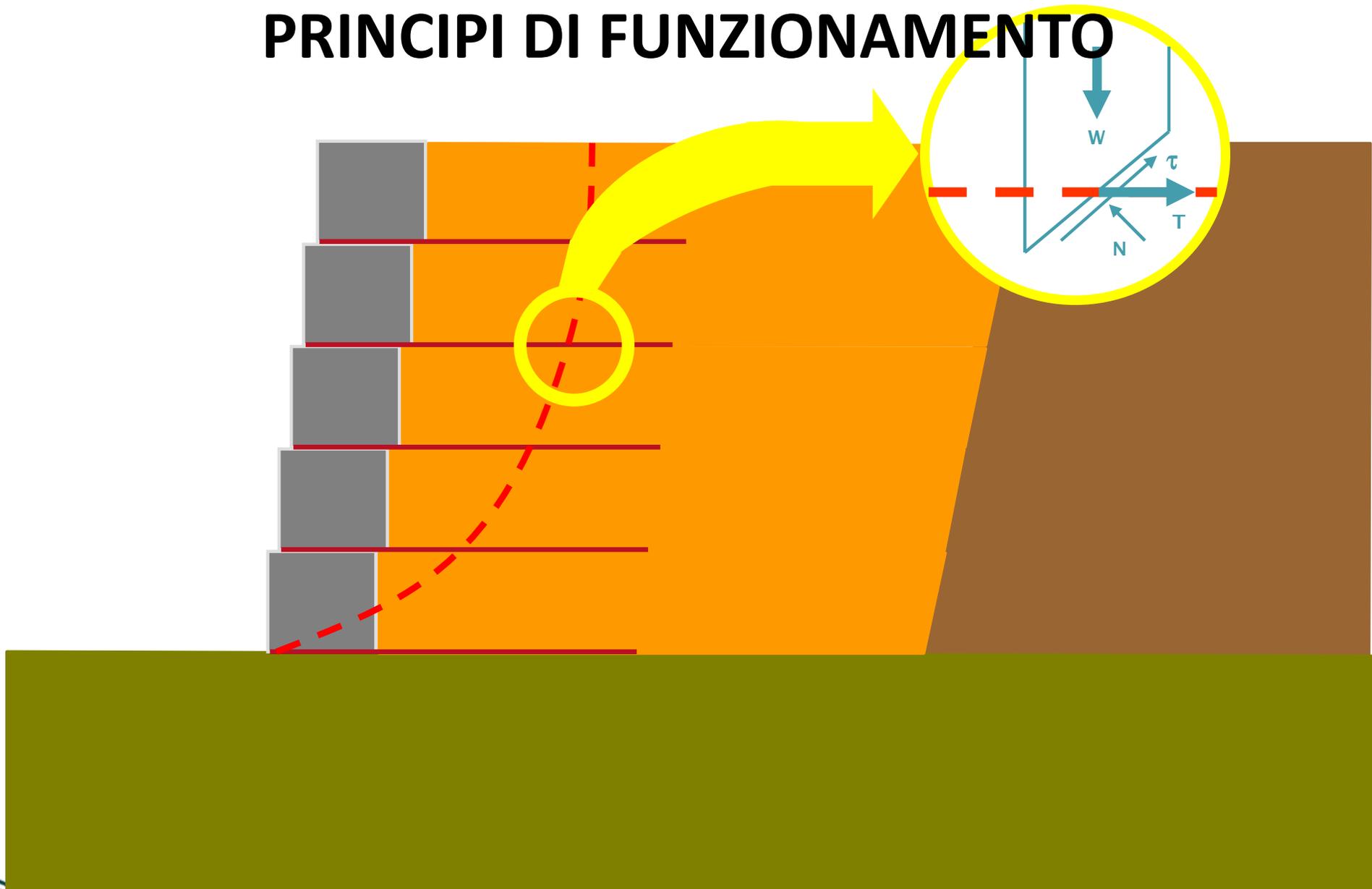
# PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO



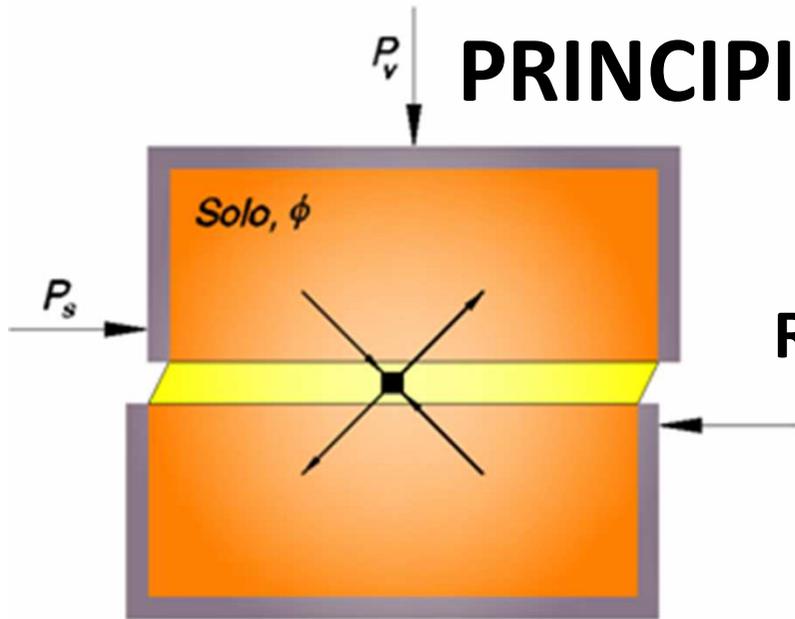
# PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO



# PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

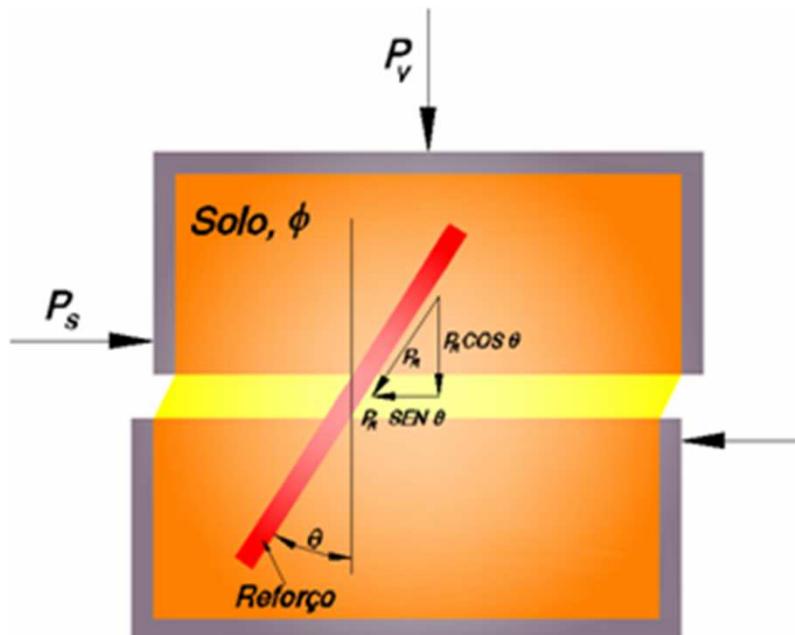


# PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO



Resistenza al taglio in assenza di rinforzo

$$P_{\text{resisting}} = P_v \tan\phi$$



Resistenza al taglio in presenza di rinforzo

$$P_{\text{resisting}} = P_v \tan\phi + P_R (\sin\theta + \cos\theta \tan\phi)$$

(After Jewell & Wroth 1987)

# GEOSINTETICI: DEFINIZIONE (UNI EN ISO 10318)

Termine generico che descrive un prodotto, del quale almeno un componente è fatto di un polimero sintetico o naturale, sotto forma di foglio, striscia o struttura tridimensionale, utilizzato in contatto con il terreno e/o altri materiali in applicazioni geotecniche e di ingegneria civile.

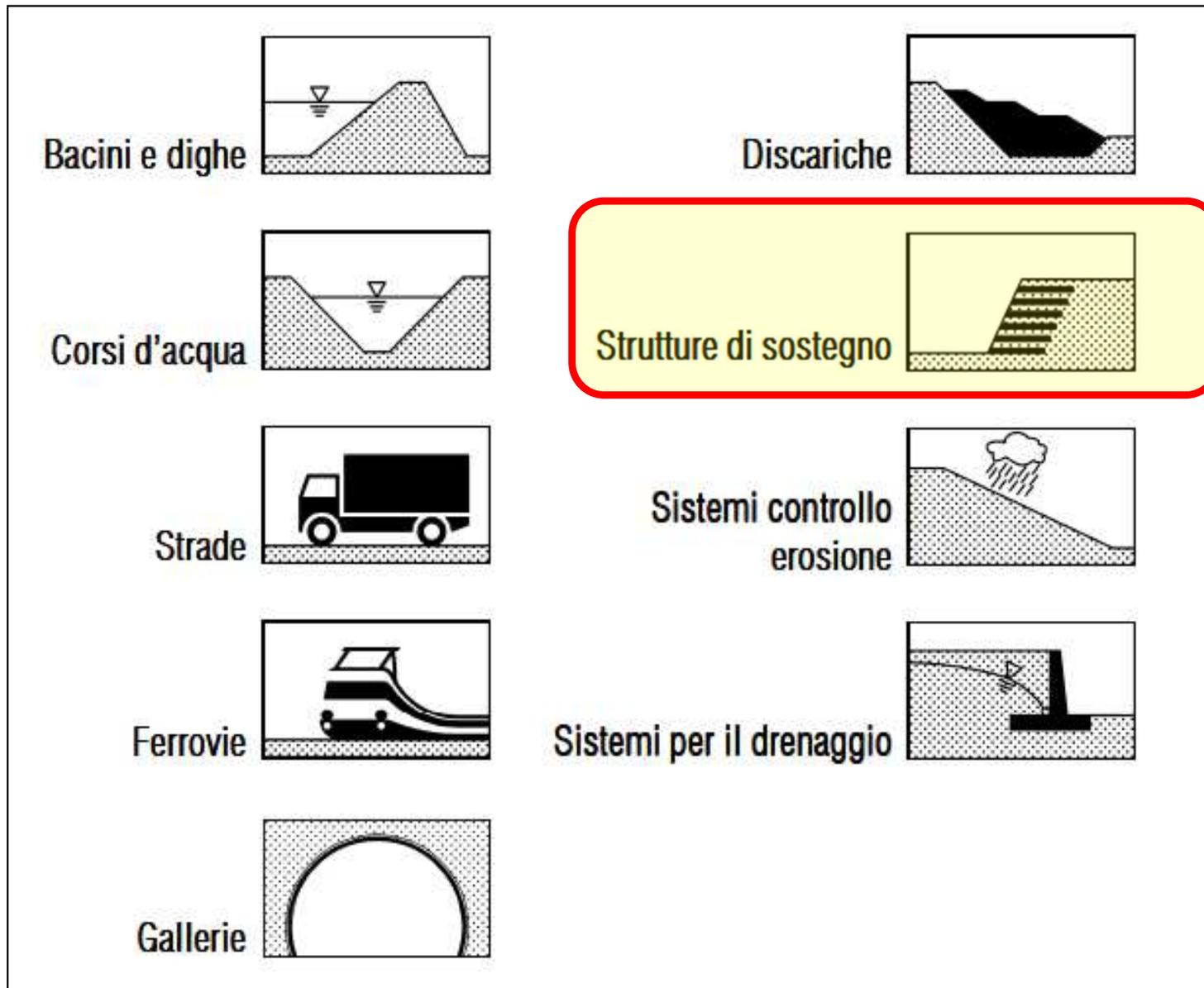
La Normativa Europea di riferimento, recepita in Italia, è la **UNI EN ISO 10318:2005 “Geosintetici - Termini e definizioni”**. In essa sono definite le terminologie suddivise per funzioni, proprietà ed altri termini e la simbologia applicabili ai geosintetici.



# GEOSINTETICI: FUNZIONI (UNI EN ISO 10318)

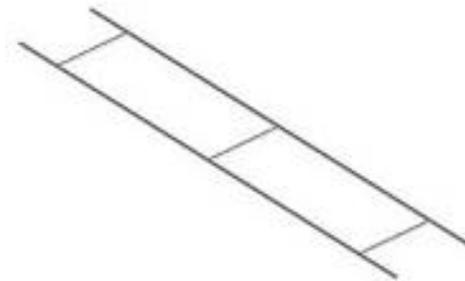
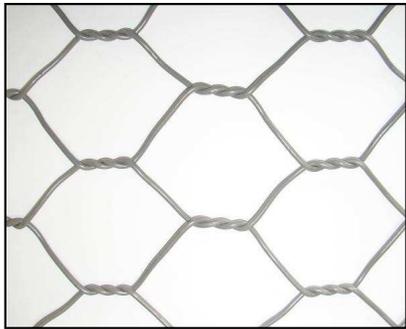


# GEOSINTETICI: CAMPI DI APPLICAZIONE

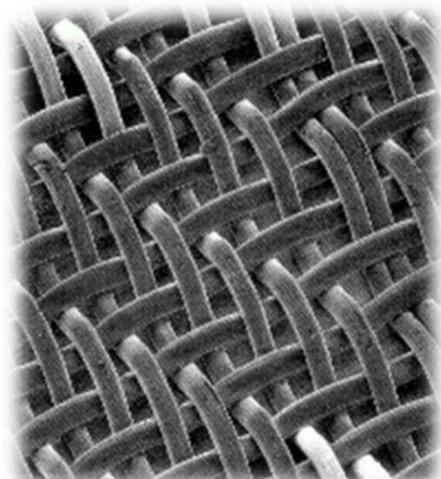


## MATERIALI PER RINFORZI: ACCIAIO

La norma di riferimento per i geosintetici (ISO 10318) include anche i prodotti metallici: reti doppia torsione, reti elettrosaldate, bandelle, ecc.



# PRODOTTI PER RINFORZO



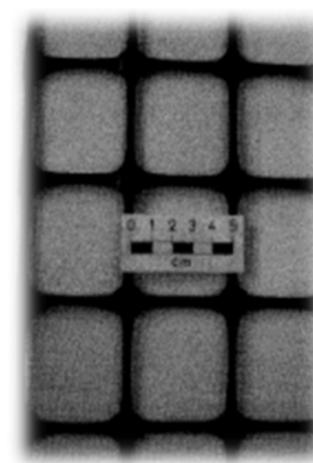
monofilamento



multifilamento



estrusa  
monodirezionale



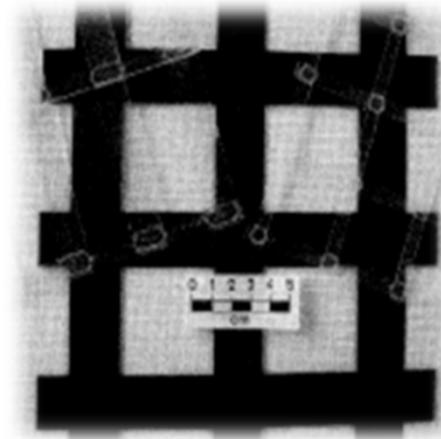
estrusa  
bidirezionale



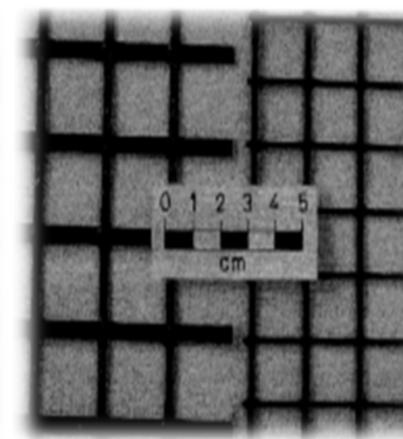
a bandelle



a struttura orientata



saldata



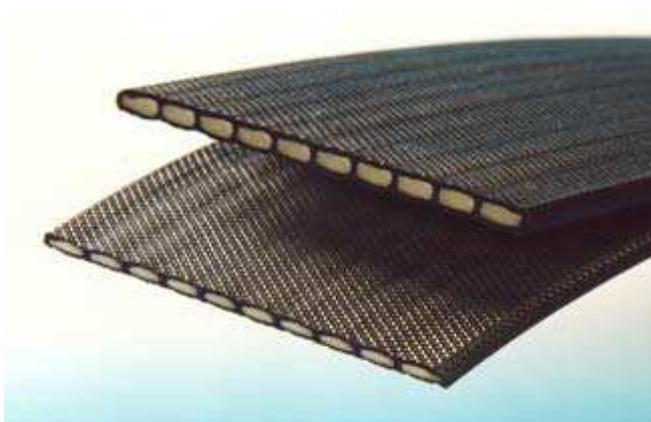
tessuta



**GEOTESSILI TESSUTI**

**GEOGRIGLIE**

# PRODOTTI PER RINFORZO

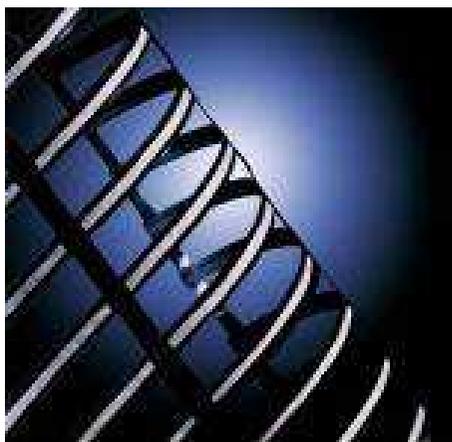


polimeriche



In acciaio

**BANDELLE**



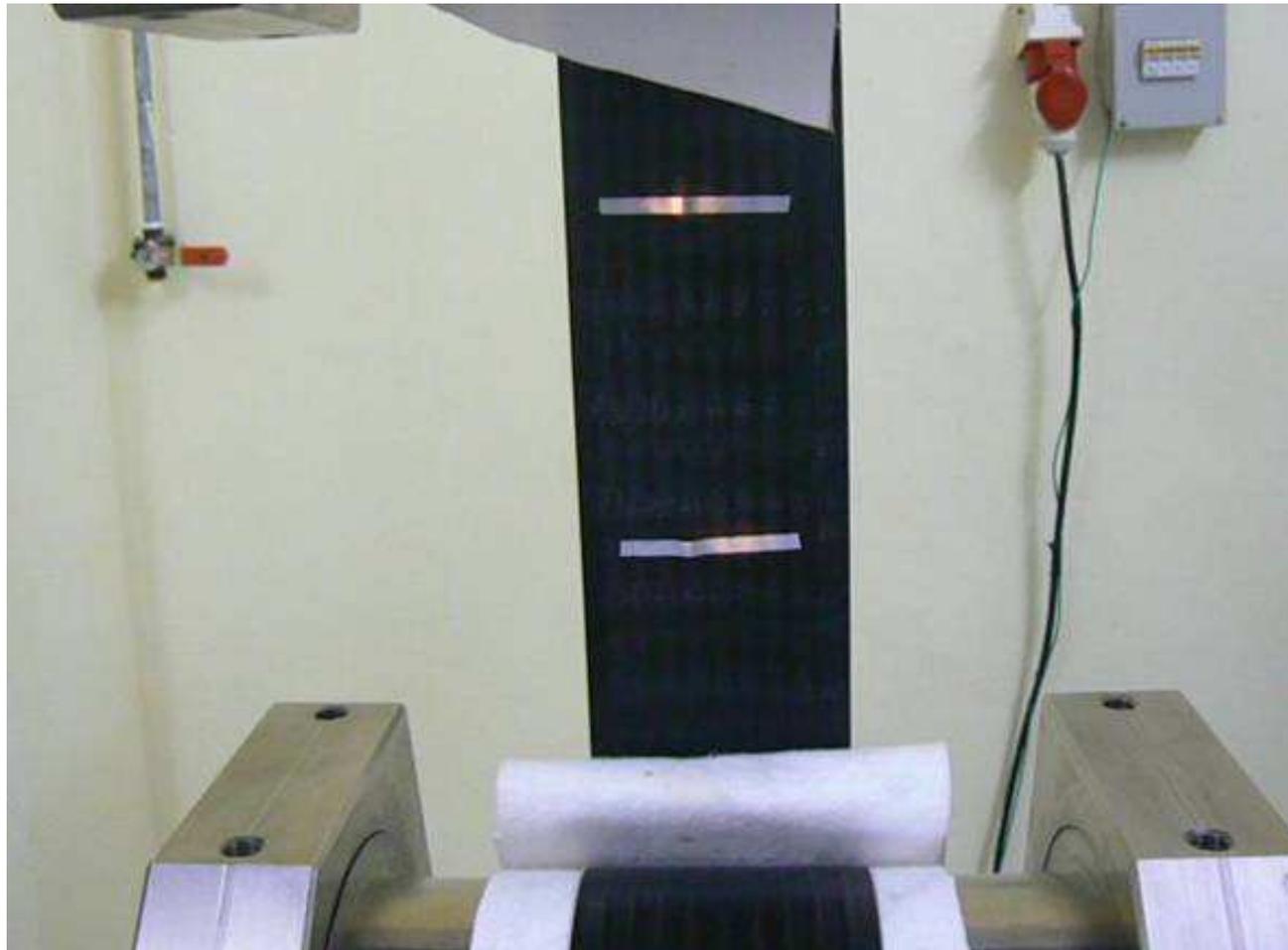
**GEOCOMPOSITI**



**RETI DOPPIA TORSIONE**



# CARATTERISTICHE DEI RINFORZI



# CARATTERISTICHE DEI RINFORZI

Sono due le principali proprietà dei rinforzi che devono essere attentamente valutate quando vengono utilizzati in combinazione con i terreni:

## 1 – RESISTENZA A TRAZIONE

**a breve termine**

(i.e post produzione)

**a lungo termine LTDS**

(i.e dopo 5/60/100/120 anni)

## 2 – INTERAZIONE CON IL TERRENO

pullout, scorrimento



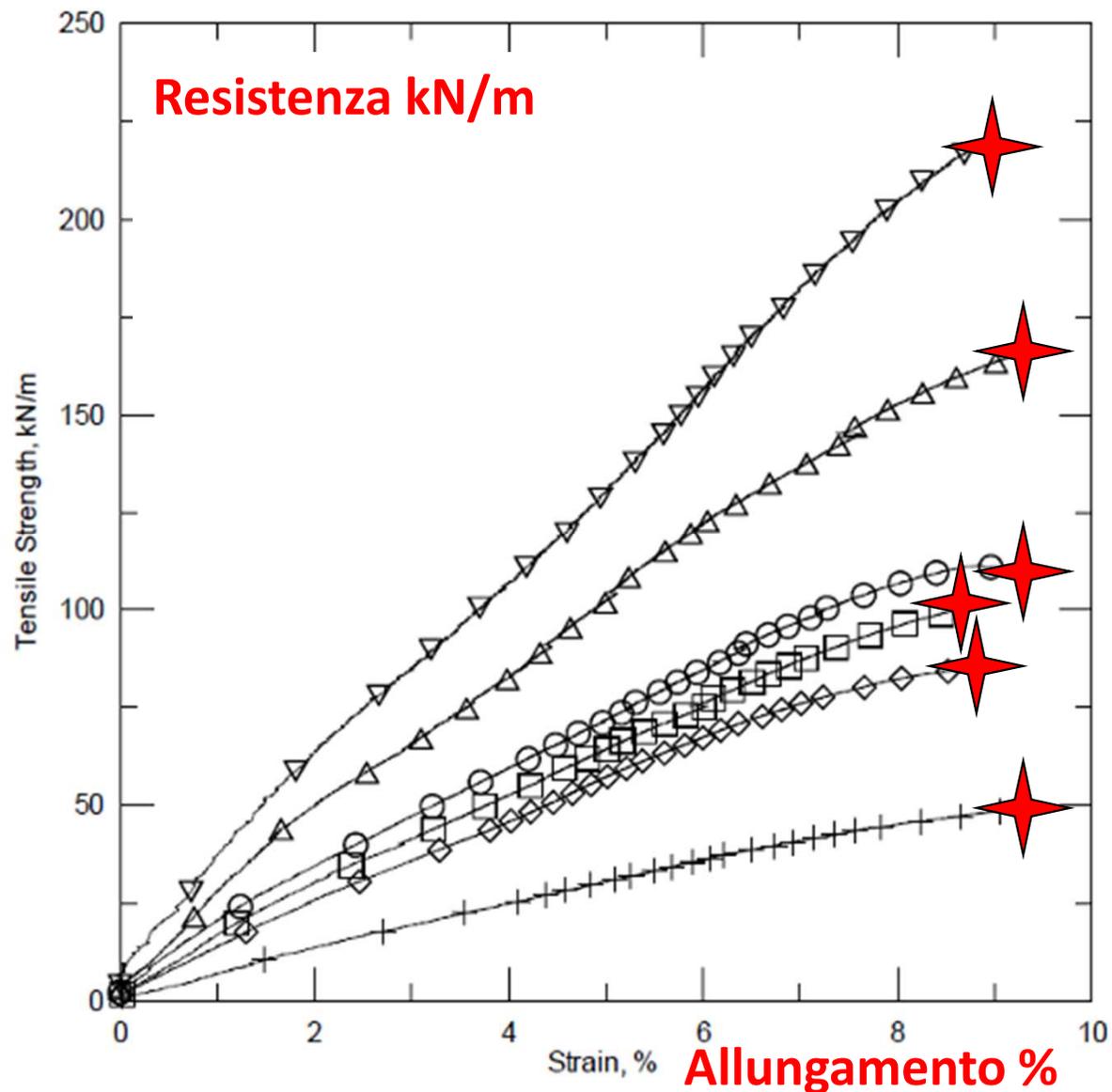
# RESISTENZA A TRAZIONE A BREVE TERMINE

Il valore caratteristico di resistenza a trazione (o UTS o NBL o  $R_{t;k}$ ) ed il suo relativo allungamento vengono valutati con un test di trazione su banda larga effettuati su:

- Campioni “Indisturbati” (dalla fabbrica al laboratorio)
- Temperatura 20°C (in esercizio si può avere 40°)
- Rottura dopo secondi (rapida applicazione del carico)



## RESISTENZA A TRAZIONE A BREVE TERMINE

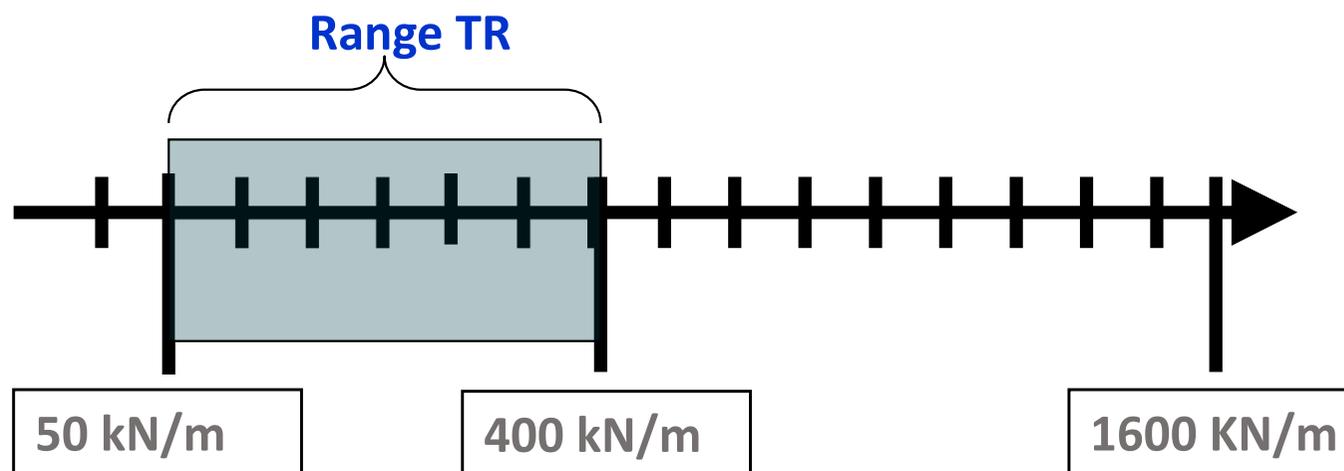


## RESISTENZA A TRAZIONE A BREVE TERMINE

Attualmente sono disponibili rinforzi in grado di erogare una resistenza a trazione compresa nell'intervallo

$$UTS = 30 - 1600 \text{ kN/m}$$

Nelle TR di solito vengono impiegati rinforzi da 50 a 400 kN/m



# RESISTENZA A TRAZIONE A LUNGO TERMINE (LTDS)

Il Rinforzo può degradare a causa di attività fisico-chimiche nel terreno come idrolisi, ossidazione, corrosione e stress cracking.

Inoltre, questi materiali sono suscettibili ai danni durante l'installazione e agli effetti della temperatura elevata, che agiscono per accelerare le deformazioni o i processi di invecchiamento

**La resistenza disponibile alla fine della vita utile di progetto (LTDS) deve essere valutata prendendo in considerazione tutti questi aspetti.**



## LTDS: QUAL E' LA VITA DI PROGETTO?

La vita nominale di un'opera strutturale  $V_N$  è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata. La vita nominale dei diversi tipi di opere è quella riportata nella Tab. 2.4.I e deve essere precisata nei documenti di progetto.

**Tabella 2.4.I** – Vita nominale  $V_N$  per diversi tipi di opere

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale $V_N$ (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva <sup>1</sup>	$\leq 10$
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	$\geq 50$
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	$\geq 100$

**(NTC 2008/2018)**



# RESISTENZA A TRAZIONE A LUNGO TERMINE (LTDS)

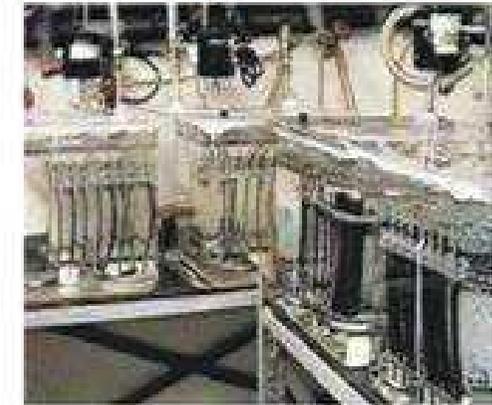
$$\text{LTDS} = \frac{\text{Ultimate strength of geosynthetic}}{F_{SCR} \times F_{ID} \times F_{D}}$$



Creep



Installation  
Damage



Durability  
Chemical & Biological

ISO TR 20432-2: Guida per la determinazione della resistenza a trazione a lungo termine dei geosintetici per il rinforzo dei terreni



## LTDS: EFFETTO DEL CREEP

Al variare del materiale si riscontra una notevole differenza del comportamento a creep

Valori tipici del  $F_{creep}$  a 20° e 120 anni sono nel range tra 1.4 – 5 per i materiali geosintetici

MATERIALE	Fattore di riduzione $F_{creep}$
ACCIAIO	1
HDPE	2 – 3.5
PET	1.4 – 1.8
PP	4 – 5
PVA	1.5 – 2.5

$$F_{creep} = 1 - 5$$



# LTDS: DANNEGGIAMENTO PER INSTALLAZIONE

I carichi e le sollecitazioni applicati su un rinforzo durante la fase di installazione possono essere quelli più severi a cui il rinforzo è soggetto. La posa e la compattazione di differenti tipo di terreni a contatto con i rinforzi possono generare una riduzione della sua resistenza a trazione



La quantità dei danneggiamenti inflitti al rinforzo dipenderanno dai seguenti fattori:

- **tipo di rinforzo (rivestimento protettivo)**
- **dimensioni e “spigolosità” del terreno**
- **metodo di compattazione**



## LTDS: DANNEGGIAMENTO PER INSTALLAZIONE

Nel caso di utilizzo di terreni di riempimento particolari (per dimensioni, aggressività, etc.) sono necessari test specifici per procedere con una progettazione adeguata.

Tipici valori di  $F_{dam}$  per un riempimento con terreni granulari ghiaiosi si attestano tra 1.05 e 1.5

<b>MATERIALE</b>	<b>Fattore di riduzione <math>F_{dam}</math></b>
<b>ACCIAIO</b>	<b>1.1 – 1.4</b>
<b>HDPE</b>	<b>1.1 – 1.5</b>
<b>PET</b>	<b>1.05 – 1.15</b>
<b>PP</b>	<b>1.1 – 1.5</b>
<b>PVA</b>	<b>1.05 – 1.2</b>

$$F_{damage} = 1.05 - 1.5$$



# LTDS: DANNEGGIAMENTO PER INSTALLAZIONE

Una ulteriore, ma pericolosa causa di di danneggiamento è la scarsa cura durante le procedure di installazione.....



Spaccare massi sopra i rinforzi...



Transitare con i veicoli sopra i rinforzi...



# LTDS: EFFETTI AMBIENTALI

Questo fattore di riduzione dipende dalla sensibilità del materiale del rinforzo ai seguenti fattori ambientali:

- **Aggressione Chimica**
- **Ossidazione termica**
- **Idrolisi**
- **Microrganismi**
- **UV**
- **pH del terreno**
- **Temperatura**

**Test per misurare la sensibilità a tali fattori:**

ISO 13439 - *Geotextiles and geotextile-related products - Screening test method for determining the resistance to hydrolysis*

ISO 12960 - *Geotextiles and geotextile-related products - Screening test method for determining the resistance to liquids [acids and alkalis]*



## LTDS: EFFETTI AMBIENTALI

Il progettista deve tenere in considerazione gli specifici aspetti del sito di applicazione

Valori tipici di  $F_{env}$  per  $4 < pH < 9$  sono compresi tra 1.05 – 1.1

<b>Materiale</b>	<b>Fattore di riduzione <math>F_{env}</math></b>
<b>ACCIAIO (rivestito)</b>	<b>1.05 – 1.1</b>
<b>HDPE</b>	<b>1.0 – 1.1</b>
<b>PET (rivestito)</b>	<b>1.0 – 1.1</b>
<b>PP</b>	<b>1.0 – 1.1</b>
<b>PVA</b>	<b>1.0 – 1.1</b>

$$F_{env} = 1 - 1.1$$



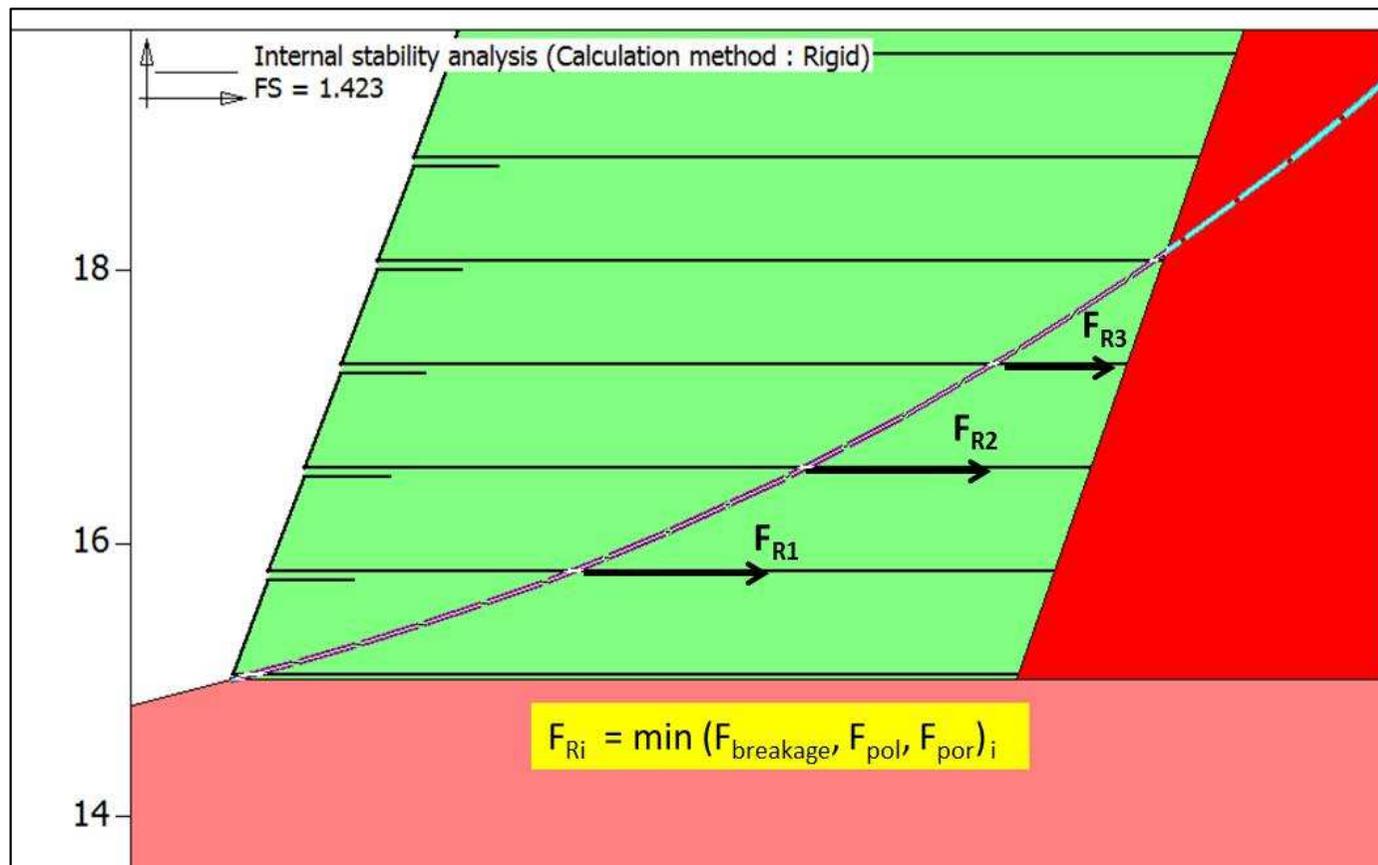
## LTDS: FATTORE DI RIDUZIONE GLOBALE

<b>MATERIALE</b>	<b>Fattore di riduzione <math>F_{TOT}</math></b>
<b>ACCIAIO (rivestito)</b>	<b>1.1 – 1.5</b>
<b>HDPE</b>	<b>2.2 – 5.8</b>
<b>PET (rivestito)</b>	<b>1.5 – 2.3</b>
<b>PP</b>	<b>4.4 – 8.2</b>
<b>PVA</b>	<b>1.6 – 3.3</b>



## COEFFICIENTI DI SFILAMENTO $\mu$

Nel calcolo delle terre rinforzate occorre verificare l'effettiva resistenza allo sfilamento erogata dal rinforzo in modo da considerare in maniera corretta il suo contributo stabilizzante



## COEFFICIENTI DI SFILAMENTO $\mu$

La massima forza di ancoraggio che il rinforzo è in grado di erogare ( $F_{po}$ ) è data dalla relazione:

$$F_{po} = 2 \sigma_v L W \mu \operatorname{tg} \Phi$$

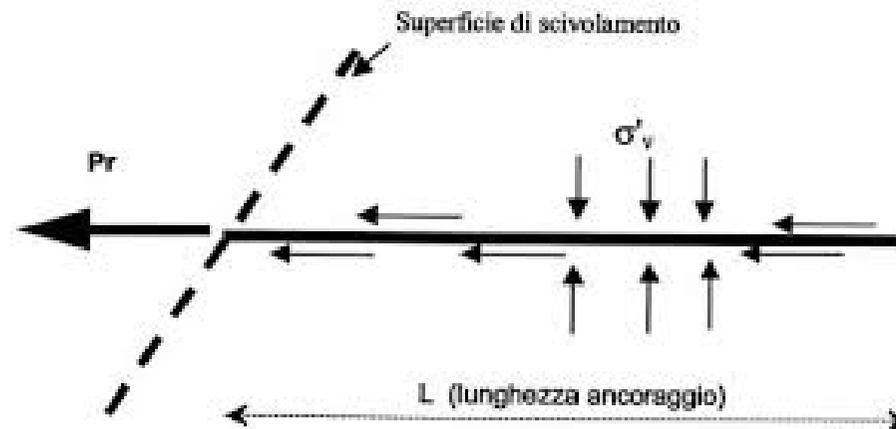
$\Phi$  = angolo di attrito del materiale del rilevato

$\mu$  = coefficiente di interazione tra il terreno ed il rinforzo

L = Lunghezza di ancoraggio del rinforzo

W = Larghezza del rinforzo (generalmente pari ad 1 m)

$\sigma_v$  = Pressione verticale agente sul rinforzo



## COEFFICIENTI DI SFILAMENTO $\mu$

I coefficienti di sfilamento derivano dai risultati delle prove di pullout realizzate presso la New South Wales University a Canberra (Australia 1990), il STS Consultant Lab. di Chicago (USA 1989), il Bathrust, Clarabut Geotechnical Testing, Inc. (Canada 2001) e l'Ismes Geo (Italia 2002); le prove sono state effettuate in accordo con le procedure della EN ISO 12957-1 o della ASTM D 6706-01.

<b>ARGILLA</b>	<b>LIMO</b>	<b>SABBIA</b>	<b>GHIAIA</b>
<b>0.3</b>	<b>0.5</b>	<b>0.65</b>	<b>0.9</b>

- **Valori tipici per la rete metallica a doppia torsione**



## VALORI DEI COEFFICIENTI $\mu$ , $\alpha_{ds}$

Entrambi i valori di  $\mu$  e  $\alpha_{ds}$  dipendono da molteplici fattori quali: pressione, forma e dimensioni dei granuli, superficie dei rinforzi, acqua.

Terreno	Coefficiente di Pullout $\mu$	Coefficiente di taglio diretto $\alpha_{ds}$
Limo	<b>0.5 – 0.6</b>	<b>0.4</b>
Sabbia	<b>0.8 – 0.9</b>	<b>0.5 – 0.6</b>
Ghiaia	<b>0.9 – 0.95</b>	<b>0.7 – 0.8</b>

**Valori tipici per Geogriglie**



# PROPRIETA' DEI TERRENI



## PROPRIETA' DEI TERRENI: $\phi$ $c$ $\gamma$

La performance di una struttura in terra rinforzata dipende *in primis* dalle caratteristiche del terreno strutturale utilizzato e dalle interazioni di quest'ultimo con le condizioni idrauliche (regime delle pressioni interstiziali) e con le condizioni di carico esterne (carichi applicati).

$$\phi_{cv} \circ \phi_{peak} ?$$

$$c_u \circ c' ?$$

$$\gamma_{dry} \circ \gamma_{sat} ?$$



## PROPRIETA' DEI TERRENI: ANGOLO DI ATTRITO $\phi$

Generalmente i rinforzi sono installati con terreni selezionati di tipo granulare, la cui resistenza al taglio è dipendente dal solo angolo d'attrito  $\phi'$

Poiché le deformazioni indotte in strutture in terra rinforzata come muri e pendii sono molto basse (0.5 - 1%), l'angolo d'attrito utilizzato è quello effettivo di picco  $\phi_{peak}$ .

$$\text{Angolo d'attrito} = \phi_{peak}$$



## PROPRIETA' DEI TERRENI: COESIONE $c$

Essendo il terreno strutturale essenzialmente granulare,

$$\text{Coesione} = c' = 0 \quad (\text{max. 5 kPa})$$

La coesione effettiva,  $c_u$  viene utilizzata solo nella caratterizzazione di versanti in scavo in argille sovraconsolidate, che vengono consolidati mediante “soil nailing”.

Piccoli e costanti valori di coesione effettiva possono essere utilizzati nella caratterizzazione di terreni di riporto (utilizzati in piccole quantità) o nel caso di rifiuti industriali o urbani: in tali casi anche l'angolo di attrito  $\phi_{cv}$  deve essere valutato per grandi deformazioni.



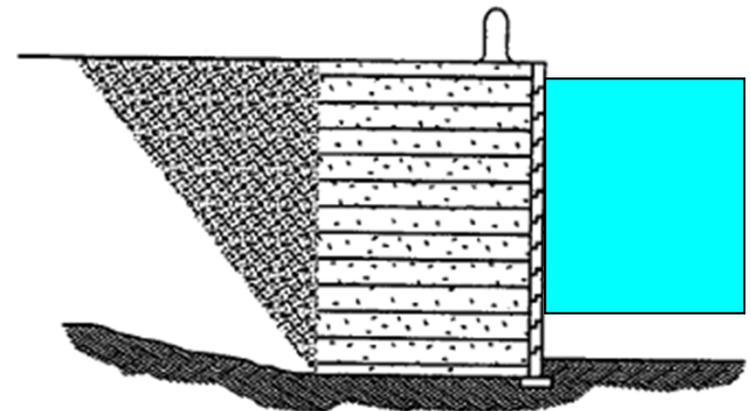
## PROPRIETA' DEI TERRENI: PESO SPECIFICO $\gamma$

Essendo il terreno strutturale essenzialmente granulare e quindi naturalmente drenante,

$$\text{Peso specifico} = \gamma_{\text{dry}}$$

Nel caso di strutture eventualmente soggette a saturazione del suolo (ad esempio strutture lungomare, fiume, ecc) a favore di sicurezza

$$\text{Peso specifico} = \gamma_{\text{sat}}$$



## SPECIFICA TIPO PER RILEVATI STRUTTURALI

Il terreno di riempimento che costituisce il rilevato strutturale dell'opera dovrà appartenere ai gruppi della UNI 10006

**A1-a, A1-b, A3, A2-4, A2-5**

con esclusione di pezzature superiori a 150 mm.

Il materiale con dimensioni superiori a 100 mm è ammesso con percentuale inferiore al 15% del totale.

In ogni caso saranno esclusi elementi di diametro maggiore o uguale a 150 mm, e i materiali che, da prove opportune, presentino angoli d'attrito minori di quelli previsti in progetto.



# SPECIFICHE PER RILEVATI STRUTTURALI

**Meno del 15%**  $< 80 \mu\text{m}$   
**Fino al 90%**  $< 100 \text{ mm}$   
**Coefficiente di Uniformità**  $C_u = D_{60}/D_{10} > 2$  **(FRANCIA)**

<u>Gradation:</u> (AASHTO T-27)	<u>U.S. Sieve Size</u>	<u>Percent Passing</u>
	4 in. (102 mm) <sup>(a,b)</sup> 3/4-inch (20 mm) <sup>(a)</sup>	100
	No. 4 (4.76 mm)	100 – 20
	No. 40 (0.425 mm)	0-60
	No. 200 (0.075 mm)	0 – 50
<u>Plasticity Index, PI</u> (AASHTO T-90)	PI $\leq$ 20	

**(USA)**



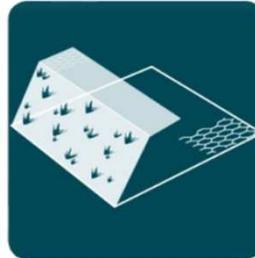
# SOLUZIONI MACCAFERRI PER LE OPERE DI SOSTEGNO



**Gabion**



**Terramesh®  
System**



**Green  
Terramesh®**



**Paraproduct**



**MacWall®**



**MacRes®**

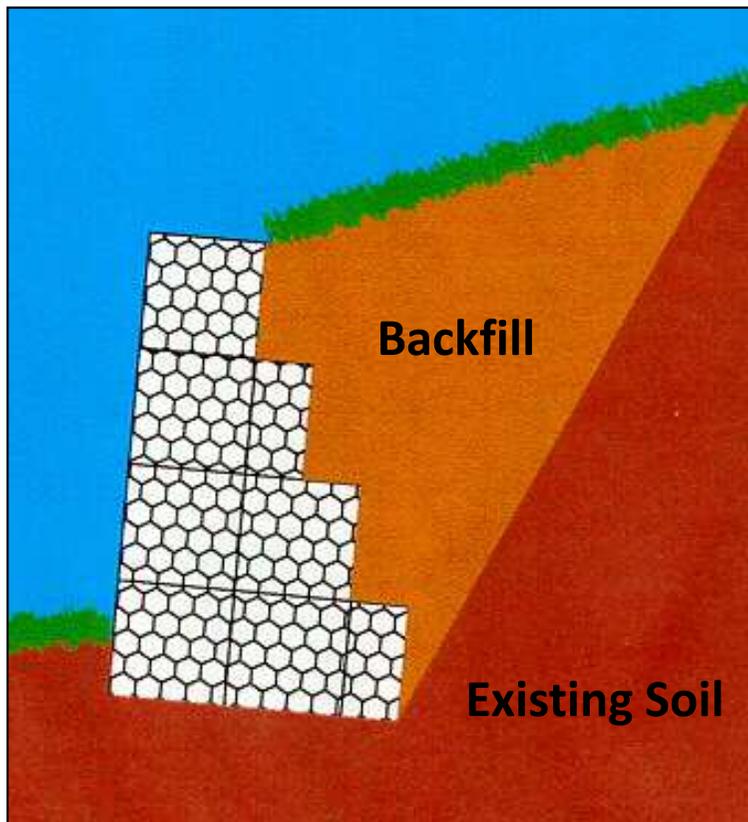


# OPERE DI SOSTEGNO: LE SOLUZIONI MACCAFERRI

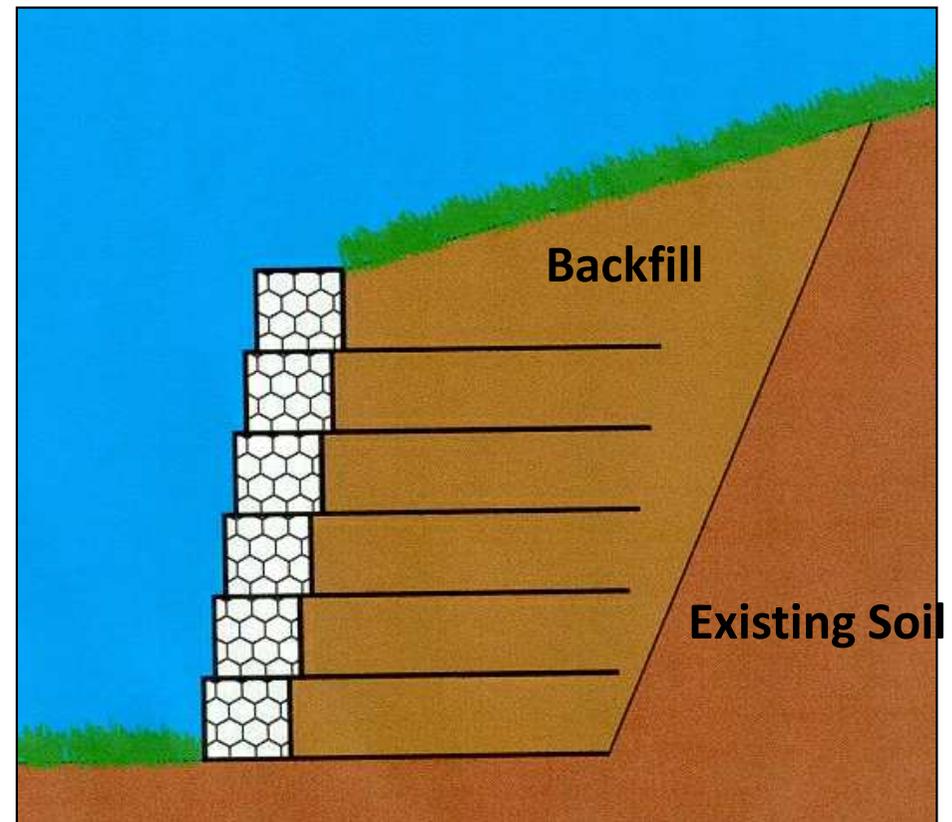


# OPERE DI SOSTEGNO: LE SOLUZIONI MACCAFERRI

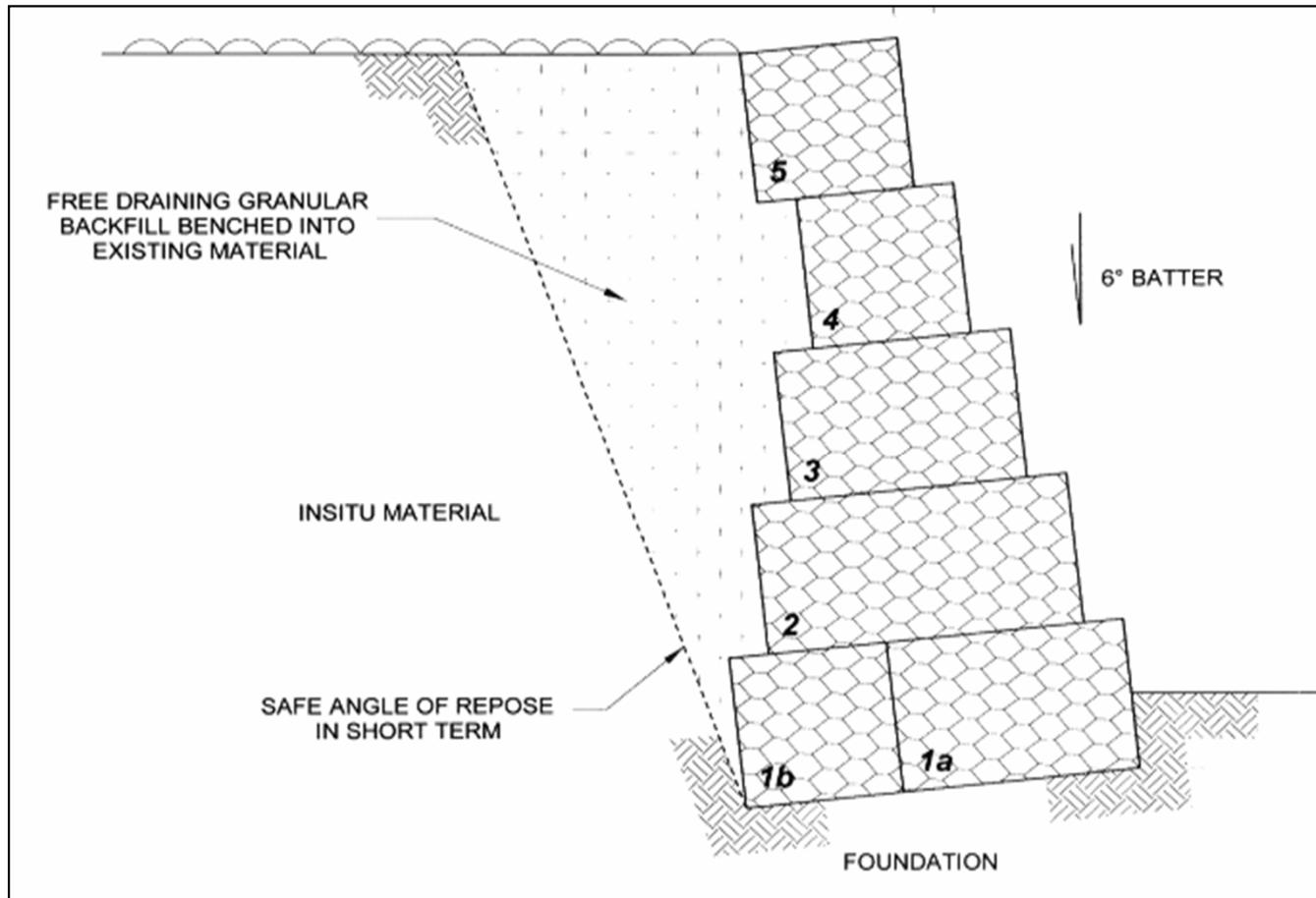
## MURI A GRAVITA'



## TERRE RINFORZATE



# MURI IN GABBIONI





## MURI IN GABBIONI



# TERRE RINFORZATE

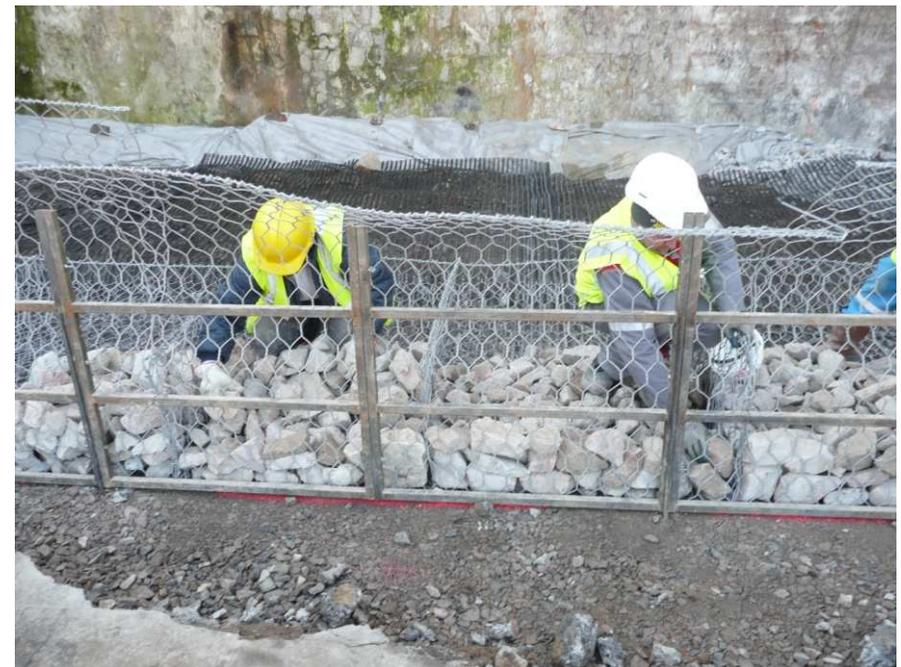
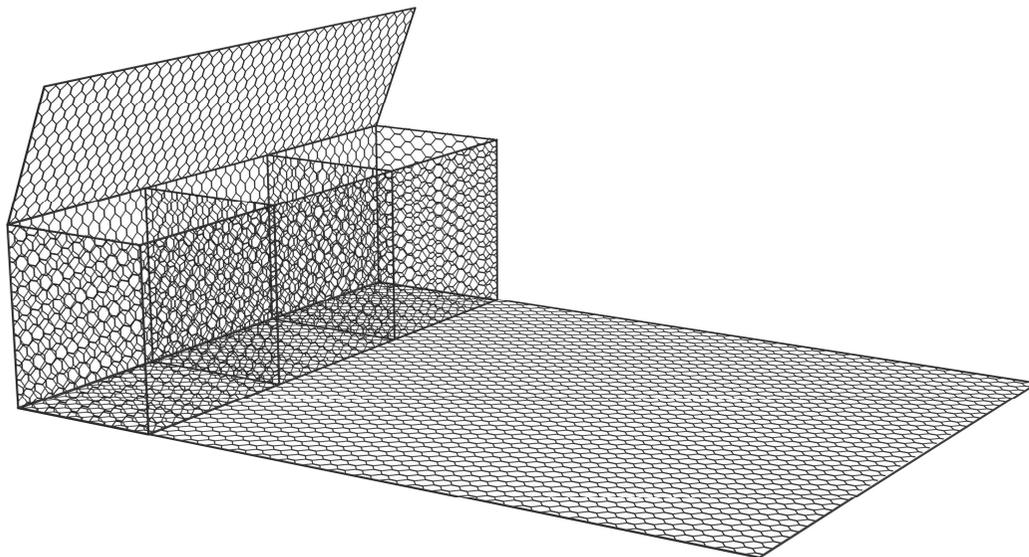
Maccaferri iniziò la propria esperienza nelle Terre Rinforzate in rete metallica a doppia torsione con una struttura di altezza 14 m costruita in Sabah (Malesia) nel 1979 e da loro ha realizzato opere per diversi milioni di m<sup>2</sup> di paramento





## TERRAMESH® SYSTEM

Il Terramesh® System è costituito da un paramento in gabbioni connesso all'elemento di rinforzo. Gli elementi sono forniti già a misura senza richiedere ulteriori tagli in cantiere





## TERRAMESH<sup>®</sup> SYSTEM

### CARATTERISTICHE

Il paramento in gabbioni e l'elemento di rinforzo sono costituiti da un telo continuo di rete DT: la connessione in cantiere non è necessaria

Resiste a cedimenti differenziali elevati

Resiste al fuoco

Adatto per le opere idrauliche





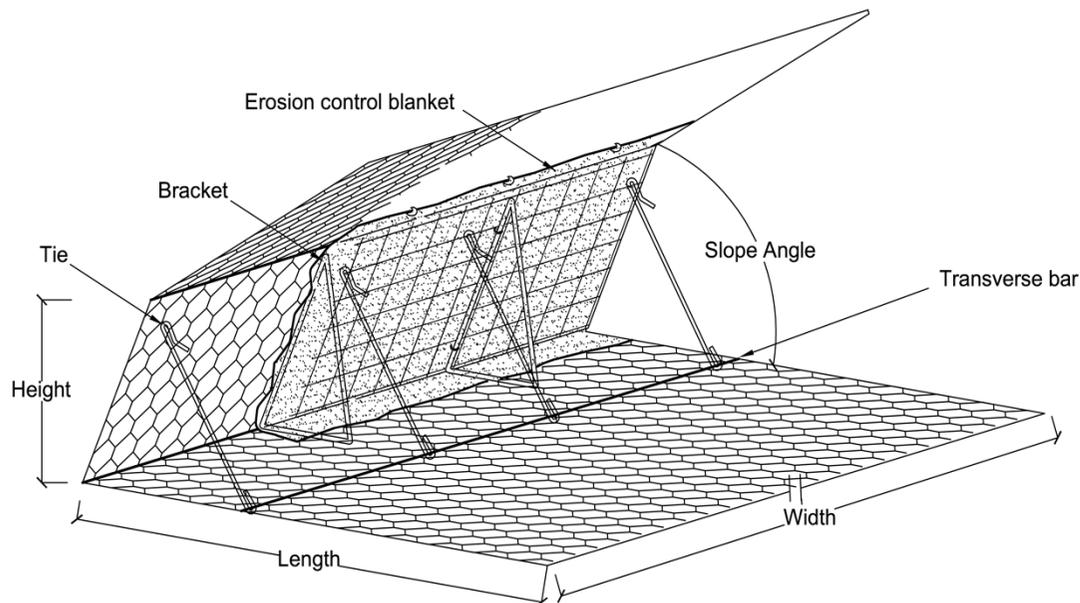
# TERRAMESH® SYSTEM





## TERRAMESH® VERDE

Il Terramesh® Verde è costituito da rinforzo in rete DT risvoltato a paramento rinverdibile. Gli elementi sono forniti già a misura senza richiedere sagomature o tagli in cantiere





## TERRAMESH<sup>®</sup> VERDE

### CARATTERISTICHE

Disponibile in 3 pendenze: 60°/65°/70°

Elevata produttività di posa

Resiste a cedimenti differenziali elevati





# TERRAMESH® VERDE



# Terramesh® Minerale 65° – 70° – 80° – 90° inclinazione

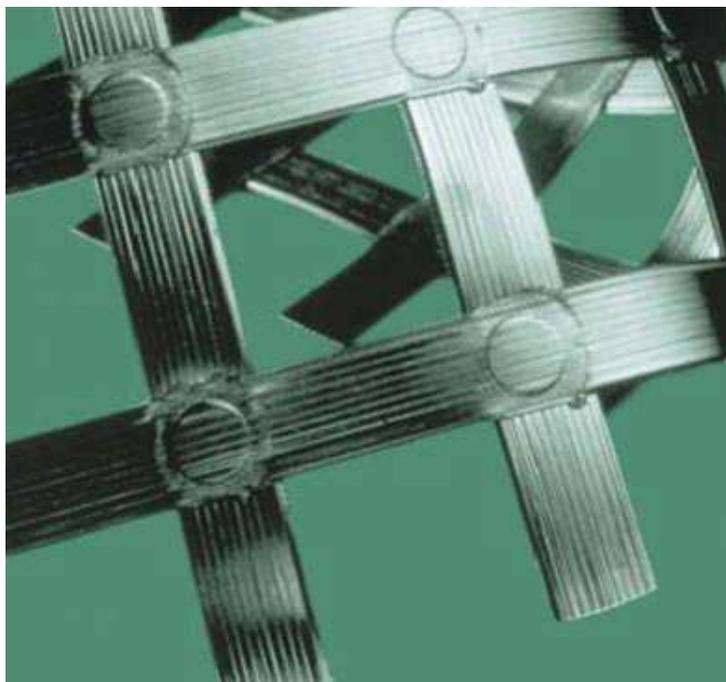


Il Terramesh® Verde Minerale è un Sistema modulare con paramento in pietra per le terre rinforzate .

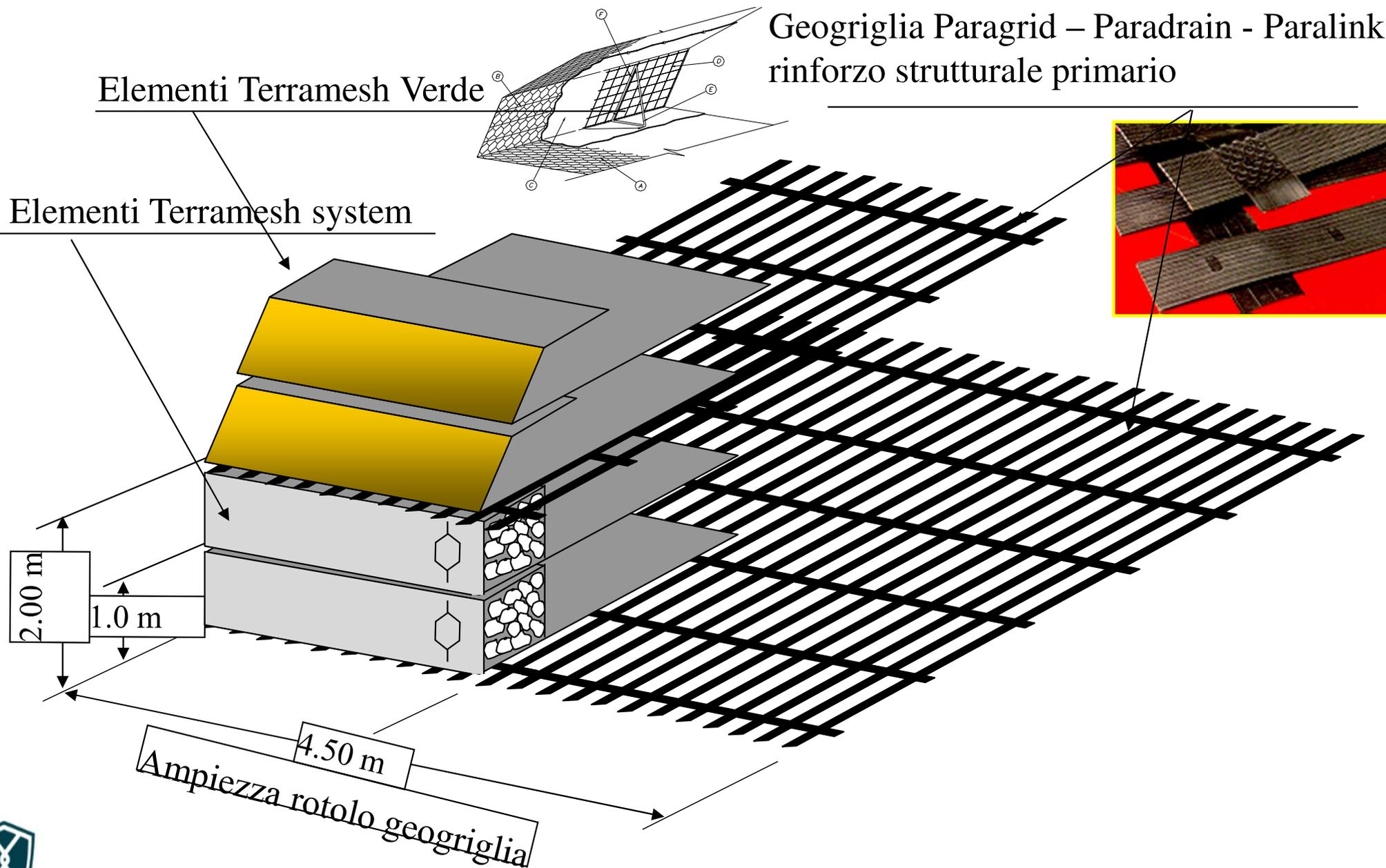


## GEOGRIGLIE

Terre rinforzate con geogriglie in poliestere ad alta tenacità (ParaGrid®) con resistenza nominale fino a 200 kN/m



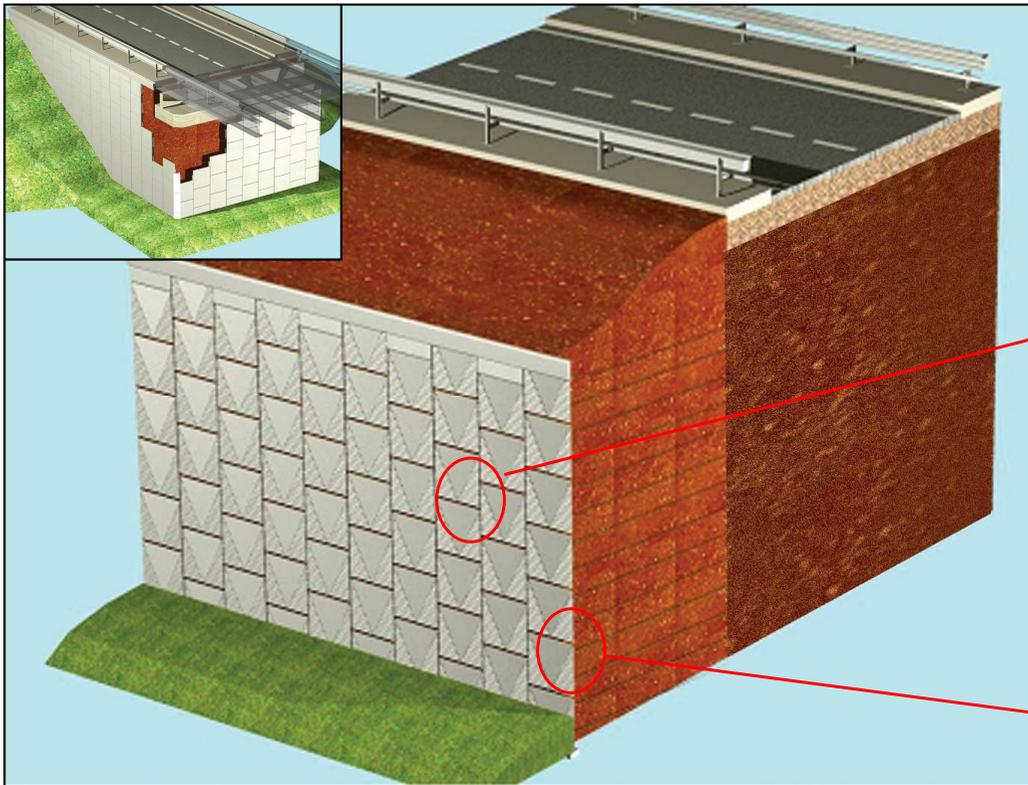
# Configurazioni miste





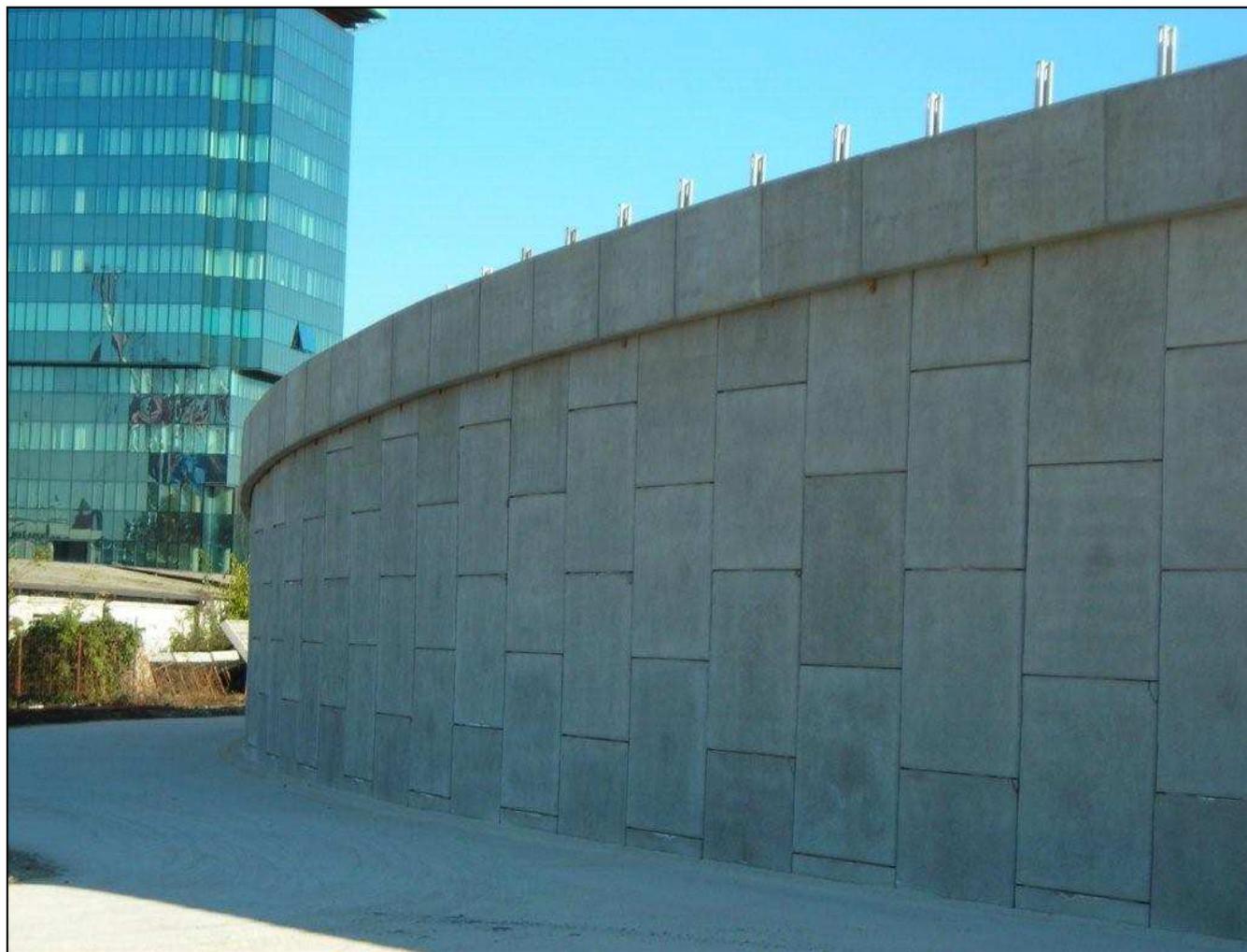
## MACRES®

Sistema di muri verticali in terra rinforzata con paramento in pannelli di calcestruzzo e rinforzi a nastri in poliestere (ParaWeb®) ad alta tenacità





## MACRES®



# **CRITERI PROGETTUALI DELLE OPERE DI SOSTEGNO**

## **LE NORME TECNICHE DELLE COSTRUZIONI NTC 08/18**



## NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Esistono metodi di calcolo riconosciuti che consentono di avere tutte le garanzie necessarie nella progettazione di tali opere, tra cui:

- **FHWA** (Federal Highway Administration)
- **AASHTO** (American Association of State Highway and Transportation Officials)
- **BS 8006** (British Standard)

In Italia:

- **DM 14/01/2008** (Gazzetta ufficiale n. 29 del 04/02/2008) “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni”
- **Circolare n. 617 del 26/02/2009** “Istruzioni per l’applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008”

**DM 17/01/2018.** «Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni.»



# NUOVE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI

## DECRETO MINISTERIALE 14 GENNAIO 2008



IL MINISTRO DELLE INFRASTRUTTURE

di concerto con

IL MINISTRO DELL'INTERNO

e con

IL CAPO DEL DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE

Vista la legge 5 novembre 1971, n. 1086, recante norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso e da struttura metallica;

Vista la legge 2 febbraio 1974, n. 64, recante provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche;

Vista la legge 21 giugno 1986, n. 317 recante "Procedura di informazione nel settore



[www.cslp.it](http://www.cslp.it)

- Accorpamento in un unico testo della normativa nel campo delle costruzioni
- Filosofia progettuale che recepisce i criteri dettati dagli **Eurocodici**
- Introduzione dei valori caratteristici dei parametri di progetto
- Filosofia **prestazionale** delle opere
- Determinazione degli **Stati Limite** per la progettazione delle opere



# NUOVE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI

MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI

*CIRCOLARE 2 febbraio 2009 , n. 617*

*Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008.*

*(Gazzetta Ufficiale n. 47 del 26 febbraio 2009 - Suppl. Ordinario n.27)*



- La Circolare privilegia gli argomenti più innovativi e per certi versi più complessi trattati dalle nuove Norme Tecniche.
- Il testo non travalica i compiti e i limiti propri di una circolare e, quindi, non modifica argomenti trattati dalle nuove Norme Tecniche, né aggiunge nuovi argomenti, se non per informazioni, chiarimenti ed istruzioni applicative



# AGGIORNAMENTO

DECRETO MINISTERIALE 17 GENNAIO 2018  
(GU N. 42 DEL 20-2-2019 – SERIE GENERALE)

MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE  
E DEI TRASPORTI

DECRETO 17 gennaio 2018.

**Aggiornamento delle «Norme tecniche per  
le costruzioni».**



## FATTORE DI SICUREZZA DA RAGGIUNGERE

La **verifica** si intenderà **soddisfatta** quando l'**azione resistente** (ultima) risulta **maggiore (o uguale)** a quella **sollecitante di progetto** calcolata secondo le amplificazioni dei carichi di cui prima.

**La verifica richiede che il rapporto fra l'azione ultima resistente ed l'azione sollecitante (FS) risulti maggiore o uguale a 1.**

$$Ed \leq Rd$$

**Ed** = azioni o effetto delle **azioni di progetto**

**Rd** = azioni o effetto delle **azioni resistenti** del sistema geotecnico

- le azioni si moltiplicano per il coefficienti  $\gamma_f$
- i parametri geotecnici si dividono per i coefficienti  $\gamma_m$
- la resistenza globale si divide per i coefficienti  $\gamma_r$



# CAPITOLO 6: PROGETTAZIONE GEOTECNICA

Oggetto delle norme é la verifica, progettazione e la realizzazione di:

- stabilita dei pendii naturali
- opere di fondazione
- ***opere di sostegno (terre rinforzate, muri cellulari)***
- tiranti di ancoraggio
- opere in sotterraneo
- opere e manufatti di materiali sciolti e fronti di scavo
- miglioramento e rinforzo dei terreni e degli ammassi rocciosi
- consolidamento dei terreni interessanti opere esistenti
- discariche controllate di rifiuti e depositi di inerti
- fattibilità di grandi opere che hanno riflessi su grandi aree



## CAPITOLO 6: PROGETTAZIONE GEOTECNICA

- Sono definite **opere di sostegno** (Cap. 6.5) i muri o altre strutture miste ad essi assimilabili:
  - - **muri**, per i quali la funzione di sostegno è affidata al peso proprio del muro e a quello del terreno direttamente agente su di esso (ad esempio muri a gravità, muri a mensola, muri a contrafforti);
  - - **strutture miste**, che esplicano la funzione di sostegno anche per effetto di trattamenti di miglioramento e per la presenza di particolari elementi di rinforzo e collegamento (~~ad esempio terre rinforzate, muri cellulari~~).



# CAPITOLO 6: PROGETTAZIONE GEOTECNICA

Verifiche della sicurezza e delle prestazioni - *SLU*

Verifiche basate sull'impiego di *Coefficienti Parziali*

**A** - Sulle Azioni

**M** - Sui parametri geotecnici del terreno

**R** - Sulle resistenze caratteristiche

“Le verifiche devono essere effettuate, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali .. seguendo almeno uno dei due approcci”

## **Approccio 1**

Combinazione 1: **A1 + M1 + R1**

Combinazione 2: **A2 + M2 + R2**

## **Approccio 2**

**A1 + M1 + R3**



## ■ VERIFICHE STATICHE ALLO STATO LIMITE ULTIMO (NTC 2018)

### ■ Stabilità Globale (GEO)

- Approccio 1 - Combinazione 2 **(A2+M2+R2)**
- *Fattore parziale Earth Resistance  $\gamma_r = 1.1$*

### ■ Stabilità Interna (STR)

- Approccio 2 **(A1+M1+R3)**
- *Ex. Scorrimento gabbione-gabbione*

### ■ Scorrimento, Ribaltamento e Capacità Portante (GEO)

- Approccio 2 **(A1+M1+R3)**
- *Fattore parziale Earth resistance e Bearing Capacity  $\gamma_r = 1.4$ ; Sliding  $\gamma_r = 1.1$*



# ■ FATTORI PARZIALI PER LE VERIFICHE SLU

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti $G_1$	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_{Q1}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</sup> Per i carichi permanenti  $G_2$  si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti  $\gamma_{G1}$

Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale $\gamma_M$	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_\gamma$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0

Tab. 6.5.I - Coefficienti parziali  $\gamma_R$  per le verifiche agli stati limite ultimi di muri di sostegno

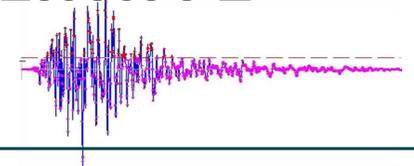
Verifica	Coefficiente parziale (R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,4$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$
Ribaltamento	$\gamma_R = 1,15$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,4$

Tab. 7.11.III - Coefficienti parziali  $\gamma_R$  per le verifiche degli stati limite (SLV) dei muri di sostegno.

Verifica	Coefficiente parziale $\gamma_R$
Carico limite	1.2
Scorrimento	1.0
Ribaltamento	1.0
Resistenza del terreno a valle	1.2



# ■ VERIFICHE SISMICHE ALLO STATO LIMITE ULTIMO (NTC 2018)



## ■ Stabilità Globale (GEO)

- Approccio 1 - Combinazione 2 **(M2+R2+Kh+Kv)**
- *Fattore parziale Earth Resistance  $\gamma_r = 1.2$*

## ■ Stabilità Interna (STR)

- Approccio 2 **(M1+R3+Kh+Kv)**
- *Ex. Scorrimento gabbione-gabbione*

## ■ Scorrimento, Ribaltamento e Capacità Portante (GEO)

- Approccio 2 **(M1+R3+Kh+Kv)**
- *Fattore parziale Earth resistance e Bearing Capacity  $\gamma_r = 1.0$ ; Sliding  $\gamma_r = 1.2$*



# CALCOLO PARAMETRI SISMICI (www.geostru.com)

## 1 – LOCALIZZAZIONE GEOGRAFICA

Via	<input type="text" value="Kennedy"/>	n°	<input type="text" value="10"/>
Comune	<input type="text" value="Zola Predosa"/>	Cap	<input type="text" value="40069"/>
Provincia	<input type="text" value="BO"/>	<input type="button" value="Cerca"/>	

**WGS84 (°)**

Latitudine	<input type="text"/>	<input type="button" value="Cerca"/>
Longitudine	<input type="text"/>	

Isole



# CALCOLO PARAMETRI SISMICI (www.geostru.com)

## 2 – CLASSE EDIFICIO E VITA NOMINALE

**CU = 1**

Stato Limite	Tr [anni]	a <sub>g</sub> [g]	F <sub>o</sub>	T <sub>c</sub> * [s]
Operatività (SLO)	30	0.053	2.487	0.257
Danno (SLD)	50	0.066	2.493	0.270
Salvaguardia vita (SLV)	475	0.163	2.390	0.307
Prevenzione collasso (SLC)	975	0.207	2.419	0.316
Periodo di riferimento per l'azione sismica:	50			

 Cat. Sottosuolo C  
 Cat. Topografica T1

	SLO	SLD	SLV	SLC
SS Amplificazione stratigrafica	1,50	1,50	1,47	1,40
CC Coeff. funz categoria	1,64	1,62	1,55	1,54
ST Amplificazione topografica	1,00	1,00	1,00	1,00

Acc.ne massima attesa al sito [m/s<sup>2</sup>] ↔ 0.6

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.000	0.046	0.091	0.000
kv	--	0.023	0.046	--
Amax [m/s <sup>2</sup> ]	0.783	0.969	2.350	2.837
Beta	--	0.470	0.380	--



# CALCOLO PARAMETRI SISMICI (www.geostru.com)

## 3 – CATEGORIE SOTTOSUOLO & TOPOGRAFICA

- Muri di sostegno
  Paratie  
 Stabilità dei pendii e fondazioni

Muri di sostegno che non sono in grado di subire spostamenti.

H (m)

us (m)

Categoria sottosuolo

Categoria topografica

	SLO	SLD	SLV	SLC
<b>Ss *</b> Amplificazione stratigrafica	<input style="width: 50px;" type="text" value="1,80"/>	<input style="width: 50px;" type="text" value="1,80"/>	<input style="width: 50px;" type="text" value="1,80"/>	<input style="width: 50px;" type="text" value="1,65"/>
<b>Cc *</b> Coeff. funz categoria	<input style="width: 50px;" type="text" value="2,47"/>	<input style="width: 50px;" type="text" value="2,40"/>	<input style="width: 50px;" type="text" value="2,25"/>	<input style="width: 50px;" type="text" value="2,22"/>
<b>St *</b> Amplificazione topografica	<input style="width: 50px;" type="text" value="1,40"/>			



## COEFFICIENTI SISMICI

A meno di analisi dinamiche avanzate, l'analisi della sicurezza dei muri di sostegno in condizioni sismiche può essere eseguita mediante i metodi pseudostatici e i metodi degli spostamenti; l'analisi pseudostatica si effettua mediante i metodi dell'equilibrio limite.

I **coefficienti sismici**  $k_H$  e  $k_V$  sono calcolati mediante le espressioni:

$$k_H = \beta_m a_{\max}/g$$

$$k_V = 0.5 k_H$$

$$\blacksquare \underline{\beta_m = 0,38}$$



## ANALISI DI STABILITA' (NTC 6.3.4)

...devono essere effettuate con metodi che tengano conto della **forma** e **posizione** della **superficie di scorrimento**, dell'**assetto strutturale**, dei **parametri geotecnici** e del regime delle **pressioni interstiziali**.

...**superfici di scorrimento** cinematicamente possibili, in **numero sufficiente** per ricercare la superficie critica alla quale corrisponde il **grado di sicurezza più basso**.

Quando sussistano condizioni tali da **non consentire** una agevole **valutazione** delle **pressioni interstiziali**, le verifiche di sicurezza devono essere eseguite assumendo le **condizioni più sfavorevoli** che ragionevolmente si possono prevedere.



# MODELLI DI CALCOLO



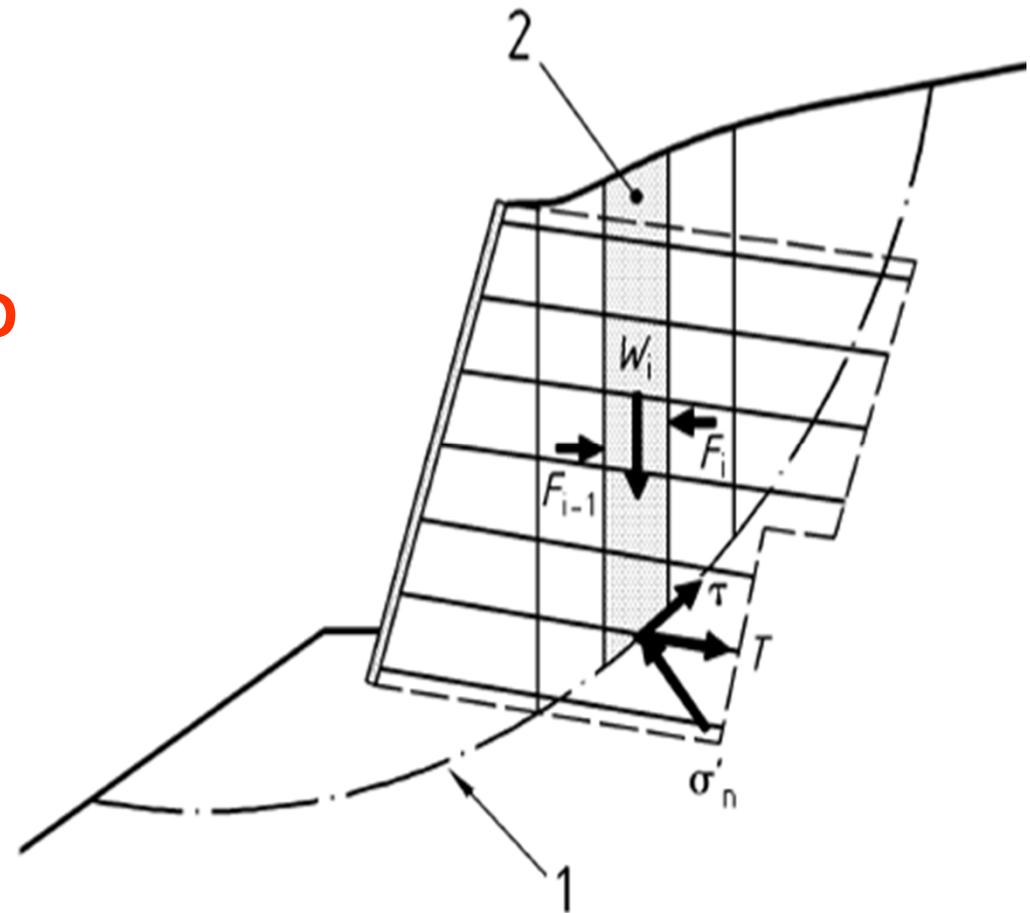
# STRUTTURE SEMPLICI o COMPLESSE?

## SEMPLICI

- 1 – TIE-BACK WEDGE METHOD
- 2 – COHERENT GRAVITY METHOD
- 3 – SIMPLIFIED METHOD
- 4 – TWO-PART WEDGE METHOD

## COMPLESSE

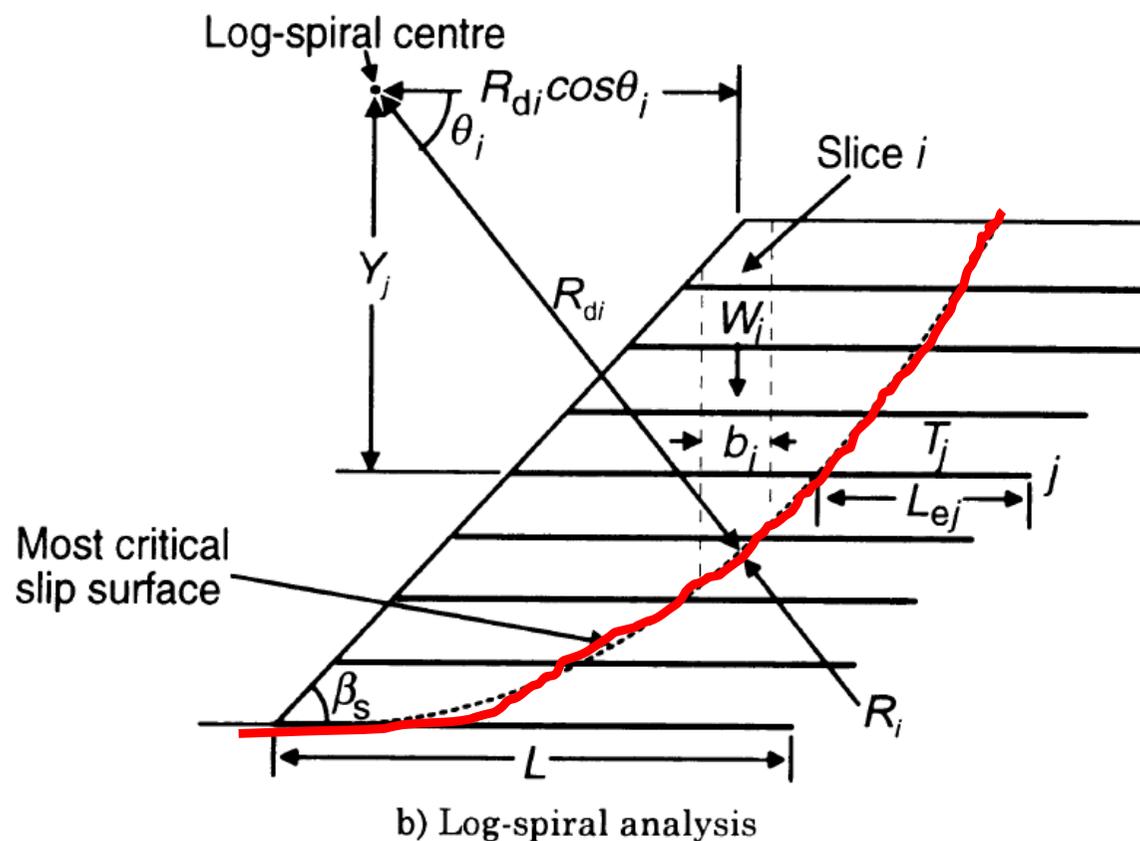
- 1 – CIRCULAR SLIP ANALYSIS
- 2 – LOG-SPIRAL SLIP ANALYSIS



**SLICES METHOD – LOG-SPIRAL SURFACE (1986)**

Questo metodo permette di ottenere risultati più accurati delle analisi di superfici circolari.

Tuttavia le analisi condotte su superfici circolari sono matematicamente più semplici e conducono a risultati che si discostano non più del 5% dai risultati ottenuti per via “ESATTA” con il modello log-spirale.



## QUALE MODELLO E' MIGLIORE?

Il progettista può scegliere tra un largo numero di Modelli per analizzare le terre rinforzate, ma (come recita BS 8006):

- 1 – La indeterminatezza nella definizione dei parametri dei materiali ha un **peso maggiore rispetto alla differenze generate da diversi tipi modello di calcolo**, il quale più essere di secondaria importanza nella maggior parte dei casi.
- 2 – In casi in cui il coefficiente di pressione interstiziale  **$r_u$  è maggiore di 0.15**, oppure quando la falda freatica interessa la terra rinforzata, le analisi di stabilità devono essere condotte utilizzando **modelli all'equilibrio limite**.
- 3 – Laddove le strutture siano caratterizzate da **geometrie irregolari e siano soggette a carichi concentrati** devono essere condotte **analisi su superfici di scorrimento circolari**.



# METODI ALL'EQUILIBRIO LIMITE

I modelli all'Equilibrio Limite (LE) sono basati sulla analisi delle azioni stabilizzanti e delle azioni destabilizzanti, lungo superfici di scorrimento di prova, in modo da determinare un coefficiente di sicurezza come rapporto tra le due azioni.

Per fare ciò una numerosa quantità di superfici di scorrimento vengono sottoposte ad analisi al fine di determinare il minimo coefficiente di sicurezza .

La principale differenza tra I diversi modelli all'equilibrio limite è l'insieme delle ipotesi sulla forma della superficie di scorrimento analizzata (Circolare, piana , logaritmica, etc.) e le equazioni di equilibrio che si impongono a verifica (equilibrio delle forze, dei momenti, o di entrambi).



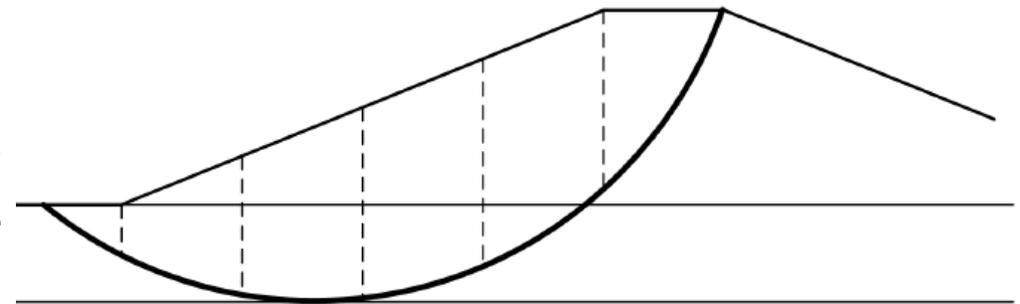
## FORMA DELLE SUPERFICI

La superficie scelta dipende dalle caratteristiche geometriche e stratigrafiche del caso in esame.

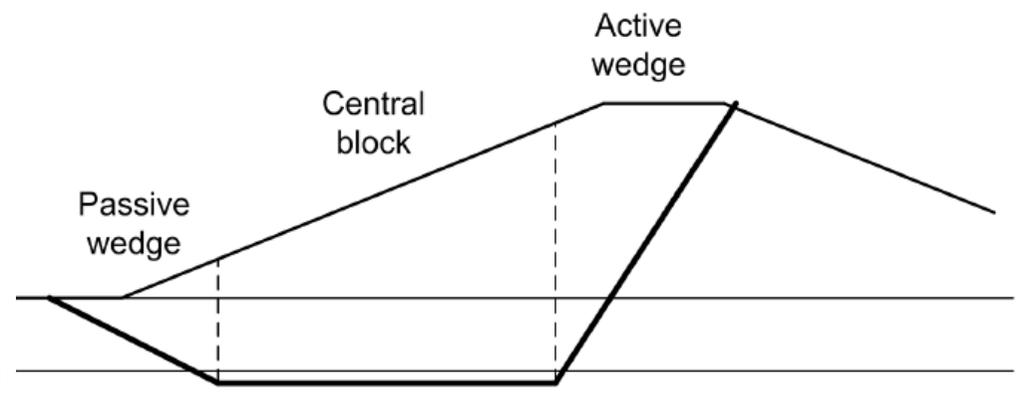
CIRCOLARE => le rotture in materiali omogenei si osservano spesso a propagazione circolare

WEDGE => appropriato quando le superfici critiche si sviluppano lungo un tratto di materiale particolarmente debole circondato da materiale più resistente

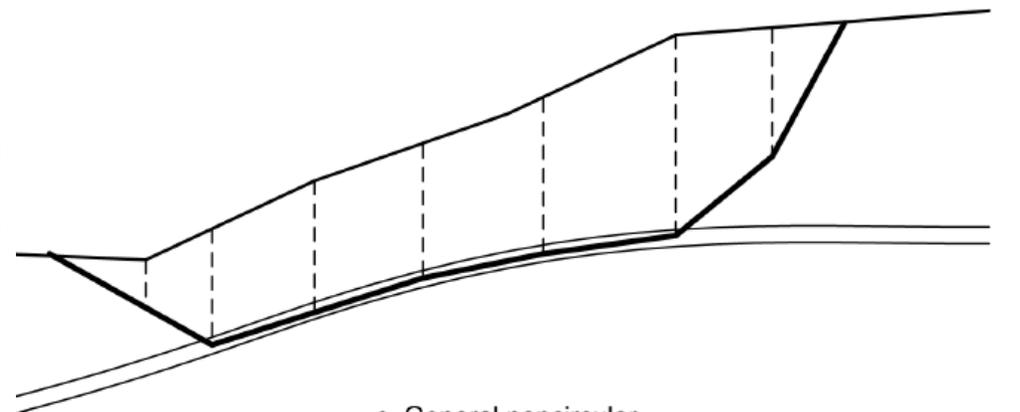
NON-CIRCOLARE => quando le rotture si verificano lungo superfici irregolari che non sono riconducibili a wedge o a circolari.



a. Circular



b. Wedge



c. General noncircular



# METODI ALL'EQUILIBRIO LIMITE

I metodi più comunemente utilizzati nella pratica sono applicabili a superfici di scorrimento circolari e/o non circolari e rappresentano diverse possibili soluzioni del metodo dell'Equilibrio Limite Generale.

I vari metodi si differenziano tra loro per le assunzioni sulle forze interconco e per l'uso delle forze e/o dei momenti nel calcolo dell'equilibrio statico.

- 1 - Fellenius (o Ordinario, 1936)**
- 2 - Bishop (1955)**
- 3 - Janbu (1956)**
- 4 - Morgenstern and Price (1965)**
- 5 - Spencer (1967)**
- 6 - Sarma (1973)**



# CONFRONTO TRA METODI ALL'EQUILIBRIO LIMITE

I risultati ottenuti indicano un buon accordo tra i diversi metodi e, se si esclude il metodo ordinario dei conci che fornisce risultati non soddisfacenti, **la differenza nei valori del fattore di sicurezza risulta dell'ordine del 4% in tutti i casi analizzati.**

Il fattore di sicurezza rispetto all'equilibrio dei momenti  $F_m$  è scarsamente influenzato dalle assunzioni sulle forze interconco.

Le differenze tra il fattore di sicurezza ottenuto col metodo di Bishop e quello ottenuto col metodo di Morgenstern & Price sono inferiori allo 0.4%.

**Bishop e Janbu sono i modelli preferibili per la loro semplicità**



# METODI EQUILIBRIO LIMITE IN MACSTARS W

**Global Stability Analysis** [X]

Calculation Method  
 Rigid [v]

Surface  
 Circular [v]  
 Random Polygonal  
 Circular

Janbu  
 Bishop

Termination Points [m]  
 First abscissa: 4      Second abscissa: 8

Range of Surfaces Termination Points [m]  
 First Abscissa: 15      Second Abscissa: 21

< Indietro    Avanti >    Annulla    ?



## CARATTERISTICHE DI MACSTARS W

E' un software concepito per la progettazione di strutture in terra rinforzata e gabbioni ed analisi di stabilità dei pendii, che contempla tutte le combinazioni possibili di coefficienti riportate nel Nuovo Testo Unico per le Costruzioni 2008/18

- stratigrafie qualunque
- presenza d'acqua
- accelerazioni sismiche
- Sovraccarichi
- Tiranti
- rinforzi di ogni tipo e rigidità
- stabilità interna
- stato tensionale indotto nei rinforzi
- verifica di stabilità come opera di sostegno
- stabilità globale
- cedimenti del terreno di fondazione

CONSULENTI

Prof. Ghionna (Politecnico di Torino)

Studio Geotecnico Italiano

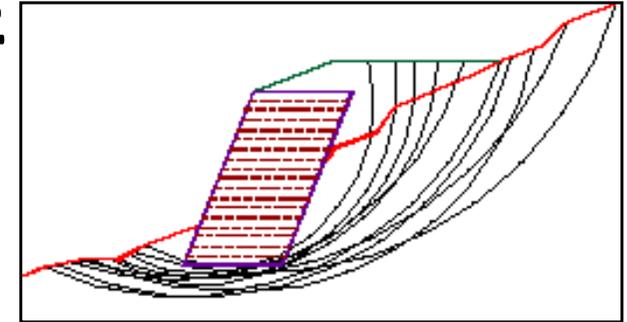
Prof. Bathrust (Canada)



## TIPI DI VERIFICHE

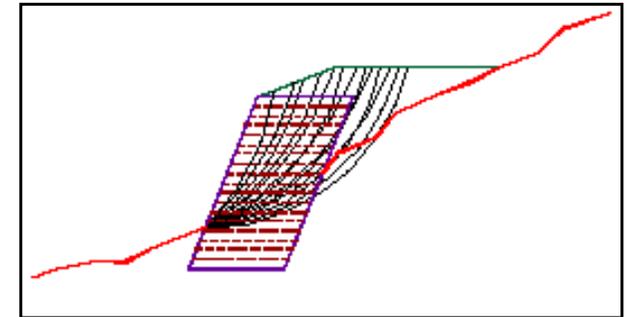
### STABILITA' GLOBALE

- sulle possibili superfici di scorrimento che interessano l'opera nel suo complesso



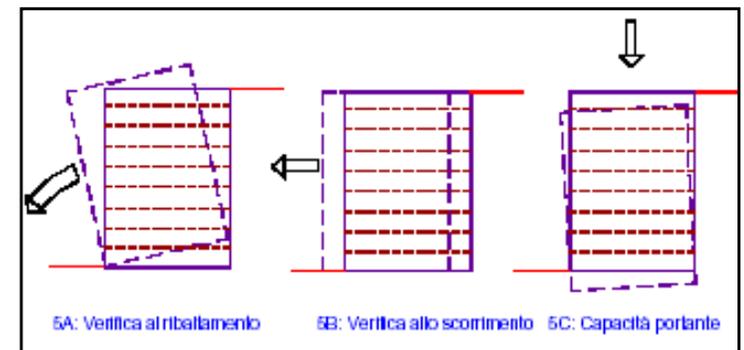
### STABILITA' INTERNA

- sulle possibili superfici di scorrimento che interessano la sola opera di sostegno



### OPERA DI SOSTEGNO

- Verifica al ribaltamento
- Verifica allo scorrimento
- Verifica della capacità portante



# DEFINIZIONE DATI DI INPUT

**Combinazione di carico**

Lista Combinazioni

- A1 + M1 + R1
- A1 + M1 + R3
- A2 + M2 + R2**
- EQU + M2 + Kh±Kv
- EQU + M2 + R1
- M1+R1+ Kh±Kv
- M2+R2+ Kh±Kv
- M2+R3+ Kh±Kv

**Configurazione carichi distribuiti**

Sigla: P1

descrizione:

Intensità [KPa]: 20      Inclinazione [°]: -10

Estensione [m]:  
 Da: 20.1      A: 21.9

Classe Moltiplicatore: Permanente - favorevole

- Permanente - favorevole
- Permanente - sfavorevole
- Permanente non strutturale - favorevole
- Permanente non strutturale - sfavorevole**
- Variabile - favorevole
- Variabile - sfavorevole

**Configurazione terreno**

Sigla: T1

descrizione: Terreno di Base

Parametri elastici per calcolo cedimenti

Coazione [KPa]: 20      Angolo d'attrito [°]: 24      Ru: 0

Classe Moltiplicatore per attrito: Coeff. Parziale - tangente dell'angolo di resistenza a taglio

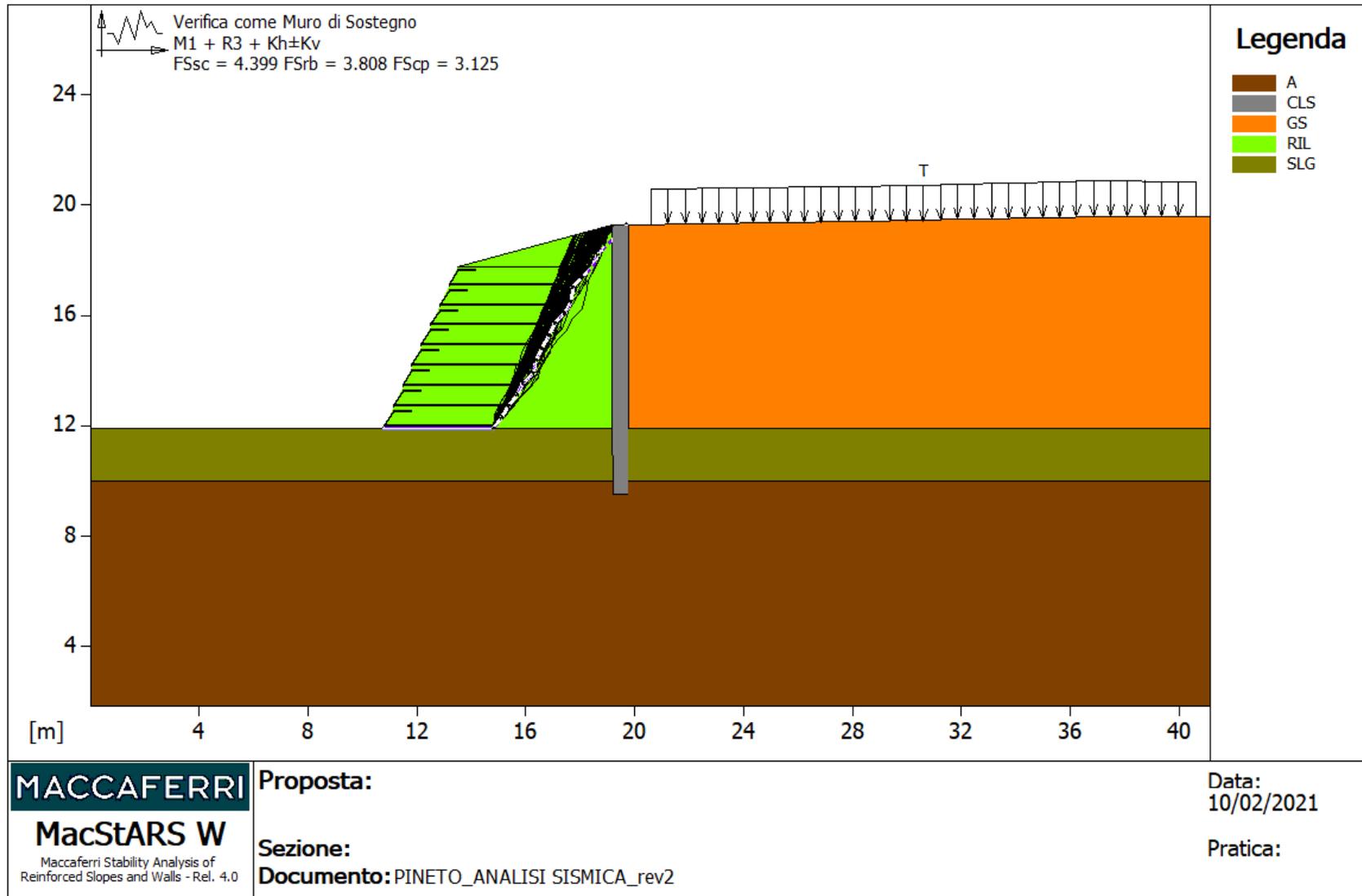
Peso specifico [KN/m³]:  
 Saturo: 19      Secco: 18

Classe Moltiplicatore: Coeff. Parziale - Peso dell'unità di volume - sfavorevole

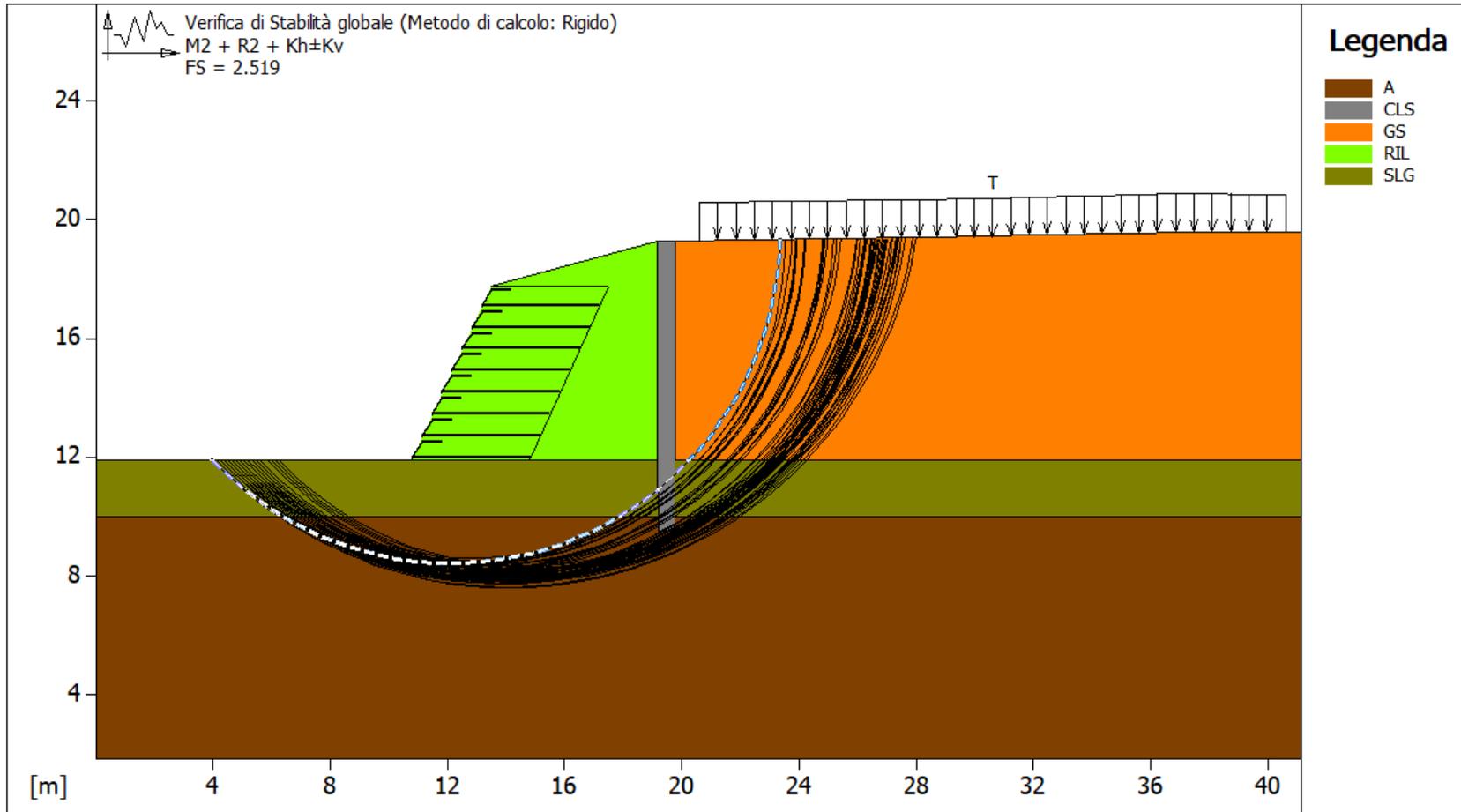
- Coeff. Parziale - Peso dell'unità di volume - sfavorevole
- Coeff. Parziale - Peso dell'unità di volume - sfavorevole**



# VERIFICA COME OPERA DI SOSTEGNO



# VERIFICA STABILITA' GLOBALE



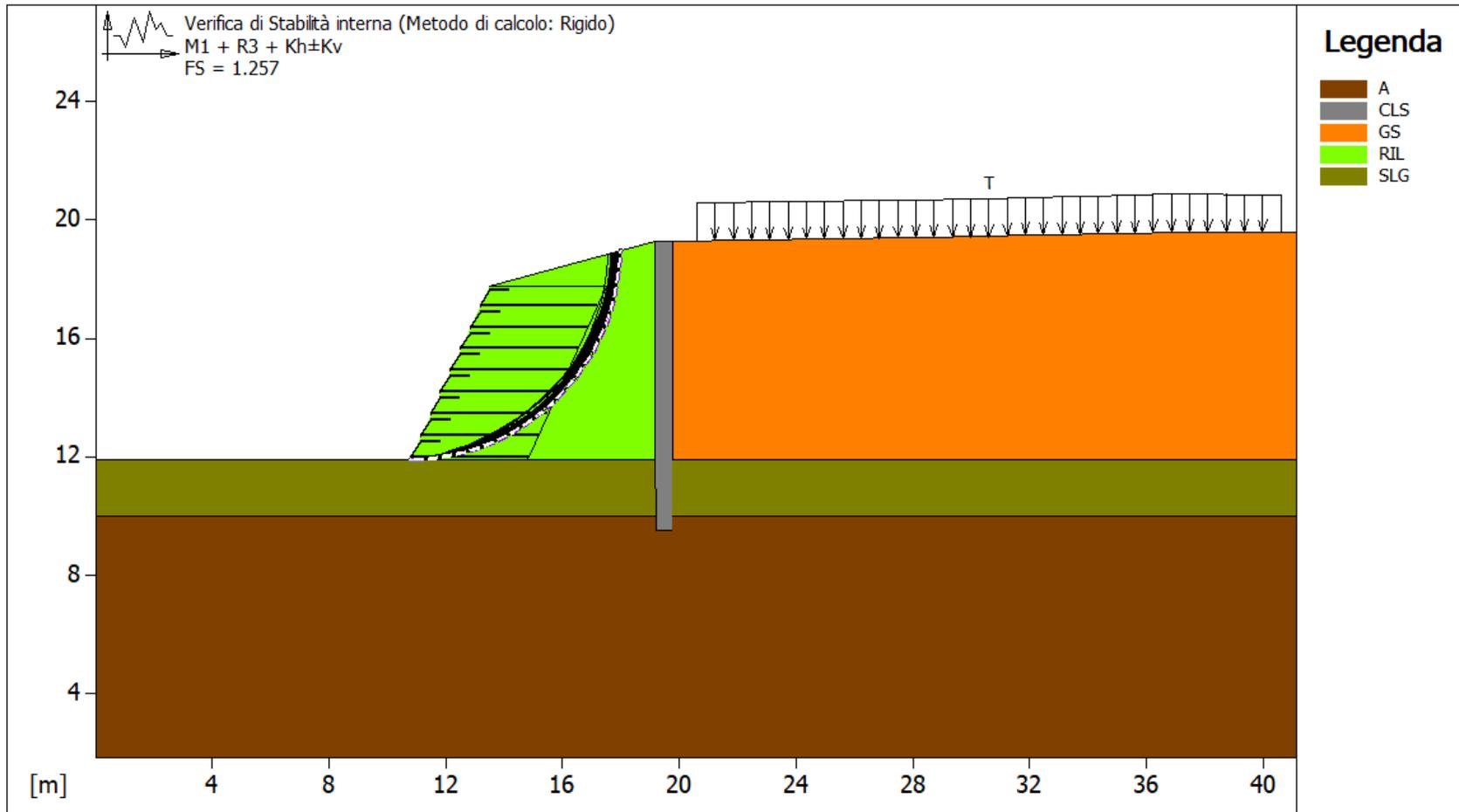
**MACCAFERRI**  
**MacStARS W**  
 Maccaferri Stability Analysis of  
 Reinforced Slopes and Walls - Rel. 4.0

**Proposta:**  
**Sezione:**  
**Documento:** PINETO\_ANALISI SISMICA\_rev2

**Data:**  
 10/02/2021  
**Pratica:**



# VERIFICA STABILITA' INTERNA



MACCAFERRI

MacStARS W

Maccaferri Stability Analysis of Reinforced Slopes and Walls - Rel. 4.0

Proposta:

Sezione:

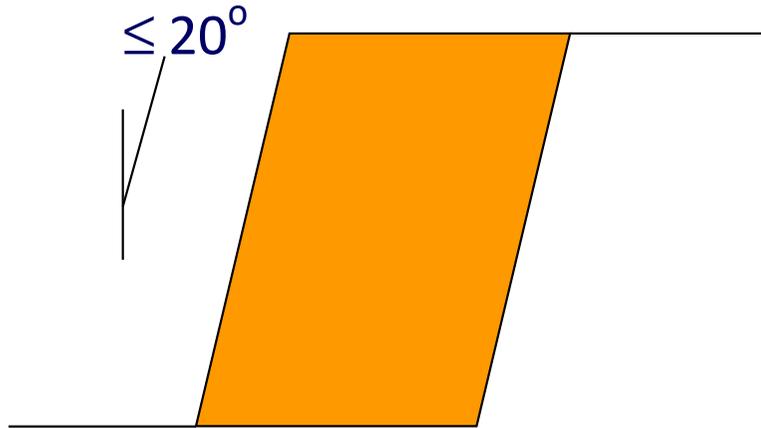
Documento: PINETO\_ANALISI SISMICA\_rev2

Data:  
10/02/2021

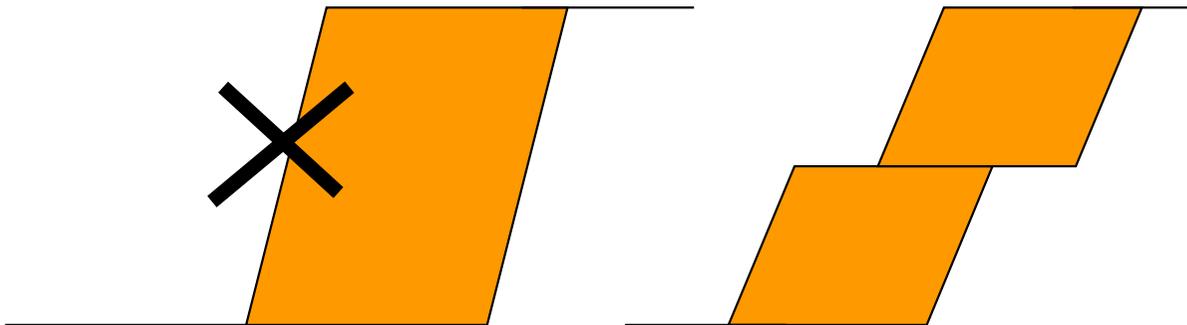
Pratica:



## INDICAZIONI PROGETTUALI



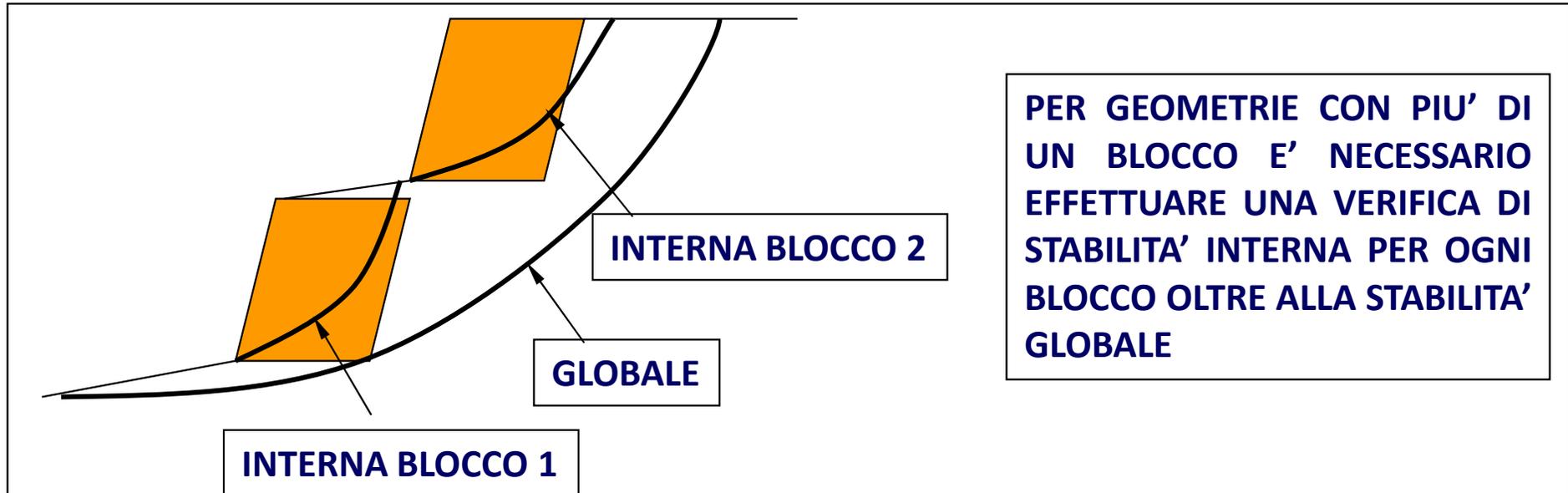
Quando possibile, sono raccomandate scarpate con inclinazione inferiore a  $70^\circ$



Per strutture di altezza superiore a 10-12 m è opportuno creare berme intermedie



# INDICAZIONI PROGETTUALI



---

# QUALI SONO LE CAUSE DI POSSIBILI CEDIMENTI DELLE STRUTTURE IN TERRA RINFORZATA?



## 3 PROBLEMI PRINCIPALI

### 1. ACQUA

- Riduce la coesione dei terreni

### 2. ACQUA

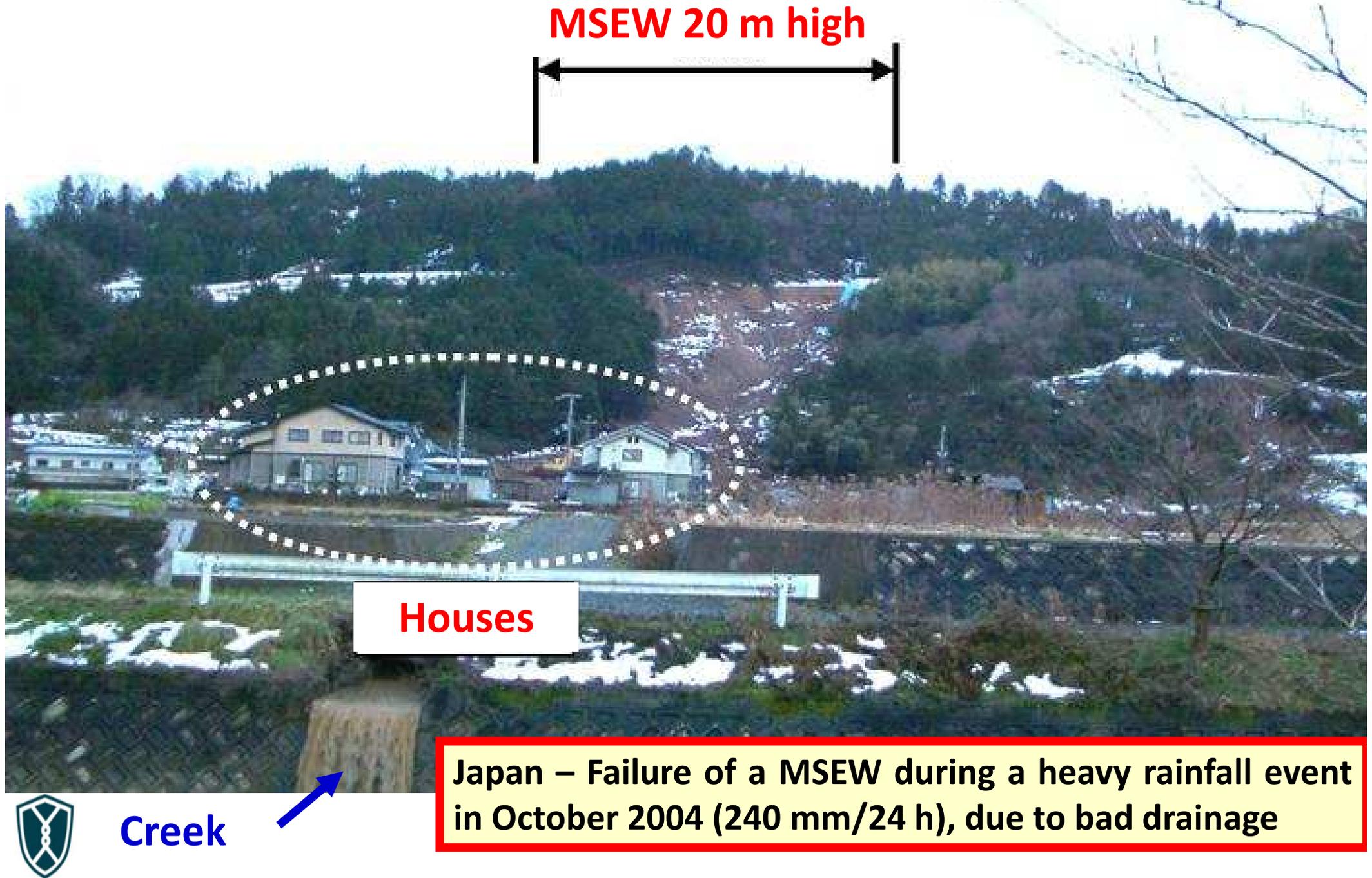
- Aumenta le pressioni interstiziali

### 3. ACQUA

- Può provocare erosioni al piede



# ERRORI DA EVITARE



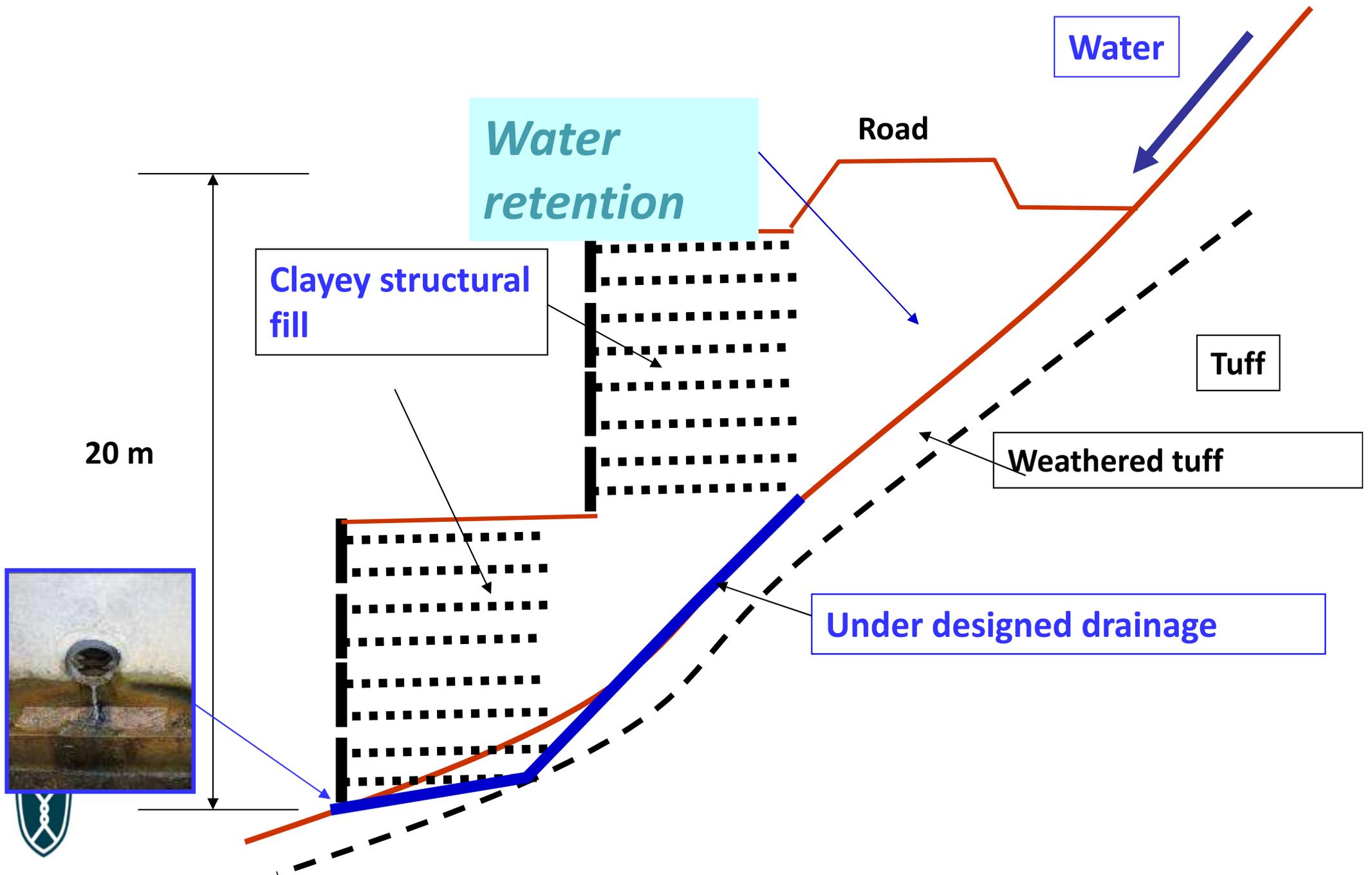
MSEW 20 m high

Houses

Creek

Japan – Failure of a MSEW during a heavy rainfall event in October 2004 (240 mm/24 h), due to bad drainage







# Cedimento di un MSEW (Italia) per erosione al piede



25/09/2009

# Cedimento di un MSEW (Italia) per erosione al piede



26/09/2009

# Cedimento di un MSEW (Italia) per erosione al piede



28/09/2009

## 3 PROBLEMI PRINCIPALI

### 1. ACQUA

- Riduce la coesione dei terreni

### 2. ACQUA

- Aumenta le pressioni interstiziali

### 3. ACQUA

- Può provocare erosioni al piede

**▪.. E UN NON ADEGUATO CONTROLLO QUALITA' IN FASE DI COSTRUZIONE**



**E' un problema del rinforzo o di un assenza/mancanza di Controllo Qualità durante l'installazione?**



# ERRORI DA EVITARE





# GRAZIE

Per informazioni: [r.uccellini@it.maccaferri.com](mailto:r.uccellini@it.maccaferri.com)

**MACCAFERRI**