

**ITINERARIO INTERNAZIONALE E78 S.G.C. GROSSETO – FANO**  
**Tratto Selci Lama (E45) – S. Stefano di Gaifa**  
**Adeguamento a 2 corsie della Galleria della Guinza (lotto 2)**  
**e del tratto Guinza – Mercatello Ovest (lotto 3)**  
**1° stralcio**

**PROGETTO DEFINITIVO**

cod. AN58

**PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI**

**PROGETTISTI:**

*Ing. VINCENZO MARZI*  
*Ordine Ingegneri di Bari n. 3594*

**IL GEOLOGO**

*Geol. FRANCESCO MATALONI*  
*Ordine Geologici del Lazio n. 725*

**IL RESPONSABILE DEL S.I.A.**

*Arch. GIOVANNI MAGARO'*  
*Ordine Architetti di Roma n. 16183*

**COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE**

*Geom. FABIO QUONDAM*

**VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO**

*Dott. ing. ACHILLE DEVITOFRANCESCHI*

PROTOCOLLO

DATA:

**OPERE D'ARTE MAGGIORI**

**Imbocco lato Umbria**

Relazione di calcolo - Terra rinforzata

**CODICE PROGETTO**

PROGETTO      LIV. PROG.      N. PROG.

**L0702M D 1801**

**NOME FILE**

**T00GA01OSTRE02B**

**REVISIONE**

**CODICE ELAB.**

**T00GA01OSTRE02**

**B**

D					
C					
B	AGGIORNAMENTO	Luglio 2019			
A	EMISSIONE	Giugno 2018			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	3
3. DESCRIZIONE DELLE OPERE.....	4
4. CALCOLI DI DIMENSIONAMENTO .....	7
4.1 SEZIONE DI VERIFICA .....	7
4.2 APPROCCIO NORMATIVO.....	7
4.3 METODI DI ANALISI E CODICE DI CALCOLO.....	10
4.4 AZIONI SISMICHE.....	16
4.5 MODELLO GEOTECNICO.....	17
4.6 SUPERFICIE PIEZOMETRICA.....	19
4.7 CARICHI .....	19
4.8 CARATTERISTICHE DEI RINFORZI .....	19
4.9 RISULTATI DELLE ANALISI .....	25
ALLEGATO DI CALCOLO .....	27

## 1. PREMESSA

Il presente documento ha per oggetto la verifica dei ritombamenti dell'imbocco lato Umbria della galleria Guinza previsti nell'ambito del progetto definitivo per l'adeguamento a due corsie del tratto della Galleria della Guinza (Lotto 2°) e del Tratto Guinza – Mercatello Ovest (Lotto 3°) dell'itinerario internazionale E78 S.G.C. Grosseto - Fano.

L'intervento è localizzato tra le Regioni Umbria e Marche, nei Comuni di Parnacciano (PG) e Mercatello sul Metauro (PU). Più dettagliatamente, il 2° Lotto comprende la Galleria della Guinza, mentre il 3° Lotto comprende tutte le opere dall'uscita della Guinza sul lato marchigiano, fino al termine dell'intervento.

La soluzione progettuale adottata per l'esecuzione del ritombamento lato Umbria prevede la costruzione di un rilevato rinforzato mediante la presenza di griglie metalliche.

L'opera va inoltre a riambientare la paratia in micropali di imbocco della galleria.

## 2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- DM 17.01.2018 – Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”
- CIRCOLARE 21.01.2019 n.7 - Istruzioni per l’applicazione dell’“Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”
- DM 14.01.2008 – Norme tecniche per le costruzioni
- CIRCOLARE n.617 del 2.2.2009 – Istruzioni per l’applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al DM.14.01.2008.

### 3. DESCRIZIONE DELLE OPERE

La soluzione progettuale adottata per l'esecuzione del ritombamento lato Umbria prevede la costruzione di un rilevato rinforzato mediante la presenza di griglie metalliche.

L'opera va inoltre a riambientare la paratia in micropali di imbocco della galleria.

Nelle seguenti immagini vengono illustrate la planimetria e le sezioni tipologiche degli interventi in progetto.

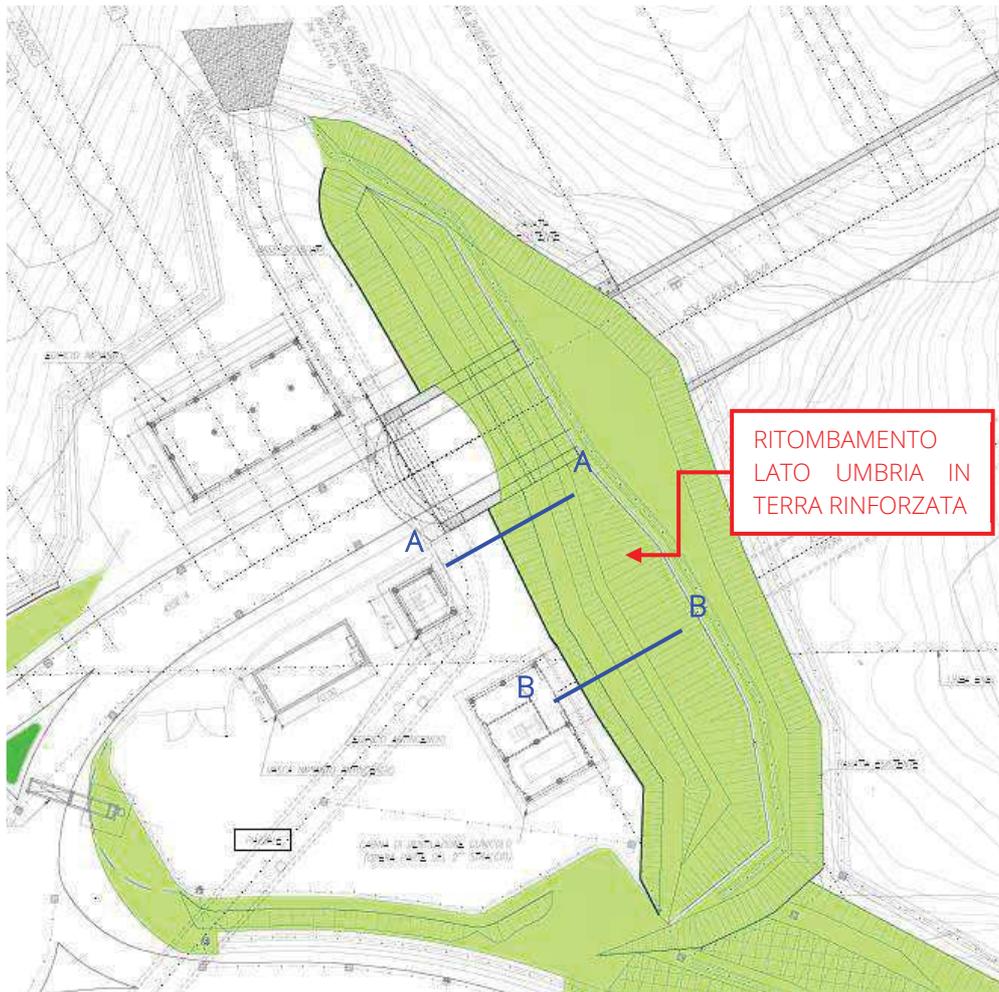


Figura 3.1 - Stralcio planimetrico dell'intervento.

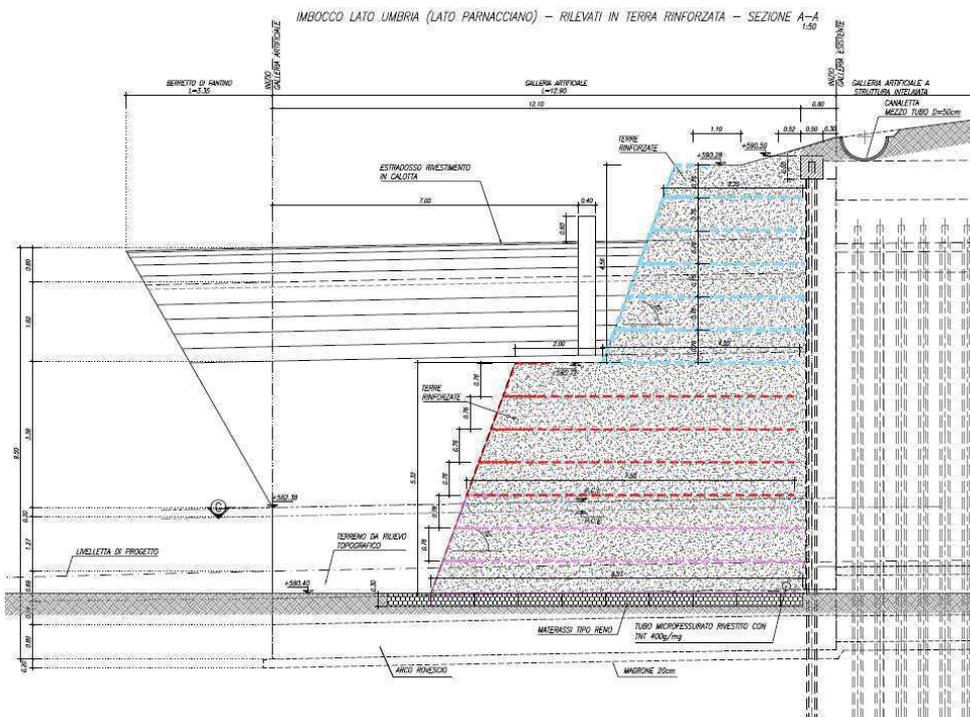


Figura 3.2 – Sezione tipologica A-A.

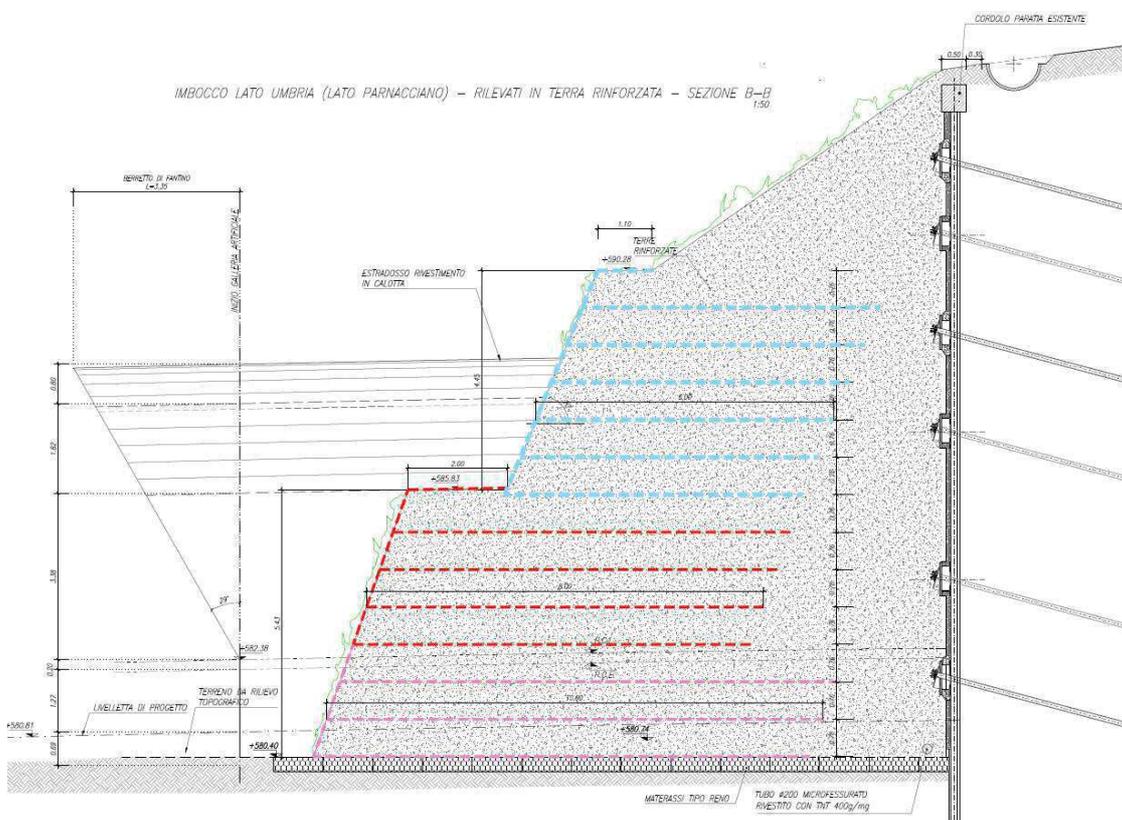


Figura 3.3 - Sezione tipologica B-B.

Il rilevato in terra rinforzata sarà realizzato da una struttura tipo Terramesh Verde con paramento a vista inclinato di 70° rispetto all'orizzontale, costituito da strati alternati di terre fornite a piè d'opera di idonee caratteristiche geotecniche e di griglie in rete metallica a doppia torsione con maglia esagonale, tipo 8×10mm, tessuta con filo d'acciaio, protetta con Galmac e un ulteriore rivestimento polimerico.

Sul fronte è previsto l'inserimento di una berma con funzione rompi-tratta di ampiezza  $L=2.0\text{m}$ .

L'opera in terra rinforzata presenta uno sviluppo lineare del fronte di lunghezza pari a circa 78m, valutati sul ciglio sommitale del paramento.

Il manufatto presenta un'altezza massima di ca 10.0 m, ed è costituito dalla sovrapposizione di pacchetti rinforzati di spessore 76cm (finito dopo costipamento).

I rinforzi sono caratterizzati da lunghezze di ancoraggio variabili fra 3.0m e 10.0m e da resistenza di picco  $R_p = 50\text{kN/m}$ .

Come da immagini precedenti, sono previsti n.2 tipologici.

Per i tratti di ritombamento ad ovest della galleria Guinza e a cavallo della galleria stessa, si prevede il ricorso alla sezione tipologica A-A, altrove alla sezione tipologica B-B.

La sezione tipologica A-A viene utilizzata dunque, dove il paramento della terra rinforzata è stato addossato alla berlinese di imbocco per ottimizzare il layout del piazzale e gli ingombri delle strutture: in tal caso, come evidente dalla Figura 3.2, le griglie vengono estese lungo tutta l'altezza del rilevato rinforzato fino ai micropali della berlinese.

Per la sezione tipologica B-B, invece, il fronte della terra rinforzata è più avanzato rispetto alla berlinese di imbocco: in tal caso, come evidente dalla Figura 3.3, i teli di ancoraggio non vengono protratti fino alla berlinese.

Sul fronte della terra rinforzata viene predisposto un tessuto in poliestere a maglia in catena con inserzione di trama, con funzione di ritentore della componente fine del terreno di riempimento e antierosiva fino alla crescita delle essenze vegetali, e delle costolature di irrigidimento, che garantiscono la corretta inclinazione e favoriscono la compattazione in prossimità del paramento.

Il rinverdimento finale del fronte dell'opera assume un'importanza notevole, rendendo il manufatto sicuramente più omogeneo, gradevole e perfettamente inserito nel contesto ambientale circostante, oltre a proteggere dal dilavamento l'intero paramento frontale.

Per ulteriori dettagli si rimanda alla consultazione degli elaborati grafici allegati al progetto.

## 4.CALCOLI DI DIMENSIONAMENTO

### 4.1 SEZIONE DI VERIFICA

Ai fini della definizione delle sezioni di verifica, è stato condotto un esame di dettaglio delle condizioni geometriche (geometria del rilevato in terra rinforzata e, quindi, altezze di progetto; inclinazione del pendio a tergo), della configurazione delle griglie di rinforzo, delle caratteristiche stratigrafiche (condizioni geotecniche dei terreni di imposta e spessore dei litotipi coinvolti), delle condizioni idrauliche (profondità della falda), dei carichi sollecitanti.

Tenuto conto della sostanziale costanza per gran parte dello sviluppo dell'opera delle condizioni di carico, del modello stratigrafico, meccanico e idraulico ipotizzato, gli elementi di maggior criticità sono risultati l'altezza del paramento dell'opera e la distanza intercorrente con la paratia in micropali dell'imbocco, che regola la lunghezza di stesa delle griglie.

Le analisi di dimensionamento della terra rinforzata, dunque, sono state effettuate riferendosi alla sezione tipologica B-B, caratterizzata al pari della sezione tipo A-A dalla massima altezza fuoriterra dell'opera, pari a ca 10.0m, ma contraddistinta dalla presenza di una maggior distanza intercorrente fra code delle griglie e paratia di imbocco.

Le condizioni prese a riferimento per la sezione di verifica sono quelle complessivamente più critiche per la stabilità: essa risulta rilevante e dimensionante per l'intero rilevato rinforzato ed i risultati delle analisi, dunque, sono da intendersi applicabili ed estrapolabili per garantire condizioni di sicurezza per l'opera nel suo complesso.

Di seguito si riporta lo schema di rinforzo adottato a partire dalla testa della terra rinforzata, con le caratteristiche principali delle griglie di rinforzo in termini di lunghezze di ancoraggio e resistenze a trazione.

Sezione di calcolo	Numero di strati	Altezza pacchetto [m]	Resist. di picco (Rp) [kN/m]	Lunghezza d'ancoraggio [m]
B-B (H=9.9m)	6	4.56	$R_p \geq 50.0 \text{ kN/m}$	6.0
	4	3.04	$R_p \geq 50.0 \text{ kN/m}$	8.0
	3	2.28	$R_p \geq 50.0 \text{ kN/m}$	10.0

Tabella 4.1 – Caratteristiche dei pacchetti rinforzati.

### 4.2 APPROCCIO NORMATIVO

Le analisi sono state eseguite conformemente al decreto 17 Gennaio 2018 "Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni" (NTC 2018), con il metodo degli stati limite ultimi SLU (sicurezza nei confronti della rottura).

Le analisi geotecniche vengono eseguite relativamente ai seguenti stati limite di verifica:

- o VERIFICHE STATICHE SLU;
- o VERIFICHE SISMICHE SLV.

Le analisi statiche SLU sono state condotte coerentemente con la combinazione “fondamentale” delle azioni (cfr.§2.5.3 di NTC 2018), di seguito riepilogata.

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Per le analisi connesse alle azioni sismiche (SLV), si è impiegata la combinazione “sismica” seguente (cfr.§2.5.3 di NTC 2018).

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

Le verifiche agli SLU, statici e sismici, si intendono soddisfatte se avviene il rispetto della condizione  $E_d \leq R_d$ , con  $E_d$  valore di progetto dell'azione o del suo effetto e  $R_d$  valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

Secondo il D.M. 17/01/2018 sono definiti muri di sostegno anche le strutture miste, che esplicano la funzione di sostegno per la presenza di particolari elementi di rinforzo e collegamento, come, appunto, le terre rinforzate in esame.

La valutazione del grado di sicurezza avviene dunque con riferimento a quanto disposto nell'impianto normativo per i muri di sostegno ai § 6.5.3. 1.1, §6.5.2 e §6.8.2 per le analisi statiche e al § 7.11.6.2 per quel che concerne le verifiche sismiche.

Come espressamente richiesto dalla normativa di riferimento al §6.5, le verifiche geotecniche di stabilità sono state condotte con riferimento ai seguenti meccanismi di stato limite ultimo:

- SLU di tipo geotecnico (GEO)
  - o stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno;
  - o scorrimento sul piano di posa;
  - o collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno;
  - o ribaltamento.
- SLU di tipo strutturale (STR)
  - o sfilamento (*pull out*)
  - o raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali.

Tali analisi sono riconducibili a tre tipi di verifica:

- o **Stabilità interna** (raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali e sfilamento): verifica della lunghezza necessaria e della spaziatura degli elementi di rinforzo tali da garantire che il rilevato rinforzato sia sufficientemente compatto e resistente alle azioni interne provocate dai pesi e dai carichi esterni. Si sono investigate superfici rotazionali che partendo dal piede di valle dell'opera, si estendono verso monte fino ad incontrare il

profilo del terreno, intersecando totalmente o anche solo parzialmente l'ammasso rinforzato. Il *pull-out* consiste nello sfilamento del rinforzo per eccesso di trazione.

- o **Stabilità globale** (stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno): verifica delle dimensioni della massa strutturale nei confronti di scivolamenti esterni all'opera.
- o **Stabilità come muro di sostegno** (scorrimento sul piano di posa, collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno, ribaltamento): in tale verifica l'opera viene considerata come un muro monolitico, formato da blocchi che compongono l'opera stessa, che sostiene le spinte del terreno che si trova a monte. La verifica dell'opera come muro di sostegno si articola a sua volta nelle classiche verifiche per muri di sostegno: verifica al ribaltamento, verifica allo scorrimento, verifica per capacità portante.

Le verifiche di stabilità interna e "come muro di sostegno" vengono condotte congruentemente all'"Approccio 2".

L'"Approccio 2" impiega la famiglie di combinazioni A1+M1+R3 per il caso statico SLU, M1+R3 per quello sismico SLV, in cui i coefficienti amplificativi delle azioni sono unitari.

Per le verifiche di stabilità globale dell'opera è da impiegarsi l'Approccio Progettuale 1, **Combinazione 2** (A2+M2+R2 per il caso statico SLU, M2+R2 per quello sismico SLV, in cui i coefficienti amplificativi delle azioni sono unitari), in ottemperanza a quanto prescritto dalle norme al §6.5.3.1.1 e §7.11.6.2.

È da sottolineare che l'impiego dei coefficienti M2 nelle verifiche di stabilità globale sismiche SLV costituisca un'assunzione a vantaggio di sicurezza rispetto a quanto richiesto dalle NTC2018, che prevedono nelle analisi sismiche l'utilizzo dei parametri geotecnici con il loro valore caratteristico  $X_k$  (cfr. § 7.11.4 di NTC2018).

Nelle analisi si è tenuto conto dei coefficienti parziali riportati in Tabella 4.2 e Tabella 4.3 (§6.2.3.1.1 e 6.2.3.1.2 del NTC2018) sulle azioni  $\gamma_F$  e sui parametri geotecnici  $\gamma_M$ , e di quelli operanti sulla resistenza globale del sistema opera-terreno rispettivamente per le verifiche di stabilità globale (Tabella 4.4, paragrafo 6.8.2 di NTC2018) e per le verifiche di portanza, scorrimento, ribaltamento, resistenza interna (Tabella 4.5, §6.5.3.1.1 di NTC2018).

Carichi	Effetto	Coefficiente Parziale $\gamma_F$	(A1)	(A2)
			STR	GEO
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{G1}$	1.0	1.0
	Sfavorevole		1.3	1.0
Permanenti non strutturali	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0.8	0.8
	Sfavorevole		1.5	1.3
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0.0	0.0
	Sfavorevole		1.5	1.3

Tabella 4.2 – Coefficienti parziali per le azioni  $\gamma_F$ .

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente Parziale $\gamma_M$	SLU		SLV	
			(M1)	(M2)	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_\varphi$	1.0	1.25	1.0	1.0
Coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_c$	1.0	1.25	1.0	1.0
Peso dell'unità di volume	$\gamma$	$\gamma_\gamma$	1.0	1.0	1.0	1.0

Tabella 4.3 – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno  $\gamma_M$ .

Coefficiente	(R2)	
	SLU	SLV
$\gamma_R$	1.1	1.2

Tabella 4.4 – Coefficienti parziali sul sistema geotecnico  $\gamma_R$  per le verifiche di stabilità globale.

Verifica	(R3)	
	SLU	SLV
Capacità portante della fondazione	1.4	1.2
Scorrimento	1.1	1.0
Ribaltamento	1.15	1.0
Resistenza interna (sfilamento e rottura rinforzi)	1.0	1.0

Tabella 4.5 – Coefficienti parziali sul sistema geotecnico  $\gamma_R$  per le verifiche di portanza, scorrimento, ribaltamento, resistenza interna.

Per i criteri di implementazione delle azioni sismiche si rimanda al §4.4.

#### 4.3 METODI DI ANALISI E CODICE DI CALCOLO

L'esame delle condizioni di **stabilità globale ed interna** delle strutture in terra rinforzata con rete metallica viene condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite. La valutazione dei fattori di sicurezza alla stabilità viene condotta mediante un programma di calcolo denominato **MacStars**, distribuito da *Maccaferri*, in cui la ricerca delle superfici critiche viene svolta attraverso la generazione automatica di un elevato numero di superfici di potenziale scivolamento. In particolare in questa sede si fa riferimento al metodo di BISHOP modificato che prevede l'utilizzo di superfici di scorrimento circolari e la suddivisione della massa scivolante in conci. Il criterio di rottura adottato è quello di Mohr-Coulomb.

La ricerca della superficie critica è guidata dall'utente mediante l'utilizzo di alcuni parametri geometrici quali l'estensione del tratto da cui partono le superfici, l'estensione del tratto in cui terminano le superfici, l'ampiezza dell'angolo di partenza delle superfici. Sono state generate per ciascuna modellazione 1000 superfici di ricerca.

La presenza della superficie piezometrica è definita mediante l'assegnazione di spezzate definite da punti che si riferiscono alla superficie libera della falda.

Il contributo dei teli di rinforzo viene introdotto nel calcolo solo se essi intersecano la superficie di scivolamento. La presenza del rinforzo viene modellata introducendo nel punto di intersezione tra rinforzo e superficie di scorrimento una forza orizzontale stabilizzante, diretta verso l'interno del pendio (Figura 4.1).

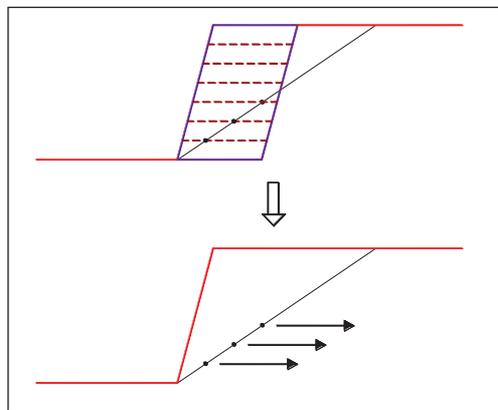


Figura 4.1 – Macstars: implementazione dei rinforzi.

La resistenza a trazione nei rinforzi può mobilizzarsi per l'aderenza tra il rinforzo stesso ed i materiali (terreno o altri rinforzi) che si trovano sopra e/o sotto.

Tale contributo viene simulato con una forza stabilizzante diretta verso l'interno del rilevato rinforzato applicata nel punto di contatto tra superficie di scorrimento e rinforzo stesso. Il modulo di tale forza è determinata scegliendo il minore tra il valore della resistenza a rottura del rinforzo ed il valore della resistenza allo sfilamento del rinforzo nel tratto di ancoraggio o nel tratto interno alla porzione di terreno instabile.

In relazione ai modelli di comportamento dei rinforzi una verifica di stabilità può essere condotta con il metodo rigido o con il metodo degli spostamenti.

Per il presente studio l'effetto dei rinforzi è stato implementato un modello di comportamento rigido. Nel modello rigido si ipotizza che un qualsiasi rinforzo, che attraversi la superficie di potenziale scorrimento analizzata, fornisca la forza di rottura del rinforzo penalizzata del relativo coefficiente di sicurezza, indipendentemente dai valori di rigidità dei rinforzi stessi. Per ciascun rinforzo devono essere verificate le seguenti condizioni:

- o deve essere garantito un ancoraggio minimo;
- o deve essere garantito lo sfilamento nella zona di ancoraggio;
- o deve essere garantito lo sfilamento all'interno della porzione di terreno instabile.

Nel primo caso una lunghezza di ancoraggio inferiore al minimo stabilito comporta l'annullamento completo della trazione nel rinforzo. Nel secondo e terzo caso la trazione nel rinforzo viene limitata al minore dei due valori di sfilamento.

Il calcolo delle forze ultime di sfilamento viene eseguito con il seguente procedimento, che si basa sulla considerazione che in tutti i punti del rinforzo sia raggiunta la condizione ultima ( $\tau_u$ ).

o **Sfilamento esterno (tratto di ancoraggio)**

La zona di ancoraggio viene suddivisa in tratti e per ciascun tratto si calcola il valore della tensione tangenziale ultima ( $\tau_u$ ) dalla seguente relazione:

$$\tau_u = f \cdot \sigma_v$$

dove:

$f$  = coefficiente di attrito totale del rinforzo sui materiali sopra e sotto nel tratto interessato, potendo essere rinforzo su rinforzo ( $f_{rr}$ ) o rinforzo su terreno ( $f_{tr}$ ).

$\sigma_v$  = tensione verticale efficace sul tratto considerato, ottenuta dalla relazione:

$$\sigma_v = (W + P_v - U) / dx$$

$W$  = peso totale della colonna di terreno sovrastante;

$P_v$  = componente verticale del carico distribuito uniforme agente in sommità;

$U$  = pressione neutra;

$dx$  = larghezza del tratto considerato.

L'integrale delle tensioni tangenziali ultime fornisce la forza di sfilamento esterna ultima del rinforzo. Al valore così determinato può essere applicato un coefficiente di sicurezza definito dall'utente.

I coefficienti di sfilamento  $f$  derivano dai risultati delle prove di pullout realizzate da Maccaferri su rinforzi in rete metallica doppia torsione presso 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.

Dai test succitati sono stati ricavati i seguenti valori dei coefficienti di sfilamento  $f$  del Terramesh:

ARGILLA	LIMO	SABBIA	GHIAIA
0.3	0.5	0.65	0.9

Tabella 4.6 – Coefficienti di sfilamento  $f$  del Terramesh.

Per maggiori dettagli vedasi la TN-DT-031

o **Sfilamento interno**

Nel caso di rinforzi secondari il procedimento per il calcolo della forza di sfilamento ultima è identico a quella dello sfilamento esterno.

La lunghezza del rinforzo all'interno del blocco instabile viene suddivisa in tratti e per ciascun tratto si calcola il valore della tensione tangenziale ultima ( $\tau_u$ ) dalla seguente relazione:

$$\tau_u = f \cdot \sigma_v$$

dove il significato dei simboli è il medesimo del caso precedente. L'integrazione delle tensioni tangenziali ultime fornisce la forza ultima di sfilamento interno.

Nel caso di rinforzi principali è da aggiungere il contributo resistente dovuto al risvolto. Tale contributo ( $F_0$ ) può essere calcolato mediante somma di due contributi:

$$F_0 = F_1 + \Delta F$$

Dove  $F_1$  è il contributo che genera sfilamento nella parte risvoltata (orizzontale), mentre  $\Delta F$  è l'ulteriore contributo che tiene conto delle forze radenti lungo il tratto subverticale, adiacente al paramento.

$F_1$  viene calcolata con procedimento analogo a quello dello sfilamento esterno (integrazione delle forze tangenziali ultime), mentre  $\Delta F$  viene calcolato, nell'ipotesi che il tratto in oggetto assuma una configurazione semicircolare, dalla relazione:

$$\Delta F = F_1 \cdot \pi \cdot f_{tr}$$

Al valore di forza ultima totale di sfilamento interno può essere applicato un coefficiente di sicurezza definito dall'utente.

Il programma prevede l'inserimento di carichi uniformemente distribuiti mediante l'assegnazione del tratto di contorno esterno interessato, valore del carico e sua inclinazione.

Tale carico viene quindi riportato alla base dei conci interessati alla loro sommità, senza nessuna diffusione laterale (Figura 4.2).

Nel caso di carico inclinato il programma provvede a scomporne le due componenti orizzontale e verticale.

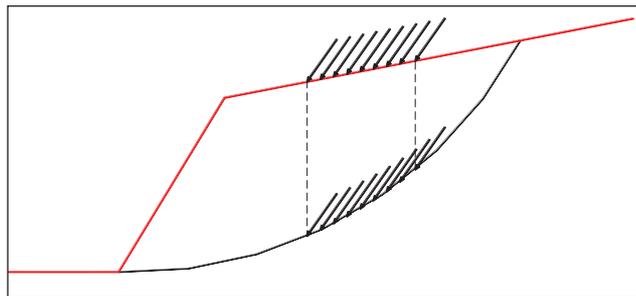


Figura 4.2 – Macstars: implementazione dei carichi superficiali.

MACSTARS riconduce il calcolo in presenza di carichi sismici al metodo pseudostatico, introducendo nel calcolo forze di massa in direzione orizzontale ed in direzione verticale, ottenute moltiplicando il peso totale di ogni conio in cui è suddivisa la massa instabile per i due coefficienti di intensità sismica.

Valori positivi dei coefficienti di intensità sismica, che vanno espressi come % di g, danno luogo a forze orientate verso l'esterno del pendio e verso l'alto.

In relazione ai **calcoli come muro di sostegno**, le **verifiche a scorrimento e ribaltamento** sono stati eseguiti con i classici metodi presenti diffusamente in letteratura. Si puntualizza che non si è tenuto conto della resistenza passiva a valle del muro.

Le fasi essenziali della verifica allo **scorrimento** dell'opera o di uno dei blocchi che la compongono sono:

1. scelta dell'opera/blocco di verifica;
2. si considera che la base resistente allo scorrimento sia compresa tra lo spigolo di valle del blocco (Figura 4.3, punto A) e un punto posto nel tratto di monte di estensione pari alla metà della base del blocco (Figura 4.3, punto B);

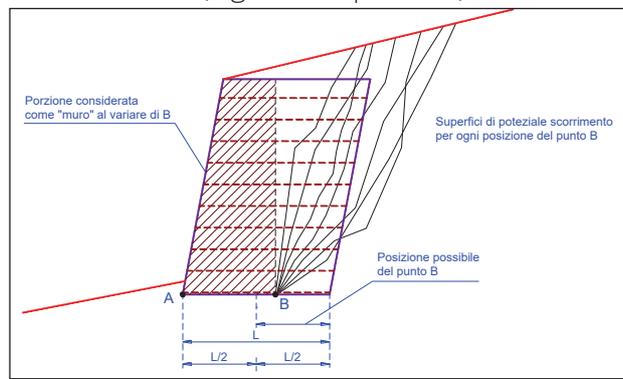


Figura 4.3 – Macstars: verifiche a scorrimento.

3. si generano 200 superfici di potenziale scorrimento facendo variare sia la posizione del punto B sia il modo di generazione a monte del punto B stesso (100 superfici in modo casuale e 100 superfici secondo la teoria di Rankine)
4. per ogni superficie si adotta una schematizzazione del tipo muro di sostegno, nella quale il muro è definito a monte dal profilo verticale uscente da B verso la superficie libera
5. si determina la superficie che fornisce la massima spinta sul muro e per questa si determina la forza resistente alla base e quindi il coefficiente di sicurezza allo scorrimento, utilizzando le stesse formulazioni viste per il muro di sostegno ed utilizzando i parametri di resistenza forniti dall'utente in funzione del tipo di contatto verificato alla base stessa.

La verifica **ribaltamento** viene effettuata con le equazioni tipiche per muri di sostegno, ampiamente presenti nella manualistica geotecnica, alla quale si rimanda il lettore per approfondimenti e delucidazioni

Il procedimento per la verifica della **capacità portante** si articola nelle seguenti fasi:

- 1) si determina il valore dell'eccentricità (e) dalla relazione

$$e = B / 2 - [(M_{stab} - M_u) - (M_a + M_r)] / N$$

- 2) si determina la larghezza ridotta ( $B_r$ ) della base di fondazione

$$B_r = B \quad e < 0$$

$$B_r = B - 2 \cdot e \quad e > 0$$

- 3) si determina la pressione media equivalente dalla relazione

$$p_{meq} = R / B_r$$

dove  $R$  = risultante vettoriale inclinata del carico verticale ( $N$ ) e della forza totale orizzontale agente sulla base ( $F_{htot}$ )

4) si determina il coefficiente di sicurezza per capacità portante ( $F_{scp}$ ) dalla relazione

$$F_{scp} = (p_u) / p_{meq}$$

dove  $p_u$  = pressione ultima dei terreni di fondazione calcolata dal programma (intesa allora inclinata come  $R$ ).

La pressione ultima dei terreni di fondazione viene calcolata con un metodo generale, che riprende i classici metodi all'equilibrio limite (Terzaghi, Hansen, Meyerhof), e che consente di tenere in conto situazioni stratigrafiche o geometriche complesse.

Il procedimento utilizzato, con riferimento alla Figura 4.4, è il seguente:

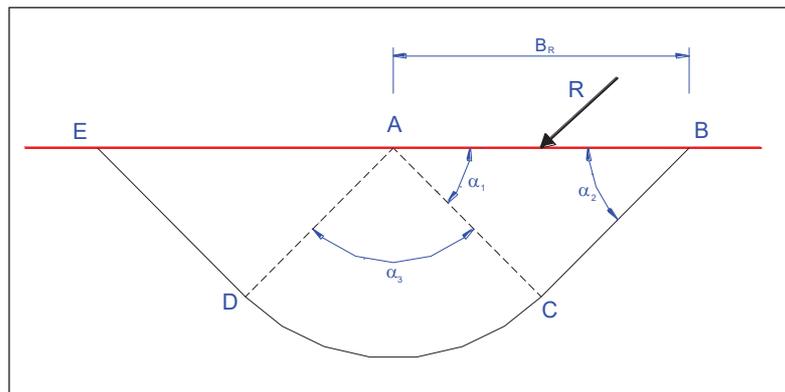


Figura 4.4 – Macstars: verifica di portanza.

- 1) si considera una fondazione di larghezza  $B_r$  soggetta a carico inclinato  $R$ , considerato nastriforme, cioè infinitamente esteso nella terza direzione;
- 2) si definiscono 225 superfici del tipo retta (BC) – spirale (CD) – retta (DE) ; per ogni superficie il punto C è ottenuto intersecando le semirette uscenti da A e B con gli angoli  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  (variabili tra  $10^\circ$  e  $70^\circ$  ad intervalli di  $4^\circ$ ), mentre il tratto CD è del tipo spirale logaritmica con angolo  $\alpha_3 = 90^\circ$ , tangente in C al tratto BC; il tratto DE infine è tangente in D alla stessa spirale logaritmica; alcuni controlli geometrici consentono di scartare eventuali superfici non compatibili con la geometria del problema;
- 3) per ogni superficie definita si esegue una analisi di stabilità all'equilibrio limite con il metodo di Janbu incrementando la pressione agente dal valore iniziale ( $R/B_r$ ) sino ad un valore ( $p_1$ ) tale da fornire  $F_s=1.0$ ;
- 4) il più piccolo di tutti i valori  $p_1$  calcolati per tutte le superfici generate è la pressione ultima dei terreni di fondazione del muro .

In definitiva, nelle analisi sono stati impiegate le combinazioni di calcolo e i coefficienti di sicurezza riepilogati nella seguente Tabella 4.7.

	Scorrimento	Ribaltamento	Carico limite	Stabilità globale	Stabilità interna
SLU	A1+M1+R3	A1+M1+R3	A1+M1+R3	A2+M2+R2	A1+M1+R3
$\gamma_R$	1.1	1.15	1.4	1.1	1.0
SLV	M1+R3+ $k_h+k_v$	M1+R3+ $k_h+k_v$	M1+R3+ $k_h+k_v$	M2+R2+ $k_h+k_v$	M1+R3+ $k_h+k_v$
$\gamma_R$	1.0	1.0	1.2	1.2	1.0

Tabella 4.7 – MACSTARS: scenari di verifica.

I fattori di sicurezza dedotti dal calcolo sono il rapporto fra la resistenza del sistema geotecnico  $R_d = \frac{1}{\gamma_R} R[\gamma_F F_k; X_k / \gamma_M; a_d]$ , ottenuta una volta amplificate le azioni, parzializzate le caratteristiche geotecniche dei terreni, tenuto conto della particolare geometria del problema  $a_d$  e applicando un fattore di sicurezza  $\gamma_R$  sulla resistenza del sistema, e le azioni di progetto  $E_d$ :

$$FS = R_d / E_d.$$

Il codice di calcolo impiegato permette la generazione automatica delle combinazioni di carico, amplificando automaticamente i valori caratteristici delle azioni  $F_k$  secondo i moltiplicatori  $\gamma_F$ , riducendo i valori caratteristici dei parametri geotecnici  $X_k$  con i coefficiente parziali di sicurezza  $\gamma_M$ .

Non viene operata automaticamente la fattorizzazione della resistenza globale caratteristica del sistema geotecnico  $R_k$  secondo i coefficienti  $\gamma_R$ .

Ciò sta a significare che, una volta amplificate le azioni e parzializzate le caratteristiche geotecniche dei terreni nei modi sopra precisati, le verifiche restituiscono dei coefficienti di sicurezza  $FS = R_d/E_d$  che devono risultare superiori ai  $FS_{adm} = \gamma_R$  indicati in Tabella 4.7.

#### 4.4 AZIONI SISMICHE

Circa le analisi sismiche, si è adottato l'approccio pseudostatico, col quale l'azione dinamica del sisma viene rappresentata con una coppia di forze statiche equivalenti all'azione inerziale, proporzionali, per il tramite di due coefficienti sismici  $k_h$  e  $k_v = \pm 0.5k_h$ , al peso della massa potenzialmente instabile.

Il segno  $\pm$  sta ad indicare che la componente verticale dell'azione sismica viene considerata agente sia verso l'alto che verso il basso. In output il software restituisce unicamente i risultati della verifica più gravosa fra le due.

In Tabella 4.8 si riportano i valori delle principali grandezze sismiche per il sito di progetto relative allo stato limite di salvaguardia della vita SLV e per il caso dei muri di sostegno.

Classe	Stato limite	V <sub>N</sub>	C <sub>U</sub>	V <sub>R</sub>	P <sub>VR</sub>	T <sub>R</sub>	a <sub>g</sub>	S <sub>S</sub>	S <sub>T</sub>	S	a <sub>max</sub>	β <sub>m</sub>	k <sub>h,m</sub>	k <sub>v,m</sub>
-	-	anni	-	anni	-	anni	g	-	-	-	g	-	-	-
IV	SLV	50	2.0	100	10%	949	0.288	1.124	1.2	1.349	0.388	0.38	0.147	±0.073

Tabella 4.8 – Parametri sismici.

dove:

- V<sub>N</sub> vita nominale;
- C<sub>U</sub> coefficiente d'uso;
- V<sub>R</sub> vita di riferimento;
- P<sub>VR</sub> probabilità di superamento nel periodo di riferimento;
- a<sub>g</sub> accelerazione sismica massima attesa di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale;
- S<sub>S</sub> coefficiente di amplificazione stratigrafica;
- S<sub>T</sub> coefficiente di amplificazione topografica;
- S = S<sub>S</sub> · S<sub>T</sub>;
- a<sub>max</sub> = S<sub>S</sub> · S<sub>T</sub> · a<sub>g</sub>;
- β<sub>m</sub> coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito per i muri
- k<sub>h,m</sub> coefficiente pseudostatico orizzontale per muri;
- k<sub>v,m</sub> coefficiente pseudostatico verticale per muri.

Coerentemente con le valutazioni espresse, in definitiva si sono adottati i coefficienti pseudostatici k<sub>h,m</sub> = 0.147 e k<sub>v,m</sub> = ±0.073.

#### 4.5 MODELLO GEOTECNICO

Le analisi vengono condotte in condizioni di lungo termine utilizzando i parametri di resistenza al taglio drenati.

Come legame costitutivo viene adottato il criterio di rottura di Mohr-Coulomb in termini di tensioni efficaci.

Dal punto di vista generale il riferimento è costituito dalla caratterizzazione geotecnica contenuta nell'elaborato "Relazione geotecnica" (rif. T00\_GE00\_GET\_RE01).

A partire dai valori dei parametri geotecnici indicati nella "Relazione geotecnica", nelle verifiche si sono in definitiva adottati i parametri geotecnici riassunti Tabella 4.9.

Vengono riportati, in funzione dello stato limite preso in esame, tanto i valori caratteristici  $X_k$  delle proprietà del terreno che i valori di progetto  $X_d$ .

Unità	Colore	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	STABILITÀ INTERNA, VERIFICHE COME MURO DI SOSTEGNO		STABILITÀ GLOBALE			
			$c'_k$ (kPa)	$\phi'_k$ (°)	SLU A2+M2+R2		SLV M2+R2	
					$c'_d$ (kPa)	$\phi'_d$ (°)	$c'_k$ (kPa)	$\phi'_k$ (°)
Rilevato		19.0	0	35	0	29.3	0	35
Detriti		18.0	0	30	0	24.8	0	30
Flysch marnoso- arenaceo		21.0	100	35	80	29.3	100	35

Tabella 4.9 – Caratteristiche geotecniche (valori caratteristici  $X_k$  e di progetto  $X_d$ ).

Rispetto alla parametrizzazione numerica indicata nella “Relazione Geotecnica”, nelle verifiche si è operata una significativa riduzione del valore assegnato alla coesione efficace  $c'$  del substrato flyschoidale, assunta pari a 100kPa in luogo dei 200kPa ivi stimati.

Le cautele adottate per  $c'$  sono dovute al fatto che, in corrispondenza dei bassi stati tensionali efficaci caratterizzanti il problema geotecnico in esame, la resistenza al taglio è molto influenzata da  $c'$ , mentre  $\phi'$  “pesa” in misura molto più ridotta.

Inoltre, in prossimità di basse tensioni normali agenti sulla superficie di scorrimento c'è da attendersi una curvatura dell'involuppo di rottura di picco particolarmente marcata, per cui la linearizzazione dell'involuppo secondo il criterio di snervamento di Mohr-Coulomb potrebbe condurre ad una sovrastima dell'intercetta coesiva  $c'$  e della resistenza al taglio del materiale.

Tali condizioni, dunque, obbligano a scelte ragionevolmente cautelative per quanto riguarda  $c'$ . Nella figura seguente viene schematizzata la stratigrafia di calcolo adottata nelle analisi.

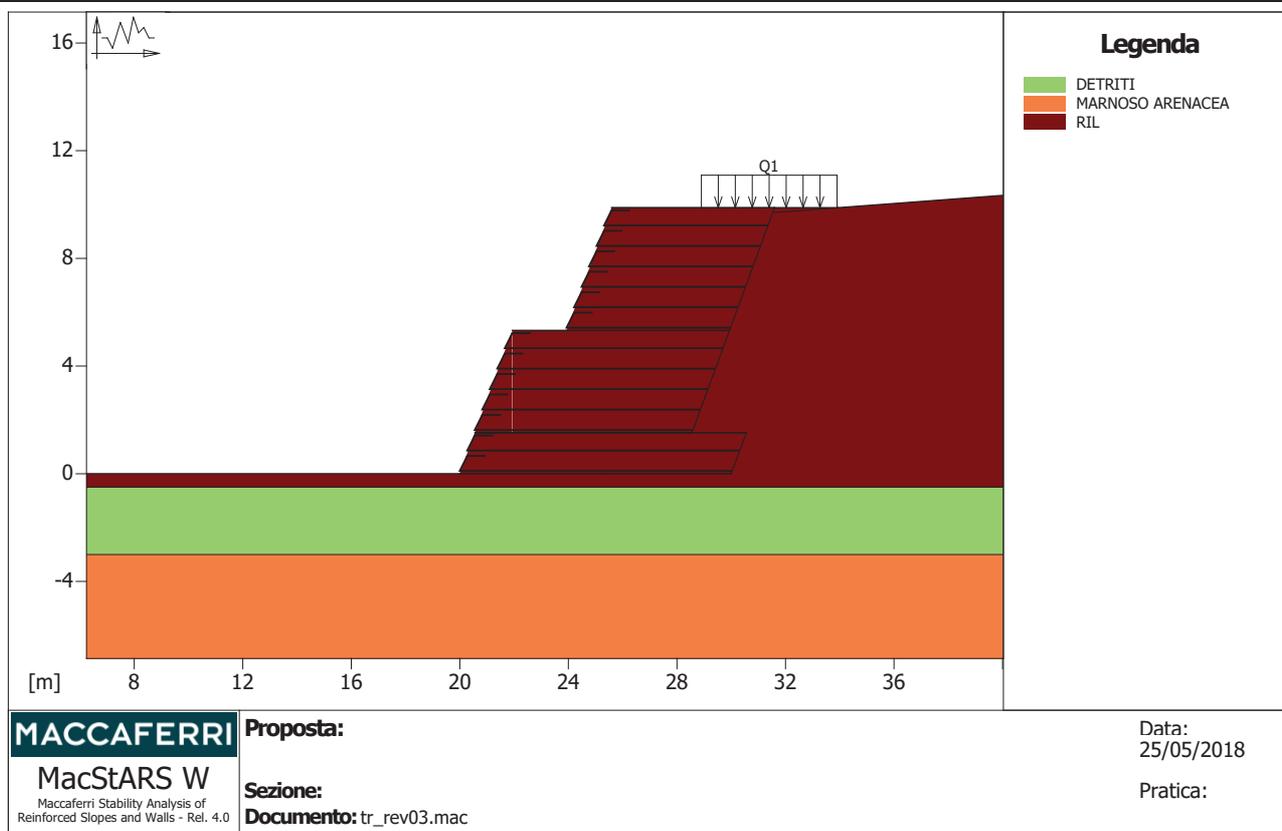


Figura 4.5 – Stratigrafia di progetto.

Per i terreni originari in posto si è ipotizzata una sequenza stratigrafica costituita superficialmente (0.0÷3.0m) dai detriti di versante, seguiti lungo la verticale dal substrato flyschoidale, che chiude in basso il volume di terreno “significativo” per le opere (porzione di sottosuolo che influenza e, a sua volta, viene influenzata dall’esecuzione dei manufatti).

#### 4.6 SUPERFICIE PIEZOMETRICA

Come dettagliato in sede di “Relazione Geotecnica”, la superficie piezometrica non interviene nel “volume significativo” di sottosuolo interagente con le opere e, dunque, non viene modellata.

#### 4.7 CARICHI

Le verifiche includono la possibile presenza di carichi accidentali in testa all’opera, schematizzati attraverso un sovraccarico distribuito di valore caratteristico  $\Delta q_k = 5 \text{ kPa}$ .

Tale carico è stato opportunamente amplificato nelle analisi in funzione della combinazione di verifica secondo i coefficienti parziali per azioni variabili sfavorevoli previsti dalla normativa (cfr. §4.2).

#### 4.8 CARATTERISTICHE DEI RINFORZI

Ai fini del calcolo strutturale si è tenuto conto che si tratta di opere permanenti, per cui si è fatto riferimento alle prestazioni a lungo termine dei materiali metallici; a tale proposito il parametro fondamentale è la resistenza di lavoro, per la quale le diverse normative possono indicare

metodologie differenti per la definizione. Mancando in Italia uno specifico riferimento normativo, la stima della resistenza di lavoro degli elementi di rinforzo è stata determinata facendo riferimento allo schema illustrato di seguito in Figura 4.6 che la normativa inglese BS8006 prescrive per i rinforzi in genere.

Il valore di  $T_b$  nel caso di rinforzi metallici è pari alla resistenza a trazione ultima e nel caso del Terramesh si fa riferimento alle procedure di prova descritte nel Par. 9.3 della UNI EN 10223-3:2013 che tengono in conto le caratteristiche geometriche delle reti doppia torsione; tale procedura di prova è parte integrante del sistema di controllo qualità alla base della marcatura CE del Terramesh (ETA-13/0295).

Il valore minimo di resistenza a trazione così determinato risulta pari a:

$$T_B = 50.0 \text{ kN/m (8x10 2.7/3.7 mm)}$$

$$T_B = 35.0 \text{ kN/m (8x10 2.2/3.2 mm)}$$

La resistenza di lavoro è designata  $T_d$  (o LTDS) ed è tale che:

$$T_d = T_b / (f_m \times f_{creep})$$

Il fenomeno di creep è l'aumento dell'allungamento di un materiale sottoposto ad un carico costante: per molti materiali polimerici la temperatura ambiente (tra 10° e 30°) coincide con la loro fase visco-elastica e per tale motivo il creep diventa particolarmente importante per la determinazione delle caratteristiche di resistenza a lungo termine dei materiali polimerici.

Nel caso dell'acciaio, la cui fase visco-elastica comincia a temperature superiori ai 500°, il fenomeno di creep è insignificante e per tale motivo si assume:

$$f_{creep} = 1.0.$$

$f_m$  è il fattore di sicurezza complessivo che consente di passare dalla resistenza a trazione nominale ("*base strength*")  $T_b$  a quella di lavoro.  $T_b$  è calcolato per una data deformazione massima ammissibile durante la vita di progetto; per le opere in terra rinforzata le deformazioni massime ammissibili nei rinforzi sono dell'ordine del 5.5-6.5 %. Ciò significa che per la rete metallica a doppia torsione, non subendo gli effetti del creep ed avendo una resistenza a rottura pari a 50 kN/m con deformazioni inferiori al 5%, tale resistenza può essere assunta come resistenza a trazione nominale.

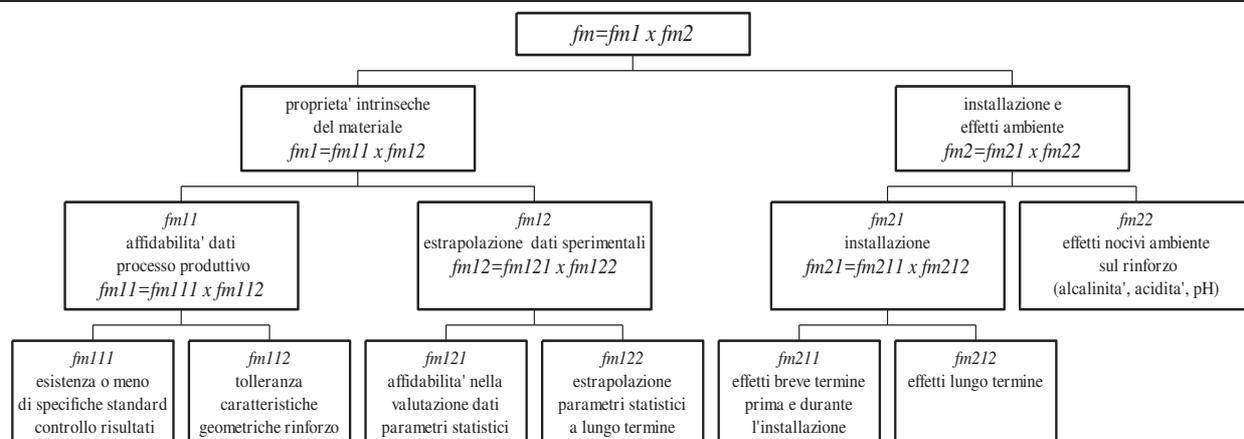


Figura 4.6 – Definizione del fattore di sicurezza per il calcolo della resistenza di lavoro.

Il fattore parziale del materiale  $f_m$  è calcolato su un numero di sotto-fattori:

$$f_m = f_{m11} \times f_{m12} \times f_{m21} \times f_{m22}$$

dove:

$f_{m11}$  è un fattore riferito al processo manifatturiero;

$f_{m12}$  è un fattore riferito all'estrapolazione dei dati;

$f_{m21}$  è un fattore riferito al danneggiamento causato ai prodotti durante il processo dell'installazione;

$f_{m22}$  è un fattore riferito agli effetti dell'ambiente sui prodotti.

Le considerazioni seguenti si riferiscono al paragrafo 5.3.3 (fattori parziali dei materiali di rinforzo) e all'Appendice A dal codice BS 8006.

- $f_{m11}$  – Produzione

Questo fattore è una combinazione di:

- Esistenza o meno di uno standard per specifica, produzione e di controllo del materiale di base ( $f_{m111}$ )
- Esistenza o meno di tolleranze dimensionali del particolare prodotto fabbricato ( $f_{m112}$ )

$f_{m111}$

Le unità Terramesh sono prodotte in accordo con il regolamento 305/2011 (ex Direttiva Europea 89/106/CEE) e sono provvisti di marcatura CE in conformità con ETA-13/0295, dove la resistenza a trazione certificata è di 55 (+ 5) kN/m per il Terramesh 8x10 2.7/3.7 mm e 40 (± 5) kN/m per il

Terramesh 8x10 2.2/3.2 mm. Poiché, a favore di sicurezza, viene fatto riferimento alla resistenza minima del rinforzo (rispettivamente 50 kN/m e 35 kN/m), può porsi:

$$f_{m11} = 1.0$$

$$f_{m12}$$

Poiché la resistenza caratteristica dipende dalle tolleranze della sezione trasversale e quindi dalle tolleranze di diametro di filo, deve essere usato un fattore più grande dell'unità.

Poiché la tolleranza sul filo di diametro 2.7 mm è  $\pm 0.06$  mm (vedi la Tavola 1 EN 10223-3), il rapporto corrispondente tra l'area nominale (5.72 mm<sup>2</sup> per diametro 2.7 mm) e minima (5.47 mm<sup>2</sup> per 2.64 mm) è 1.04 si ha

$$f_{m12}=1.04$$

Avendo così:

$$f_{m11} = f_{m11} \times f_{m12} = 1.0 \times 1.04 = 1.04$$

- $f_{m12}$  – Estrapolazione

L'estrapolazione copre la combinazione di:

- valutazione dei dati disponibili per dedurre una distribuzione statistica ( $f_{m121}$ );
- l'estrapolazione della distribuzione statistica fino alla vita utile richiesta ( $f_{m122}$ ).

$$f_{m121}$$

È riferito alla valutazione di qualità, quantità e durata dei dati disponibili.  $f_{m121}$  rappresenta una misura dell'affidabilità di tali dati. Nel caso di numerosi dati disponibili attinenti ad un periodo lungo di tempo, l'analisi statistica permette un valore di 1,0 per  $f_{m121}$ . Un valore di 1.0 può essere adottato per i rinforzi in Terramesh, sulla base delle numerose prove eseguite durante il corso di molti anni.

$$f_{m122}$$

Questo fattore riguarda l'estrapolazione dei dati disponibili su un periodo più lungo, pari alla vita utile della struttura. Poiché per il Terramesh l'estrapolazione a 120 anni è fatta partendo da una base ventennale di dati, e quindi su un solo log cycle,  $f_{m122}$  viene assunto pari a 1.0

$$f_{m12} = f_{m121} \times f_{m122} = 1.0 \times 1.0 = 1.0$$

- $f_{m21}$  – Installazione

I fattori di sicurezza parziali per danneggiamento meccanico durante l'installazione sono riportati nella tavola sottostante, che si basa sul tipo di terreno di riempimento usato, nell'ipotesi che questo sia ben distribuito ed uniforme. Alcuni riempimenti, per esempio pietre angolari, possono

richiedere che una stesa protettiva di materiale granulare sia messa prima dell'installazione delle reti in maglia di PVC per evitare danni al rivestimento. L'acciaio galvanizzato normalmente non viene danneggiato durante il processo di costruzione.

I fattori di danneggiamento comprendono:

gli effetti a breve termine di un danneggiamento prima e durante l'installazione,  $f_{m211}$ ;

gli effetti a lungo termine del danneggiamento,  $f_{m212}$ .

$f_{m211}$

L'acciaio galvanizzato normalmente non viene danneggiato durante il processo di costruzione (effetto a breve termine) se il materiale rispetta gli standard comuni sui materiali del riempimento usati per strutture rinforzate.

La protezione offerta dalla galvanizzazione è un processo chimico, che incide sul metallo stesso ed è diverso da un rivestimento o da un rivestimento epossidico. La galvanizzazione è un processo autocatizzante con alcune rientranze che creano un processo di autoriparazione elettrochimica. Il rivestimento in PVC è estruso sul filo di acciaio a forte zincatura usato nel Terramesh e perciò è in accordo con le considerazioni precedentemente esposte. Per i rinforzi di Terramesh può essere adottato un valore di 1.0.

$$f_{m211} = 1.0$$

$f_{m212}$

Un valore massimo di 1.165 può essere adottato per il Terramesh, presumendo di usare per il riempimento strutturale un terreno col peggior fuso granulometrico (0-50 mm). Granulometrie oltre questi valori (fino a 0-200 mm) sono accettabili purché uno strato protettivo di materiale fine sia messo prima della stesa della rete in PVC per evitare danneggiamenti.

$$f_{m212} = 1.0 - 1.15$$

Avendo così:

$$f_{m21} = f_{m211} \times f_{m212} = 1.0 \times (1.0 \text{ o } 1.15) = 1.0 \text{ o } 1.15$$

- $f_{m22}$  Fattore di Componente Ambientale

Questo fattore considera il comportamento del materiale sotto sforzo. Il rivestimento in PVC dei rinforzi in Terramesh non è soggetto a trazione in quanto incomparabilmente più deformabile del filo in acciaio. È stato confermato che il materiale di PVC non è chimicamente aggredibile quando usato in ambienti caratterizzati da un pH superiore a 2.5, per cui in queste condizioni possiamo assumere un valore di 1.05.

$$f_{m22} = 1.05$$

La tavola seguente riassume i fattori parziali del Terramesh adottati da MacStARS W – Rel. 4.0.

$f_{m111}$	1.0	Resistenza caratteristica
$f_{m112}$	1.04	Tolleranze sulla sezione trasversale
$f_{m121}$	1.00	Certificazione ISO 9002
$f_{m122}$	1.0	100 anni di dati disponibili
$f_{m211}$	1.00	Nessun effetto a breve termine per danneggiamento
$f_{m212}$	1.05 - 1.15	Valore massimo per riempimenti granulari
$f_{m22}$	1.05	Nessuna degradazione del rivestimento di PVC
$f_m$	1.09 - 1.26	

Tabella 4.10 – Fattori di sicurezza parziali per rinforzi metallici.

Dove:

$f_{m111}$	controllo qualità
$f_{m112}$	tolleranze nella produzione
$f_{m121}$	affidabilità dei dati disponibili
$f_{m122}$	affidabilità dell'estrapolazione alla vita utile
$f_{m211}$	effetti a breve termine del danneggiamento
$f_{m212}$	effetti a lungo termine del danneggiamento
$f_{m22}$	degradazione chimica, biologica e di UV

In conclusione, la resistenza a lungo termine (LTDS) a 120 anni del **Terramesh 8x10 2.7/3.7** mm con rivestimento polimerico in accordo con l'Annex A della BS 8006-1:2010 e i certificati BBA 16/H247 Product Sheet 2 (Terramesh System) e 16/H247 Product Sheet 3 (Green Terramesh) risulta:

$$T_D = T_B/f_m = 50.0/1.09 = 45.79 \text{ kN/m LTDS (in argilla, ghiaia, sabbia)}$$

$$T_D = T_B/f_m = 50.0/1.26 = 39.82 \text{ kN/m LTDS (nella ghiaia).}$$

Nel caso di impiego del **Terramesh 8x10 2.2/3.2** mm con rivestimento polimerico in accordo con l'Annex A della BS 8006-1:2010 e il certificato BBA 16/H247 Product Sheet 3 (Green Terramesh), la resistenza a lungo termine (LTDS) a 120 anni risulterebbe:

$$T_D = T_B/f_m = 35.0/1.09 = 32.11 \text{ kN/m LTDS (in argilla, ghiaia, sabbia)}$$

$$T_D = T_B/f_m = 35.0/1.26 = 27.77 \text{ kN/m LTDS (nella ghiaia).}$$

Nel caso di progetto, venendo impiegata griglia tipo Terramesh 8x10 2.7/3.7 mm ed ipotizzando un riempimento di tipo prevalentemente sabbioso, si fa riferimento ad un valore di resistenza a lungo termine (LTDS) a 120 anni:

$$T_D = T_B/f_m = 50.0/1.09 = 45.79 \text{ kN/m LTDS (in argilla, ghiaia, sabbia).}$$

#### 4.9 RISULTATI DELLE ANALISI

In Tabella 4.11 è riportato un quadro di sintesi delle analisi effettuate per verificare la stabilità delle terre rinforzate con rete metallica in progetto.

I coefficienti di sicurezza desumibili dalle analisi  $FS = R_d/E_d$ , che esprimono il rapporto fra le resistenze di progetto  $R_d$  e le azioni di calcolo  $E_d$ , sono tutti al di sopra dei fattori di sicurezza minimi prescritti da NTC2018, garantendo quindi l'idoneità dell'intervento in progetto.

Per le verifiche a sfilamento ("pull-out"), si rimanda ai risultati contenuti nell'output.

Risulta in tutti i casi che il margine di sicurezza a pull-out  $FS_{pull-out} = T_p/T_d$ , con  $T_p$  resistenza a sfilamento e  $T_d$  massima forza di lavoro agente sul rinforzo, risulta maggiore del coefficiente di sicurezza  $\gamma_R = FS_{adm} = 1.0$  adottato, e, dunque, le verifiche di pull-out sono da intendersi soddisfatte.

Per maggiori dettagli sulle verifiche svolte con il programma MACSTARS W – REL. 4.0 si rimanda agli allegati di calcolo in calce al documento.

SEZIONE		VERIFICHE STATICHE SLU					VERIFICHE SISMICHE SLV				
		STABILITA' INTERNA	STABILITA' GLOBALE	MURO DI SOSTEGNO			STABILITA' INTERNA	STABILITA' GLOBALE	MURO DI SOSTEGNO		
				SCOR	RIB	QLIM			SCOR	RIB	QLIM
B-B	$FS = R_d / E_d$	2.065	1.316	7.730	16.594	11.607	1.244	1.393	2.432	3.783	2.604
	$FS_{adm}$	1.0	1.1	1.1	1.15	1.4	1.0	1.2	1.0	1.0	1.2
	Risultato verifica	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Tabella 4.11 – Verifiche di stabilità: sintesi dei risultati.

## ALLEGATO DI CALCOLO

### MacStARS W – Rel. 4.0

Maccaferri Stability Analysis of Reinforced Slopes and Walls

Officine Maccaferri S.p.A. - Via Kennedy 10 - 40069 Zola Predosa (Bologna)

Tel. 051.6436000 - Fax 051.236507

Proposta.....:

Sezione.....:

Località.....:

Pratica.....:

File.....: tr\_rev04.mac

Data...: 25/05/2018

Verifiche condotte in accordo alla normativa : NTC 2018

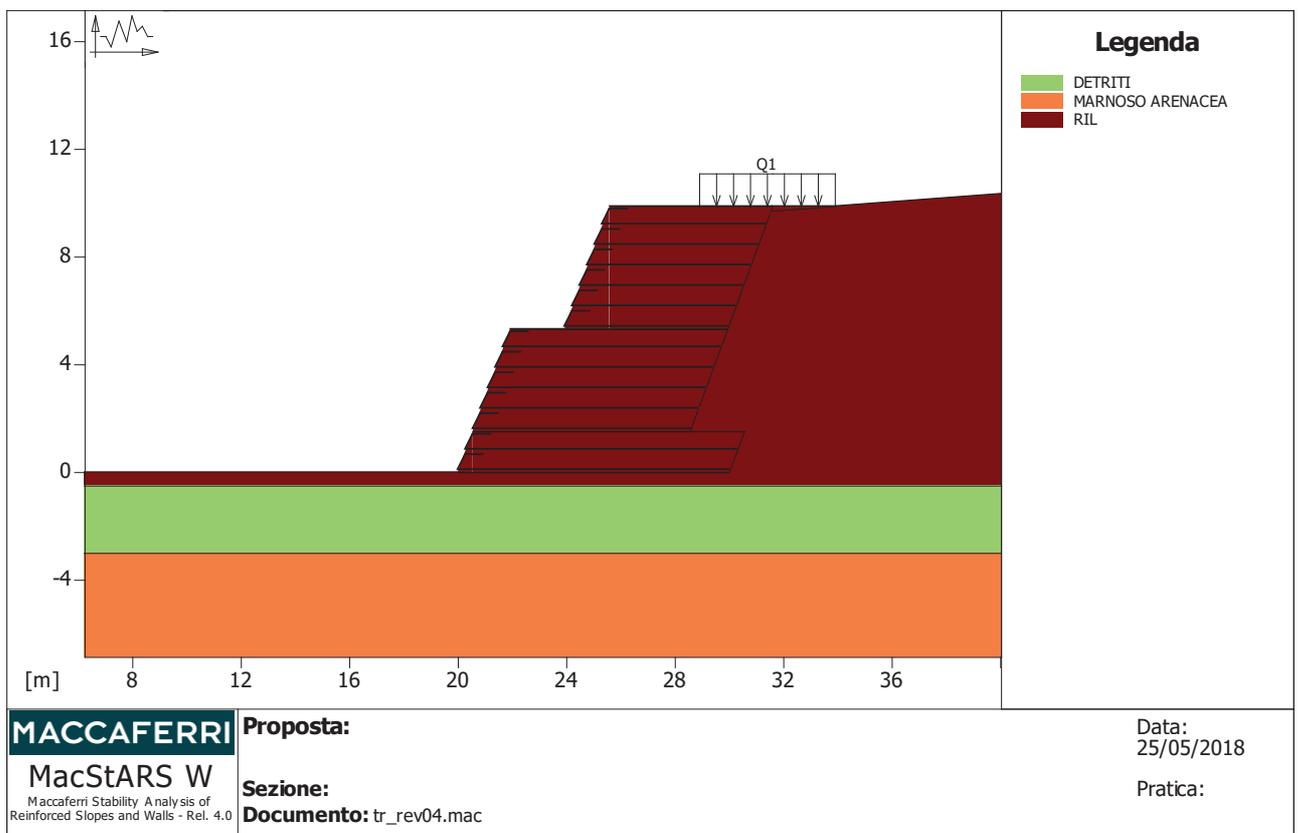
\_Verifiche di sicurezza (SLU)

### SOMMARIO

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI	28
PROFILI STRATIGRAFICI	29
BLOCCHI RINFORZATI	30
Blocco : B3	30
Blocco : B1	31
Blocco : B2	31
CARICHI	32
PROPRIETA' DEI RINFORZI UTILIZZATI	32
VERIFICHE	33

Verifica di stabilità globale :	33
Verifica come muro di sostegno :	35
Verifica di stabilità interna :	37
Verifica come muro di sostegno :	38
Verifica di stabilità globale :	40
Verifica di stabilità interna :	41

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI



<b>Terreno :</b> DETRITI	Descrizione :
Classe coesione:	Coeff. Parziale - Coesione efficace
Coesione.....[kN/m²]...:	10.00
Classe d'attrito...:	Coeff. Parziale - tangente dell'angolo di resistenza a taglio
Angolo d'attrito.[°].....:	30.00
Rapporto di pressione interstiziale (Ru).....:	0.00
Classe di peso...:	Coeff. Parziale - Peso dell'unità di volume - favorevole
Peso specifico sopra falda.[kN/m³]...:	20.00

Relazione di calcolo – Terra rinforzata

Peso specifico in falda.....[kN/m<sup>3</sup>]...: 20.00

Modulo elastico [kN/m<sup>2</sup>]...: 0.00

Coefficiente di Poisson.....: 0.30

**Terreno : MARNOSO ARENACEA** Descrizione : FORMAZIONE MARNOSO-ARENACEA

Classe coesione : Coeff. Parziale - Coesione efficace

Coesione.....[kN/m<sup>2</sup>]...: 100.00

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

Angolo d'attrito.[°].....: 35.00

Rapporto di pressione interstiziale (Ru).....: 0.00

Classe di peso...: Coeff. Parziale - Peso dell'unità di volume - favorevole

Peso specifico sopra falda [kN/m<sup>3</sup>]...: 21.00

Peso specifico in falda.....[kN/m<sup>3</sup>]...: 21.00

Modulo elastico [kN/m<sup>2</sup>]...: 0.00

Coefficiente di Poisson.....: 0.30

**Terreno : RIL** Descrizione : RILEVATO

Classe coesione : Coeff. Parziale - Coesione efficace

Coesione.....[kN/m<sup>2</sup>]...: 0.00

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

Angolo d'attrito.[°].....: 35.00

Rapporto di pressione interstiziale (Ru).....: 0.00

Classe di peso...: Coeff. Parziale - Peso dell'unità di volume - favorevole

Peso specifico sopra falda [kN/m<sup>3</sup>]...: 19.00

Peso specifico in falda.....[kN/m<sup>3</sup>]...: 19.00

Modulo elastico [kN/m<sup>2</sup>]...: 0.00

Coefficiente di Poisson.....: 0.30

PROFILI STRATIGRAFICI

**Strato: P1** Descrizione:

Terreno : RIL

X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0.00	0.00	0.10	0.00	20.00	0.00	25.40	0.00
28.90	9.50	52.80	11.30	52.81	11.30		

**Strato: P2** Descrizione:

Terreno : DETRITI

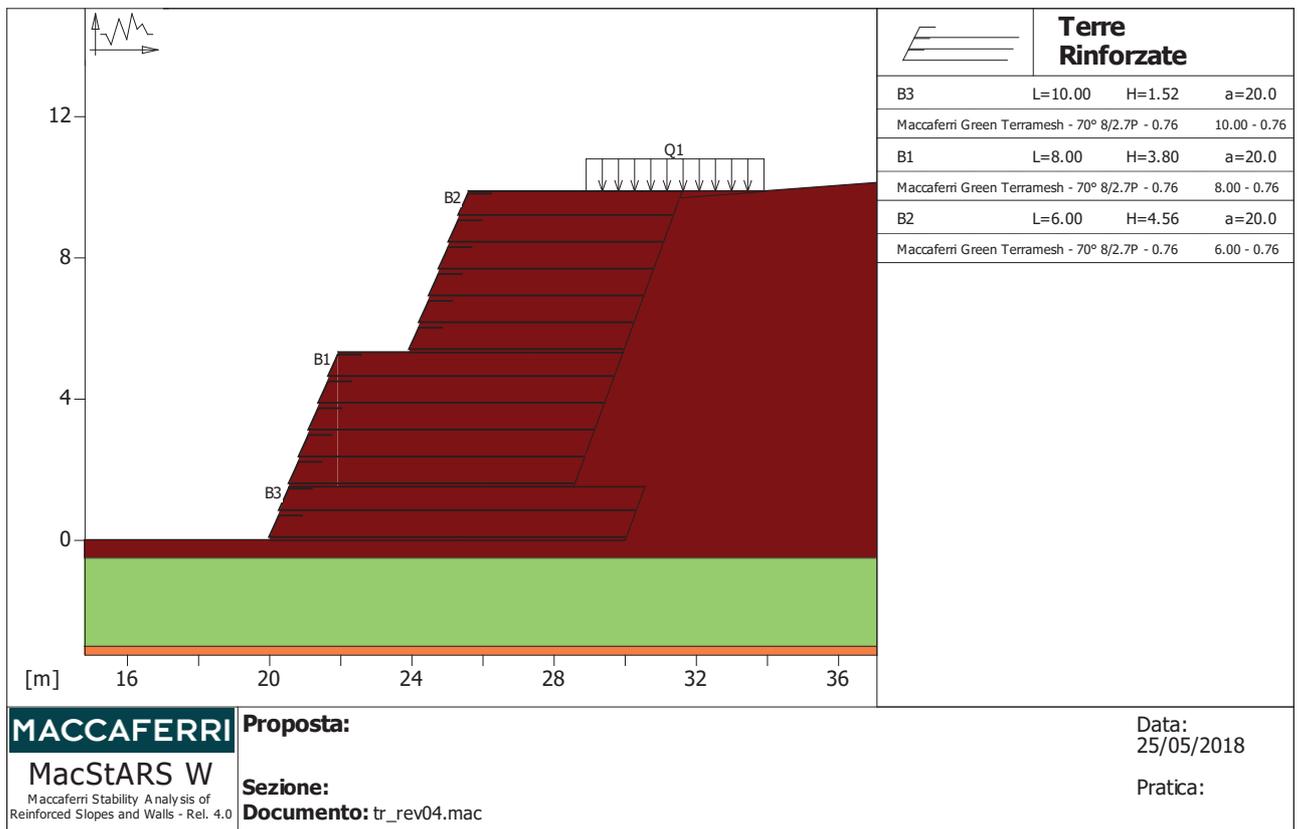
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0.00	-0.50	52.80	-0.50				

**Strato: P3** Descrizione:

Terreno : MARNOSO ARENACEA

X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0.00	-3.00	52.00	-3.00				

**BLOCCHI RINFORZATI**



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

**Proposta:**  
**Sezione:**  
**Documento:** tr\_rev04.mac

**Data:**  
 25/05/2018  
**Pratica:**

**Blocco : B3**

Dati principali...[m].....: Larghezza.....= 10.00 Altezza...= 1.52  
 Coordinate Origine...[m].....: Ascissa...= 20.00 Ordinata...= 0.00  
 Inclinazione paramento...[°].....: 20.00

Rilevato strutturale - materiale tipo.....: Sabbia  
Rilevato strutturale.: RIL  
Terreno di riempimento a tergo.....: RIL  
Terreno di copertura.....: RIL  
Terreno di fondazione.....: RIL

Parametri per il calcolo della capacità portante con Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof

Affondamento fondazione[m] : 0.00  
Inclinazione pendio a valle[°] : 0.00

**Rinforzi :**

Maccaferri - Green Terramesh - 70° - 8/2.7P - 0.76

Lunghezza.....[m].....= 10.00

Interasse [m].....= 0.76

Risolto...[m].....= 0.65

**Blocco : B1**

Dati principali...[m].....: Larghezza.....= 8.00 Altezza...= 3.80

Arretramento...[m].....= 0.00 da B3

Inclinazione paramento...[°].....: 20.00

Rilevato strutturale - materiale tipo.....: Sabbia  
Rilevato strutturale.: RIL  
Terreno di riempimento a tergo.....: RIL  
Terreno di copertura.....: RIL  
Terreno di fondazione.....: RIL

Parametri per il calcolo della capacità portante con Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof

Affondamento fondazione[m] : 0.00  
Inclinazione pendio a valle[°] : 0.00

**Rinforzi :**

Maccaferri - Green Terramesh - 70° - 8/2.7P - 0.76

Lunghezza.....[m].....= 8.00

Interasse [m].....= 0.76

Risolto...[m].....= 0.65

**Blocco : B2**

Dati principali...[m].....: Larghezza.....= 6.00 Altezza...= 4.56

Arretramento...[m].....= 2.00 da B1

Inclinazione paramento...[°].....: 20.00

Rilevato strutturale - materiale tipo.....: Sabbia  
 Rilevato strutturale.: RIL  
 Terreno di riempimento a tergo.....: RIL  
 Terreno di copertura.....: RIL  
 Terreno di fondazione.....: RIL

Parametri per il calcolo della capacità portante con Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof

Affondamento fondazione[m] : 0.00  
 Inclinazione pendio a valle[°] : 0.00

**Rinforzi :**

Maccaferri - Green Terramesh - 70° - 8/2.7P - 0.76  
 Lunghezza.....[m].....= 6.00  
 Interasse\_[m].....= 0.76  
 Risvolto\_\_[m].....= 0.65

**CARICHI**

**Pressione : Q1** Descrizione : ACCIDENTALE

Classe : Variabile - sfavorevole

Intensità.....[kN/m²]..= 5.00 Inclinazione.....[°].....= 0.00

Ascissa.....[m] : Da = 28.90 To = 33.90

**Sisma :**

Classe : Sisma

Accelerazione...[m/s²].....: Orizzontale.....= 1.44 Verticale\_= 0.72

**PROPRIETA' DEI RINFORZI UTILIZZATI**

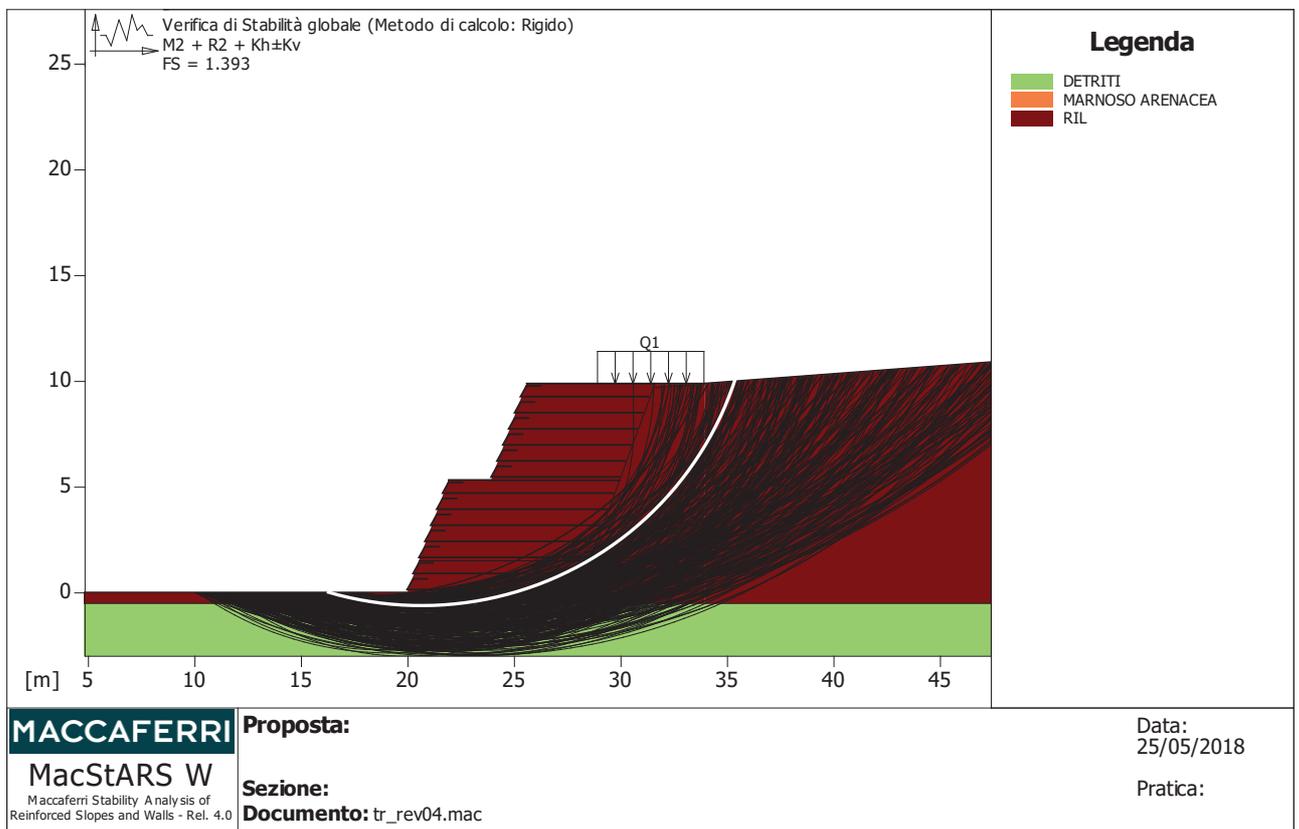
Maccaferri - Green Terramesh - 70° - 8/2.7P - 0.76

Carico di rottura Nominale Tr .....	[kN/m].....:	50.00
Rapporto di Scorrimento plastico.....:		2.00
Coefficiente di Scorrimento elastico.....	[m³/kN].....:	1.10e-04
Rigidezza estensionale.....	[kN/m].....:	500.00
Lunghezza minima di ancoraggio.....	[m].....:	0.15
Coefficiente di sicurezza alla rottura (ghiaia).....:		1.26
Coefficiente di sicurezza al Pull-out.....:		1.00
Coefficiente di sicurezza alla rottura (sabbia).....:		1.09

Relazione di calcolo – Terra rinforzata

Coefficiente di sicurezza al Pull-out.....:	1.00
Coefficiente di sicurezza alla rottura (limo).....:	1.09
Coefficiente di sicurezza al Pull-out .....	1.00
Coefficiente di sicurezza alla rottura (argilla).....:	1.09
Coefficiente di sicurezza al Pull-out.....:	1.00
Coefficiente di interazione rinforzo-rinforzo :	0.30
Coefficiente di sfilamento rinforzo-ghiaia.....:	0.90
Coefficiente di sfilamento rinforzo-sabbia.....:	0.65
Coefficiente di sfilamento rinforzo-limo; :	0.50
Coefficiente di sfilamento rinforzo-argilla.....:	0.30

VERIFICHE



Verifica di stabilità globale :

Calcolo delle forze nei rinforzi col metodo rigido

Ricerca delle superfici critiche col metodo di Bishop

Coefficiente di sicurezza minimo calcolato.....: 1.393

Relazione di calcolo – Terra rinforzata

Intervallo di ricerca delle superfici

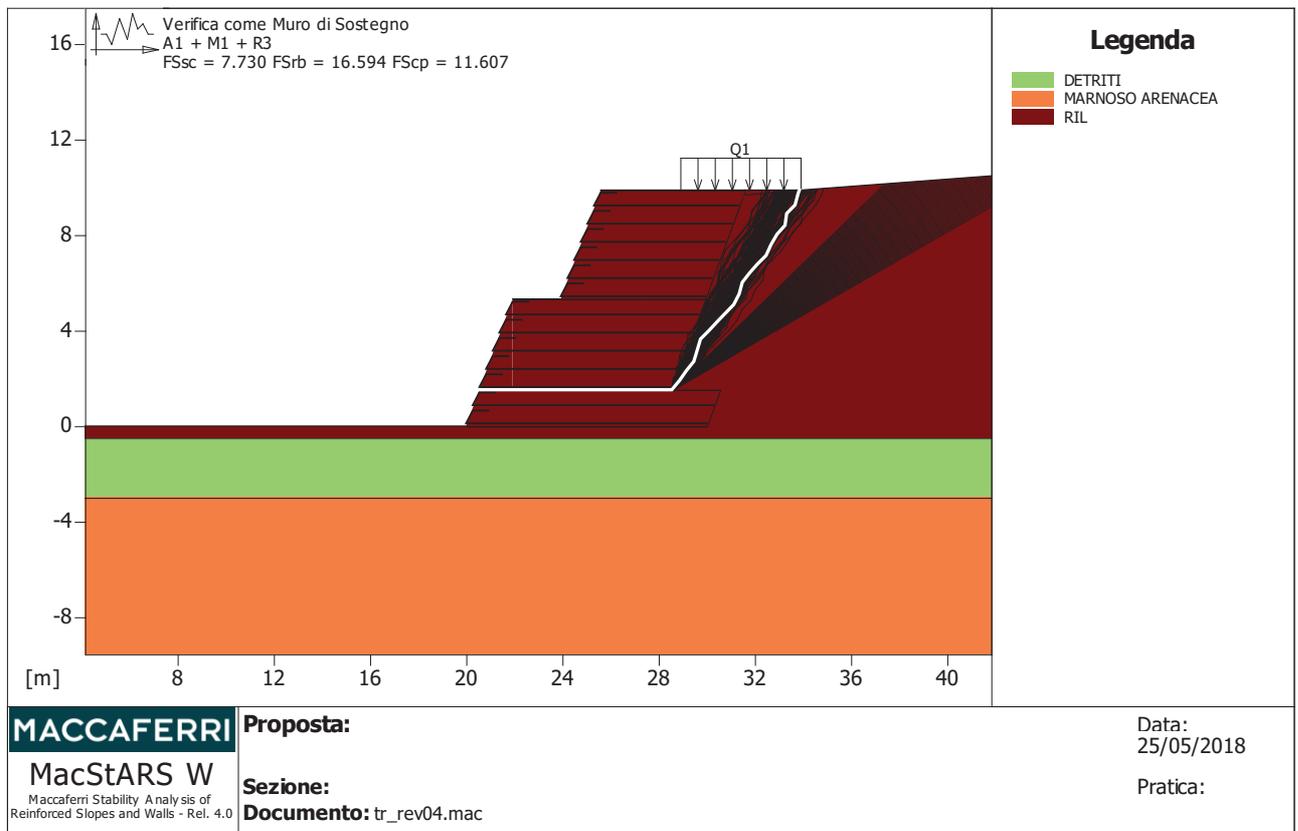
Segmento di partenza, ascisse [m]		Segmento di arrivo, ascisse [m]	
Primo punto	Secondo punto	Primo punto	Secondo punto
10.00	18.00	30.00	52.00
Numero punti avvio superfici sul segmento di partenza_:		100	
Numero totale superfici di prova_....:		1000	
Lunghezza segmenti delle superfici_ [m].....:		0.50	
Angolo limite orario.....[°].....:		0.00	
Angolo limite antiorario....[°].....:		0.00	

Blocco : B3

Maccaferri - Green Terramesh - 70° - 8/2.7P - 0.76

Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rottura	sfilamento		agente	1/Fmax
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	50.0	843.7	45.9	1.09	18.38
0.760	50.0	508.7	45.9	1.09	11.08

Fattore	Classe
1.00	Variabile - sfavorevole
1.00	Sisma
1.00	Coeff. Parziale - tangente dell'angolo di resistenza a taglio
1.00	Coeff. Parziale - Coesione efficace
1.00	Coeff. Parziale - Peso dell'unità di volume - favorevole
1.00	Fs Rottura Rinforzi
1.00	Fs Sfilamento Rinforzi
1.00	Coeff. Parziale R - Stabilità



**Verifica come muro di sostegno :**

Combinazione di carico : A1 + M1 + R3

Stabilità verificata sul blocco : B1

Forza Stabilizzante.....[kN/m].....: 782.59

Forza Instabilizzante.....[kN/m].....: 92.04

Classe scorrimento.....: Coeff. parziale R - Scorrimento

Coefficiente di sicurezza allo scorrimento.....: 7.730

Momento Stabilizzante....[kN\*m/m].....: 6649.00

Momento Instabilizzante...[kN\*m/m].....: 348.42

Classe momento.....: Coeff. parziale R - Ribaltamento

Coefficiente di sicurezza al ribaltamento.....: 16.594

Pressione ultima calcolata con metodo dell'equilibrio limite.

Pressione ultima.....[kN/m²]...: 2277.90

Pressione media agente...[kN/m²]...: 140.18

Classe pressione.....: Coeff. parziale R - Capacità portante

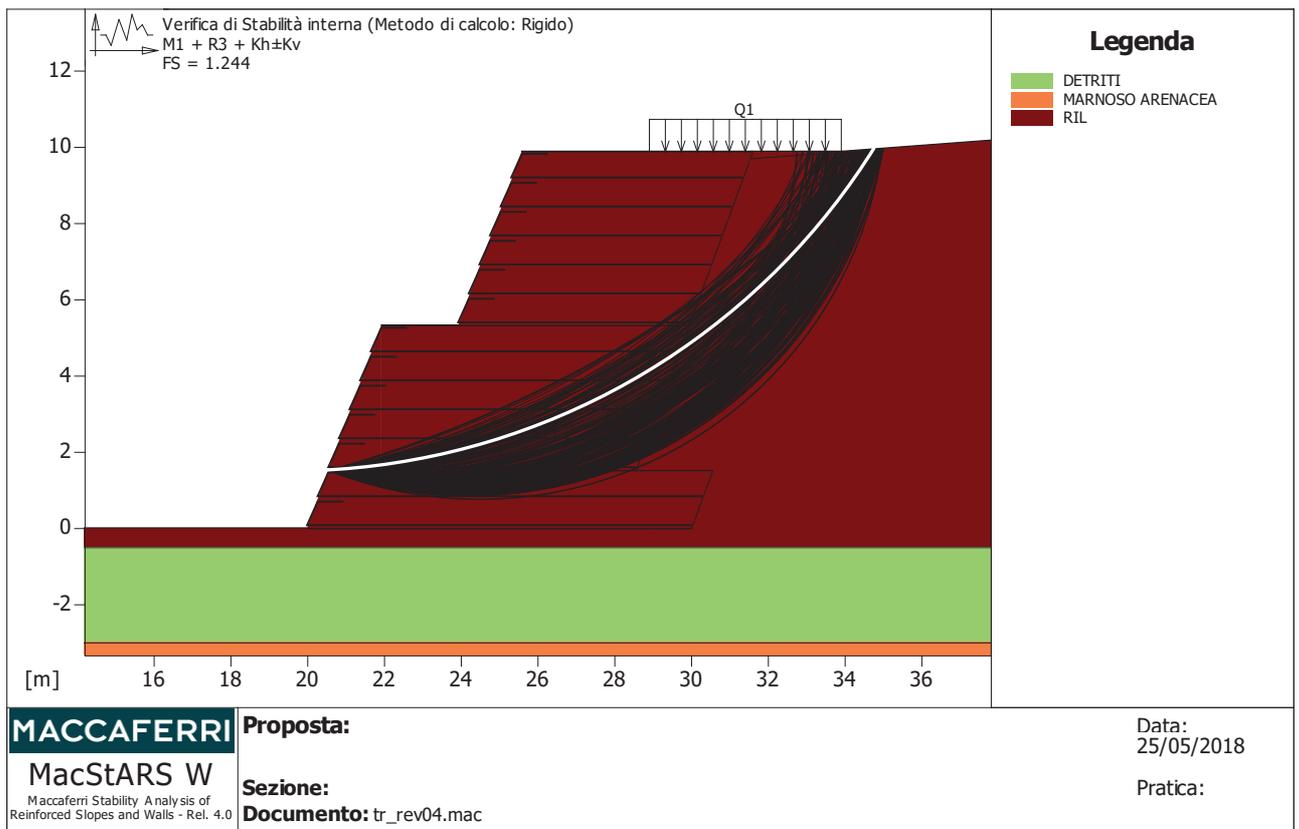
Coefficiente di sicurezza sulla capacità portante.....: 11.607

Fondazione equivalente...[m].....: 8.00

Relazione di calcolo – Terra rinforzata

Eccentricità forza normale[m].....: -1.64  
 Braccio momento.....[m].....: 3.79  
 Forza normale \_[kN].....: 1117.70  
 Pressione estremo di valle[kN/m²]...: -255.20  
 Pressione estremo di monte.....[kN/m²]...: 728.26

Fattore	Classe
1.50	Variabile - sfavorevole
0.00	Sisma
1.00	Coeff. Parziale - tangente dell'angolo di resistenza a taglio
1.00	Coeff. Parziale - Coesione efficace
1.00	Coeff. Parziale - Peso dell'unità di volume - favorevole
1.00	Fs Rottura Rinforzi
1.00	Fs Sfilamento Rinforzi
1.10	Coeff. parziale R - Scorrimento
1.40	Coeff. parziale R - Capacità portante
1.15	Coeff. parziale R - Ribaltamento



**Verifica di stabilità interna :**

Combinazione di carico : M1 + R3 + Kh±Kv

Calcolo delle forze nei rinforzi col metodo rigido

Ricerca delle superfici critiche col metodo di Bishop

Coefficiente di sicurezza minimo calcolato.....: 1.244

Intervallo di ricerca delle superfici

Blocco Segmento di arrivo, ascisse [m]

B1 Primo punto Secondo punto

22.00 35.00

Numero punti avvio superfici sul segmento di partenza\_: 1

Numero totale superfici di prova.....: 1000

Lunghezza segmenti delle superfici.. [m].....: 0.50

Angolo limite orario.....[°].....: 0.00

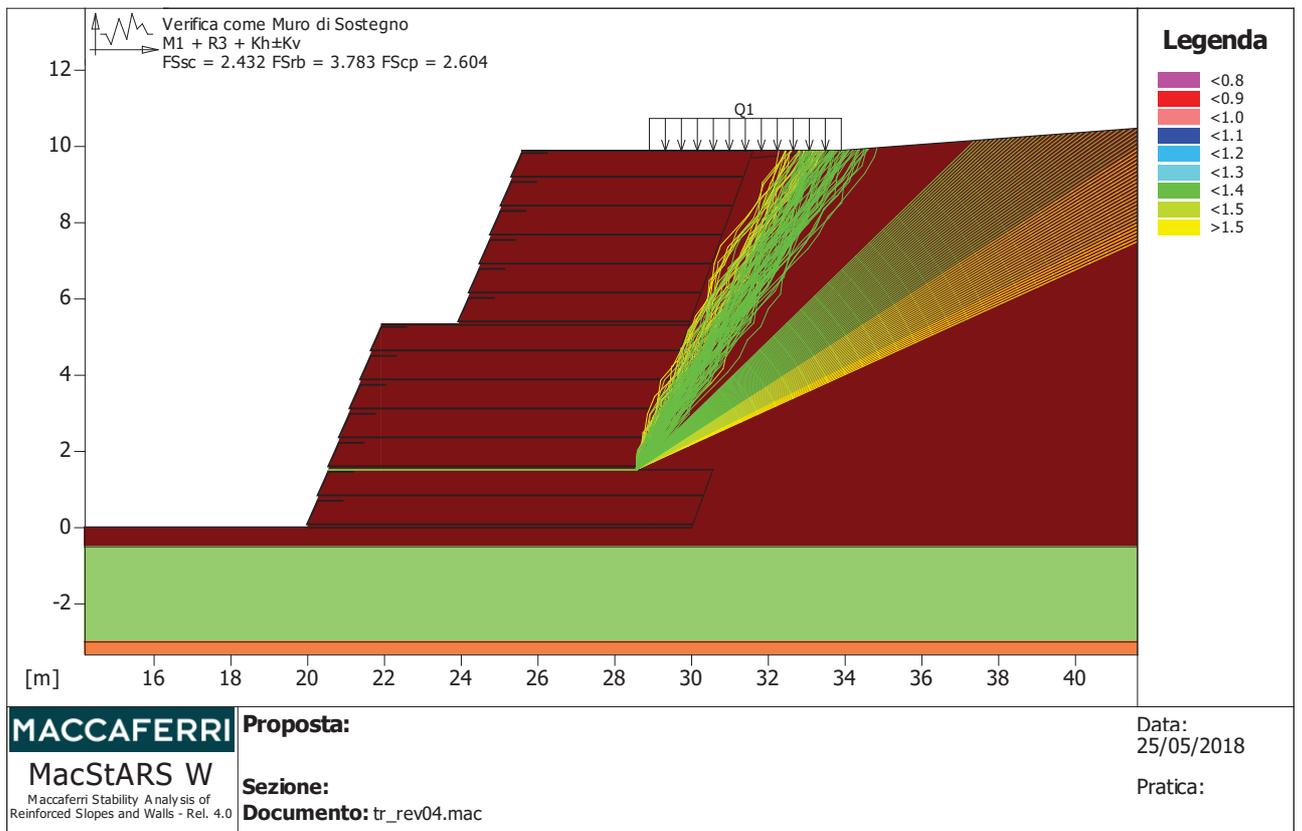
Angolo limite antiorario....[°].....: 0.00

Blocco : B1

Maccaferri - Green Terramesh - 70° - 8/2.7P - 0.76

Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	agente	1/Fmax
0.760	50.0	515.1	45.9	1.09	11.22
1.520	50.0	270.1	45.9	1.09	5.88
2.280	50.0	112.0	45.9	1.09	2.44

Fattore	Classe
1.00	Variabile - sfavorevole
1.00	Sisma
1.00	Coeff. Parziale - tangente dell'angolo di resistenza a taglio
1.00	Coeff. Parziale - Coesione efficace
1.00	Coeff. Parziale - Peso dell'unità di volume - favorevole
1.00	Fs Rottura Rinforzi
1.00	Fs Sfilamento Rinforzi
1.20	Coeff. Parziale R - Stabilità



**Verifica come muro di sostegno :**

Combinazione di carico : M1 + R3 + Kh±Kv

Stabilità verificata sul blocco : B1

Forza Stabilizzante.....[kN/m].....: 721.78

Forza Instabilizzante.....[kN/m].....: 296.76

Classe scorrimento.....: Coeff. parziale R - Scorrimento

Coefficiente di sicurezza allo scorrimento.....: 2.432

Momento Stabilizzante....[kN\*m/m].....: 6583.60

Momento Instabilizzante...[kN\*m/m].....: 1740.40

Classe momento.....: Coeff. parziale R - Ribaltamento

Coefficiente di sicurezza al ribaltamento.....: 3.783

Pressione ultima calcolata con metodo dell'equilibrio limite.

Pressione ultima.....[kN/m²]...: 419.01

Pressione media agente...[kN/m²]...: 134.08

Classe pressione.....: Coeff. parziale R - Capacità portante

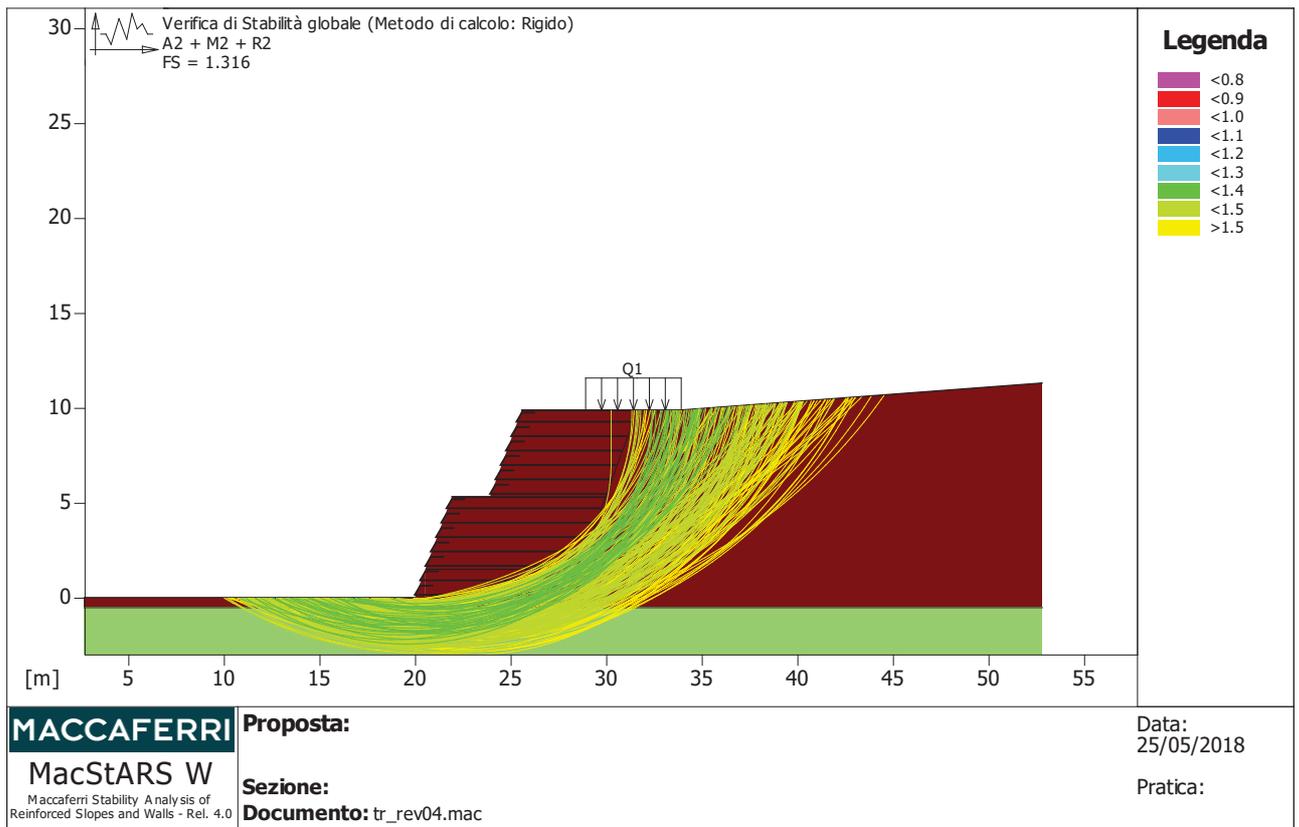
Coefficiente di sicurezza sulla capacità portante.....: 2.604

Fondazione equivalente...[m].....: 8.00

Relazione di calcolo – Terra rinforzata

Eccentricità forza normale[m].....:	-0.70
Braccio momento.....[m].....:	5.86
Forza normale _[kN].....:	1030.80
Pressione estremo di valle[kN/m²]...:	57.03
Pressione estremo di monte.....[kN/m²]...:	255.19

Fattore	Classe
1.00	Variabile - sfavorevole
1.00	Sisma
1.00	Coeff. Parziale - tangente dell'angolo di resistenza a taglio
1.00	Coeff. Parziale - Coesione efficace
1.00	Coeff. Parziale - Peso dell'unità di volume - favorevole
1.00	Fs Rottura Rinforzi
1.00	Fs Sfilamento Rinforzi
1.00	Coeff. parziale R - Scorrimento
1.20	Coeff. parziale R - Capacità portante
1.00	Coeff. parziale R - Ribaltamento



**Verifica di stabilità globale :**

Combinazione di carico : A2 + M2 + R2

Calcolo delle forze nei rinforzi col metodo rigido

Ricerca delle superfici critiche col metodo di Bishop

Coefficiente di sicurezza minimo calcolato.....: 1.316

Intervallo di ricerca delle superfici

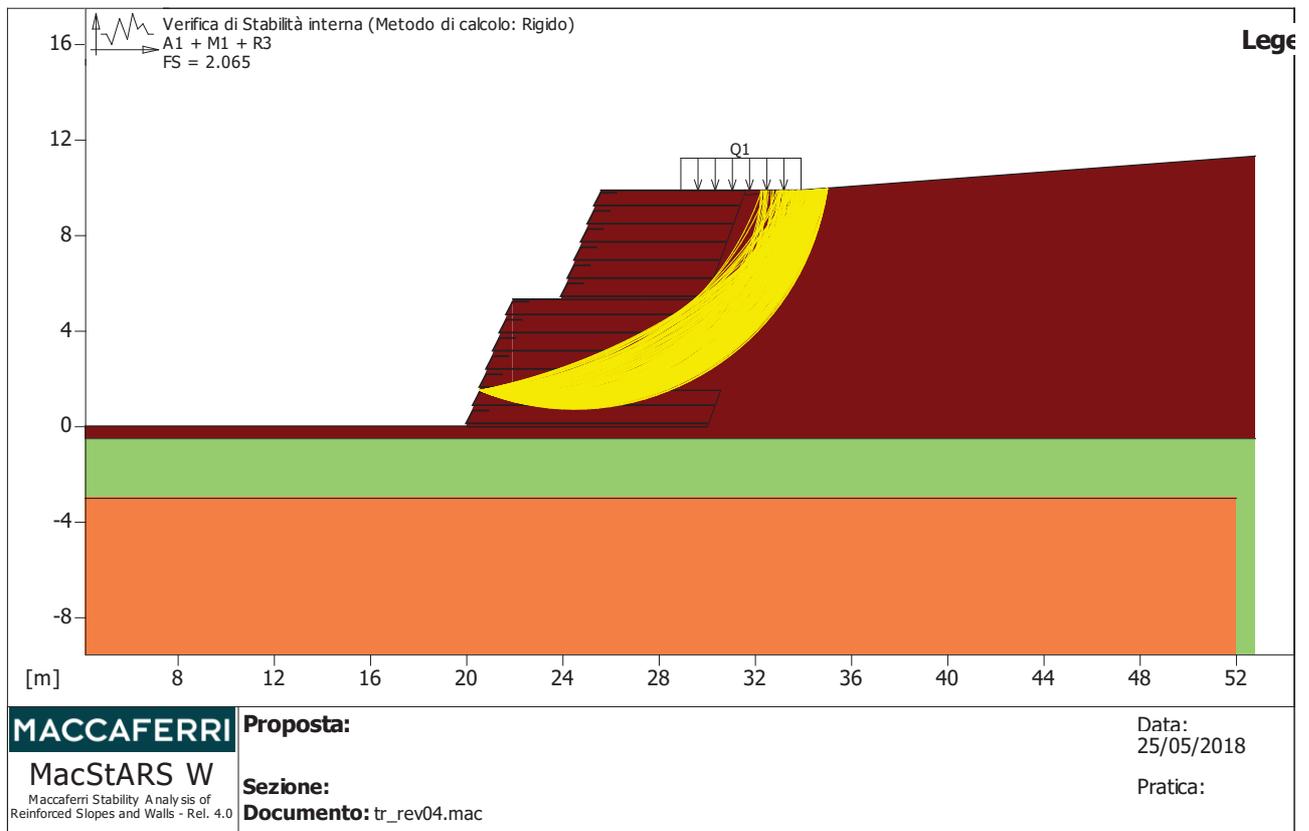
Segmento di partenza, ascisse [m]		Segmento di arrivo, ascisse [m]	
Primo punto	Secondo punto	Primo punto	Secondo punto
10.00	20.00	21.60	45.00
Numero punti avvio superfici sul segmento di partenza.:		100	
Numero totale superfici di prova.....:		1000	
Lunghezza segmenti delle superfici.. [m].....:		0.50	
Angolo limite orario.....[°].....:		0.00	
Angolo limite antiorario....[°].....:		0.00	

Blocco : B3

Maccaferri - Green Terramesh - 70° - 8/2.7P - 0.76

Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	agente	1/Fmax
0.000	50.0	734.7	45.9	1.09	16.01
0.760	50.0	468.7	45.9	1.09	10.21

Fattore	Classe
1.30	Variabile - sfavorevole
0.00	Sisma
1.25	Coeff. Parziale - tangente dell'angolo di resistenza a taglio
1.25	Coeff. Parziale - Coesione efficace
1.00	Coeff. Parziale - Peso dell'unità di volume - favorevole
1.00	Fs Rottura Rinforzi
1.00	Fs Sfilamento Rinforzi
1.10	Coeff. Parziale R - Stabilità



**Verifica di stabilità interna :**

Combinazione di carico : A1 + M1 + R3

Calcolo delle forze nei rinforzi col metodo rigido

Ricerca delle superfici critiche col metodo di Bishop

Coefficiente di sicurezza minimo calcolato.....: 2.065

Intervallo di ricerca delle superfici

Blocco Segmento di arrivo, ascisse [m]

B1 Primo punto Secondo punto

22.00 35.00

Numero punti avvio superfici sul segmento di partenza\_: 1

Numero totale superfici di prova.....: 1000

Lunghezza segmenti delle superfici, [m].....: 0.50

Angolo limite orario.....[°].....: 0.00

Angolo limite antiorario.....[°].....: 0.00

Blocco : B1

Relazione di calcolo – Terra rinforzata

Maccaferri - Green Terramesh - 70° - 8/2.7P - 0.76

Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rottura	sfilamento		agente	1/Fmax
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.760	50.0	483.2	45.9	1.09	10.53
1.520	50.0	246.4	45.9	1.09	5.37
2.280	50.0	100.9	45.9	1.09	2.20

Fattore	Classe
1.50	Variabile - sfavorevole
0.00	Sisma
1.00	Coeff. Parziale - tangente dell'angolo di resistenza a taglio
1.00	Coeff. Parziale - Coesione efficace
1.00	Coeff. Parziale - Peso dell'unità di volume - favorevole
1.00	Fs Rottura Rinforzi
1.00	Fs Sfilamento Rinforzi
1.00	Coeff. Parziale R - Stabilità