

# PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



## PROGETTO DEFINITIVO ALTERNATIVE AI SITI DI DEPOSITO

(Richieste CTVA del 22/12/2011 Prot. CTVA/2011/4534 e del 16/03/2012 Prot. CTVA/2012/1012)

### EUROLINK S.C.p.A.

IMPREGILO S.p.A.  
SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A.  
COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. DI RAVENNA SOC. COOP. A.R.L.  
SACYR S.A.U.  
ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD  
A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE

IL PROGETTISTA  
ATI PRO-GLOBAL  
Ing. B. Polifroni n° A1845  
Arch. S. Fedele n° 274



Ing. E. Pagani  
Ordine Ing. Milano n°15408

IL CONTRAENTE GENERALE  
PROJECT MANAGER  
(Ing. P.P. Marcheselli)

STRETTO DI MESSINA  
Direttore Generale  
Ing. G. Fiammenghi

STRETTO DI MESSINA  
Amministratore Delegato  
Dott. P. Ciucci

Firmato digitalmente ai sensi dell' "Art.21 del D.Lgs. 82/2005"

CZV0682\_F0

<i>Unità Funzionale</i>	COLLEGAMENTI VERSANTE CALABRIA
<i>Tipo di sistema</i>	CANTIERI
<i>Raggruppamento di opere/attività</i>	SITI DI RECUPERO AMBIENTALE E PRODUZIONE INERTI
<i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i>	SITI DI RECUPERO AMBIENTALE
<i>Titolo del documento</i>	CRA 4 - MARRO - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'

CODICE

C G 1 4 0 0 P R B V C C Z C 4 S D 2 1 0 0 0 0 0 1 F 0

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	08/06/2012	EMISSIONE FINALE	ZANGHI'	G. POLIFRONI	B. POLIFRONI



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>		<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012

## INDICE

INDICE .....	3
1 INTRODUZIONE .....	5
2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	7
3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO .....	7
4 INDAGINI GEOGNOSTICHE.....	7
5 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	9
5.1 Stato iniziale dei materiali .....	10
6 PERICOLOSITA' SISMICA .....	11
7 FASI COSTRUTTIVE.....	15
8 MODELLO DI CALCOLO.....	15
8.1 Metodo agli elementi finiti (Metodo SSR) .....	15
8.2 Metodo dell'equilibrio limite (LEM) .....	17
9 PRESCRIZIONI ESECUTIVE .....	17
10 RISULTATI DI CALCOLO .....	19
10.1 Sezione 1.....	19
10.2 Sezione 2.....	21
11 TABULATI DI CALCOLO.....	23
11.1 Sezione 1 – tabulato di input.....	23
11.2 Sezione 1 – tabulato di output.....	28
11.3 Sezione 2 – tabulato di input.....	32
11.4 Sezione 2 – tabulato di output.....	37



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

## 1 INTRODUZIONE

La presente relazione riguarda la caratterizzazione fisico meccanica del sottosuolo e le verifiche connesse con la progettazione del deposito di materiale inerte denominato "CRA4", che sorgerà in C.da Marro nel comune di Terranova Sappo Minulio, in provincia di Reggio Calabria (Fig.1.1). Dalla figura 1.1, si evince che il deposito nel suo complesso è costituito da due "corpi", uno riveste carattere temporaneo (si prevede, infatti, che il materiale depositato venga successivamente rimosso) indicato come "Area A", l'altro denominato "Area B" riveste carattere provvisorio e definitivo, si prevede, infatti, che una porzione del materiale stoccato venga successivamente rimosso (fig. 1.2). Nelle analisi svolte è stata assunta per l'opera una vita nominale pari a 10 anni. Le analisi di stabilità del deposito sono state effettuate secondo il metodo **Shear Strength Reduction (SSR)**, applicato ad un modello agli elementi finiti a comportamento elasto-plastico, considerando le sezioni che permettono di individuare le principali configurazioni critiche dello stesso (Fig.1.3). Inoltre, con riferimento alla sezione critica del deposito, è stata anche eseguita una verifica di controllo, seguendo l'approccio tradizionale all'equilibrio limite (**LEM**), che mostra come i fattori di sicurezza ottenuti siano congruenti fra loro.

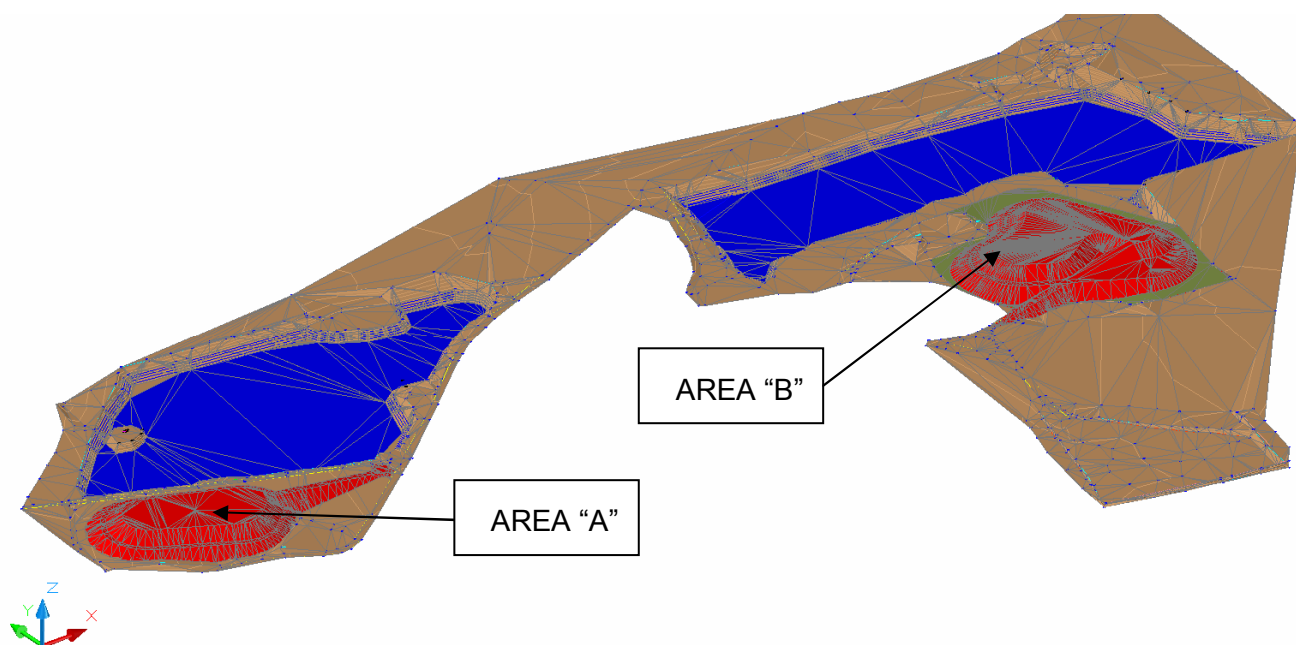



Figura 1.1 : Vista tridimensionale del deposito

Per quanto riguarda gli aspetti litologici, geologici ed idrogeologici si fa riferimento alle specifiche relazioni di progetto integrate dagli elaborati generali di riferimento:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

**Geologia:** Relazione Geologica generale e annesse relazioni idrogeologiche

- per la Calabria CG0800PRGDCSBC6G000000001A;

**Geotecnica:** Relazione Geotecnica generale

- per la Calabria CG0800PRBDCSBC8G000000001A;



Figura 1.2 : Sezione tipo del deposito "Area B" con indicazione del volume di terreno da rimuovere

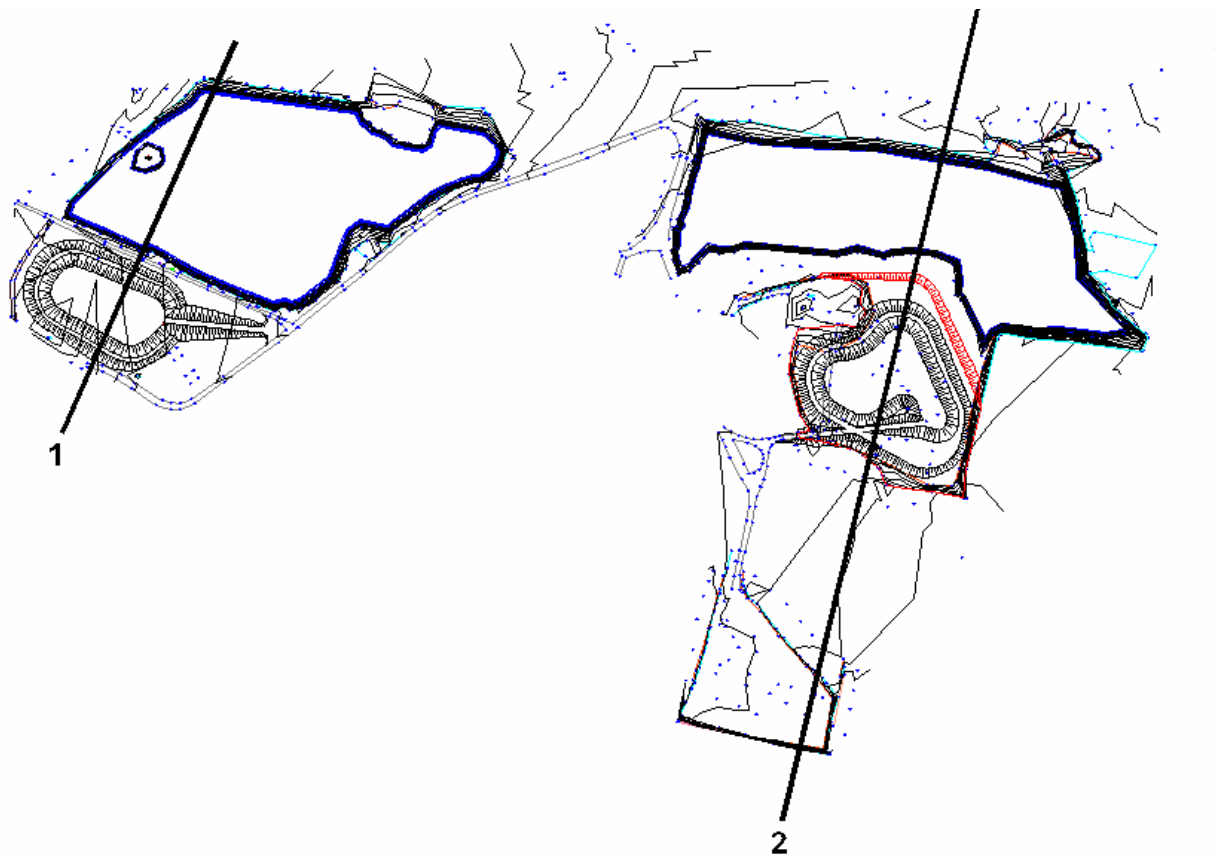


Figura 1.3 : Planimetria del deposito con indicazione delle sezioni di calcolo

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Nel seguito si elencano le normative a cui si è fatto riferimento, e si descrivono i parametri geotecnici adottati nei calcoli, i modelli di calcolo e le verifiche di stabilità del deposito in oggetto. Per ulteriori dettagli si rimanda agli elaborati grafici di progetto a cui il presente documento si affianca.

## 2            **NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

- D.M. Infrastrutture 14 Gennaio 2008, pubblicato su S.O. alla G.U. 4 febbraio 2008, n. 29 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”
- 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 (GU n.47 del 26 Febbraio 2009 – Suppl. Ordinario n.27)
- UNI ENV 1997: “Eurocodice 7. Progettazione geotecnica”

## 3            **INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO**

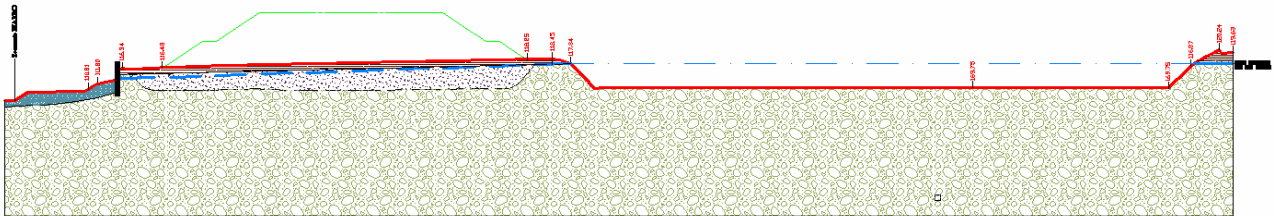
Il sito interessato dall’intervento è caratterizzato principalmente da depositi alluvionali recenti. Dal punto di vista granulometrico sono costituiti in prevalenza da elementi clastici di dimensioni comprese tra i ciottoli e le ghiaie, immersi in un’abbondante matrice sabbiosa e sabbioso-limosa. I ciottoli sono generalmente di forma subarrotondata e di natura metamorfica e granitica; le sabbie sono in prevalenza quarzose ed hanno forma subangolare. Trattandosi di materiale di deposizione recente, la pressione litostatica non è stata mai molto elevata, per cui i processi diagenetici sono praticamente irrilevanti. I sedimenti sono quindi privi di coesione effettiva e risultano facilmente disgregabili per la mancanza di cementazione. Lo spessore di questa formazione risulta variabile fra 30 e 50 m. Durante le operazioni di cava è stata identificata la risalita dl’acqua, fino alla quota campagna, che ha dato origine alla formazione del bacino esistente.

## 4            **INDAGINI GEOGNOSTICHE**

I dati acquisiti in questa fase di studio, integrati anche con le informazioni disponibili da altre indagini, per come specificato nella relazione geologica, hanno consentito di definire, con sufficiente approssimazione il modello geotecnico di progetto. A tal riguardo, in figura 4.1 e tabella 4.1, si riportano le sezioni litotecniche di riferimento utilizzate nei calcoli ed i rispettivi parametri geotecnici di sintesi.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>		<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012

**SEZIONE GEOTECNICA N. 1**



**SEZIONE GEOTECNICA N. 2**

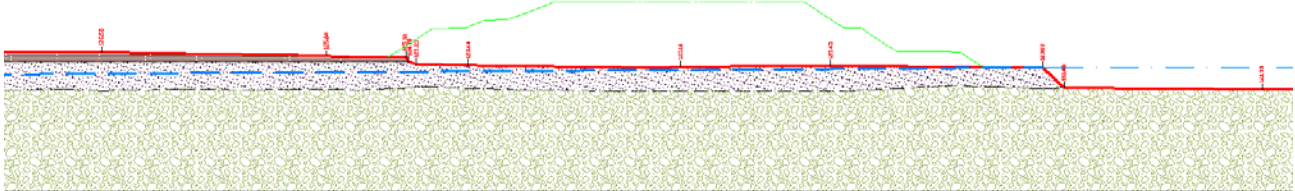


Figura 4.1 : Sezioni geotecniche di riferimento





Litologia	Parametri geotecnici
 <b>Materiale eterogeneo di riempimento degli scavi derivati dalla passata attività estrattiva.</b>	<b>Peso Unità di Volume: 1,8 t/mc</b> <b>Angolo di Attrito: 22°</b> <b>Coesione: 0,00 Kg/cmq</b>
 <b>Terreno vegetale a composizione limosa - argillosa.</b>	<b>Peso Unità di Volume: 1,8 t/mc</b> <b>Angolo di Attrito: 22°</b> <b>Coesione: 0,16 Kg/cmq</b>
 <b>Depositi alluvionali in alveo attivo attivo composti da blocchi e ciottoli sub arrotondati immersi in una matrice ghiaioso - sabbiosa, con lenti di ghiaie sabbiose e sabbie limose.</b>	<b>Peso Unità di Volume: 1,9 t/mc</b> <b>Angolo di Attrito: 32°</b> <b>Coesione: 0,00 Kg/cmq</b>
 <b>Depositi alluvionali composti da blocchi e ciottoli sub arrotondati immersi in una matrice ghiaioso - sabbiosa, con lenti di ghiaie sabbiose e sabbie limose.</b>	<b>Peso Unità di Volume: 1,9 t/mc</b> <b>Angolo di Attrito: 33°</b> <b>Coesione: 0,00 Kg/cmq</b>

Tabella 4.1 : Parametri geotecnici di sintesi

Per quanto riguarda le indagini geofisiche è stato eseguito uno stendimento sismico, le risultanze delle indagini geosismiche MASW ha fornito il valore del  $V_{s,30}$ , necessario per classificare la categoria di sottosuolo [par.3.2.2, NTC 2008] :

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}} = 286 \text{ m/s}$$



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Il suolo in esame è, quindi, stato assimilato alla categoria "C" (depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti).

## 5 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La caratterizzazione geotecnica dell'area in esame è stata definita facendo riferimento a dati di prove penetrometriche pesanti eseguite in aree di fondovalle alluvionali simili e vicine a quella interessata dall'intervento in progetto. Si riassumono i parametri geotecnici utilizzati nelle analisi:

### ▪ Materiale di risulta

		Caratteristici	Di progetto
Peso di Volume	$\gamma$ [kN/mc]	18.00	18.00
Peso di Volume saturo	$\gamma_s$ [kN/mc]	19.00	19.00
Coesione efficace	$c'$ [kPa]	0	0
Angolo di attrito	$\phi$ [°]	22	17.91
Modulo di Young	$E$ [kPa]	2500	2500
Coefficiente di Poisson	$\nu$	0.30	0.30

### ▪ Terreno vegetale a composizione limosa-argillosa

		Caratteristici	Di progetto
Peso di Volume	$\gamma$ [kN/mc]	18.00	18.00
Peso di Volume saturo	$\gamma_s$ [kN/mc]	19.00	19.00
Coesione efficace	$c'$ [kPa]	16	12.80
Angolo di attrito	$\phi$ [°]	22	17.91
Modulo di Young	$E$ [kPa]	2500	2500
Coefficiente di Poisson	$\nu$	0.30	0.30

### ▪ Depositi alluvionali in alveo

		Caratteristici	Di progetto
Peso di Volume	$\gamma$ [kN/mc]	19.00	19.00
Peso di Volume saturo	$\gamma_s$ [kN/mc]	20.00	20.00
Coesione efficace	$c'$ [kPa]	0	0
Angolo di attrito	$\phi$ [°]	32	26.56
Modulo di Young	$E$ [kPa]	20000	20000
Coefficiente di Poisson	$\nu$	0.32	0.32

### ▪ Depositi alluvionali – ciottoli con ghiaia e sabbia

		Caratteristici	Di progetto
Peso di Volume	$\gamma$ [kN/mc]	19.00	19.00

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>		<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012

Peso di Volume saturo	$\gamma_s$ [kN/mc]	20.00	20.00
Coesione efficace	$c'$ [kPa]	0	0
Angolo di attrito	$\phi$ [°]	33	27.45
Modulo di Young	$E$ [kPa]	20000	20000
Coefficiente di Poisson	$\nu$	0.32	0.32

▪ **Materiale inerte (che costituirà il corpo del deposito)**

		Caratteristici	Di progetto
Peso di Volume	$\gamma$ [kN/mc]	19.00	19.00
Peso di Volume saturo	$\gamma_s$ [kN/mc]	20.00	20.00
Coesione efficace	$c'$ [kPa]	0	0
Angolo di attrito	$\phi$ [°]	35	29.25
Modulo di Young	$E$ [kPa]	30000	30000
Coefficiente di Poisson	$\nu$	0.30	0.30

## 5.1 Stato iniziale dei materiali

Le condizioni tensionali presenti in situ prima dello scavo sono state considerate di tipo gravitazionale. Le tensioni verticali iniziali in un dato punto del modello del terreno variano, quindi, linearmente con la profondità.

Le componenti orizzontali sono ricavate a partire da quelle verticali, attraverso il coefficiente di spinta a riposo  $k'$ . In particolare, in termini di tensioni efficaci e totali risultano rispettivamente:

$$\sigma'_H = k' \sigma'_V \text{ e } \sigma_H = k' (\sigma_V - u) + u$$

dove

- $\sigma'_H$  tensione orizzontale efficace;
- $\sigma'_V$  tensione verticale efficace;
- $k'$  coefficiente di spinta a riposo pari al rapporto tra la tensione orizzontale e verticale;
- $\sigma_H$  tensione orizzontale totale;
- $\sigma_V$  tensione verticale totale;
- $u$  pressione interstiziale;

Nel caso esaminato è stato assunto un valore di  $k'$  dato dalla seguente relazione [Jaky, 1944]:

$$k' = 1 - \sin \phi'$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE  DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

In cui  $\varphi'$  è l'angolo di resistenza al taglio.

## 6 PERICOLOSITA' SISMICA

I parametri sismici sono funzione di diversi fattori, quali:

- coordinate geografiche del sito in esame (latitudine e longitudine)
- vita nominale
- classe dell'opera
- periodo di riferimento
- coefficiente d'uso
- categoria topografica
- categoria di sottosuolo

La vita nominale, funzione del tipo d'opera che verrà realizzata [tabella 2.4I NTC 2008], è stata assunta pari a 10 anni, la classe dell'opera pari a 2, ed il coefficiente d'uso pari a 1. Conseguentemente il periodo di riferimento dell'azione sismica è pari a 10 anni [par. 2.4.3 NTC 2008]. La categoria topografica, funzione del sito in esame, è stata scelta corrisponde alla categoria T1 [tab. 3.2.IV, NTC 2008], e quella di sottosuolo dedotta dalle indagini sismiche a rifrazione è pari a C.

Le componenti dell'azione sismica sono state valutate a partire dei coefficienti  $K_0$  e  $K_v$ , funzione dei seguenti parametri:

$$K_0 = \beta_s \cdot \left( \frac{a_{\max}}{g} \right) \qquad K_v = \pm 0.5 \cdot K_0$$

dove:

$\beta_s$  coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

$g$  accelerazione di gravità;

$a_{mac}$  accelerazione massima attesa sul sito;

Quest'ultimo valore dipende dalle caratteristiche geomorfologiche del territorio, in particolare:

$$a_{mac} = S_s \cdot S_T \cdot a_g$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

$S_s$  coefficiente di amplificazione stratigrafica, funzione di  $F_0$  (fattore massimo di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale) e della categoria di suolo (A, B, C, D, E);

$S_T$  coefficiente di amplificazione topografica;

$a_g$  accelerazione orizzontale massima;

Sono stati, così, dedotti i parametri sismici relativi ai diversi stati limite. Si ricorda che nelle analisi di stabilità svolte si è fatto riferimento allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV). Si riportano i parametri sismici ricavati.

#### Sito in esame.

latitudine: 38,337307

longitudine: 15,99724

Classe: 2

Vita nominale: 10

#### Siti di riferimento

Sito 1 ID: 44106 Lat: 38,3568 Lon: 15,9719 Distanza: 3089,629

Sito 2 ID: 44107 Lat: 38,3553 Lon: 16,0355 Distanza: 3891,542

Sito 3 ID: 44329 Lat: 38,3053 Lon: 16,0336 Distanza: 4766,549

Sito 4 ID: 44328 Lat: 38,3068 Lon: 15,9701 Distanza: 4141,485

#### Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C

Categoria topografica: T1

Periodo di riferimento: 10anni

Coefficiente  $c_u$ : 1

#### Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %

Tr: 30 [anni]

$a_g$ : 0,067 g

$F_0$ : 2,304

$T_c^*$ : 0,277 [s]

#### Danno (SLD):

Probabilità di superamento: 63 %

Tr: 30 [anni]

$a_g$ : 0,067 g

$F_0$ : 2,304

$T_c^*$ : 0,277 [s]

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento: 10 %  
Tr: 95 [anni]  
ag: 0,126 g  
Fo: 2,289  
Tc\*: 0,317 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento: 5 %  
Tr: 195 [anni]  
ag: 0,179 g  
Fo: 2,349  
Tc\*: 0,336 [s]

Coefficienti Sismici

SLO:

Ss: 1,500  
Cc: 1,600  
St: 1,000  
Kh: 0,020  
Kv: 0,010  
Amax: 0,985  
Beta: 0,200

SLV:


Ss: 1,500  
Cc: 1,530  
St: 1,000  
Kh: 0,045  
Kv: 0,023  
Amax: 1,854  
Beta: 0,240

SLD:

Ss: 1,500  
Cc: 1,600  
St: 1,000  
Kh: 0,020  
Kv: 0,010  
Amax: 0,985  
Beta: 0,200

SLC:

Ss: 1,450  
Cc: 1,500  
St: 1,000  
Kh: 0,062  
Kv: 0,031  
Amax: 2,546  
Beta: 0,240

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>		
<p align="center">CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</p>	<p><i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001</p>	<p><i>Rev</i> F0</p>	<p><i>Data</i> 08/06/2012</p>	

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

## 7 FASI COSTRUTTIVE

Il riempimento del deposito sarà effettuato in progressive stratificazioni (rappresentate nelle analisi con spessore pari a circa 3.00 m). Nel modello di calcolo impiegato, tenendo conto di quanto detto in premessa, è stato ricostruito l'intero processo di realizzazione del deposito, partendo dalla configurazione di terreno vergine, corrispondente alle condizioni tensionali iniziali, antecedenti il progressivo accumulo di materiale, fino alle condizioni finali, in presenza di sisma. In particolare, gli stages di calcolo previsti sono:

- STAGE 1: Condizioni iniziali
- STAGE 2-n-1: Sovrapposizione degli strati di riempimento del deposito
- STAGE n: Azione del sisma e presenza della falda

## 8 MODELLO DI CALCOLO

### 8.1 Metodo agli elementi finiti (Metodo SSR)

La risoluzione di un problema di stabilità di un versante richiede la conoscenza delle sue equazioni di governo, ovvero le equazioni di equilibrio e quelle costitutive, che descrivono il comportamento meccanico del terreno.

Tali equazioni risultano particolarmente complesse, visto che il terreno è un sistema multifase, riconducibile ad un sistema monofase solo in condizioni di terreno secco, o di analisi in condizioni drenate.

Inoltre, è praticamente impossibile definire una legge costitutiva di validità generale, vista la non-linearità del terreno anche in corrispondenza di piccole deformazioni, la sua anisotropia e la dipendenza del suo comportamento sia dallo sforzo normale che da quello deviatorico.

A causa di tali difficoltà è necessario introdurre delle ipotesi semplificative, ed in particolare:

- Il comportamento costitutivo del terreno viene assunto rigido perfettamente plastico.
- La resistenza del materiale viene espressa unicamente dalla coesione e dall'angolo di resistenza al taglio, assunti costanti e caratteristici dello stato plastico; si suppone valido il criterio di rottura di Mohr-Coulomb.





		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

## 8.2 Metodo dell'equilibrio limite (LEM)

Il metodo dell'equilibrio limite consiste nello studiare l'equilibrio di un corpo rigido, costituito dal pendio e da una superficie di scorrimento di forma qualsiasi (linea retta, arco di cerchio, spirale logaritmica); da tale equilibrio viene calcolata l'azione instabilizzante  $Ed$  e confrontata con la resistenza  $Rd$  disponibile per il sistema geotecnico, valutata secondo il criterio di rottura di *Coulomb*, da tale confronto ne scaturisce l'indicazione sulla stabilità attraverso il coefficiente di sicurezza  $F = Rd/Ed$ .

Le analisi sono state condotte con il programma di calcolo *SLIDE* della *Rocscience Inc.*, utilizzando il metodo di *Bishop semplificato* (1955), ed ipotizzando superfici di scorrimento circolari di raggio  $r$ , con il materiale coinvolto nella rottura suddiviso in conci di larghezza  $b$  (vedi schema riportato in figura 8.2), per ognuno dei quali viene espresso il rapporto fra i momenti stabilizzanti  $M_s$  (resistenza  $Rd$  del sistema geotecnico) e i momenti ribaltanti  $M_r$  (azione  $Ed$ ) calcolati rispetto al centro del cerchio.

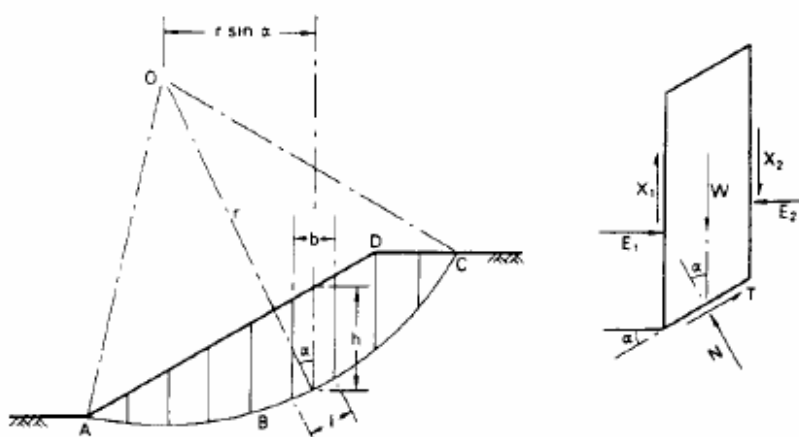


Figura 8.2

## 9 PRESCRIZIONI ESECUTIVE

Il deposito in esame è formato prevalentemente da materiali classificati come “terre e rocce da scavo” provenienti quindi, da scavi di sbancamento di fondazione o in galleria appartenenti ai gruppi  $A_1, A_{2-4}, A_{2-5}, A_3$  (classificazione **CNR- UNI 10006**, 1963).

Prima della costruzione del corpo del deposito, si deve procedere alla rimozione e asportazione del terreno vegetale ove presente, per uno spessore medio pari a 25 cm, in modo che il piano di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

posa risulti più regolare possibile, privo di avvallamenti e tale da evitare il ristagno delle acque piovane.

I piani di posa sono ottenuti praticando scavi di sbancamento a gradoni laddove il terreno si presenta non orizzontale. La stesa del materiale deve essere eseguita con regolarità per strati di spessore costante pari a 50 cm. A compattazione avvenuta, i materiali impiegati devono presentare un modulo di deformabilità non inferiore a 15 MPa e caratteristiche di resistenza congruenti con le ipotesi di progetto per il corpo del deposito; queste ultime devono essere accertate in modo rigoroso, e garantite anche a lungo termine, nelle condizioni climatiche e idrogeologiche più sfavorevoli.

E' inoltre opportuno sottolineare la necessità di realizzare una sperimentazione in vera grandezza ("**campo prova**") al fine di definire, sulla scorta dei risultati delle prove preliminari di laboratorio e con l'impiego di mezzi disponibili, gli spessori di stesa ed il numero di passaggi dei compattatori che permettono di raggiungere le prestazioni prescritte (grado di addensamento, portanza e resistenza). La sperimentazione in scala reale deve riguardare ogni campione omogeneo di materiale che si intende utilizzare per la realizzazione del corpo del deposito e deve essere completata prima della esecuzione dello stesso, in modo da essere di riferimento dei movimenti di materia e delle modalità esecutive di lavorazione. L'area predestinata alla prova deve essere perfettamente livellata, compattata, tale da presentare caratteristiche di deformabilità e resistenza analoghe a quelle dei materiali in esame.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

## 10 RISULTATI DI CALCOLO

Le Analisi sono state condotte seguendo l'Approccio 1, che prevede la combinazione 2 (A2+M2+R2), in accordo al codice normativo vigente [NTC 2008, par.6.8.2].

Secondo tale combinazione i parametri di resistenza del terreno sono decurtati del 25%, mentre gli eventuali carichi agenti sono considerati con il loro valore caratteristico.

L'azione sismica è stata considerata con il suo valore massimo nella direzione orizzontale, mentre ridotta del 30% nella direzione verticale.

Le analisi hanno evidenziato coefficienti di sicurezza superiori al coefficiente limite ( $SFR_{normativo}=1.10$ ) ammesso dalle NTC 2008. Di seguito vengono rappresentate le configurazioni considerate per le sezioni in studio:

### 10.1 Sezione 1

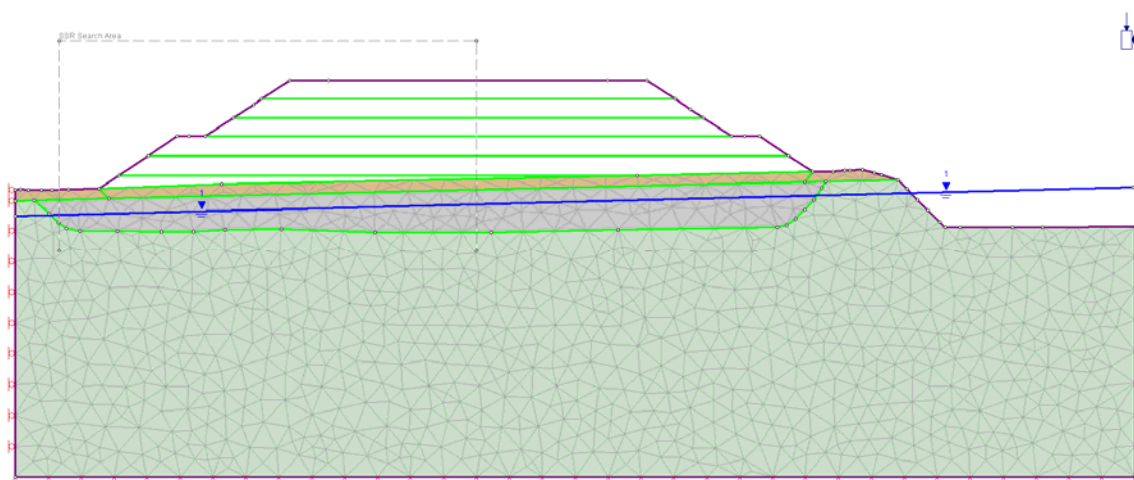


Figura 10.1 : Fase iniziale

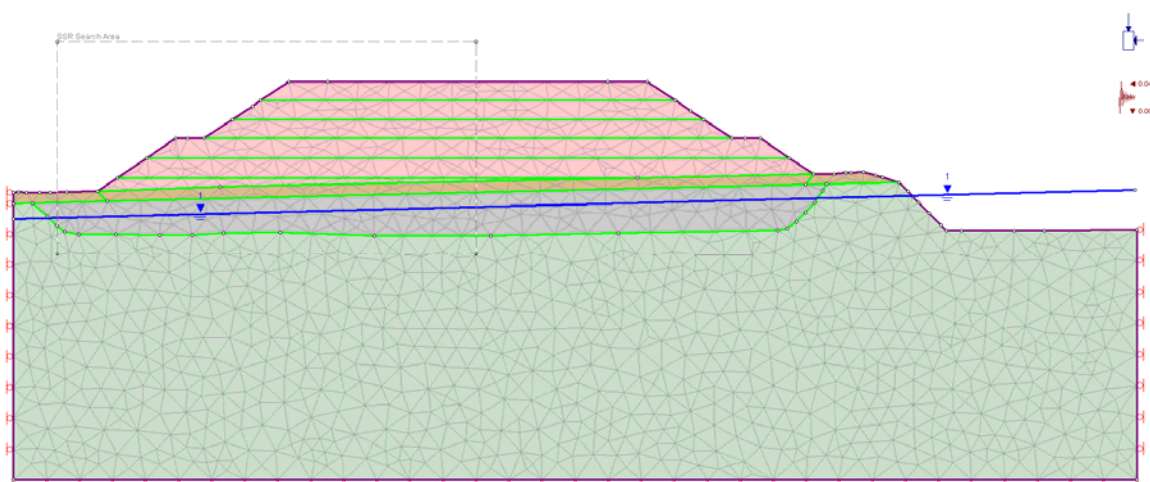


Figura 10.2 : Fase finale – completo riempimento

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>		<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012

L'analisi di stabilità condotta sulla configurazione di completo riempimento del deposito con materiale inerte ha fornito un valore del coefficiente di sicurezza pari a **1.25**, superiore al valore normativo.

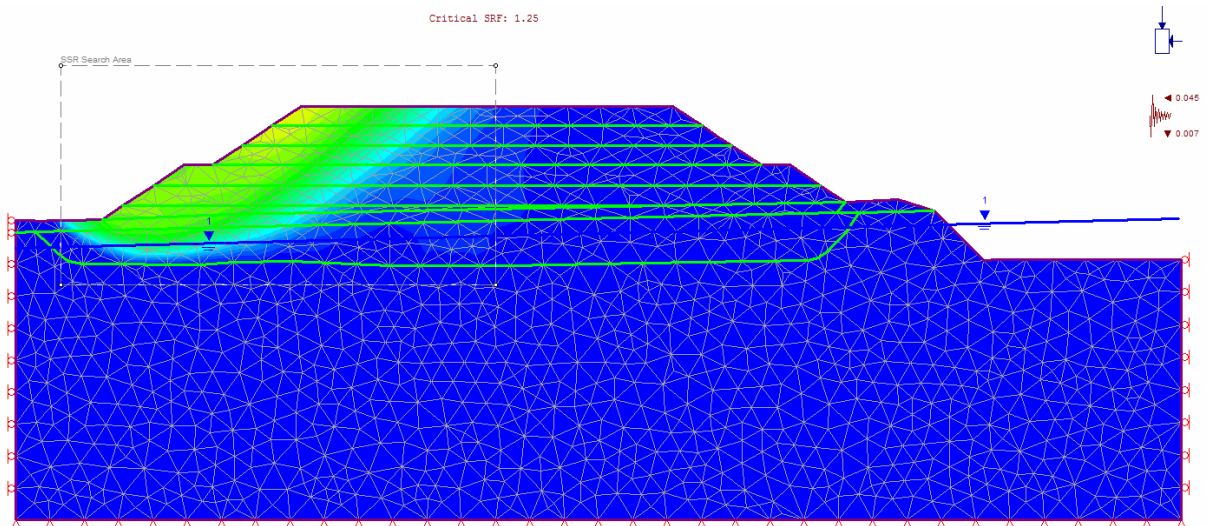


Figura 10.3 : Meccanismo di scivolamento - Spostamenti totali – Fase finale - SRF=1.25

Come accennato nell'introduzione, la verifica della sezione critica (sezione con coefficiente di sicurezza più basso) è stata anche eseguita secondo l'approccio tradizionale all'equilibrio limite (figura 10.4):

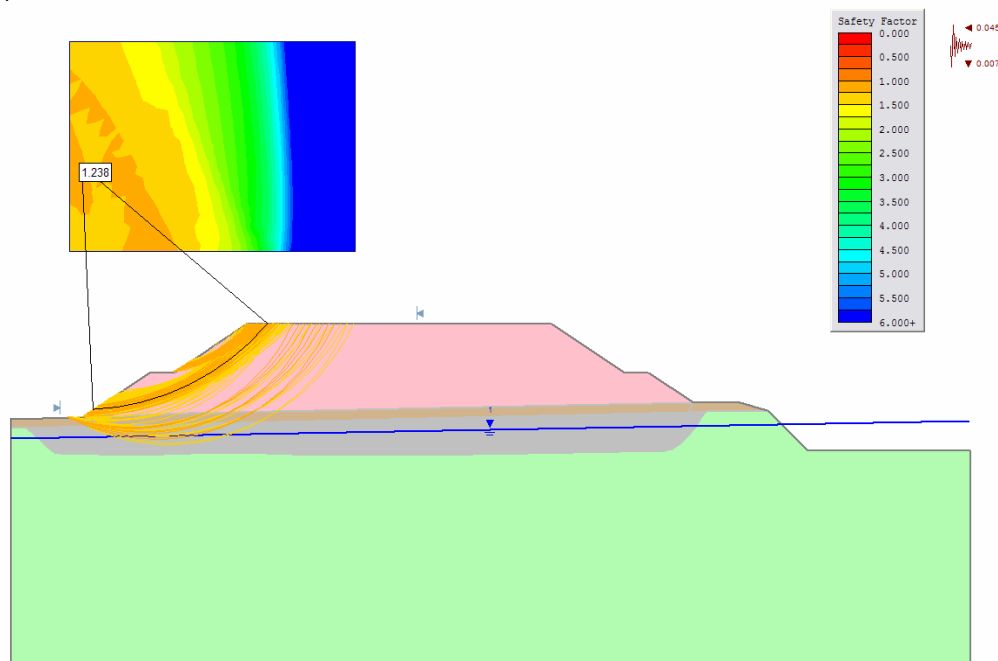


Figura 10.4 : Verifica di stabilità con il metodo dell'equilibrio limite (Sezione 1)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Dal confronto fra la figura 10.3 e la figura 10.4 appare evidente come i risultati ottenuti mediante le due analisi siano confrontabili fra di loro. Ciò mostra come il fattore di sicurezza ottenuto con il metodo utilizzato (SSR) sia assolutamente congruente ed in linea con i più tradizionali metodi di verifica della stabilità.

## 10.2 Sezione 2

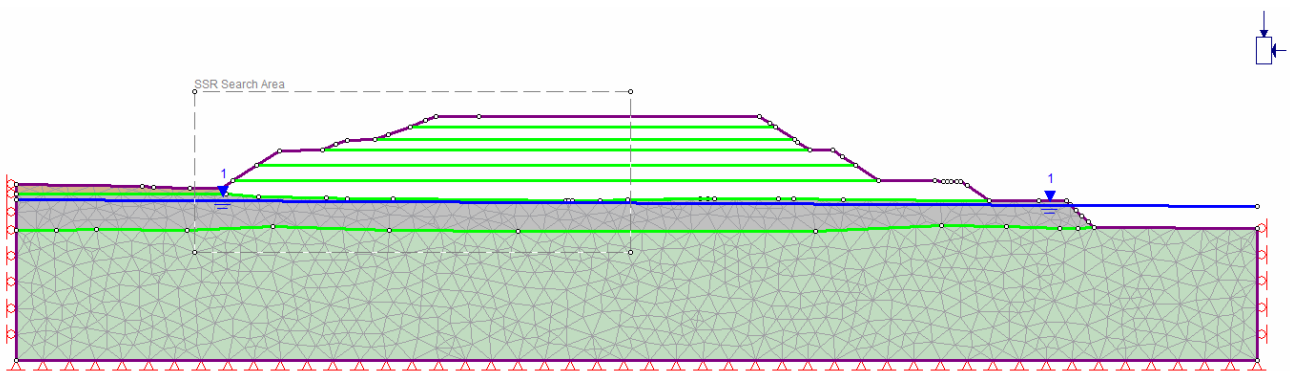


Figura 10.5 : Fase iniziale

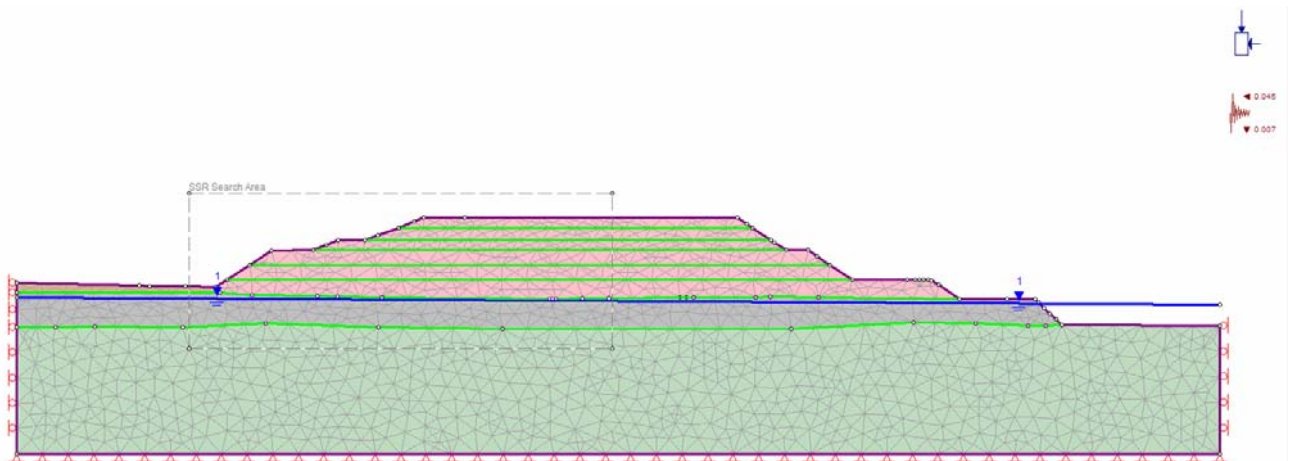


Figura 10.6 : Fase finale – completo riempimento

L'analisi di stabilità condotta sulla configurazione di completo riempimento del deposito con materiale inerte ha fornito un valore del coefficiente di sicurezza pari a **1.61**, superiore al valore normativo.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>		<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012

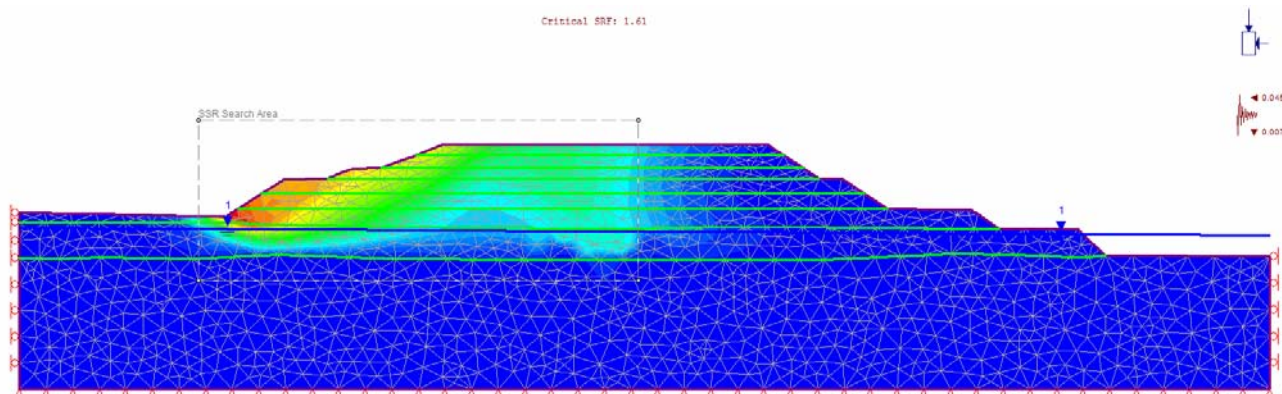


Figura 10.7 : Meccanismo di scivolamento - Spostamenti totali – Fase finale - SFR=1.61

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

## 11 TABULATI DI CALCOLO

### 11.1 Sezione 1 – tabulato di input

#### Document Name

Sezione1\_stabilità\_MAX RIEMPIMENTO\_falda+sisma.fez

#### Project Settings

##### General

Project Title: Project1

Number of Stages: 8

Analysis Type: Plane Strain

Solver Type: Gaussian Elimination

Units: Metric, stress as kPa

##### Stress Analysis

Maximum Number of Iterations: 500

Tolerance: 0.001

Number of Load Steps: Automatic

Convergence Type: Absolute Energy

Tensile Failure: Reduces Shear Strength

##### Groundwater

Method: Piezometric Lines

Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>

##### Strength Reduction

Initial Estimate of SRF: 1

Step Size: Automatic

Tolerance (SRF): 0.01

Limit SSR Search Area: Yes

minx: 4.6666

maxx: 49.136

miny: 24.058

maxy: 46.435

Accelerate SSR Analysis: Yes

Convergence Parameters: Automatic

#### Seismic Loading

Horizontal seismic load coefficient: -0.045 (positive to the right)

Vertical seismic load coefficient: -0.007 (positive up)

Seismic load applied in: Stage 8

#### Mesh

Mesh type: uniform

Element type: 3 noded triangles

Number of elements on Stage 1: 1786

Number of nodes on Stage 1: 945

Number of elements on Stage 2: 1891

Number of nodes on Stage 2: 998

Number of elements on Stage 3: 2001

Number of nodes on Stage 3: 1053

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Number of elements on Stage 4: 2097  
Number of nodes on Stage 4: 1102  
Number of elements on Stage 5: 2180  
Number of nodes on Stage 5: 1144  
Number of elements on Stage 6: 2246  
Number of nodes on Stage 6: 1178  
Number of elements on Stage 7: 2310  
Number of nodes on Stage 7: 1210  
Number of elements on Stage 8: 2310  
Number of nodes on Stage 8: 1210

### **Reset Displacements**

Displacements reset after: Stage 1

### **Material Properties**

#### Material: MATERIALE INERTE

Initial element loading: field stress & body force

Unit weight: 19 kN/m<sup>3</sup>

Elastic type: isotropic

Young's modulus: 30000 kPa

Poisson's ratio: 0.3

Failure criterion: Mohr-Coulomb

Tensile strength: 0 kPa

Peak friction angle: 29.25 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Material type: Plastic

Dilation Angle: 0 degrees

Residual Friction Angle: 29.25 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Stage 1: Piezo to use: None

Hu Type: Auto

#### Custom Field Stress:

Field stress: gravity

Ground surface elevation: 0 m

Unit weight of overburden: 27 kN/m<sup>3</sup>

Effective stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.43

Effective stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.43

Locked-in horizontal stress (in-plane): 0

Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

#### Material: DEPOSITI ALLUVIONALI

Initial element loading: field stress & body force

Unit weight: 19 kN/m<sup>3</sup>

Elastic type: isotropic

Young's modulus: 20000 kPa

Poisson's ratio: 0.32

Failure criterion: Mohr-Coulomb

Tensile strength: 0 kPa

Peak friction angle: 27.45 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Material type: Plastic

Dilation Angle: 0 degrees



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Residual Friction Angle: 27.45 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Stage 1: Piezo to use: 1  
Hu Type: Auto  
Custom Field Stress:  
Field stress: gravity  
Ground surface elevation: 0 m  
Unit weight of overburden: 27 kN/m<sup>3</sup>  
Effective stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.455  
Effective stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.455  
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0  
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

**Material: TERRENO VEGETALE**

Initial element loading: field stress & body force  
Unit weight: 18 kN/m<sup>3</sup>  
Elastic type: isotropic  
Young's modulus: 2500 kPa  
Poisson's ratio: 0.32  
Failure criterion: Mohr-Coulomb  
Tensile strength: 0 kPa  
Peak friction angle: 17.91 degrees  
Peak cohesion: 12.8 kPa  
Material type: Plastic  
Dilation Angle: 0 degrees  
Residual Friction Angle: 17.91 degrees  
Residual Cohesion: 12.8 kPa  
Piezo to use: None  
Ru value: 0  
Custom Field Stress:  
Field stress: gravity  
Ground surface elevation: 0 m  
Unit weight of overburden: 27 kN/m<sup>3</sup>  
Effective stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.625  
Effective stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.625  
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0  
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

**Material: MATERIALE DI RISULTA**

Initial element loading: field stress & body force  
Unit weight: 18 kN/m<sup>3</sup>  
Elastic type: isotropic  
Young's modulus: 15000 kPa  
Poisson's ratio: 0.3  
Failure criterion: Mohr-Coulomb  
Tensile strength: 0 kPa  
Peak friction angle: 17.91 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Material type: Plastic  
Dilation Angle: 0 degrees  
Residual Friction Angle: 17.91 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Piezo to use: None  
Ru value: 0

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

### List of All Coordinates

#### External boundary

84.937 32.488  
82.398 34.180  
79.307 36.240  
77.725 36.240  
76.305 36.240  
73.304 38.240  
71.930 39.156  
70.303 40.240  
67.301 42.240  
63.133 42.240  
33.330 42.240  
29.267 42.240  
26.258 40.240  
25.386 39.661  
23.248 38.240  
20.239 36.240  
18.469 36.240  
17.229 36.240  
14.129 34.180  
11.003 32.103  
10.978 32.086  
8.920 30.719  
5.651 30.601  
3.869 30.564  
2.747 30.525  
1.355 30.576  
0.533 30.588  
-0.000 30.581  
-0.000 29.381  
0.000 0.000  
119.301 -0.000  
119.301 26.620  
109.457 26.599  
106.248 26.592  
100.669 26.600  
99.077 26.555  
98.503 27.128  
97.284 28.357  
96.123 29.525  
95.539 30.115  
94.999 30.654  
94.077 31.585  
94.017 31.604  
92.306 32.141  
91.508 32.359  
90.278 32.694  
88.957 32.667  
88.386 32.641  
87.142 32.534

#### Material boundary

8.920 30.719

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

9.962 29.616  
84.107 31.371  
84.937 32.488

Material boundary

84.937 32.488  
66.271 32.103  
21.952 31.188  
8.920 30.719

Material boundary

76.305 36.240  
20.239 36.240

Material boundary

82.398 34.180  
14.129 34.180

Material boundary

66.271 32.103  
11.003 32.103

Material boundary

73.304 38.240  
23.248 38.240

Material boundary

70.303 40.240  
26.258 40.240

Material boundary

9.962 29.616  
1.969 29.427  
3.592 28.012  
4.569 27.060  
5.456 26.406  
6.889 26.144  
10.899 26.120  
15.565 26.054  
18.939 26.097  
22.351 26.295  
28.345 26.383  
38.313 26.008  
50.664 26.008  
64.258 26.280  
81.170 26.543  
82.188 26.798  
83.139 27.481  
84.127 28.460  
85.102 29.511  
85.924 30.753  
86.383 31.425  
84.107 31.371

Material boundary

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

1.969 29.427  
-0.000 29.381

Material boundary  
94.017 31.604  
86.383 31.425

Piezometric line  
-0.000 27.723  
119.078 30.808

SSR Search Area  
4.667 24.058  
49.136 24.058  
49.136 46.435  
4.667 46.435

## 11.2 Sezione 1 – tabulato di output

### Shear Strength Reduction - Material Properties

Strength Reduction Factor: 1

Converged: yes

Material: MATERIALE INERTE

Peak friction angle: 29.25 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 29.25 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: DEPOSITI ALLUVIONALI

Peak friction angle: 27.45 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 27.45 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: TERRENO VEGETALE

Peak friction angle: 17.91 degrees

Peak cohesion: 12.8 kPa

Residual Friction Angle: 17.91 degrees

Residual Cohesion: 12.8 kPa

Material: MATERIALE DI RISULTA

Peak friction angle: 17.91 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 17.91 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

**Critical Strength Reduction Factor: 1.25**

Converged: yes

Material: MATERIALE INERTE

Peak friction angle: 24.1334 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 24.1334 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: DEPOSITI ALLUVIONALI

Peak friction angle: 22.5661 degrees

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 22.5661 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: TERRENO VEGETALE  
Peak friction angle: 14.4962 degrees  
Peak cohesion: 10.24 kPa  
Residual Friction Angle: 14.4962 degrees  
Residual Cohesion: 10.24 kPa  
Material: MATERIALE DI RISULTA  
Peak friction angle: 14.4962 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 14.4962 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa

Strength Reduction Factor: 1.26  
Converged: no  
Material: MATERIALE INERTE  
Peak friction angle: 23.9635 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 23.9635 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: DEPOSITI ALLUVIONALI  
Peak friction angle: 22.4048 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 22.4048 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: TERRENO VEGETALE  
Peak friction angle: 14.386 degrees  
Peak cohesion: 10.1587 kPa  
Residual Friction Angle: 14.386 degrees  
Residual Cohesion: 10.1587 kPa  
Material: MATERIALE DI RISULTA  
Peak friction angle: 14.386 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 14.386 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa

Strength Reduction Factor: 1.37  
Converged: no  
Material: MATERIALE INERTE  
Peak friction angle: 22.2337 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 22.2337 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: DEPOSITI ALLUVIONALI  
Peak friction angle: 20.7651 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 20.7651 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: TERRENO VEGETALE  
Peak friction angle: 13.2734 degrees  
Peak cohesion: 9.34307 kPa  
Residual Friction Angle: 13.2734 degrees  
Residual Cohesion: 9.34307 kPa  
Material: MATERIALE DI RISULTA

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Peak friction angle: 13.2734 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 13.2734 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa

Strength Reduction Factor: 1.5

Converged: no

Material: MATERIALE INERTE

Peak friction angle: 20.4732 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 20.4732 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: DEPOSITI ALLUVIONALI

Peak friction angle: 19.1013 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 19.1013 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: TERRENO VEGETALE

Peak friction angle: 12.1588 degrees

Peak cohesion: 8.53333 kPa

Residual Friction Angle: 12.1588 degrees

Residual Cohesion: 8.53333 kPa

Material: MATERIALE DI RISULTA

Peak friction angle: 12.1588 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 12.1588 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Strength Reduction Factor: 1.75

Converged: no

Material: MATERIALE INERTE

Peak friction angle: 17.7455 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 17.7455 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: DEPOSITI ALLUVIONALI

Peak friction angle: 16.5326 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 16.5326 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: TERRENO VEGETALE

Peak friction angle: 10.4633 degrees

Peak cohesion: 7.31429 kPa

Residual Friction Angle: 10.4633 degrees

Residual Cohesion: 7.31429 kPa

Material: MATERIALE DI RISULTA

Peak friction angle: 10.4633 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 10.4633 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

**Areas of Excavated and Filled Elements**

Stage 2

Material: MATERIALE INERTE, Area Filled: 33.824 m2

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Stage 3

Material: MATERIALE INERTE, Area Filled: 144.584 m<sup>2</sup>

Stage 4

Material: MATERIALE INERTE, Area Filled: 134.273 m<sup>2</sup>

Stage 5

Material: MATERIALE INERTE, Area Filled: 106.123 m<sup>2</sup>

Stage 6

Material: MATERIALE INERTE, Area Filled: 94.101 m<sup>2</sup>

Stage 7

Material: MATERIALE INERTE, Area Filled: 82.079 m<sup>2</sup>

**Excavation Areas**

Original Un-deformed Areas

External Boundary Area: 4256.191 m<sup>2</sup>

External Boundary Perimeter: 304.497 m

Stage 1

External Boundary Area: 4256.191 m<sup>2</sup> (0 m<sup>2</sup> change from original area)

External Boundary Perimeter: 304.497 m (0 m change from original perimeter)

Stage 2

External Boundary Area: 4256.015 m<sup>2</sup> (-0.175092 m<sup>2</sup> change from original area)

External Boundary Perimeter: 304.503 m (0.00588093 m change from original perimeter)

Stage 3

External Boundary Area: 4255.413 m<sup>2</sup> (-0.777791 m<sup>2</sup> change from original area)

External Boundary Perimeter: 304.518 m (0.0215959 m change from original perimeter)

Stage 4

External Boundary Area: 4254.201 m<sup>2</sup> (-1.98987 m<sup>2</sup> change from original area)

External Boundary Perimeter: 304.543 m (0.0463795 m change from original perimeter)

Stage 5

External Boundary Area: 4253.519 m<sup>2</sup> (-2.67181 m<sup>2</sup> change from original area)

External Boundary Perimeter: 304.561 m (0.0645035 m change from original perimeter)

Stage 6

External Boundary Area: 4252.708 m<sup>2</sup> (-3.48263 m<sup>2</sup> change from original area)

External Boundary Perimeter: 304.573 m (0.0757748 m change from original perimeter)

Stage 7

External Boundary Area: 4247.773 m<sup>2</sup> (-8.41797 m<sup>2</sup> change from original area)

External Boundary Perimeter: 304.479 m (-0.0176938 m change from original perimeter)

Stage 8

External Boundary Area: 4247.076 m<sup>2</sup> (-9.1145 m<sup>2</sup> change from original area)

External Boundary Perimeter: 304.450 m (-0.0467581 m change from original perimeter)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

## **Yielded Elements**

### Yielded Mesh Elements

Number of yielded mesh elements on Stage 1: 3  
Number of yielded mesh elements on Stage 2: 40  
Number of yielded mesh elements on Stage 3: 142  
Number of yielded mesh elements on Stage 4: 191  
Number of yielded mesh elements on Stage 5: 259  
Number of yielded mesh elements on Stage 6: 331  
Number of yielded mesh elements on Stage 7: 421  
Number of yielded mesh elements on Stage 8: 442

## **11.3 Sezione 2 – tabulato di input**

### **Document Name**

Sezione2\_stabilità\_MAX RIEMPIMENTO\_falda+sisma.fez

### **Project Settings**

#### General

Project Title: Project1  
Number of Stages: 8  
Analysis Type: Plane Strain  
Solver Type: Gaussian Elimination  
Units: Metric, stress as kPa

#### Stress Analysis

Maximum Number of Iterations: 500  
Tolerance: 0.001  
Number of Load Steps: Automatic  
Convergence Type: Absolute Energy  
Tensile Failure: Reduces Shear Strength

#### Groundwater

Method: Piezometric Lines  
Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>

#### Strength Reduction

Initial Estimate of SRF: 1  
Step Size: Automatic  
Tolerance (SRF): 0.01  
Limit SSR Search Area: Yes  
minx: 31.514  
maxx: 108.801  
miny: 19.195  
maxy: 47.515  
Accelerate SSR Analysis: Yes  
Convergence Parameters: Automatic

### **Seismic Loading**

Horizontal seismic load coefficient: -0.045 (positive to the right)  
Vertical seismic load coefficient: -0.007 (positive up)  
Seismic load applied in: Stage 8



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

## **Mesh**

Mesh type: uniform  
Element type: 3 noded triangles  
Number of elements on Stage 1: 1796  
Number of nodes on Stage 1: 958  
Number of elements on Stage 2: 1977  
Number of nodes on Stage 2: 1049  
Number of elements on Stage 3: 2097  
Number of nodes on Stage 3: 1109  
Number of elements on Stage 4: 2211  
Number of nodes on Stage 4: 1167  
Number of elements on Stage 5: 2289  
Number of nodes on Stage 5: 1207  
Number of elements on Stage 6: 2366  
Number of nodes on Stage 6: 1246  
Number of elements on Stage 7: 2425  
Number of nodes on Stage 7: 1277  
Number of elements on Stage 8: 2425  
Number of nodes on Stage 8: 1277

## **Reset Displacements**

Displacements reset after: Stage 1

## **Material Properties**

### Material: MATERIALE INERTE

Initial element loading: field stress & body force  
Unit weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Elastic type: isotropic  
Young's modulus: 30000 kPa  
Poisson's ratio: 0.3  
Failure criterion: Mohr-Coulomb  
Tensile strength: 0 kPa  
Peak friction angle: 29.25 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Material type: Plastic  
Dilation Angle: 0 degrees  
Residual Friction Angle: 29.25 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Stage 1: Piezo to use: None  
Hu Type: Auto

### Custom Field Stress:

Field stress: gravity  
Ground surface elevation: 0 m  
Unit weight of overburden: 27 kN/m<sup>3</sup>  
Effective stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.43  
Effective stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.43  
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0  
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

### Material: DEPOSITI ALLUVIONALI

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Initial element loading: field stress & body force

Unit weight: 19 kN/m<sup>3</sup>

Elastic type: isotropic

Young's modulus: 20000 kPa

Poisson's ratio: 0.32

Failure criterion: Mohr-Coulomb

Tensile strength: 0 kPa

Peak friction angle: 27.45 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Material type: Plastic

Dilation Angle: 0 degrees

Residual Friction Angle: 27.45 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Stage 1: Piezo to use: 1

Hu Type: Auto

Custom Field Stress:

Field stress: gravity

Ground surface elevation: 0 m

Unit weight of overburden: 27 kN/m<sup>3</sup>

Effective stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.455

Effective stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.455

Locked-in horizontal stress (in-plane): 0

Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Material: TERRENO VEGETALE

Initial element loading: field stress & body force

Unit weight: 18 kN/m<sup>3</sup>

Elastic type: isotropic

Young's modulus: 2500 kPa

Poisson's ratio: 0.32

Failure criterion: Mohr-Coulomb

Tensile strength: 0 kPa

Peak friction angle: 17.91 degrees

Peak cohesion: 12.8 kPa

Material type: Plastic

Dilation Angle: 0 degrees

Residual Friction Angle: 17.91 degrees

Residual Cohesion: 12.8 kPa

Piezo to use: None

Ru value: 0

Custom Field Stress:

Field stress: gravity

Ground surface elevation: 0 m

Unit weight of overburden: 27 kN/m<sup>3</sup>

Effective stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.625

Effective stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.625

Locked-in horizontal stress (in-plane): 0

Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Material: MATERIALE DI RISULTA

Initial element loading: field stress & body force

Unit weight: 18 kN/m<sup>3</sup>

Elastic type: isotropic

Young's modulus: 2500 kPa

Poisson's ratio: 0.3

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Failure criterion: Mohr-Coulomb  
Tensile strength: 0 kPa  
Peak friction angle: 17.91 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Material type: Plastic  
Dilation Angle: 0 degrees  
Residual Friction Angle: 17.91 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Piezo to use: None  
Ru value: 0  
Custom Field Stress:  
Field stress: gravity  
Ground surface elevation: 0 m  
Unit weight of overburden: 27 kN/m<sup>3</sup>  
Effective stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.625  
Effective stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.625  
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0  
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

### **List of All Coordinates**

#### External boundary

172.402	28.323
168.506	30.914
167.303	31.714
166.646	31.719
165.700	31.724
164.968	31.747
164.285	31.748
162.778	31.786
152.758	31.816
148.733	34.498
146.337	36.094
144.709	37.180
140.707	37.180
138.544	38.621
137.874	39.065
134.514	41.290
133.529	41.943
131.662	43.180
81.920	43.180
74.416	43.180
72.544	42.467
69.758	41.290
65.963	39.920
63.590	39.065
58.691	38.969
56.528	38.190
54.252	37.180
46.568	37.054
42.589	34.498
38.414	31.816
36.407	30.527
30.784	30.554
24.343	30.618

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

22.336 30.807  
-0.000 31.194  
0.000 29.479  
-0.000 23.101  
-0.000 23.096  
0.000 0.000  
219.964 0.000  
219.964 23.395  
191.091 23.582  
190.016 24.607  
188.941 25.632  
187.864 26.659  
186.787 27.686  
186.214 28.232  
181.169 28.255

Material boundary

66.790 28.597  
98.504 28.276

Material boundary

36.407 30.527  
37.100 29.479  
42.975 29.031  
54.860 28.845  
58.605 28.633  
66.790 28.597  
97.394 28.269  
97.917 28.268  
98.504 28.276  
103.396 28.360  
108.306 28.396  
121.248 28.551  
122.488 28.555  
123.777 28.554  
135.050 28.593  
137.747 28.653  
146.662 28.521  
172.402 28.323

Material boundary

108.306 28.396  
123.777 28.554

Material boundary

38.414 31.816  
152.758 31.816

Material boundary

42.589 34.498  
148.733 34.498

Material boundary

54.252 37.180  
140.707 37.180

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Material boundary

137.874 39.065  
63.590 39.065

Material boundary

134.514 41.290  
69.758 41.290

Material boundary

-0.000 23.101  
7.093 23.036  
14.185 23.262  
30.268 23.081  
45.463 23.787  
66.131 23.049  
88.828 22.864  
141.649 22.843  
163.977 23.950  
175.418 23.765  
184.899 23.355  
188.242 23.355  
191.091 23.582

Material boundary

0.000 29.479  
37.100 29.479

Piezometric line

-0.000 28.533  
219.960 27.191

SSR Search Area

31.514 19.195  
108.801 19.195  
108.801 47.515  
31.514 47.515

## 11.4 Sezione 2 – tabulato di output

### Shear Strength Reduction - Material Properties

Strength Reduction Factor: 1

Converged: yes

Material: MATERIALE INERTE

Peak friction angle: 29.25 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 29.25 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: DEPOSITI ALLUVIONALI

Peak friction angle: 27.45 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 27.45 degrees

EuroLink S.C.p.A.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: TERRENO VEGETALE  
Peak friction angle: 17.91 degrees  
Peak cohesion: 12.8 kPa  
Residual Friction Angle: 17.91 degrees  
Residual Cohesion: 12.8 kPa  
Material: MATERIALE DI RISULTA  
Peak friction angle: 17.91 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 17.91 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa

Strength Reduction Factor: 1.5  
Converged: yes  
Material: MATERIALE INERTE  
Peak friction angle: 20.4732 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 20.4732 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: DEPOSITI ALLUVIONALI  
Peak friction angle: 19.1013 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 19.1013 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: TERRENO VEGETALE  
Peak friction angle: 12.1588 degrees  
Peak cohesion: 8.53333 kPa  
Residual Friction Angle: 12.1588 degrees  
Residual Cohesion: 8.53333 kPa  
Material: MATERIALE DI RISULTA  
Peak friction angle: 12.1588 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 12.1588 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa

Strength Reduction Factor: 1.55  
Converged: yes  
Material: MATERIALE INERTE  
Peak friction angle: 19.8652 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 19.8652 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: DEPOSITI ALLUVIONALI  
Peak friction angle: 18.5278 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 18.5278 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: TERRENO VEGETALE  
Peak friction angle: 11.7778 degrees  
Peak cohesion: 8.25806 kPa  
Residual Friction Angle: 11.7778 degrees  
Residual Cohesion: 8.25806 kPa  
Material: MATERIALE DI RISULTA  
Peak friction angle: 11.7778 degrees

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 11.7778 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa

Strength Reduction Factor: 1.58

Converged: yes

Material: MATERIALE INERTE

Peak friction angle: 19.5167 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 19.5167 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: DEPOSITI ALLUVIONALI

Peak friction angle: 18.1994 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 18.1994 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: TERRENO VEGETALE

Peak friction angle: 11.5602 degrees

Peak cohesion: 8.10127 kPa

Residual Friction Angle: 11.5602 degrees

Residual Cohesion: 8.10127 kPa

Material: MATERIALE DI RISULTA

Peak friction angle: 11.5602 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 11.5602 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Strength Reduction Factor: 1.6

Converged: yes

Material: MATERIALE INERTE

Peak friction angle: 19.2909 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 19.2909 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: DEPOSITI ALLUVIONALI

Peak friction angle: 17.9866 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 17.9866 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: TERRENO VEGETALE

Peak friction angle: 11.4195 degrees

Peak cohesion: 8 kPa

Residual Friction Angle: 11.4195 degrees

Residual Cohesion: 8 kPa

Material: MATERIALE DI RISULTA

Peak friction angle: 11.4195 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 11.4195 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

**Critical Strength Reduction Factor: 1.61**

Converged: yes

Material: MATERIALE INERTE

Peak friction angle: 19.1799 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Residual Friction Angle: 19.1799 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: DEPOSITI ALLUVIONALI  
Peak friction angle: 17.882 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 17.882 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: TERRENO VEGETALE  
Peak friction angle: 11.3504 degrees  
Peak cohesion: 7.95031 kPa  
Residual Friction Angle: 11.3504 degrees  
Residual Cohesion: 7.95031 kPa  
Material: MATERIALE DI RISULTA  
Peak friction angle: 11.3504 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 11.3504 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa

Strength Reduction Factor: 1.62  
Maximum Total Displacement: 2.39482 m  
Converged: no  
Material: MATERIALE INERTE  
Peak friction angle: 19.07 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 19.07 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: DEPOSITI ALLUVIONALI  
Peak friction angle: 17.7786 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 17.7786 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: TERRENO VEGETALE  
Peak friction angle: 11.2822 degrees  
Peak cohesion: 7.90123 kPa  
Residual Friction Angle: 11.2822 degrees  
Residual Cohesion: 7.90123 kPa  
Material: MATERIALE DI RISULTA  
Peak friction angle: 11.2822 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 11.2822 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa

Strength Reduction Factor: 1.75  
Converged: no  
Material: MATERIALE INERTE  
Peak friction angle: 17.7455 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 17.7455 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: DEPOSITI ALLUVIONALI  
Peak friction angle: 16.5326 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 16.5326 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa  
Material: TERRENO VEGETALE



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Peak friction angle: 10.4633 degrees  
Peak cohesion: 7.31429 kPa  
Residual Friction Angle: 10.4633 degrees  
Residual Cohesion: 7.31429 kPa  
Material: MATERIALE DI RISULTA  
Peak friction angle: 10.4633 degrees  
Peak cohesion: 0 kPa  
Residual Friction Angle: 10.4633 degrees  
Residual Cohesion: 0 kPa

Strength Reduction Factor: 2

Converged: no

Material: MATERIALE INERTE

Peak friction angle: 15.643 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 15.643 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: DEPOSITI ALLUVIONALI

Peak friction angle: 14.5597 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 14.5597 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

Material: TERRENO VEGETALE

Peak friction angle: 9.17919 degrees

Peak cohesion: 6.4 kPa

Residual Friction Angle: 9.17919 degrees

Residual Cohesion: 6.4 kPa

Material: MATERIALE DI RISULTA

Peak friction angle: 9.17919 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Residual Friction Angle: 9.17919 degrees

Residual Cohesion: 0 kPa

**Areas of Excavated and Filled Elements**

Stage 2

Material: MATERIALE INERTE, Area Filled: 431.448 m2

Stage 3

Material: MATERIALE INERTE, Area Filled: 295.659 m2

Stage 4

Material: MATERIALE INERTE, Area Filled: 273.198 m2

Stage 5

Material: MATERIALE INERTE, Area Filled: 155.870 m2


Stage 6

Material: MATERIALE INERTE, Area Filled: 154.722 m2

Stage 7

Material: MATERIALE INERTE, Area Filled: 115.368 m2

**Excavation Areas**

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>CRA 4 - RELAZIONE GEOTECNICA E VERIFICHE DI STABILITA'</b>	<i>Codice documento</i> CG1400PRBVCCZC4SD21000001	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 08/06/2012	

Original Un-deformed Areas

External Boundary Area: 7628.508 m<sup>2</sup>  
External Boundary Perimeter: 503.875 m

Stage 1

External Boundary Area: 7628.508 m<sup>2</sup> (0 m<sup>2</sup> change from original area)  
External Boundary Perimeter: 503.875 m (0 m change from original perimeter)

Stage 2

External Boundary Area: 7625.482 m<sup>2</sup> (-3.02587 m<sup>2</sup> change from original area)  
External Boundary Perimeter: 503.959 m (0.083187 m change from original perimeter)

Stage 3

External Boundary Area: 7624.480 m<sup>2</sup> (-4.02844 m<sup>2</sup> change from original area)  
External Boundary Perimeter: 503.996 m (0.120499 m change from original perimeter)

Stage 4

External Boundary Area: 7622.096 m<sup>2</sup> (-6.41254 m<sup>2</sup> change from original area)  
External Boundary Perimeter: 504.021 m (0.145607 m change from original perimeter)

Stage 5

External Boundary Area: 7620.892 m<sup>2</sup> (-7.61597 m<sup>2</sup> change from original area)  
External Boundary Perimeter: 504.040 m (0.164437 m change from original perimeter)

Stage 6

External Boundary Area: 7619.923 m<sup>2</sup> (-8.58465 m<sup>2</sup> change from original area)  
External Boundary Perimeter: 504.065 m (0.189226 m change from original perimeter)

Stage 7

External Boundary Area: 7613.168 m<sup>2</sup> (-15.3406 m<sup>2</sup> change from original area)  
External Boundary Perimeter: 504.013 m (0.137377 m change from original perimeter)

Stage 8

External Boundary Area: 7611.571 m<sup>2</sup> (-16.9375 m<sup>2</sup> change from original area)  
External Boundary Perimeter: 503.994 m (0.118969 m change from original perimeter)

**Yielded Elements**

Yielded Mesh Elements

Number of yielded mesh elements on Stage 1: 156  
Number of yielded mesh elements on Stage 2: 244  
Number of yielded mesh elements on Stage 3: 340  
Number of yielded mesh elements on Stage 4: 427  
Number of yielded mesh elements on Stage 5: 461  
Number of yielded mesh elements on Stage 6: 521  
Number of yielded mesh elements on Stage 7: 550  
Number of yielded mesh elements on Stage 8: 574