



# PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



## PROGETTO DEFINITIVO

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

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

<p>IL PROGETTISTA</p>  <p>Ing. E.M. Veje Dott. Ing. E. Pagani Ordine Ingegneri Milano n° 15408</p> 	<p>IL CONTRAENTE GENERALE</p> <p>Project Manager (Ing. P.P. Marcheselli)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA</p> <p>Direttore Generale e RUP Validazione (Ing. G. Fiammenghi)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA</p> <p>Amministratore Delegato (Dott. P. Ciucci)</p>
---	--	--	--

<p><i>Unità Funzionale</i></p> <p><i>Tipo di sistema</i></p> <p><i>Raggruppamento di opere/attività</i></p> <p><i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i></p> <p><i>Titolo del documento</i></p>	<p>OPERA DI ATTRAVERSAMENTO</p> <p>SOTTOSTRUTTURE</p> <p>BLOCCHI DI ANCORAGGIO</p> <p>Ancoraggio Calabria</p> <p>Analisi numeriche in condizioni tridimensionali</p>	<p>PF0067_F0</p>
---	--	------------------

CODICE	C G 1 0 0 0	P	C L	D	P	S T	B 4	B C	0 0	0 0	0 0	0 3	F 0
--------	-------------	---	-----	---	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	20-06-2011	EMISSIONE FINALE	GL	LC	SR

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## INDICE

1	RELAZIONE DI SINTESI .....	5
2	PROFILO DEL TERRENO E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	12
3	ANALISI NUMERICA TRIDIMENSIONALE DEL BLOCCO DI ANCORAGGIO CALABRIA....	16
3.1	Modello del terreno.....	16
3.1.1	Modello geometrico del terreno .....	16
3.1.2	Modello costitutivo del terreno .....	17
3.1.3	Parametri del terreno.....	20
3.2	Elementi strutturali.....	21
3.2.1	Blocco di Ancoraggio.....	21
3.2.2	Diaframmi .....	22
3.2.3	Tiranti di ancoraggio.....	22
3.3	Fasi di calcolo dell'analisi .....	25
3.3.1	Effetto dello scavo attorno al blocco .....	28
4	RISULTATI DELLE ANALISI TRIDIMENSIONALI.....	30
4.1	Applicazione delle forze di progetto .....	30
4.2	Curve carico-spostamento: aumento dei carichi esterni.....	35
4.3	Curve Msf-spostamento: analisi della riduzione $\varphi' - c'$ .....	37
4.4	Risultati Plaxis 3D Foundation.....	38
4.4.1	Stato di sollecitazione del terreno .....	38
4.4.2	Spostamenti della maglia.....	39
4.4.3	Distribuzione della pressione idrica .....	39
5	CONCLUSIONI.....	41
6	FIGURE.....	44
	APPENDICE A – Forze cavi aggiornate ottenute con il modello IBDAS globale, versione 3.3b...	104
	APPENDICE B – Forze cavi aggiornate ottenute con il modello IBDAS globale, versione 3.3f....	107
	RIFERIMENTI.....	110

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## 1 RELAZIONE DI SINTESI

La presente relazione descrive le analisi statiche tridimensionali agli elementi finiti relativamente al comportamento del Blocco di Ancoraggio Calabria eseguite usando il codice commerciale Plaxis 3D Foundation. I calcoli sono basati sui disegni e sulle forze dei cavi indicati nel Progetto d'Offerta. Si tiene inoltre conto dell'influenza delle forze dei cavi calcolate mediante il modello globale IBDAS, versione 3.3b e 3.3f.

Le analisi condotte per valutare gli spostamenti del blocco indotte dal sisma e la sicurezza nei confronti della mancanza di scorrimento, rotazione e capacità portante vengono descritte nella relazione di guida "Blocco di ancoraggio Calabria: spostamenti indotti dal sisma e sicurezza nei confronti degli stati limite ultimi".

**Il capitolo 2** descrive il profilo del terreno della costa calabra (Figura 1). Partendo dal livello terra e scendendo verso il basso si incontrano le seguenti unità geologiche: *Depositi Costieri* (Coastal Deposits); *Ghiaie di Messina* (Messina Gravel)/*Sedimenti dei terrazzi* (Terrace Deposits); *Depositi Continentali* (Continental Deposits)/*Calcarenite di Vinco* (Vinco Calcarenite); *Conglomerato di Pezzo* (Pezzo Conglomerate); *Cristallino* (Crystalline bedrock). Per il Blocco di Ancoraggio Calabria, l'unità geologica di riferimento è il Conglomerato di Pezzo caratterizzato da uno strato superficiale eroso ( $20\text{ m} < z < 40\text{ m}$ ) e sovrastato dai Sedimenti dei terrazzi di piccolo spessore. La Figura 2 mostra una vista in pianta della sede di localizzazione del Blocco di Ancoraggio Calabria. Le due sezioni longitudinali e la sezione trasversale indicate in Figura 2 sono visualizzate in Figura 3, Figura 4 e Figura 5. La Tabella 1 riassume i principali parametri meccanici ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica dei relativi strati.

**Il capitolo 3** descrive la geometria del modello tridimensionale del Blocco di Ancoraggio Calabria, dettagli i modelli costitutivi adottati per il terreno e gli elementi strutturali e riassume le fasi di calcolo delle analisi agli elementi finiti.

Il modello del terreno è descritto al punto 3.1. La geometria del modello del sottosuolo (punto 3.1.1) è costituita da uno strato di ghiaia e sabbia corrispondente ai Depositi Costieri ed alle Ghiaie di Messina, da uno strato di Conglomerato di Pezzo eroso e da uno strato di Conglomerato di Pezzo al proprio posto. Nel modello numerico (Figure 11, 12 e 13), gli strati sono inclinati sull'orizzontale in direzione est-ovest, parallelamente alla linea costiera; il piano terra è orizzontale a quota + 118 m s.l.m.; la distribuzione iniziale della pressione dell'acqua nei pori è

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> <i>PF0067_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

idrostatica con una prevalenza idraulica a quota +102 m s.l.m. Il modello costitutivo adottato per il terreno (punto 3.1.2) è un modello elasto-plastico indipendente dalla velocità con incrudimento isotropo (Incrudimento del terreno) disponibile nella libreria del codice *Plaxis*. La taratura del modello costitutivo (punto 3.1.3) è stata effettuata usando i risultati ottenuti dalla prova del foro trasversale eseguita in loco e dai risultati pubblicati delle prove di compressione triassiale. In particolare, la prova del foro trasversale è stata usata per valutare il modulo di taglio in corrispondenza di piccole sollecitazioni  $G_0$  e descrive la relativa variazione con sollecitazione effettiva. I restanti parametri del terreno sono stati scelti per ottenere una descrizione soddisfacente della non linearità del terreno osservata nelle prove triassiali. I parametri di incrudimento del terreno per i tre strati vengono riassunti in Tabella 3 e Tabella 4.

I modelli numerici degli elementi strutturali sono descritti al punto 3.2. Il Blocco di Ancoraggio (punto 3.2.1) ha la forma di un prisma a base trapezoidale (Figura 11); nel modello numerico, il margine inferiore del blocco è definito mediante un profilo a gradini. Il blocco di ancoraggio ha due paia di camere vuote destinate rispettivamente a contenere i cavi principali del Ponte di Messina e ad essere riempite con del materiale di zavorra. La Tabella 5 riassume i parametri meccanici adottati nelle analisi per il calcestruzzo del blocco di ancoraggio, il materiale di zavorra ed il "materiale vuoto", tutti modellati come lineari elastici. I diaframmi che reggono lo scavo (punto 3.2.2) hanno uno spessore di 1.0 m e una lunghezza variabile conforme alla forma del blocco. Nel modello, la profondità del piede dei diaframmi è sostanzialmente uguale a quella di progetto, mentre la testata dei diaframmi si trova uniformemente a +118 m s.l.m. I diaframmi pieni sono modellati sotto forma di elementi anisotropi *Plaxis WALL*. Per simulare la mancanza di travi di collegamento tra i pannelli dei diaframmi, il modulo  $E_2$  Young e il modulo di taglio  $G_{23}$  (Figura 18) sono stati ridotti di un ordine di grandezza. La Tabella 6 riassume le caratteristiche geometriche e meccaniche dei diaframmi. Il modello comprende 7 livelli di tiranti di ancoraggio lungo il lato orientale ed occidentale della fossa e 4 livelli di ancoraggi lungo il lato nord e sud (punto 3.2.3). I tiranti di ancoraggio sono modellati sotto forma di elementi *Plaxis SPRING* con una spaziatura di 5.0 m in piano, vale a dire due volte (o più) la spaziatura di progetto, in modo che ciascuna molla rappresenti almeno due tiranti di ancoraggio. Una trave di collegamento è inserita nel modello alla quota di ciascun livello dei tiranti di ancoraggio onde distribuire il carico dagli ancoraggi al diaframma di sostegno. Gli elementi *SPRING* simulano gli ancoraggi in modo semplificato senza tener conto dell'interazione ancoraggio-terreno. La resistenza di pelle dei tiranti di ancoraggio è stata determinata usando l' eqn. (10) (metodo Bustamante e Doix (1985), - *iniezione ripetitiva e selettiva*) e le caratteristiche del terreno ed i risultati SPT degli strati di terreno iniettati. La rigidezza

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

delle barre di ancoraggio è stata calcolata per un numero variabile di trefoli per barra (tra 7 e 11) con un diametro nominale di 15.2 mm. Lo spostamento limite delle barre di ancoraggio è stato calcolato usando l' eqn. (11). La Tabella 7 riassume le caratteristiche geometriche e quelle di resistenza e rigidezza dei tiranti di ancoraggio. Una rigidezza non lineare è stata assegnata a ciascuna molla mediante un diagramma di forza-spostamento (T-u) (Figura 17), comprendente un valore di pre-tensionamento dei tiranti  $T_{pret}$ . La

Tabella 8 sintetizza le caratteristiche di rigidezza assegnate alle molle nel modello numerico; i  $u_{mod}$  valori sono stati determinati usando l' eqn. (12). La Tabella 9 riassume le caratteristiche della trave di collegamento.

Nelle analisi è stata usata la seguente sequenza delle fasi di calcolo (punto 3.3):

1. calcolo dello stato di tensione iniziale mediante la procedura  $K_0$ ;
2. attivazione dei diaframmi e corrispondenti elementi di interfaccia (Figura 19);
3. scavo del terreno, in 7 balzi progressivi, per raggiungere la base del blocco di ancoraggio; simultanea attivazione dei corrispondenti livelli di tiranti di ancoraggio, della trave di collegamento e del pre-tensionamento dei tiranti. Per tutte le fasi di scavo con livello di dragaggio al di sotto del livello della falda (vale a dire al di sotto di +102 m s.l.m.) l'infiltrazione si verifica verso l'interno della fossa; in queste fasi, la distribuzione della pressione nei nidi di pori del terreno al di sotto della linea di dragaggio ed all'interno della zona della fossa è stata interpolata tra il livello esterno della falda (+102 m s.l.m.) ed il livello di falda corrispondente al livello di dragaggio (Figura 58 e 57);
4. attivazione progressiva del blocco di ancoraggio dal basso verso l'alto in 11 fasi. In ciascuna fase, i nodi scavati vengono prima riattivati sotto forma di "calcestruzzo liquido" con valore molto basso di rigidezza da taglio e poi le loro proprietà trasformate in "calcestruzzo solido" con attivazione dello strato successivo dell'elemento "calcestruzzo liquido". Al termine della costruzione del blocco di ancoraggio, le camere posteriori del blocco vengono riempite con materiale di zavorra e quelle anteriori con "materiale vuoto". La Figura 25 mostra il modello tridimensionale del blocco di ancoraggio prima e dopo il riempimento delle camere. Prima dell'applicazione dei carichi esterni, i sistemi di sostegno provvisori vengono tolti ricreando le condizioni di falda idrostatiche generali (Figura 58).
5. applicazione di carichi esterni; le forze trasmesse dai cavi al Blocco di Ancoraggio Calabria sono quelle previste dalle analisi strutturali del progetto d'offerta per tre diverse combinazioni di carico. La Tabella 10 riassume i casi di carico ed i valori corrispondenti delle forze agenti. La direzione della forza è inclinata di 15 gradi verso l'alto; il verso è

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

rivolto in direzione della spiaggia. Il valore più basso della forza (SILS) viene raggiunto in 10 fasi di carico incrementali; 1 ulteriore fase di carico è necessaria per raggiungere la forza SLS2 e tre ulteriori fasi per raggiungere il valore massimo della forza (ULS).

6. a) aumento dei carichi esterni. I carichi esterni vengono ulteriormente aumentati fino ad un valore finale di ca. 8500 MN, o fino a ca. due volte il valore della forza ULS e ca. 2,7 volte il valore della forza SILS.
- b) riduzione  $\varphi' - c'$ . Le analisi di riduzione  $\varphi' - c'$  vengono eseguite partendo dai valori delle forze corrispondenti a SILS, SLS2 e ULS. In queste analisi, le caratteristiche di resistenza dei terreni vengono progressivamente ridotte conformemente alle eqn. (13) e (14).

Per valutare l'effetto dello strato di terreno più elevato sugli spostamenti calcolati del blocco sottoposto ai carichi applicati, è stata eseguita un'analisi *comparativa* (punto 3.3.1), nella quale, prima dell'applicazione dei carichi esterni, è stato modellato uno scavo profondo 4 m con un'estensione di 25 m attorno al blocco in piano (Figura 27).

**Il capitolo 4** descrive i risultati dell'analisi tridimensionale agli elementi finiti.

Lo spostamento del blocco di ancoraggio sottoposto ai carichi esterni (punto 4.1) è dato da una traslazione verso la spiaggia (direzione z) e da una rotazione verso il basso sul piano y-z (Figure 26 e 27). La Figura 30 mostra la traslazione di una sezione nord sud del blocco di ancoraggio vicino al suo centro di gravità ottenuto assegnando a tutti i punti della sezione i valori medi degli spostamenti nelle direzioni z e y calcolati per i 12469 nodi del blocco di ancoraggio. Lo spostamento medio è uguale a ca. 8 mm, con una pendenza di ca. 8 gradi sull'orizzontale direzionata verso l'alto. La Figura 31 mostra la roto-traslazione della stessa sezione del blocco di ancoraggio. Lo spostamento del centro di gravità è ancora uguale a ca. 8 mm, con un'inclinazione di 13° sull'orizzontale, mentre la rotazione media  $\theta_G$  attorno al punto G è uguale a ca.  $3 \cdot 10^{-3}$  gradi. Per l'elaborazione del risultato sono stati scelti dieci punti del blocco di ancoraggio, la cui localizzazione è indicata in Figura 31 e nella Tabella 12.

Tabella 13 e la Tabella 14 sintetizzano gli spostamenti calcolati per ciascuno dei dieci punti alla fine di tre fasi corrispondenti ai valori di carico SILS, SLS2 e ULS. Le curve di spostamento da carico ottenute per i dieci punti selezionati sono tracciate in *Tender Design* = Progetto d'offerta

*Figura 34*; la *Tender Design* = Progetto d'offerta

*Figura 35* e la *Tender Design* = Progetto d'offerta

*Figura 36* mostrano le curve di spostamento da carico orizzontale (direzione z) e verticale



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20-06-2011

(direzione y), mentre la *Tender Design* = Progetto d'offerta

Figura 37 mostra le curve di spostamento da carico orizzontale (direzione x, ortogonale alla forza). La Figura 37 mette a confronto le curve di spostamento da carico ottenute con le analisi standard e con quelle comparative. Gli spostamenti sono stati risettati sullo zero prima dell'applicazione dei carichi esterni. I risultati indicano quanto segue:

- 1) Lo spostamento del blocco di ancoraggio sottoposto ai carichi esterni è dato da una traslazione verso la riva del mare (direzione z) e da una rotazione verso il basso nel piano y-z (Figura 28 - Figura 30).
- 2) Per tutte e tre le combinazioni di carico, lo spostamento orizzontale del blocco sottoposto ai carichi esterni è inferiore a 10 mm, quello verticale verso l'alto è inferiore a 2 mm, mentre lo spostamento orizzontale in direzione x (ortogonale alla forza) è praticamente uguale a zero.
- 3) La Tabella 16 riassume gli angoli di rotazione corrispondenti ai valori SILS, SLS2 e ULS del carico esterno, mentre la
- 4) *plane rotation* = rotazione sul piano
- 5) Figura 38 mostra l'evoluzione delle rotazioni sul piano y-z e x-z rispetto al carico esterno in aumento. I valori di rotazione sul piano y-z sono dell'ordine di un millesimo di grado (il valore di rotazione positivo è diretto verso la riva del mare), mentre sono sostanzialmente uguali a zero in direzione x-y. Le rotazioni nel piano x-z sono piccole e mostrano un leggero effetto dell'inclinazione degli strati di terreno sulla risposta del blocco di ancoraggio.
- 6) I risultati dell'analisi *comparativa* mostrano un'influenza relativamente piccola dei 4 m più elevati di terreno sulla risposta del blocco di ancoraggio (*Tender Design* = Progetto d'offerta
- 7) Figura 40). In ogni modo, si raccomanda un riempimento completo della zona che circonda il blocco di ancoraggio almeno fino ad una quota di 118 m s.l.m.
- 8) La direzione media del movimento del blocco è rivolta verso l'alto, con una pendenza di ca. 10° sull'orizzontale (Tabella 17).
- 9) Un valore limite del carico che può essere applicato al blocco di ancoraggio (punto 4.2) può essere valutato usando un adeguamento iperbolico delle curve di spostamento da carico (Figura 39), conformemente all'eqn. (15) e (16). Il valore risultante del carico limite è di ca. 11000 MN, o un fattore di sicurezza contro le forze esterne in aumento di ca. 2.75 per il carico ULS e di ca. 3.5 per il carico SILS.
- 10) Le analisi di riduzione  $\varphi' - c'$  eseguite partendo dalla configurazione corrispondente ai valori SILS, SLS2 e ULS dei carichi applicati danno un fattore di sicurezza  $M_{sf}$  di ca. 3 per tutte e tre le condizioni di carico (Figura 40). Le analisi di riduzione  $\varphi' - c'$  eseguite per le analisi

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

comparative danno un fattore di sicurezza Msf di ca. 2.5 (Figura 42).

Lo stato di sollecitazione del terreno durante le principali fasi di analisi viene discusso al punto 4.4.1. e si riferisce a due sezioni attraverso il centro di gravità del blocco di ancoraggio, una longitudinale e una trasversale. La Figura 45, Figura 46 e Figura 47 mostra i contorni della relativa sollecitazione da taglio definiti secondo l'eqn. (17), rispettivamente nelle condizioni iniziali, al termine dello scavo ed al termine della costruzione del blocco; la

Figura 48 mostra la distribuzione della relativa sollecitazione da taglio al termine dell'applicazione del carico ULS, con pressione di terra attiva completamente mobilizzata sul lato sud e pressione di terra passiva ancora lontana dall'essere completamente attivata sul lato nord. La Figura 49 e la Figura 50 mostrano le sollecitazioni verticali totali  $\sigma_y$  e le sollecitazioni orizzontali totali ( $\sigma_z$  or  $\sigma_x$ ) indotte dalla condizione di carico ULS; la

*Seashore z-direction* = direzione z verso riva

*Figura 51 e la Seashore z-direction* = direzione z verso riva; concrete = calcestruzzo; Coastal Deposits = Depositi Costieri; Weathered Conglomerate = Conglomerato eroso; Pezzo Conglomerate = Conglomerato di Pozzo

*Figura 52* mostrano le sollecitazioni verticali totali  $\sigma_y$  e le sollecitazioni orizzontali totali  $\sigma_z$  su una sezione orizzontale ad una quota di 105.05 m s.l.m.

Gli spostamenti calcolati del terreno e del blocco di ancoraggio sono presentati al punto 4.4.2, con riferimento alla condizione di carico ULS (Figure da 51 a 55). Lo spostamento massimo del blocco di ancoraggio è uguale a ca. 11 mm (parte superiore del blocco), mentre lo spostamento al centro del blocco è uguale a ca. 8 mm. Durante lo scavo viene indotto un processo di infiltrazione a partire dall'esterno della fossa verso l'interno. La distribuzione della pressione nei pori (punto 4.4.3) assegnata ai nidi di terreno al termine dell'ultima fase di scavo è illustrata in Figura 58, ancora lungo le sezioni longitudinale e trasversale; il profilo della corrispondente testata di falda è indicato in Figura 59.

### **Appendice A e Appendice B. Forze aggiornate dei cavi ottenute con le versioni 3.3b e 3.3f del modello IBDAS globale**

Le forze trasmesse dai cavi principali al Blocco di Ancoraggio Calabria sono state nuovamente valutate usando le versioni 3.3b e 3.3f del modello IBDAS globale. Sono state scelte le peggiori condizioni di carico di ciascun stato limite (SILS, SLS2 e ULS) in condizioni statiche e sismiche usando 6 diversi criteri (Tabella A.1 – Tabella A.2 per IBDAS 3.3b, Tabella B.1 – Tabella B.2 per IBDAS 3.3f). Per entrambe le versioni del modello IBDAS si osserva una piccola differenza tra le forze dei cavi del Progetto d'Offerta e quelle aggiornate (IBDAS), con un rapporto che oscilla tra

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>

1.05 e 0.96 per IBDAS 3.3b (Tabella A.3) e tra 1.07 e 0.93 per IBDAS 3.3f (Tabella B.3); il valore maggiore si riferisce alla combinazione di carico ULS, mentre quello minore si ha con la combinazione di carico SILS. Allo Stato Limite Ultimo (ULS), le forze dei cavi previste nel Progetto d'Offerta, cui viene fatto riferimento nelle analisi FE tridimensionali, sono del 5% più alte rispetto ai corrispondenti valori IBDAS 3.3b e del 7% più alte rispetto ai corrispondenti valori di IBDAS 3.3f, il che porta ad una stima prudentiale del comportamento del Blocco di Ancoraggio Calabria. Le prestazioni del blocco di ancoraggio nelle condizioni di carico SILS e SLS2 vengono pure discusse nel § 4.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

## 2 PROFILO DEL TERRENO E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La Figura 1 mostra il profilo del terreno sulla costa calabra. Partendo dal livello terra e spostandosi verso il basso si incontrano le seguenti unità:

- *Depositi Costieri*. Sabbia e ghiaia con pochissimo o nessun contenuto di fini, di spessore variabile tra minimo 5 m verso l'entroterra e massimo 45 m verso la riva del mare. In questo punto, i depositi sono in genere più grossolani nei primi 15 - 20 m al di sotto del livello terra diventando più sabbiosi man mano che si scende; verso l'entroterra questi depositi sono in genere più sabbiosi. Occasionalmente si intravedono strati limosi torbosi nella parte inferiore della formazione.
- *Ghiaie di Messina / Sedimenti dei terrazzi*. Ghiaia e sabbia con strati limosi molto occasionali; è difficile distinguere Depositi Costieri e di piccolo spessore, talvolta totalmente assenti, per cui i Depositi Costieri restano direttamente al di sopra dei sottostanti Depositi Continentali/ Calcarenite di Vinco.
- *Depositi Continentali / Calcarenite di Vinco*. Deposito argilloso-sabbioso costituito da strati di limo o di limo e sabbia, con significativo contenuto di ghiaia / Bio-calcarenite e calcarenite fossilifera, con sottili strati limosi.
- *Conglomerato di Pezzo*. Roccia morbida, costituita da sedimenti clastici di diverse dimensioni in una matrice moderatamente cementata limosa-sabbiosa e arenaria. Lo spessore di questa formazione è maggiore di 200 m.
- *Cristallino*. Granito tettonizzato.

Le indagini geotecniche locali eseguite tra il 1988 ed il 1992 unitamente alle indagini geologiche e geofisiche condotte per il Progetto Preliminare consentono di definire con maggior dettaglio il profilo del terreno nella zona del Blocco di Ancoraggio Calabria, caratterizzato da significative variazioni del livello degli strati di terreno nella direzione parallela alla linea costiera che decrescono in direzione ortogonale alla linea costiera.

La Figura 2 mostra una vista in pianta della zona e la localizzazione delle indagini locali disponibili; la Figura 3, Figura 4 e Figura 5 mostrano la sezione trasversale e le due sezioni longitudinali indicate in Figura 2.

Il piano terra nella zona del Blocco di Ancoraggio Calabria si trova tra +114 m e +127 m s.l.m.; la costa si trova ad una distanza di ca. 900 m dal blocco di ancoraggio. Il piano terra varia tra ca. +95 m s.l.m. nell'angolo nord-ovest del blocco di ancoraggio e ca. +107 m s.l.m. nell'angolo sud-

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

est.

Le sezioni nelle Figure da 3 a 5 mostrano che, nella zona del Blocco di Ancoraggio, è difficile distinguere tra i Depositi Costieri e le Ghiaie di Messina, qui di seguito considerati come un unico strato, e che lo spessore varia tra un minimo di 7 m verso l'angolo nord-est ed un massimo di 18 m verso l'angolo sud-est della zona del blocco di ancoraggio. Essi sovrastano il Conglomerato di Pezzo, eroso negli ultimi 20 m, ma non eroso al di sotto. Il Conglomerato di Pezzo si estende per uno spessore di ca. 130 m.

Ne consegue che per il Blocco di Ancoraggio Calabria l'unità geologica rilevante è il Conglomerato di Pezzo, con uno strato eroso poco profondo ( $20\text{ m} < z < 40\text{ m}$ ), sovrastato dai Depositi di Terrazze di piccolo spessore.

La permeabilità dei Depositi Costieri è stata valutata mediante prove di pompaggio da un pozzo situato nella zona della Torre Calabria, estese per 33 m al di sotto del piano terra e prove di permeabilità Lefranc eseguite in due fori di trivellazione a profondità variabili tra ca. 5 m e 45 m al di sotto del piano terra. Il valore della permeabilità orizzontale ottenuto dalle prove di pompaggio dal pozzo più affidabili è pari a  $k_h = 2.6 \cdot 10^{-3}$  m/s; il valore del rapporto misurato in fasce di permeabilità verticale e orizzontale varia tra  $k_v/k_h = 0,10$  e  $k_v/k_h = 0,17$ . La permeabilità del Conglomerato di Pezzo è stata valutata mediante prove di Lugeon eseguite in uno dei fori di trivellazione usati per le prove di Lefranc, a pressioni di 1, 2, e 3 atm, a profondità tra 48 e 58 m al di sotto del piano terra. I risultati mostrano valori di permeabilità che decrescono con la profondità, con un valore medio di  $2.3 \cdot 10^{-2}$  m/s.

Prove di penetrazione standard ed estese hanno mostrato valori elevati di  $N_{SPT}$  e  $N_{LPT}$  nei Depositi Costieri, anche se si è osservata una grossa dispersione (Figura 6); un coefficiente di pressione di terra stimato a riposo è pari a  $K_0 = 0.43 - 0.47$ . Il Conglomerato di Pezzo è cementato e relativamente vecchio dal punto di vista geologico (Miocene); è probabile che lo storia geologica della formazione comprenda un sovraconsolidamento meccanico. I valori stimati del coefficiente di pressione di terra a riposo è pari a  $K_0 = 0.6 \div 0.9$ .

La densità relativa dei Depositi Costieri e delle Ghiaie di Messina è stata stimata sulla base dei risultati SPT e LPT usando la procedura proposta da Cubrinovski e Ishihara (1999): i valori di  $D_R = 40\% - 70\%$  sono stati ricavati come indicato in Figura 7. E' stato poi valutato l'angolo di resistenza al taglio  $\phi' = 41^\circ - 44^\circ$  mediante la relazione proposta da Schmertmann (1975) (Figura 7).

I parametri di resistenza al taglio del Conglomerato di Pezzo sono stati ottenuti dai risultati delle prove di carico su piastre di grosso diametro (865 mm) eseguite nella zona del Blocco di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

Ancoraggio Calabria. Queste prove sono state condotte a tre diverse profondità di 5, 11,85 e 16 m al di sotto del piano terra all'interno di un corpo scatolare di 2,5 m di diametro.

I risultati sono stati interpretati adottando le soluzioni disponibili per la pressione limite,  $q_u$ , di una fondazione circolare poco profonda (Berezantzev, 1964):

$$q_u = C_K c' + B_K \gamma D + A_K \gamma \frac{B}{2} \quad (1)$$

dove  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$  è il peso unitario del terreno,  $c'$  è la coesione del terreno,  $B = 0.865 \text{ m}$  è il diametro della piastra,  $D = 0$  è la profondità della piastra e  $A_K$ ,  $B_K$  e  $C_K$  sono i fattori di capacità dipendenti dall'angolo di frizione  $\phi'$ .

I valori di  $q_u$  sono stati ottenuti direttamente per la prova condotta a 5 m al di sotto del piano terra ed estrapolati con una legge iperbolica per le altre due prove. In questo modo, per ogni valore dato di  $\phi'$  è possibile calcolare il valore corrispondente di  $c'$ .

Figura 8 mostra i valori di  $c'$  ottenuti a profondità variabili tra 5 e 16 m al di sotto del piano terra assumendo che l'angolo di frizione si trovi nel campo  $\phi' = 38^\circ \div 42^\circ$ . Per profondità superiori a 16 m al di sotto del piano terra è prudentiale assumere che  $c'$  è costante ed uguale al suo valore a 16 m al di sotto del piano terra; tale assunzione è in linea con l'esistenza, sulla sommità del Conglomerato di Pezzo, di uno strato di conglomerato eroso, indicato anche dai profili di velocità dell'onda di taglio della sezione seguente. In questo tipo di materiali, un aumento della coesione man mano che si scende in profondità non penalizza l'angolo di frizione (Jamiolkowski *et al.*, 1991).

Le caratteristiche di rigidità dei depositi sono state ottenute da una prova del foro trasversale eseguita in vicinanza del Blocco di Ancoraggio Calabria (AC-BH1), usando tre fori di trivellazione fino ad una profondità massima di 100 m al di sotto del piano terra, ad una distanza di 5 m l'uno dall'altro. I risultati della prova del foro trasversale in termini di velocità dell'onda di taglio  $V_s$  rispetto alla profondità sono indicati in

*Coastal Deposits = Depositi costieri    weathered Conglomerate = Conglomerato eroso*  
*Pezzo Conglomerate = Conglomerato di Pezzo    vertical = verticale    average = media*

Figura 9. In

*Coastal Deposits = Depositi costieri    weathered Conglomerate = Conglomerato eroso*  
*Pezzo Conglomerate = Conglomerato di Pezzo    depth = profondità*  
*vertical = verticale    average = media    model = modello*

Figura 10 gli stessi risultati sono indicati sotto forma di profili del piccolo modulo di taglio da

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

deformazione  $G_0$ , ottenuto dalla velocità dell'onda di taglio come:

$$G_0 = \rho V_S^2 \quad (2)$$

Le tre serie di dati si riferiscono ai valori ottenuti in ciascuno dei tre fori di trivellazione, mentre la linea continua rappresenta la media dei tre dati a ciascuna profondità.

Il profilo di  $G_0$  in relazione alla profondità mostra tre diverse tendenze: per  $0 \text{ m} < z < 20 \text{ m}$   $G_0$  aumenta rapidamente da 190 MPa a 1200 MPa; per  $20 \text{ m} < z < 40 \text{ m}$   $G_0$  varia da ca. 1200 MPa a ca. 1400 MPa; al di sotto di  $z = 40 \text{ m}$  i dati sono più dispersivi con un valore medio di 2000 MPa. La Tabella 1 riassume i principali parametri meccanici ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica sopra descritta.

Tabella 1: Sommario dei principali parametri meccanici ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica

strato	profondità (m al di sotto del piano terra)	$K_0$	$\phi'_p$ (°)	$c'$ (kPa)	$K_h$ (m/s)	$G_0$ (MPa)
Depositi Costieri	0÷20	0.43÷0.47	41÷42	---	$2.6 \times 10^{-3}$	190÷1200
Conglomerato eroso	20÷40	0.6÷0.9	40	35-70	$2.3 \times 10^{-2}$	1200÷1400
Conglomerato di Pezzo	>40	0.6÷0.9	40	70	$2.3 \times 10^{-2}$	2000

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

### 3 ANALISI NUMERICA TRIDIMENSIONALE DEL BLOCCO DI ANCORAGGIO CALABRIA

Il Blocco di Ancoraggio Calabria è un blocco massiccio a forma di prisma a base trapezoidale ( Figura 11). Le dimensioni in piano del rettangolo superiore sono 98 x 87.5 m<sup>2</sup>; il rettangolo inferiore alla base ha dimensioni di 98 x 25 m<sup>2</sup>. La parte superiore del blocco verrà posizionata a +118 m s.l.m.; la parte inferiore a +77 m s.l.m., risultante in un'altezza massima di costruzione di 41 m (Figura 12).

Lo scavo sarà sostenuto da diaframmi realizzati con pannelli dello spessore di 1,0 m e di una larghezza di 2,5 m , attorno ad una fossa a forma rettangolare. La lunghezza dei diaframmi varia in relazione alla forma del blocco e, in qualche misura, al piano terra. La profondità massima dei diaframmi raggiunge +70 m s.l.m., mentre la sommità degli stessi è per lo più situata a +114 m s.l.m.

Lo scavo sarà inoltre sostenuto da parecchi livelli di tiranti pre-tesi in numero variabile posti lungo i diversi lati della fossa dipendentemente dalla profondità dello scavo. In genere, sono previsti per ciascun livello uno o due tiranti per ciascun diaframma con una spaziatura orizzontale di 2,5 m o inferiore.

#### 3.1 Modello del terreno

##### 3.1.1 Modello geometrico del terreno

La somiglianza della dimensione granulare dei Depositi Costieri e delle Ghiaie di Messina rende difficile una chiara distinzione tra i due strati. Quindi, il modello del sottosuolo usato per analizzare la costruzione e le prestazioni del Blocco di Ancoraggio è costituito da tre soli strati: il primo è uno strato a base di ghiaia e sabbia sul tipo del Deposito Costiero e delle Ghiaie di Messina; il secondo ed il terzo si riferiscono al Conglomerato di Pezzo, di cui lo strato superiore corrisponde al conglomerato eroso e quello inferiore al conglomerato in sito. Gli strati sono inclinati sulla linea orizzontale in direzione est-ovest, parallela alla linea costiera.

Nel modello numerico, la geometria degli strati viene identificata usando due colonne di terreno che fanno riferimento rispettivamente ai lati est ed ovest della fossa di scavo. La Tabella 2 indica i valori della quota assegnata al letto di ciascun strato. Nel modello numerico, il piano terra è orizzontale a + 118 m s.l.m.; la testata di falda H è situata ad un valore medio di +102 m s.l.m. e la



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

distribuzione iniziale della pressione dell'acqua nei pori è idrostatica .

Tabella 2: simulazione numerica: colonne di terreno

Letto dello strato	Quota lato est (m s.l.m.)	Quota lato ovest (m s.l.m.)
Deposito Costiero	+110	+102
Conglomerato eroso	+92	+80
Conglomerato di Pezzo	Non definito	Non definito

La Figura 13 mostra una vista assonometrica del modello 3D usato per le analisi, avente un'estensione di 500x500 m<sup>2</sup> in piano e di 200 m al di sotto del piano terra e costituito da ca. 60 mila elementi. La Figura 14 mostra una vista dall'alto della maglia degli elementi finiti, mentre la Figura 15 mostra due sezioni longitudinali della stessa maglia.

### 3.1.2 Modello costitutivo del terreno

Il comportamento del Blocco di Ancoraggio è stato studiato mediante analisi agli elementi finiti condotte usando il codice Plaxis 3D Foundation. Il comportamento meccanico del terreno è stato descritto utilizzando il modello costitutivo di Incrudimento del Terreno disponibile nella libreria dei modelli del codice. Il modello è in grado di riprodurre la non linearità del terreno dovuta al verificarsi di deformazioni plastiche a partire dall'inizio del processo di carico. La relazione calcolata tra sollecitazione non lineare-deformazione ha un modulo tangente iniziale uguale a  $E'_0$ ; alla rimozione del carico, il modello assume un comportamento elastico con il modulo di Young  $E'_0$ , riproducendo in tal modo una significativa variazione della rigidità. Nel modello, la rigidità del suolo dipende dall'effettivo stato di sollecitazione.

La taratura del modello costitutivo è stata eseguita usando i risultati ottenuti dalla prova del foro trasversale eseguita in loco e dai risultati pubblicati delle prove di compressione triassiale eseguiti su campioni ricostituiti di grosso diametro di terreni ghiaiosi (Tanaka et al., 1987). La prova del foro trasversale è stata usata per valutare il modulo di taglio in piccole deformazioni  $G_0$  e descrivere la sua variazione in presenza di un'effettiva sollecitazione. I restanti parametri del terreno sono stati scelti per ottenere una soddisfacente descrizione della non linearità del terreno osservata nelle prove triassiali.

Il modello di incrudimento del terreno è un modello elasto-plastico indipendente dalla velocità con incrudimento isotropo. Il comportamento elastico viene definito dall'elasticità isotropa attraverso un

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: center;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">13-04-2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	0	13-04-2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
0	13-04-2011						

modulo di Young dipendente dalla sollecitazione:

$$E' = E^{\text{ref}} \left( \frac{c' \cdot \cot \varphi' + \sigma_3'}{c' \cdot \cot \varphi' + p^{\text{ref}}} \right)^m \quad (3)$$

dove  $\sigma_3'$  è l'effettiva sollecitazione principale minima,  $c'$  è la coesione,  $\varphi'$  è l'angolo della resistenza al taglio,  $p^{\text{ref}} = 100 \text{ kPa}$  è la pressione di riferimento;  $E^{\text{ref}}$  e  $m$  sono i parametri del modello.

Il modello ha due superfici di snervamento  $f_s$  e  $f_v$  con incrudimento isotropo indipendente a seconda rispettivamente della deformazione plastica di taglio  $\gamma^p = (2 \cdot \varepsilon_1^p - \varepsilon_v^p)$  e delle deformazioni plastiche volumetriche  $\varepsilon_v^p$ ; le due superfici hanno le seguenti equazioni:

$$f_s = \frac{1}{E'_{50}} \frac{q}{(1 - 0.9 \cdot q/q_f)} - \frac{2q}{E'} - \gamma^p = 0 \quad (4)$$

$$f_v = \frac{\tilde{q}^2}{\alpha^2} + p'^2 - p_c'^2 = 0 \quad (5)$$

Nell' eqn. (4),  $E'_{50}$  è dato da un'espressione simile all' eqn. (3), ma, contrariamente a  $E'$ , non viene usata nell'ambito di un concetto di elasticità. L'incrudimento della superficie  $f_s$  è isotropo e dipende dalla deformazione plastica da taglio  $\gamma^p = (2 \cdot \varepsilon_1^p - \varepsilon_v^p)$ .

Nell'eqn. (5),  $p'$  è la sollecitazione effettiva media;  $\tilde{q}$  è una tensione generalizzata del deviatore che tiene conto della dipendenza della resistenza dalla sollecitazione effettiva principale intermedia  $\sigma_2'$ ;  $\alpha$  controlla la forma della superficie  $f_v$  sul piano  $\tilde{q} - p'$  e può essere correlata al coefficiente di pressione di terra a riposo  $K_0$  per gli stati normalmente consolidati. Il parametro di incrudimento  $p_c'$  è la dimensione della superficie  $f_v$  corrente ed è correlato alle deformazioni plastiche volumetriche  $\varepsilon_v^p$  mediante la legge di incrudimento, scritta nella forma incrementale:



$$d\varepsilon_v^p = \frac{\beta}{p^{\text{ref}}} \left( \frac{p_c'}{p^{\text{ref}}} \right)^m \cdot dp_c' \quad (6)$$

dove  $\beta$  è un parametro che controlla la variazione di  $p_c'$  dovuta alle deformazioni plastiche volumetriche. Nella formulazione del modello implementata in *Plaxis*, si deve specificare il parametro  $E'_{\text{oad}}$ , che è correlato a  $\beta$ . Si tratta del modulo vincolato del carico plastico unidimensionale e dipende dall'effettiva tensione principale massima  $\sigma_1'$  attraverso la relazione:

$$E'_{\text{oad}} = E_{\text{oad}}^{\text{ref}} \left( \frac{c' \cdot \cot \varphi' + \sigma_1'}{c' \cdot \cot \varphi' + p^{\text{ref}}} \right)^m \quad (7)$$

dove  $\sigma_1'$  è l'effettiva tensione principale massima.

Il valore iniziale del parametro di incrudimento  $p_c'$  è correlato al limite di snervamento verticale uni-

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

dimensionale e può quindi essere specificato assegnando un valore al rapporto di sovraconsolidamento OCR. E' opportuno citare che OCR deve essere considerato come un rapporto del limite di snervamento (YSR) definito nell'ambito della plasticità di incrudimento da deformazione, cosicchè valori di OCR > 1 possono essere specificati anche per depositi di terreno normalmente consolidati dal punto di vista geologico che mostrano un limite di snervamento maggiore della tensione in situ.

La regola del flusso è associata a condizioni della superficie  $f_v$ , mentre la regola del flusso non associato viene usata per condizioni della superficie  $f_s$ . Quest'ultima viene derivata dalla teoria di dilatanza della tensione di Rowe (1962): l'angolo di dilatanza mobilizzato  $\psi_m$  dipende dallo stato corrente di tensione attraverso l'angolo di attrito mobilizzato  $\phi'_m$  e dall'angolo di attrito a volume costante  $\phi'_{cv}$ :

$$\sin \psi_m = \frac{\sin \phi'_m - \sin \phi'_{cv}}{1 - \sin \phi'_m \sin \phi'_{cv}} \quad (8)$$

A sua volta,  $\phi'_{cv}$  può essere ricavato dall'angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  e dall'angolo di dilatanza  $\psi$  al collasso :

$$\sin \phi'_{cv} = \frac{\sin \phi' - \sin \psi}{1 - \sin \phi' \sin \psi} \quad (9)$$

La Figura 16 mostra la forma delle superfici di snervamento  $f_v$  e  $f_s$  e indica schematicamente la loro evoluzione.

Per il carico plastico da stati di tensione isotropa, il modello prevede una relazione tensione non lineare-deformazione con modulo di elasticità tangenziale iniziale uguale a  $E'$ . Quindi, i valori di  $E'$  sono stati correlati al modulo di taglio con piccola deformazione  $G_0$  ottenuto dalla prova del foro trasversale eseguita in loco. In particolare, valori di  $E'^{ref}$  e  $m$  sono stati ottenuti adattando al meglio i risultati di tale prova con l'uso dell' eqn. (3) ed assumendo  $\nu' = 0.2$ .

Per i Depositi Costieri, i restanti parametri del modello  $E'_{50}{}^{ref}$  e  $E'_{oed}{}^{ref}$ , sono stati tarati sui risultati delle prove di compressione triassiale condotte su campioni ricostituiti di grosso diametro di terreni ghiaiosi (Tanaka et al., 1987). La Figura 17 mostra un confronto tra la simulazione del modello ed i risultati delle prove di Tanaka. Per il Conglomerato di Pezzo, il decadimento della rigidità con deformazione da taglio è stato descritto usando rapporti di  $E'^{ref} / E'_{50}{}^{ref} = 2$  e di  $E'_{50}{}^{ref} / E'_{oed}{}^{ref} = 1.0$  ed un valore dell'angolo di dilatanza al collasso  $\psi = 0$ .

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

### 3.1.3 Parametri del terreno

Le caratteristiche meccaniche degli strati di terreno nel Modello di Incrudimento del Terreno sono sintetizzate nella Tabella 3 e Tabella 4.

Per il Deposito Costiero, è stato introdotto un valore di coesione diverso da zero per simulare valori di rigidità diversi da zero alle basse profondità (ved.

*Coastal Deposits = Depositi costieri weathered Conglomerate = Conglomerato eroso*  
*Pezzo Conglomerate = Conglomerato di Pezzo depth = profondità*  
*vertical = verticale average = media model = modello*

Figura 10); questo basso valore di coesione tuttavia non pregiudica in modo significativo il comportamento dello strato in termini di resistenza.

Per lo strato del Conglomerato di Pozzo eroso è stato assunto un valore di coesione ridotto,  $c' = 35$  kPa, in linea con le indicazioni delle prove di carico su piastra; inoltre, conformemente alle condizioni alterate del conglomerato, è stato assegnato allo strato un valore di  $K_0$  di 0,47, che è coerente con il comportamento di un terreno granulare piuttosto che con quello di una roccia morbida. La Figura 10 mostra il profilo di  $G_0$  a fronte della profondità al di sotto del piano terra. Le linee nere continue della figura rappresentano la previsione di  $G_0$  ottenuta usando l'eqn. (3) con i valori di  $c'$ ,  $\phi'$ ,  $K_0$ ,  $E^{ref}$  e  $m$  riportati in Tabella 3 e Tabella 4. Valori di  $E^{ref}$  e  $m$  sono stati ottenuti adeguando al meglio i risultati della prova del foro trasversale ed assumendo  $\nu' = 0,2$ .

Per il decadimento della rigidità nei Depositi Costieri si è ottenuto un buon accordo con la deformazione da taglio usando rapporti di  $E^{ref} / E_{50}^{ref}$  e di  $E^{ref} / E_{oed}^{ref}$  uguali a 7; rapporti inferiori sono stati usati per il Conglomerato di Pezzo. Per tutti gli strati del terreno, il valore dell'angolo di dilatazione  $\psi$  al collasso è stato assunto uguale allo zero.

Un rapporto del limite di snervamento  $YSR = 2$  è stato assegnato a tutti gli strati del terreno onde riprodurre numericamente gli elevati valori di limite di snervamento osservato per i terreni granulari.

Tabella 3: simulazione numerica : caratteristiche fisiche e meccaniche di strati di terreno

strato	Modello	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	YSR	$K_{0,NC}$	$K_0$	$\nu$
Deposito Costiero	Incrudimento del terreno	20	4.2	40	2.0	0.357	0.470	0.2
Conglomerato eroso	Incrudimento del terreno	20	35	40	2.0	0.357	0.470	0.2
Conglomerato di Pezzo	Incrudimento Del terreno	20	70	40	2.0	0.357	0.600	0.2

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Tabella 4: simulazione numerica : parametri di rigidezza di strati del terreno

strato	$E^{ref}$ (MPa)	m	$E^{ref}/E'_{50}{}^{ref}$	$E^{ref}/E'_{oed}{}^{ref}$	$E'_{50}{}^{ref}$ (MPa)	$E'_{oed}{}^{ref}$ (MPa)
Deposito Costiero	1920	1.0	7	7	274	274
Conglomerato eroso	2520	0.2	3	3	840	840
Conglomerato di Pezzo	4800	0.0	2	2	2400	2400

## 3.2 Elementi strutturali

### 3.2.1 Blocco di Ancoraggio

Il Blocco di Ancoraggio Calabria è un blocco massiccio a forma di prisma con base trapezoidale ( Figura 11). Le dimensioni in piano del rettangolo superiore sono 98 x 87.5 m<sup>2</sup>; il rettangolo inferiore alla base ha dimensioni di 98 x 25 m<sup>2</sup>. La parte superiore del blocco verrà posizionata a +118 m s.l.m.; la parte inferiore a +77 m s.l.m., risultante in un'altezza massima di costruzione di 41 m.

Nel modello numerico, a causa di alcune limitazioni del codice Plaxis 3D, il Blocco di Ancoraggio Calabria è stato definito con un profilo a gradini.

Il progetto geometrico del blocco di ancoraggio comprende due paia di camere vuote destinate rispettivamente all'installazione dei cavi principali del Ponte di Messina ed al riempimento con del materiale di zavorra..

Il comportamento meccanico del calcestruzzo del blocco di ancoraggio, del materiale di zavorra e del "materiale vuoto" viene descritto come lineare elastico. La Tabella 5 riassume le caratteristiche meccaniche dei materiali lineari elastici adottati nelle analisi delle diverse parti del blocco.

Tabella 5: simulazione numerica : caratteristiche dei materiali lineari elastici

materiale	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (kPa)	$\nu$
calcestruzzo	25.0	3.00E+07	0.15
zavorra	20.0	3.00E+07	0.15

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> <i>PF0067_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

Materiale vuoto	0.0	3.00E+08	0.15
-----------------	-----	----------	------

### 3.2.2 Diaframmi

La fossa di scavo a forma rettangolare ha dimensioni esterne in pianta di 100 x 89.5 m<sup>2</sup>, compreso 1 m di spessore del diaframma. A causa della forma del blocco di ancoraggio, la profondità del piede dei diaframmi varia lungo il perimetro dello scavo tra +94.0 m s.l.m. (sui lati nord e sud dello scavo) e +70.0 m s.l.m. (nella parte centrale del lato est ed ovest dello scavo). Anche la sommità dei diaframmi è variabile trovandosi tra +114 m s.l.m. e +127 m s.l.m. (nell'angolo sud-est dello scavo), a seconda del piano terra iniziale e della diversa profondità dello scavo preliminare previsto.

Nel modello, la profondità del piede dei diaframmi è essenzialmente la stessa del progetto, mentre la testata degli stessi è uniformemente situata a +118 m s.l.m. Ciò corrisponde ad uno scavo più profondo di 4 m nella maggior parte della fossa, mentre è solo leggermente non prudentiale (rispetto al processo di scavo) nell'angolo sud-est dello scavo.

I diaframmi vengono modellati sotto forma di elementi Plaxis WALL, vale a dire elementi shell con uno spessore  $d = 1$  m ed un peso  $\gamma = 25$  kN/m<sup>3</sup>. Per la definizione delle caratteristiche meccaniche del diaframma, il codice richiede 5 valori di rigidezza (Figura 18), precisamente  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{23}$ , ed il rapporto di Poisson  $\nu_{12}$ .

Il valore di rigidezza del calcestruzzo ( $E = 30$  GPa) è stato assegnato al modulo di Young  $E_1$ ; i moduli di taglio  $G_{12}$  e  $G_{13}$  sono stati determinati considerando  $\nu_{12}$  uguale a 0,15. Onde simulare la mancanza di collegamento tra i pannelli dei diaframmi, il modulo di Young  $E_2$  ed il modulo di taglio  $G_{23}$  (Figura 18) sono stati ridotti di un ordine di grandezza col risultato di un comportamento anisotropo degli elementi WALL.



La Tabella 6 riassume le caratteristiche geometriche e meccaniche dei diaframmi.

Tabella 6: simulazione numerica : parametri dei diaframmi

d (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E_1$ (kPa)	$E_2$ (kPa)	$\nu$	$G_{12}$ (kPa)	$G_{13}$ (kPa)	$G_{23}$ (kPa)
1.00	25.0	3.00E+07	3.00E+06	0.15	1.30E+07	1.30E+07	1.30E+06

### 3.2.3 Tiranti di ancoraggio

Parecchi livelli di tiranti d'ancoraggio, variabili nel numero lungo i diversi lati della fossa a seconda della profondità dello scavo contribuiscono con i diaframmi al sostegno dello scavo. In genere, per

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

ciascun livello, sono previsti uno o due tiranti d'ancoraggio per ciascun diaframma con una spaziatura orizzontale di 2,5 m o inferiore. I tiranti d'ancoraggio hanno un'inclinazione sulla linea orizzontale di 15 gradi e verranno pre-tesi.

La disposizione geometrica dei tiranti d'ancoraggio nel modello numerico si basa sostanzialmente sul progetto d'offerta dello scavo e comprende 7 livelli di tiranti lungo il lato est ed ovest della fossa, caratterizzata da una maggiore profondità di scavo, e 4 livelli di tiranti lungo il lato nord e sud della fossa.

La resistenza di pelle dei tiranti è stata determinata usando la seguente equazione:

$$T_{lim} = \pi \cdot d_g \cdot L_g \cdot \tau \quad (10)$$

dove  $d_g = \alpha \cdot d$  è il diametro reale del corpo iniettato,  $\alpha$  è un parametro che dipende dalla tecnologia di iniezione e dalle caratteristiche meccaniche dello strato di terreno iniettato,  $d$  è il diametro nominale del corpo iniettato (= 0.15 m),  $L_g$  è la lunghezza del corpo iniettato e  $\tau$  è la resistenza al taglio tra il corpo iniettato ed il terreno, pure dipendente dalla tecnologia di iniezione e dalle caratteristiche del terreno. Con riferimento al metodo proposto da Bustamante and Doix (1985), a seconda delle caratteristiche del terreno e dei risultati di prova SPT, e in considerazione di una *iniezione ripetitiva e selettiva* del corpo iniettato, per i parametri dell'eqn. (10) si sono ottenuti valori di  $\alpha = 1,5$  (per i Depositi Costieri) e  $\alpha = 1,2$  (per il Conglomerato eroso e di Pezzo) e valori prudenti di  $\tau = 0,20$  MPa (per Depositi Costieri),  $\tau = 0,35$  MPa (per Conglomerato Eroso) e  $\tau = 0,45$  MPa (per Conglomerato di Pezzo).

La rigidità delle barre di ancoraggio è stata determinata sulla base del numero di trefoli di ciascuna barra; si sono considerati un numero di 7 - 11 trefoli, con un diametro nominale di 15,2 mm, ed un valore del modulo di Young dell'acciaio di 210 GPa. Lo spostamento limite delle barre d'ancoraggio è stato calcolato come segue:

$$u_{lim} = \frac{T_{lim} \cdot L_{bar}}{E_{steel} \cdot A_{bar}} \quad (11)$$

La

Tabella 7 riassume le caratteristiche geometriche e le proprietà di resistenza e rigidità dei tiranti d'ancoraggio.

Tabella 7: caratteristiche geometriche e meccaniche dei tiranti d'ancoraggio

tirante	quota	Lunghezza	Lunghezza	Corpo iniettato	$T_{lim}$ (kN)	Numero di trefoli	$E_{steel} A_{bar}$ (kN)	$u_{lim}$ (m)
---------	-------	-----------	-----------	-----------------	-------------------	----------------------	-----------------------------	------------------

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
		Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0

	(m s.l.m.)	delle barre (m)	del corpo iniettato (m)	Strato di terreno				
Est/Ovest – L.1	118.00	46	8	Dep. Costiero	1131	8	3.06E+05	0.170
Est/Ovest – L.2	110.00	43	11	Dep. Costiero	1555	10	3.83E+05	0.175
Est/Ovest – L.3	105.50	36	12	Congl. Eroso	2375	10	3.83E+05	0.223
Est/Ovest – L.4	99.45	29	12	Congl. Eroso	2375	10	3.83E+05	0.180
Est/Ovest – L.5	94.50	23	12	Congl. Eroso	2375	11	4.21E+05	0.130
Est/Ovest – L.6	88.05	18	12	Congl.di Pezzo	3054	11	4.21E+05	0.130
Est/Ovest – L.7	84.25	16	12	Congl.di Pezzo	3054	11	4.21E+05	0.116
Nord/Sud– L.1	118.00	20	8	Dep. Costiero	1131	7	2.68E+05	0.084
Nord/Sud – L.2	110.00	20	12	Dep. Costiero	1696	7	2.68E+05	0.127
Nord/Sud – L.3	105.50	20	11	Congl. Eroso	2177	8	3.06E+05	0.142
Nord/Sud – L.4	99.45	20	12	Congl. Eroso	2375	8	3.06E+05	0.155

I tiranti d'ancoraggio vengono modellati sotto forma di elementi Plaxis SPRINGS, che simulano i tiranti in modo semplificato, senza tener conto dell'interazione tirante - terreno. A ciascuna molla è stata assegnata una rigidità bi-lineare mediante un diagramma forza-spostamento (T-u) (Figura 19, lato sinistro). Nelle analisi è stato definito un valore di pre-tensionamento  $T_{pret}$  dei tiranti dividendo la resistenza di pelle limite con un fattore tra 3,0 e 3,7.

Per ragioni di calcolo, le molle sono state posizionate, in pianta, ad una distanza di 5,0 m, vale a dire due volte (o più) la distanza di progetto; ciascuna molla rappresenta quindi almeno due tiranti d'ancoraggio. Di ciò si è tenuto conto nella definizione delle caratteristiche dei tiranti raddoppiando la resistenza di pelle limite di ciascun tirante. Inoltre, nel modello, è stata inserita una trave di collegamento alla quota di ciascun livello di tiranti per simulare una distribuzione omogenea delle forze sulla parete di ritegno .

La Figura 19 (lato destro) mostra la relazione forza-spostamento (T-u) adottata per le molle pre-tensionate. La Tabella 8 riassume le caratteristiche di rigidità assegnate alle molle nel modello numerico; i valori  $u_{mod}$  sono stati determinati con riferimento all' equazione:

$$u_{mod} = \left(1 - \frac{T_{pret}}{T_{lim}}\right) \cdot u_{lim} \quad (12)$$

La Tabella 9 riassume le caratteristiche di rigidità assegnate agli elementi BEAM (Figura 20), di modellazione della trave di collegamento tra le molle distanziate di 5 m. Le dimensioni



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20-06-2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20-06-2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20-06-2011						

geometriche della trave sono state scelte in modo da ridurre di ca. 10 volte il libero spostamento orizzontale di un punto situato tra due tiranti.

Tabella 8: simulazione numerica: caratteristiche dei tiranti d'ancoraggio

tirante	$T_{lim,model}$ (kN)	$T_{pret,model}$ (kN)	$U_{mod}$ (m)
Est/Ovest – L.1	2262	700	0.117
Est/Ovest – L.2	3110	900	0.124
Est/Ovest – L.3	4750	1300	0.162
Est/Ovest – L.4	4750	1500	0.123
Est/Ovest – L.5	4750	1600	0.086
Est/Ovest – L.6	6107	1800	0.092
Est/Ovest – L.7	6107	1800	0.082
Nord/Sud – L.1	2262	500	0.066
Nord/Sud – L.2	3393	600	0.104
Nord/Sud – L.3	4354	750	0.118
Nord/Sud – L.4	4750	750	0.131

Tabella 9: simulazione numerica : parametri della trave di collegamento

b (m)	h (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (kPa)	$I_2$ (m <sup>4</sup> )	$I_3$ (m <sup>4</sup> )
2.50	0.50	1.25	0.0	3.00E+07	0.651	0.026

### 3.3 Fasi di calcolo dell'analisi

L'analisi 3D agli elementi finiti del Blocco di Ancoraggio Calabria è stata eseguita adottando la seguente sequenza principale di fasi:

1. calcolo dello stato di sollecitazione iniziale;
2. attivazione dei diaframmi;
3. scavo progressivo del terreno per raggiungere la base del blocco di ancoraggio; attivazione simultanea dei livelli dei tiranti;
4. attivazione progressiva del blocco di ancoraggio;
5. applicazione dei carichi;
6. a) aumento dei carichi esterni

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> <i>PF0067_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

b) riduzione  $\phi' - c'$

1. Lo stato di sollecitazione iniziale del terreno è stato assegnato agli strati mediante la procedura  $K_0$  generando così il valore voluto del coefficiente  $K_0$  e del rapporto del limite di snervamento YSR. E' stata implementata una successiva fase zero per garantire l'equilibrio delle forze nell'intera massa di terreno.
2. L'attivazione dei diaframmi è simultanea all'attivazione dei corrispondenti elementi d'interfaccia, i cui parametri di resistenza sono 0,67 volte il parametro di resistenza del terreno circostante. I diaframmi completamente attivati sono indicati in Figura 21.
3. Lo scavo del terreno è stato modellato mediante 7 abbassamenti progressivi, ciascuno destinato a raggiungere la quota di un livello di tirante (vale a dire +110 m s.l.m., +105.5 m s.l.m., +99.45 m s.l.m., +94.5 m s.l.m., +88.05 m s.l.m., +84.25 m s.l.m. e +76.65 m s.l.m. o il livello di scavo più profondo, ved. Tabella 7). La sequenza di costruzione è la seguente: a) attivazione del livello di tiranti, attivazione della corrispondente trave di collegamento e pre-tensionamento dei tiranti; b) scavo fino al livello successivo.

La forma dello scavo corrisponde alla forma di progetto del blocco di ancoraggio, vale a dire ad un prisma col profilo a gradini. La Figura 22 mostra una vista assonometrica zoomata dello scavo finito; la Figura 23 mostra due sezioni dello scavo e la Figura 24 mostra l'insieme delle strutture di ancoraggio (pareti, tiranti, travi).

A partire da una quota di +102 m s.l.m., lo scavo è interessato da un'infiltrazione proveniente dall'esterno verso l'interno della fossa. A causa dei limiti del codice Plaxis 3D, non è possibile risolvere il processo di infiltrazione 3D. Ciò nonostante, è possibile variare la distribuzione della pressione idrica nei nodi del terreno, dove ha luogo il processo di infiltrazione. Durante lo scavo, la distribuzione della pressione nei nodi dei pori del terreno al di sopra della zona della fossa è stata interpolata tra il livello esterno della falda (+102 m s.l.m.) e la testata della falda corrispondente alla quota dello scavo. Le analisi di taratura eseguite con Plaxis 2D, hanno mostrato che il processo di infiltrazione provoca delle deviazioni della pressione idrica nei pori dalla distribuzione idrostatica ad una quota di ca. 0 m s.l.m. Non sono state adottate variazioni per i nodi al di fuori della zona della fossa di scavo.

Il regime iniziale di pressione idrica nei pori è stato ripristinato al termine delle fasi costruttive del blocco di ancoraggio (ved. § 4.4.3 e Figura 58 - Figura 60).

4. La costruzione progressiva del blocco di ancoraggio viene modellata attivando

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

progressivamente i nidi di calcestruzzo in 11 fasi, ciascuna caratterizzata da un'altezza di ca. 4 m.

Per simulare le condizioni fluide iniziali del calcestruzzo e la conseguente pressione orizzontale sui diaframmi, è stato definito un "calcestruzzo fluido" con una bassissima rigidità al taglio  $G$ . La sequenza di costruzione del blocco di ancoraggio viene quindi definita come segue: a) attivazione del livello più basso dei cluster di scavo con caratteristiche di "calcestruzzo fluido"; b) sostituzione delle caratteristiche di "calcestruzzo fluido" con caratteristiche di "calcestruzzo solido" nei cluster più bassi ed attivazione simultanea dei cluster di scavo immediatamente al di sopra, di nuovo con caratteristiche di "calcestruzzo fluido". Tale sequenza di fasi viene ripetuta fino a quando la costruzione non raggiunge la sommità del blocco di ancoraggio; c) sostituzione delle caratteristiche di "calcestruzzo fluido" nei cluster più alti del blocco d'ancoraggio.

Infine, per modellare la parte della struttura al di sopra della quota di +118 m s.l.m., nella zona delle camere cavi, viene applicato un carico verticale distribuito con un valore di 65 kPa.

Al termine della costruzione del blocco di ancoraggio, le camere posteriori del blocco vengono riempite con materiale di zavorra, mentre quelle anteriori, nelle quali devono essere installati i cavi principali del ponte, vengono riempite con "materiale vuoto".

La Figura 25 mostra il modello 3D del blocco di ancoraggio, prima e dopo il riempimento delle camere.

Prima dell'applicazione dei carichi esterni, sono state introdotte due ulteriori fasi: a) rimozione dei sistemi di ancoraggio temporanei mediante disattivazione di tutti i livelli di tiranti e delle corrispondenti travi di collegamento; b) ripristino del livello di falda originario come descritto nel precedente capoverso.

5. Le forze dei cavi considerate nei calcoli per il Blocco di Ancoraggio Calabria sono quelle previste dalle analisi strutturali del progetto d'offerta, per tre diverse combinazioni di carichi. La Tabella 10 riassume le condizioni di carico ed i corrispondenti valori delle forze agenti. La direzione delle forze è di 15 gradi rispetto alla linea orizzontale, verso l'alto; il verso è rivolto al mare. Nel § 4 si discetta inoltre sull'influenza delle forze dei cavi calcolate mediante il modello IBDAS globale, versione 3.3b (Tabella A.1 – Tabella A.2) e versione 3.3f (Tabella B.1 – Tabella B.2).

Tabella 10: Forze dei cavi nel Blocco di Ancoraggio Calabria (progetto d'offerta)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

Caso di carico	F (MN)
SILS	3142
SLS2	3232
ULS	3933

La forza globale, divisa tra i due cavi principali, è stata decomposta nelle sue componenti orizzontale e verticale ed applicata al blocco. I due punti di applicazione sono situati nel nodo di convergenza dei cavi del ponte, come indicato nel progetto d'offerta. Il valore minore della forza (SILS) è stato raggiunto in 10 fasi di carico incrementali; sono state definite 1 ulteriore fase di carico per raggiungere la forza SLS2 e tre ulteriori fasi di carico per raggiungere il valore massimo della forza (ULS).

Gli spostamenti calcolati del blocco di ancoraggio sono stati risettati a zero prima dell'applicazione delle forze.

La Figura 26 mostra il modello del blocco di ancoraggio con le forze esterne applicate; per chiarezza va detto che il "materiale vuoto" è stato disattivato.

- 6(a) I carichi esterni sono stati ulteriormente incrementati fino ad un valore finale di ca. 8500 MN, che è 2 volte il valore della forza ULS e ca. 2,7 volte il valore della forza SILS.
- 6(b) Partendo dai valori delle forze SILS, SLS2 e ULS, sono state eseguite tre analisi di riduzione  $\varphi' - c'$ . In queste analisi, le caratteristiche di resistenza dei terreni vengono progressivamente ridotte secondo le seguenti equazioni:



$$c'_{red} = \frac{c'}{M_{sf}} \quad (13)$$

$$(\tan \varphi')_{red} = \frac{(\tan \varphi')}{M_{sf}} \quad (14)$$

Nel corso di ciascuna analisi di riduzione  $\varphi' - c'$ , i moduli di rigidezza dipendenti dalla tensione mantengono un valore costante come determinato nell'ultima fase precedente.

### 3.3.1 Effetto dello scavo attorno al blocco

Nel Progetto d'Offerta del Blocco di Ancoraggio Calabria, i disegni mostrano che l'area che circonda il blocco, dopo la costruzione, verrà riempita di terra in modo che il blocco d'ancoraggio risulti interamente circondato o addirittura ricoperto di terra. L'estensione del riempimento non viene tuttavia indicata chiaramente.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Per valutare l'influenza della zona di riempimento sul campo degli spostamenti calcolati del blocco di ancoraggio, è stata eseguita un'ulteriore analisi nella quale, prima dell'applicazione dei carichi esterni, è stato modellato attorno al blocco uno scavo di 4 m.

Le fasi di tali analisi *comparativa* sono per lo più uguali a quelle descritte nel § 3.3. anche se tra la quarta fase (attivazione del blocco) e la quinta fase (applicazione di carichi esterni) è stata inserita una fase intermedia consistente in uno scavo largo 25 m e profondo 4 m attorno al blocco di ancoraggio, da +118 m s.l.m. (sommità del blocco) a +114 m s.l.m. (Figura 27).

Poichè il fronte scavo è modellato in modo verticale, l'instabilità del terreno viene evitata grazie all'uso di un cluster "di coesione" nel terreno vicino al blocco di ancoraggio ( $c' = 40$  kPa); questo materiale viene rappresentato nella figura con un colore più scuro.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

## 4 RISULTATI DELLE ANALISI TRIDIMENSIONALI

### 4.1 Applicazione delle forze di progetto

La risposta del blocco di ancoraggio all'applicazione dei carichi esterni consiste in una traslazione, diretta a riva (direzione z), associata ad una rotazione verso il basso sul piano y-z .

La Figura 28 mostra una vista generale della maglia deformata al termine della condizione di carico ULS; la Figura 29 mostra un dettaglio della maglia deformata del blocco di ancoraggio. In entrambi i casi, gli spostamenti vengono aumentati di scala 2000 volte mettendo in evidenza la roto-traslazione del blocco di ancoraggio.

La Figura 30 mostra la traslazione delle sezioni centrali longitudinali ( $x = 254.1$  m) del blocco di ancoraggio (Nord-Sud; piano y-z). I valori medi degli spostamenti in direzione z e in direzione y, calcolati sulla base di tutti i 12469 nodi del modello del blocco di ancoraggio vengono assegnati a ciascun punto della sezione. Lo spostamento medio è uguale a ca. 8 mm, con un'inclinazione verso la linea orizzontale  $\alpha = 8$  gradi, verso l'alto. Nella figura, gli spostamenti vengono aumentati di scala 1000 volte.

La

Figura 31 mostra la roto-traslazione della stessa sezione del blocco di ancoraggio. Questa volta le componenti verticale (y) ed orizzontale (z) dello spostamento del centro di gravità sono state assegnate a ciascun punto della sezione; le coordinate dei nodi del punto G sono:  $Y = 99.45$  m;  $Z = 251$  m. Lo spostamento è ancora uguale a ca. 8 mm, mentre la rotazione media  $\theta_G$  attorno al centro di gravità G è uguale a ca.  $3 \cdot 10^{-3}$  gradi, indicando un'inclinazione rispetto alla linea orizzontale  $\alpha = 13$  gradi. Nella figura, gli spostamenti sono ancora aumentati di scala 1000 volte.

La



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Tabella 11 mostra i valori di spostamento applicati alla sezione del blocco in Figura 30 e Figura 31. Vale la pena notare che l'inclinazione  $\alpha$  calcolata nelle analisi tridimensionali è coerente con quella ottenuta nelle analisi delle sollecitazioni in piano eseguite usando un profilo di terreno semplificato, discusso nella relazione guida "Blocco di ancoraggio Calabria: spostamenti indotti dal sisma e sicurezza nei confronti degli stati limite ultimi".

Una vista generale della maglia deformata nell'analisi *comparativa* (scavo profondo 4 m attorno al blocco d'ancoraggio) è indicato in Figura 32.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> <i>PF0067_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

Tabella 11: Meccanismo cinematico del blocco d'ancoraggio con l'applicazione del carico esterno ULS

cinematica	$u_y$ (mm)	$u_z$ (mm)	$u$ (mm)	$\theta_G$ (°)	$\alpha$ (°)
traslazione	1.1	-7.9	8.0	---	-8.0
roto-traslazione	1.9	-7.9	8.2	-3.46·10 <sup>-3</sup>	-13.5

Per descrivere il comportamento del blocco di ancoraggio all'applicazione dei carichi esterni sono stati selezionati dieci punti. Cinque di questi (A, B, C, D e E) sono situati in cima al blocco, a quota +118 m s.l.m.: quattro agli angoli del blocco ed il quinto al centro di quest'ultimo. Altri quattro punti (G, H, I e J) si trovano alla base del blocco, a quota +76.65 m s.l.m., vicino ai suoi angoli. L'ultimo punto (F) è situato al centro del blocco, ad una quota di 95,65 m s.l.m. La localizzazione dei dieci punti è indicata in Figura 33. Le prime fasi dell'analisi (*i.e.* scavo sostenuto da diaframmi di ancoraggio e tiranti, costruzione del blocco, rimozione dei tiranti temporanei, ripristino delle condizioni idrauliche iniziali) sono state introdotte per riprodurre lo stato di sollecitazione nel terreno all'inizio del processo di carico. Gli spostamenti calcolati al termine di queste fasi sono stati riassetati ed i valori degli spostamenti esaminati nel prosieguo con esclusivo riferimento all'applicazione di carichi esterni.

La Tabella 12, Tabella 13 e Tabella 14 riassumono gli spostamenti calcolati per ciascuno dei dieci punti al termine di tre fasi di carico corrispondenti alle condizioni di carico SILS, SLS2 e ULS considerate nel Progetto d'Offerta. Lo spostamento totale  $u$ , insieme alle componenti di spostamento  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  vengono indicati nelle tabelle, (direzione y verso l'alto, direzione z verso il mare e direzione x ortogonale all'asse del ponte). I valori medi di spostamento vengono calcolati per 10 punti scelti del blocco con uno spostamento medio totale risultante tra 6 e 8 mm.

Tabella 12: Spostamenti dei punti selezionati all'applicazione del carico SILS (F = 3142 MN)

Spst.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	media
$u$ (mm)	7.9	7.4	6.6	6.1	7.2	5.9	4.3	4.0	4.7	4.4	5.9
$u_x$ (mm)	-0.2	0.5	0.0	-0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	-0.3	0.0
$u_y$ (mm)	-1.9	-1.8	2.4	2.2	1.3	1.3	0.8	0.8	1.7	1.7	0.9
$u_z$ (mm)	-7.7	-7.2	-6.2	-5.7	-7.1	-5.8	-4.2	-3.9	-4.4	-4.1	-5.6



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>			
		Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0067_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

Tabella 13: Spostamenti dei punti selezionati all'applicazione del carico SLS2 (F = 3232 MN)

Spost.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	media
u (mm)	8.2	7.7	6.8	6.3	7.4	6.1	4.4	4.1	4.9	4.6	6.1
u <sub>x</sub> (mm)	-0.2	0.5	0.0	-0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	-0.3	0.0
u <sub>y</sub> (mm)	-1.9	-1.8	2.4	2.2	1.3	1.3	0.9	0.9	1.8	1.7	0.9
u <sub>z</sub> (mm)	-7.9	-7.4	-6.4	-5.9	-7.3	-6.0	-4.4	-4.1	-4.6	-4.3	-5.8

Tabella 14: Spostamenti dei punti selezionati all'applicazione del carico ULS (F = 3933 MN)

Spost.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	media
u (mm)	10.3	9.7	8.6	8.0	9.4	7.8	5.7	5.4	6.4	6.0	7.7
u <sub>x</sub> (mm)	-0.3	0.6	0.0	-0.5	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.1	-0.4	-0.1
u <sub>y</sub> (mm)	-2.4	-2.3	2.9	2.6	1.7	1.7	1.1	1.1	2.2	2.1	1.1
u <sub>z</sub> (mm)	-10.0	-9.4	-8.1	-7.5	-9.2	-7.6	-5.6	-5.3	-6.0	-5.6	-7.4

La Tabella 15 riassume gli spostamenti (totali) calcolati per ciascuno dei dieci punti nell'analisi comparativa nella quale è stato modellato uno scavo profondo 4 m attorno al blocco prima dell'applicazione di carichi esterni. I valori riportati si riferiscono al termine di tre fasi di carico corrispondenti rispettivamente alle condizioni di carico SILS, SLS2 e ULS.

Tabella 15: Spostamenti dei punti selezionati all'applicazione di carichi esterni (analisi comparativa)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	media
Condizione di carico	u mm	u mm	u mm	u mm	u mm	u mm	u mm	u mm	u mm	u mm	u mm
SILS	8.5	7.9	7.0	6.4	7.4	6.1	4.4	4.1	4.9	4.5	6.1
SLS2	8.8	8.2	7.2	6.6	7.7	6.3	4.5	4.2	5.0	4.7	6.3
ULS	11.1	10.4	9.1	8.4	9.8	8.1	5.9	5.5	6.6	6.1	8.1

Dai dati in Tabella 12 - Tabella 15 e dalle curve mostrate in *Tender Design* = Progetto d'offerta

*Figura 34 - Tender Design* = Progetto d'offerta

*Figura 40* (ved. § 4.2) è possibile osservare che:

- 1) La risposta del blocco d'ancoraggio all'applicazione dei carichi esterni consiste in una traslazione con direzione verso riva (direzione z), associata ad una rotazione verso il basso sul

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

piano y-z. La Figura 28 - Figura 30 mostra una vista deformata della maglia agli elementi finiti 3D e del blocco di ancoraggio, calcolata sull'applicazione dei carichi ULS.

- 2) Lo spostamento orizzontale totale del blocco diretto a riva (direzione z negativa) è inferiore a 10 mm, per ciascuna delle tre condizioni di carico. Lo spostamento verticale totale diretto verso l'alto (direzione y positiva) è inferiore a 2 mm, mentre lo spostamento orizzontale in direzione x (ortogonale alla forza) è sostanzialmente uguale a zero (ved. anche *Tender Design* = Progetto d'offerta
- 3) *Figura 34 - Tender Design* = Progetto d'offerta
- 4) *Figura 37*).
- 5) Gli spostamenti orizzontali differenziali dei punti centrali E e F del blocco di ancoraggio permettono di valutare l'angolo medio di rotazione del blocco sul piano y-z ed eventualmente sul piano x-y (ved. anche
- 6) *plane rotation* = rotazione sul piano
- 7) *Figura 38*). La distanza tra il punto E (+118 m s.l.m.) ed il punto F (+95.65 m s.l.m.) è uguale a 22,35 m. La Tabella 16 riassume i valori dell'angolo di rotazione corrispondente alle condizioni di carico SILS, SLS2 e ULS. I valori di rotazione sul piano y-z sono dell'ordine di millesimi di grado (le rotazioni positive sono dirette verso riva), mentre sono sostanzialmente uguali a zero in direzione x-y.

La rotazione sul piano x-z può essere determinata considerando gli spostamenti orizzontali in direzione z di coppie allineate di punti (ad es. A-B o C-D sulla sommità del blocco, G-H e I-J alla sommità di quest'ultimo). La Tabella 16 indica gli angoli di rotazione sul piano y-z ottenuti per le condizioni di carico SILS, SLS2 e ULS del Progetto d'Offerta, con riferimento agli spostamenti della coppia A-B (direzione z - distanza relativa: 100 m). I valori di rotazione sul piano x-z sono bassi, il che dimostra un effetto trascurabile dell'inclinazione degli strati di terreno sulla risposta del blocco.

Se si considerano coppie di punti diverse si riscontrano piccole differenze dei valori calcolati degli angoli di rotazione (ad.es. calcolo della rotazione y-z con utilizzo degli spostamenti verticali delle coppie A-C o B-D). Tali differenze sono dovute principalmente alla deformazione interna del blocco d'ancoraggio.

Tabella 16: Angolo di rotazione medio all'applicazione dei carichi esterni

Piano y-z	Piano x-y	Piano x-z
-----------	-----------	-----------

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

carico	$\theta_{EF}$ (°)	$\theta_{EF}$ (°)	$\theta_{AB}$ (°)
SILS	3.3E-03	-2.4E-05	2.8E-04
SLS2	3.3E-03	-2.4E-05	2.9E-04
ULS	4.1E-03	-2.7E-05	3.5E-04

- 8) L'analisi *comparativa* indica un'influenza relativamente piccola dei 4 m superiori del terreno sulla risposta del blocco di ancoraggio (ved. anche Figura 39 - *Tender Design* = Progetto d'offerta
- 9) *Figura 40*). Si consiglia in ogni modo un rinterro completo dell'area che circonda il blocco d'ancoraggio, perlomeno fino alla quota della sommità della struttura (+118 m s.l.m.).
- 10) La direzione media del movimento del blocco può essere valutata considerando il rapporto degli spostamenti verticali ed orizzontali,  $u_y/u_z$ , dei punti selezionati. La Tabella 17 riassume i valori ottenuti dell'angolo di inclinazione  $\alpha$  (in gradi) dello spostamento di ciascun punto selezionato e delle tre condizioni di carico (SILS, SLS2 e ULS). I valori negativi di  $\alpha$  indicano spostamenti verso l'alto. Il valore medio di  $\alpha$ , per ciascuna condizione di carico, indica uno spostamento globale del blocco di ancoraggio verso l'alto, con un'inclinazione di ca. 10 gradi.

Tabella 17: Direzione media del movimento del blocco all'applicazione dei carichi esterni

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	media
carico	$\alpha$ (°)	$\alpha$ (°)	$\alpha$ (°)	$\alpha$ (°)	$\alpha$ (°)	$\alpha$ (°)	$\alpha$ (°)	$\alpha$ (°)	$\alpha$ (°)	$\alpha$ (°)	$\alpha$ (°)
SILS	13.6	13.9	-20.8	-20.6	-10.3	-12.7	-11.4	-11.9	-21.7	-22.0	-10.4
SLS2	13.6	13.8	-20.6	-20.4	-10.3	-12.6	-11.3	-11.9	-21.5	-21.9	-10.3
ULS	13.2	13.5	-19.4	-19.1	-10.2	-12.4	-11.0	-11.6	-20.4	-20.8	-9.8

## 4.2 Curve carico-spostamento: aumento dei carichi esterni

Nelle analisi FE descritte nei precedenti paragrafi si è sempre trovata una soluzione numerica. Secondo le norme italiane in vigore (Norme Tecniche per le Costruzioni - DM 14.01.2008), che introducono fattori di sicurezza parziali per il progetto allo stato limite, le Azioni di Progetto devono essere confrontate con le Resistenze di Progetto. Se le azioni sono minori o uguali alle resistenze, le prestazioni del blocco di ancoraggio sono soddisfacenti nei confronti dello stato limite ultimo ULS. In un'analisi FE, questo confronto non ha significato, in quanto o l'analisi numerica converge verso una soluzione oppure non lo fa, , *vale a dire* che non viene ottenuta la convergenza. Queste

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

due opzioni dipendono fortemente dagli algoritmi creati nel software. Si è quindi deciso che, per valutare la reale sicurezza del blocco di ancoraggio sottoposti ai carichi applicati e nel caso si verificasse un ULS, potrebbe essere utile un'analisi incrementale del carico (aumento progressivo di carichi esterni) o un'analisi delle ridotte caratteristiche del terreno (riduzione  $\phi' - c'$ ). In questo modo è stato possibile valutare una "distanza" da una condizione di collasso generale.

I commenti di cui sopra giustificano l'uso di curve carico-spostamento come strumento di valutazione delle condizioni di sicurezza del blocco d'ancoraggio in termini di ULS. Qui di seguito verranno riportate e commentate le curve carico-spostamento dei 10 punti selezionati del blocco d'ancoraggio (§ 4.1) ricordando che gli spostamenti calcolati nelle fasi preliminari dell'analisi sono stati riazzerati e che le curve carico-spostamento si riferiscono esclusivamente all'applicazione di carichi esterni.

Nei paragrafi seguenti della relazione verranno riportati ulteriori risultati delle analisi numeriche.

Le curve carico-spostamento ottenute per i dieci punti del blocco d'ancoraggio sono tracciate in *Tender Design* = Progetto d'offerta

*Figura 34*, mentre la *Tender Design* = Progetto d'offerta

*Figura 35* e la *Tender Design* = Progetto d'offerta

*Figura 36* mostrano le stesse curve del carico e degli spostamenti nelle direzioni orizzontale (direzione z) e verticale (direzione y); infine, la *Tender Design* = Progetto d'offerta

*Figura 37* mostra le curve degli spostamenti orizzontali ortogonali all'asse del ponte (direzione x); in quest'ultima figura, poichè la componente x della forza è uguale a zero, vengono tracciati gli spostamenti x rispetto alla forza esterna totale. In ciascuna figura, tre linee continue identificano le condizioni di carico SILS, SLS2 e ULS ottenute nel Progetto d'Offerta; le linee tratteggiate si riferiscono alle condizioni di carico SILS, SLS2 e ULS ottenute dal modello IBDAS globale, versione 3.3b e versione 3.3f. Le piccole differenze tra le forze dei cavi ricavate dal Progetto d'Offerta e quelle previste dai modelli IBDAS globali comportano delle differenze trascurabili nel campo degli spostamenti del blocco d'ancoraggio. I commenti che seguono si riferiscono alle forze dei cavi del Progetto d'Offerta che indicavano valori più alti per le condizioni di carico ULS.

L'evoluzione dell'angolo di rotazione medio del blocco sul piano verticale y-z e su quello orizzontale x-z (ottenuta come spostamento differenziale di coppie di punti selezionati, ved. § 4.2) è indicata in

plane rotation = rotazione sul piano

*Figura 38* rispetto ai carichi esterni in aumento. *Tender Design* = Progetto d'offerta

*Figura 39* mostra le curve carico-spostamento ottenute per i dieci punti selezionati del blocco di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

ancoraggio nell'analisi *comparativa* nella quale è stato modellato uno scavo profondo 4 m attorno all'intero blocco prima dell'applicazione di carichi esterni; la *Tender Design* = Progetto d'offerta

Figura 40 confronta le curve carico-spostamento dei punti E e F ricavate dall'analisi *standard* (senza scavo) e dall'analisi *comparativa* (con scavo profondo 4 m attorno al blocco). Le curve mostrano una leggera influenza dello scavo profondo 4 m.

Il carico ultimo di collasso del blocco di ancoraggio può essere valutato usando il miglior adeguamento iperbolico della curva carico-spostamento secondo la seguente equazione:

$$F = \frac{u}{m + n \cdot u} \quad (15)$$

Il carico ultimo può essere stimato usando la relazione prudenziale:

$$F_{\text{lim}} = \frac{0.9}{n} \quad (16)$$

Figura 41 mostra i dati delle curve carico-spostamento dei punti E

e F in un diagramma  $u-u/F$ . L'inclinazione delle linee rette di interpolazione indica il carico ultimo che, in entrambi i casi, risulta uguale a ca. 11000 MN. Ciò offre un fattore di sicurezza globale di ca. 2,75 per la condizione di carico ULS e di ca. 3,5 per la condizione di carico SILS.

### 4.3 Curve Msf-spostamento: analisi della riduzione $\phi' - c'$

Nelle analisi della riduzione  $\phi' - c'$ , le caratteristiche di resistenza dei terreni sono state progressivamente ridotte aumentando il fattore Msf (ved. § 3.3). La procedura di riduzione  $\phi' - c'$  parte dalla configurazione del blocco corrispondente alle condizioni di carico SILS, SLS2 e ULS, il che significa che sono state condotte tre diverse analisi di riduzione  $\phi' - c'$ .

Le curve Mfs-spostamento per le analisi di riduzione  $\phi' - c'$  mostrano che gli spostamenti aumentano con l'aumentare del fattore Mfs, il cui significato fisico è comparabile ad un fattore di sicurezza. Gli spostamenti partono da zero in quanto i loro valori precedenti sono stati risettati. Come previsto, quanto più alto è il valore iniziale dei carichi esterni, tanto più basso è il fattore finale Msf.

Le curve carico-spostamento ottenute dalle tre analisi di riduzione  $\phi' - c'$  per il punto E (parte superiore del blocco, posizione centrale) e punto F (centro del blocco) sono tracciate nella Figura 42 fino a spostamenti di 45 mm. Una linea tratteggiata rappresenta il valore di Msf corrispondente ad una brusca variazione della pendenza delle curve; un valore Msf prudenziale, valido per tutte e tre le analisi, può essere uguale a 3. La Figura 43 mostra i risultati delle analisi di riduzione  $\phi' - c'$  rispetto all'intera gamma degli spostamenti calcolati.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

La Figura 44 mostra le curve Msf-spostamento ricavate dall'analisi *comparativa*, con uno scavo profondo 4 m attorno al blocco. In questo caso, un valore Msf prudenziale corrispondente ad una brusca variazione della pendenza delle curve può essere uguale a 2,5 (leggermente inferiore rispetto all'analisi *standard*). Ciò conferma l'importanza del rinterro dell'area che circonda il blocco d'ancoraggio, dopo la costruzione.

#### 4.4 Risultati Plaxis 3D Foundation

Nel paragrafo che segue, viene presentata una serie di risultati delle relative fasi delle analisi. Secondo i segni convenzionali PLAXIS, le sollecitazioni da compressione sono negative.

##### 4.4.1 Stato di sollecitazione del terreno

Lo stato di sollecitazione del terreno durante le principali fasi di analisi è indicato in termini di profili della relativa sollecitazione al taglio  $\tau_{rel}$ :

$$\tau_{rel} = \frac{\tau_{mob}}{\tau_{max}} \quad (17)$$

dove  $\tau_{mob}$  è la resistenza al taglio mobilizzata (vale a dire, il raggio del cerchio di Mohr) e  $\tau_{max}$  è il valore massimo della sollecitazione al taglio ottenuta espandendo il cerchio di Mohr fino a quando questi non si trova in posizione tangenziale rispetto all'involuppo del collasso Mohr-Coulomb, mantenendo costante il centro.

La Figura 45 fino alla

Figura 48 mostra i profili della relativa sollecitazione al taglio su due sezioni attraverso il centro del blocco, una longitudinale (direzione Nord-Sud o piano y-z) ed una trasversale (direzione Ovest-Est o piano x-y) rispettivamente. La Figura 45 mostra le condizioni iniziali; la Figura 46 mostra la situazione al termine dello scavo; una riduzione moderata dei valori di  $\tau_{rel}$  è indicata in Figura 47, al termine della costruzione del blocco. Infine, la

Figura 48 mostra la distribuzione  $\tau_{rel}$  al termine dell'applicazione del carico ULS. Mentre la pressione di terra attiva è completamente mobilizzata sul lato sud, quella passiva è ancora lontana dall'essere stata completamente attivata sul lato nord.

La Figura 49 e la

Figura 50 mostrano le sollecitazioni verticali totali  $\sigma_y$  e le sollecitazioni orizzontali totali ( $\sigma_z$  or  $\sigma_x$ ) indotte dalla condizione di carico ULS, con riferimento a due sezioni centrali, longitudinale e

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

trasversale, come da precedenti figure. La Figura 51 e la *Seashore z-direction* = direzione z verso riva; concrete = calcestruzzo; Coastal Deposits = Depositi Costieri; Weathered Conglomerate = Conglomerato eroso; Pezzo Conglomerate = Conglomerato di Pozzo

Figura 52 mostrano le sollecitazioni verticali totali  $\sigma_y$  e le sollecitazioni orizzontali totali  $\sigma_z$  su una sezione orizzontale ad una quota di 105,05 m s.l.m. La *Seashore z-direction* = direzione z verso riva; concrete = calcestruzzo; Coastal Deposits = Depositi Costieri; Weathered Conglomerate = Conglomerato eroso; Pezzo Conglomerate = Conglomerato di Pozzo

Figura 52 mostra inoltre la posizione degli strati di terreno alla stessa quota, giustificando le discontinuità della sollecitazione orizzontale totale.

#### 4.4.2 Spostamenti della maglia

I profili degli spostamenti calcolati trattati di seguito sono quelli corrispondenti alla condizione di carico ULS, che ha il valore più alto tra i tre carichi esterni applicati.

La *Seashore direction* = in direzione della riva

Figura 53 mostra i profili degli spostamenti totali dell'intera maglia, mentre la Figura 54 dà un dettaglio degli spostamenti del blocco di ancoraggio. In quest'ultima figura, è possibile apprezzare la deformazione locale del blocco di ancoraggio dovuta all'applicazione di carichi esterni (corrispondente ad uno spostamento massimo nei nodi caricati della maglia di ca. 15 mm)

La Figura 55 mostra gli spostamenti totali lungo due sezioni attraverso il centro di gravità con orientamento rispettivamente Nord-Sud ed Ovest-Est. Come discusso nei precedenti paragrafi (§ 4.1), lo spostamento massimo del blocco di ancoraggio è uguale a ca. 11 mm (sommità del blocco), mentre lo spostamento al centro del blocco è uguale a ca. 8 mm. La sezione Nord-Sud mostra chiaramente il movimento roto-traslatorio del blocco di ancoraggio, discusso al punto 4.1.

La Figura 56 e la Figura 57 mostrano le componenti in direzione z e direzione y degli spostamenti lungo le stesse sezioni presentate in Figura 55.

#### 4.4.3 Distribuzione della pressione idrica

Durante lo scavo viene indotto un processo di infiltrazione dall'esterno della fossa verso la zona scavata (§ 3.3). A causa della limitazione di Plaxis 3D, non è possibile risolvere numericamente il processo d'infiltrazione 3D. E' tuttavia possibile variare la distribuzione della pressione idrica nei cluster del terreno, dove si verifica l'infiltrazione, interpolando le pressioni nei pori tra quelli corrispondenti al livello di falda esterno generale (+102 m s.l.m.) ed il livello di falda corrispondente

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> <i>PF0067_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

alla quota dell'attuale linea di dragaggio. Le condizioni generali della falda vengono quindi ripristinate al termine della costruzione del blocco.

La Figura 58 mostra la distribuzione della pressione idrica nei pori assegnata ai cluster del terreno al termine della fase di scavo (profondità massima dello scavo: +76.65 m s.l.m.), ancora una volta lungo due sezioni centrali orientate rispettivamente Nord-Sud ed Ovest-Est. Il corrispondente profilo di testata della falda è indicato in Figura 59. Per il confronto, la

Figura 60 mostra la distribuzione della falda, corrispondente alle condizioni iniziali, al termine della costruzione del blocco.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## 5 CONCLUSIONI

Nella presente relazione è stato studiato il comportamento del Blocco di Ancoraggio Calabria sottoposto alle condizioni di carico SILS, SLS2 e ULS mediante analisi tridimensionali statiche eseguite utilizzando il codice agli elementi finiti Plaxis 3D Foundation. I calcoli si basano sia sui disegni sia sulle forze dei cavi forniti nel Progetto d'Offerta; si è anche tenuto conto dell'influenza delle forze dei cavi calcolate con il modello IBDAS globale, versione 3.3b e versione 3.3f.

La valutazione degli spostamenti del blocco indotti dal sisma e della sicurezza a fronte di stati limite ultimi è stata discussa nella relazione guida "Blocco d'Ancoraggio Calabria: spostamenti indotti dal sisma e sicurezza a fronte di stati limite ultimi".

Il Blocco di Ancoraggio Calabria è un blocco massiccio a forma di prisma con base trapezoidale. Le dimensioni del rettangolo superiore, in piano, sono 98 x 87,5 m<sup>2</sup>; l'altezza massima della costruzione è di 41 m. Lo scavo è sostenuto da diaframmi, con uno spessore di 1,0 m ed una larghezza di 2,5 m, la cui lunghezza varia in base alla forma del blocco. Lo scavo è pure sostenuto da parecchi livelli di tiranti, in numero variabile lungo i diversi lati della fossa.

L'attuale quota del piano di terra nella posizione del Blocco di Ancoraggio Calabria si trova tra +114 m e +127 m s.l.m.; la riva si trova ad una distanza di ca. 900 m dal blocco di ancoraggio. La quota della falda risulta dall'infiltrazione a regime tra un'altezza di ca. +107 m s.l.m. nell'angolo sud-est del blocco d'ancoraggio ad un'altezza di +95 m s.l.m. nell'angolo opposto, in posizione nord-ovest.

Il profilo geotecnico dell'area è caratterizzato dalle seguenti unità: 1. Depositi Costieri (sabbia e ghiaia); 2. Ghiaie di Messina (ghiaia e sabbia); 3. Conglomerato di Pezzo (sedimenti clastici di natura granitica in una matrice sabbioso-limosa e arenaria assimilabile ad una roccia morbida); è in genere possibile distinguere uno strato superiore di conglomerato eroso ed uno strato inferiore di conglomerato in situ. Il profilo geotecnico è caratterizzato da significative variazioni del livello degli strati di terreno in direzione parallela alla linea costiera e, in misura minore, in direzione ortogonale alla stessa. La caratterizzazione geotecnica si basa su indagini locali condotte nel 1988 e 1992.

Il comportamento del Blocco di Ancoraggio è stato studiato mediante analisi agli elementi finiti eseguite usando il codice Plaxis 3D Foundation; il modello 3D usato per le analisi, che si estende per 500 x 500 m<sup>2</sup> in pianta e per 200 m al di sotto del piano terra, è costituito da ca. 60 mila elementi. Il comportamento meccanico del terreno è stato descritto usando il modello di Incrudimento del Terreno, in grado di riprodurre la non linearità del terreno dovuta al verificarsi di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

deformazioni plastiche dall'inizio del processo di carico. Il comportamento meccanico del calcestruzzo del blocco di ancoraggio e del materiale di zavorra è stato definito lineare elastico. I diaframmi sono stati modellati come elementi WALL shell, mentre i tiranti di ancoraggio sono stati modellati come elementi SPRING, che simulano i tiranti in modo semplificato senza tener conto dell'interazione tirante-terreno.

Le analisi tridimensionali agli elementi finiti sono state eseguite adottando la seguente sequenza delle fasi principali: 1. calcolo dello stato di sollecitazione iniziale; 2. attivazione dei diaframmi; 3. scavo progressivo del terreno per raggiungere la base del blocco di ancoraggio e simultanea attivazione dei livelli dei tiranti; 4. attivazione progressiva del blocco di ancoraggio dal basso verso l'alto; 5. applicazione dei carichi esterni; 6a. incremento dei carichi esterni; 6b. riduzione delle caratteristiche del terreno (riduzione  $\phi' - c'$ ).

Per valutare l'effetto dello strato più alto del terreno sugli spostamenti del blocco, è stata condotta un'ulteriore analisi *comparativa*, nella quale è stato simulato uno scavo profondo 4 m attorno al blocco.

Le forze nei cavi principali in corrispondenza del Blocco di Ancoraggio Calabria sono state previste dalle analisi strutturali del progetto d'offerta per tre diverse condizioni di carico (SILS, SLS2 e ULS). La direzione delle forze è inclinata di 15 gradi rispetto alla linea orizzontale e rivolta verso l'alto, in direzione della riva. Viene inoltre discussa l'influenza delle forze dei cavi calcolate usando il modello IBDAS globale, versione 3.3b e 3.3f.

I risultati delle analisi agli elementi finiti vengono esaminati in termini di curve carico-spostamento; a tale scopo sono stati selezionati dieci punti rappresentativi del blocco d'ancoraggio. Le fasi preliminari delle analisi (scavo della fossa sostenuto da diaframmi e tiranti, costruzione del blocco, rimozione dei tiranti temporanei, ripristino delle condizioni idrauliche iniziali) sono state simulate per riprodurre completamente lo stato di sollecitazione del terreno all'inizio del processo di carico. Gli spostamenti calcolati in queste fasi sono stati riazzerati e le curve carico-spostamento si riferiscono solo all'applicazione di carichi esterni.

I risultati ottenuti dalle analisi agli elementi finiti dimostrano che:

1. la risposta del blocco di ancoraggio ai carichi esterni consiste in una traslazione verso riva (direzione z), associata ad una rotazione verso il basso sul piano y-z;
2. per tutte tre le condizioni di carico, lo spostamento orizzontale del blocco verso riva è inferiore a 10 mm;
3. lo spostamento verticale totale rivolto verso l'alto è inferiore a 2 mm, mentre lo spostamento orizzontale in direzione x (ortogonale all'asse del ponte) è praticamente uguale a zero;

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

4. le rotazioni sul piano verticale (y-z) sono dell'ordine di alcuni millesimi di grado (in direzione della riva), mentre sono praticamente uguali a zero in direzione x-y. I valori di rotazione sul piano x-z sono bassi e mostrano solo una leggera influenza dell'inclinazione degli strati di terreno delle fondazioni sulla risposta del blocco;
5. l'analisi *comparativa* indica un'influenza relativamente piccola dei 4 m più alti del terreno sulla risposta del blocco;
6. la direzione media del movimento del blocco, per tutte e tre le condizioni di carico è rivolta verso l'alto con un'inclinazione rispetto alla linea orizzontale di ca. 10 gradi;
7. il carico ultimo di collasso del blocco, valutato usando il miglior adattamento iperbolico dei dati carico-spostamento, è uguale a ca. 11000 MN. Ciò comporta un fattore di sicurezza nei confronti delle forze esterne in aumento di ca. 2.75 per i carichi ULS e di ca. 3.5 per il carico SILS;
8. nelle analisi di riduzione  $\phi' - c'$ , la resistenza del terreno è stata progressivamente ridotta aumentando il fattore  $M_{sf}$ , il cui significato fisico è comparabile ad un fattore di sicurezza. Un valore prudenziale del fattore  $M_{sf}$ , valido per tutte e tre le condizioni di carico, è ca. 3. L'analisi *comparativa*, con uno scavo profondo 4 m attorno al blocco, ha prodotto un valore prudenziale di  $M_{sf} = 2.5$ , confermando l'importanza del rinterro dell'area attorno al blocco, dopo la costruzione.

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

## 6 FIGURE

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20-06-2011</i>	

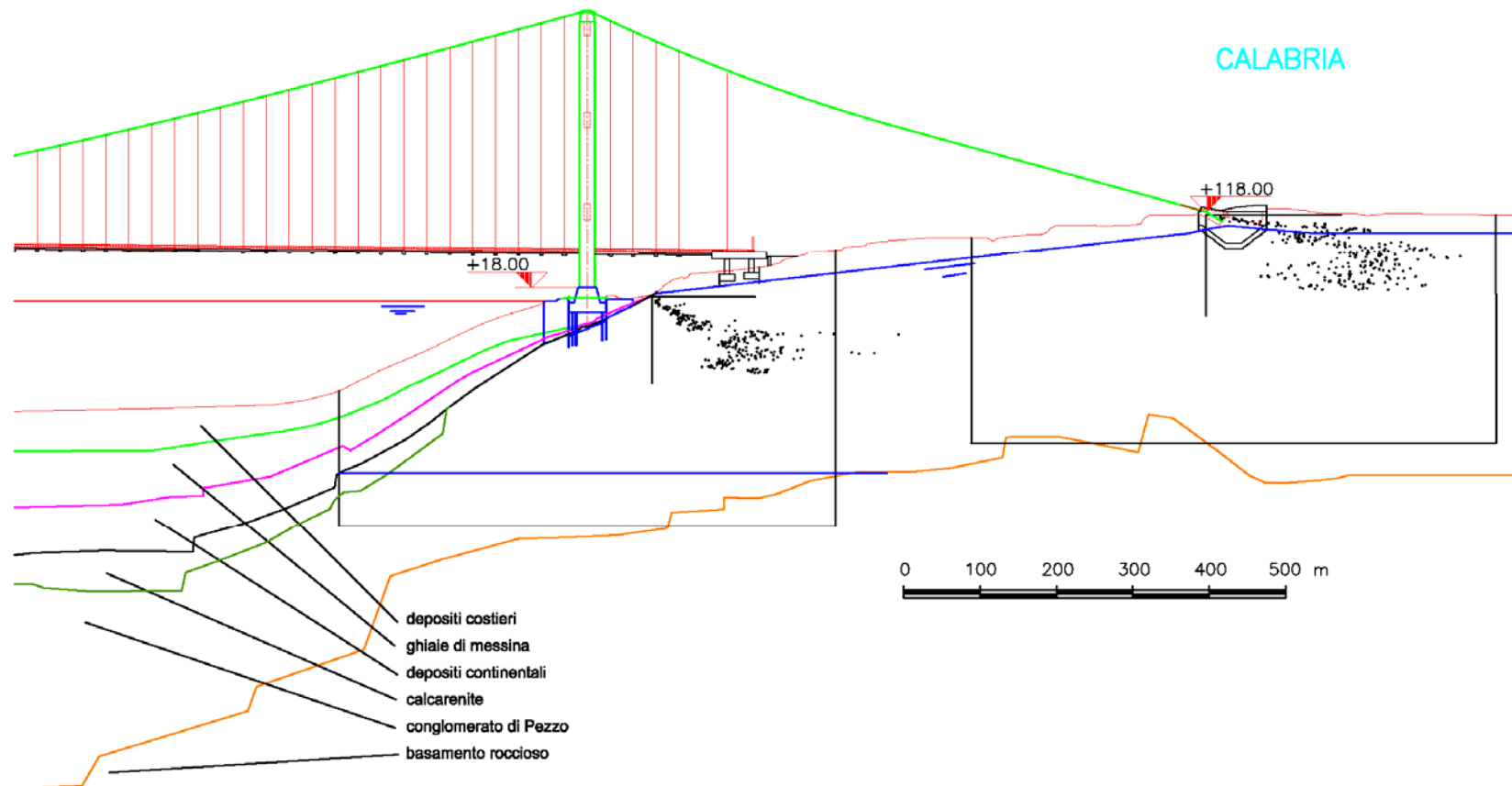


Figura 1: Profilo del terreno sulla costa calabra

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0067_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	

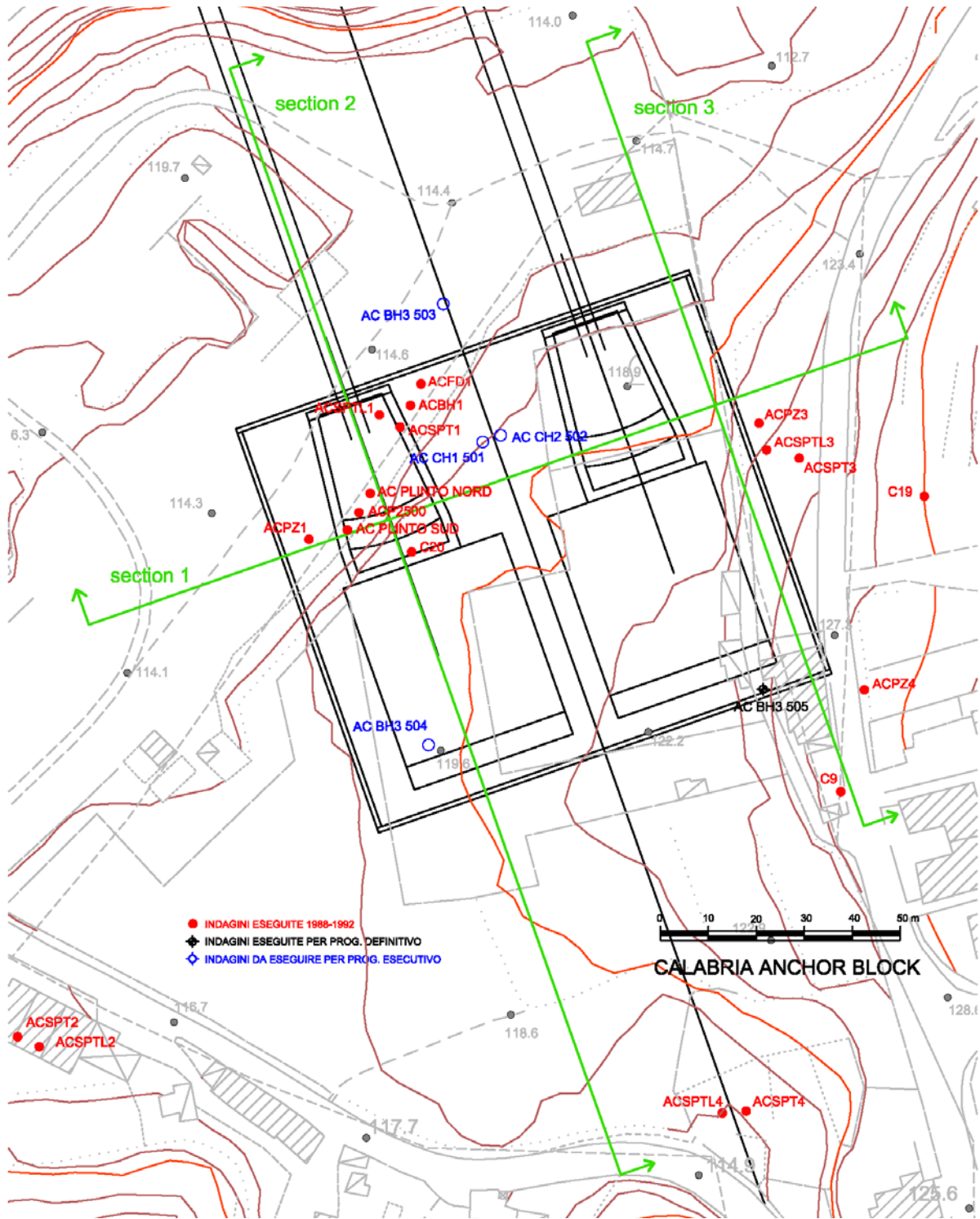


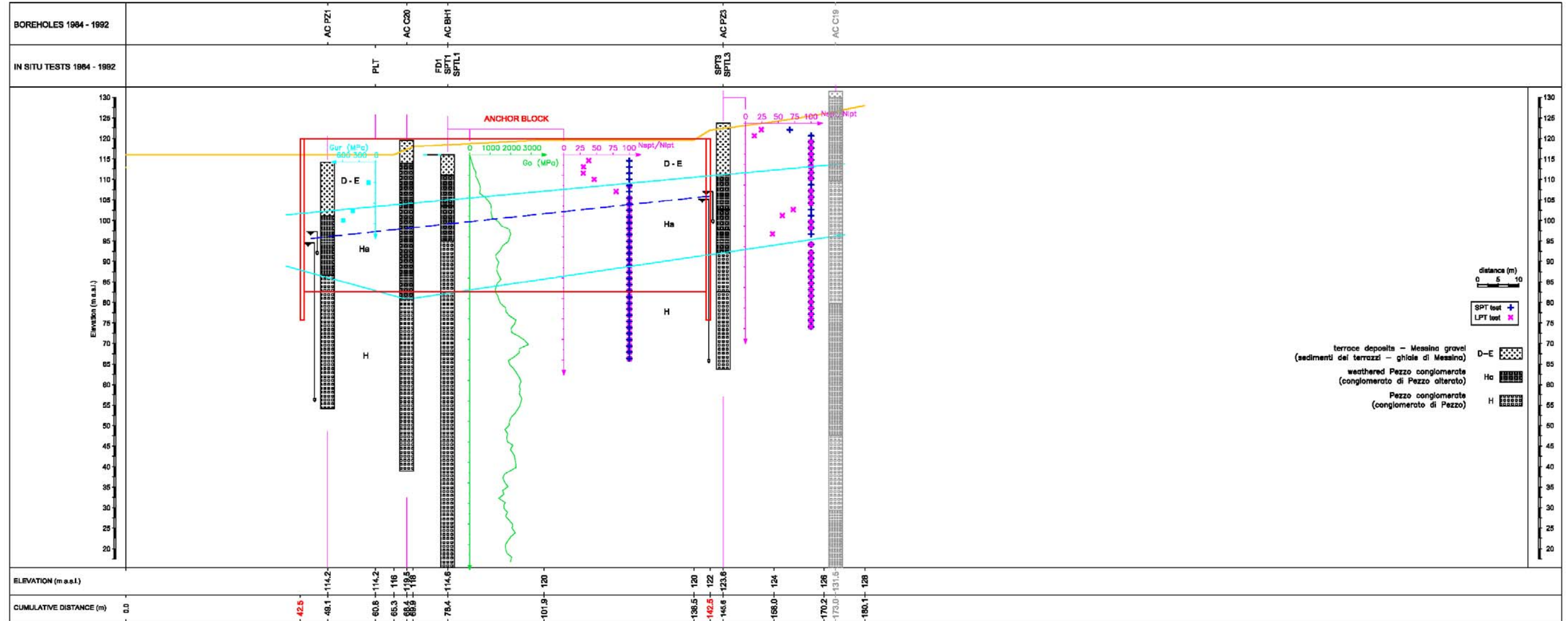
Figura 2: Vista in pianta nel punto del Blocco di Ancoraggio Calabria

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

 	<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
	Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0067_0_ITA.doc	Rev 0

SEZIONE N. 1

SECTION N. 1



Boreholes = Fori di trivellazione    In situ tests = Prove locali    Elevation = Quota    Cumulative distance = Distanza cumulativa    Anchor block = Blocco d'ancoraggio

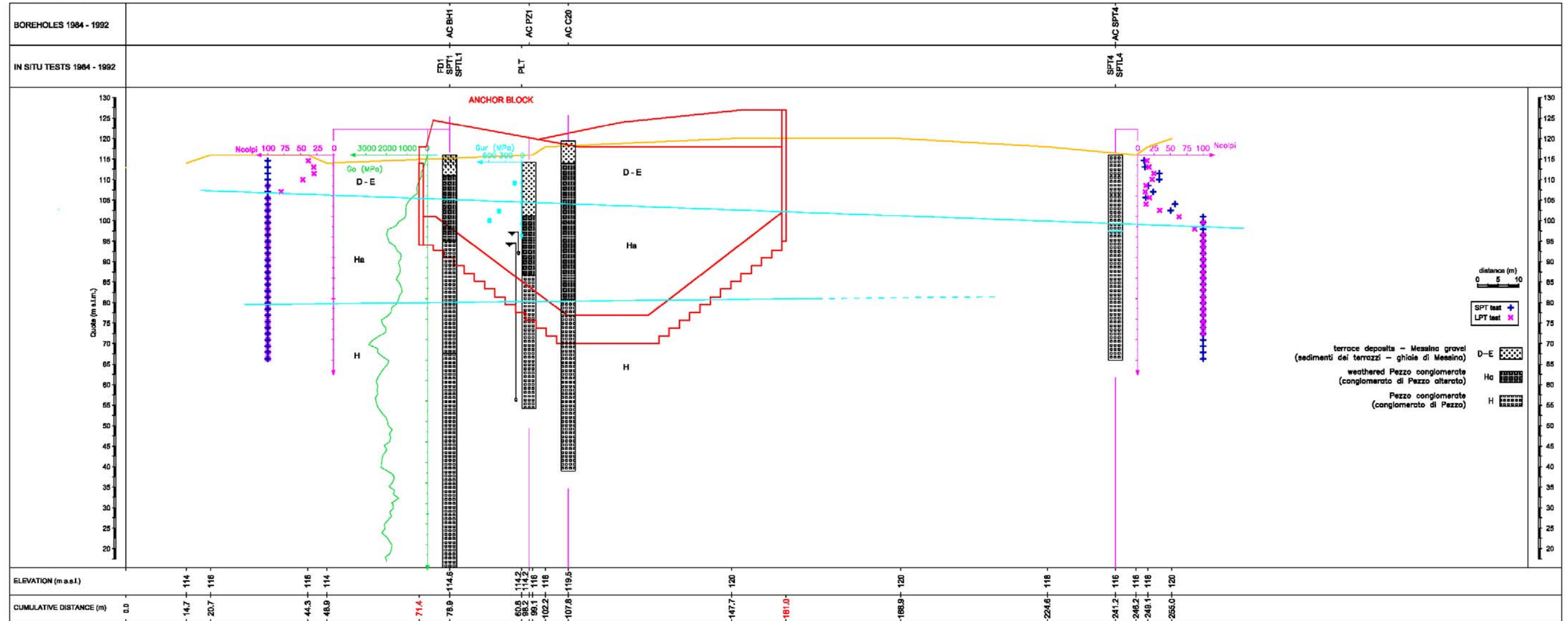
Figura 3: Blocco di Ancoraggio Calabria, sezione trasversale N. 1



		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

SEZIONE N. 2

SECTION N. 2



Boreholes = Fori di trivellazione    In situ tests = Prove locali    Elevation = Quota    Cumulative distance = Distanza cumulativa    Anchor block = Blocco d'ancoraggio

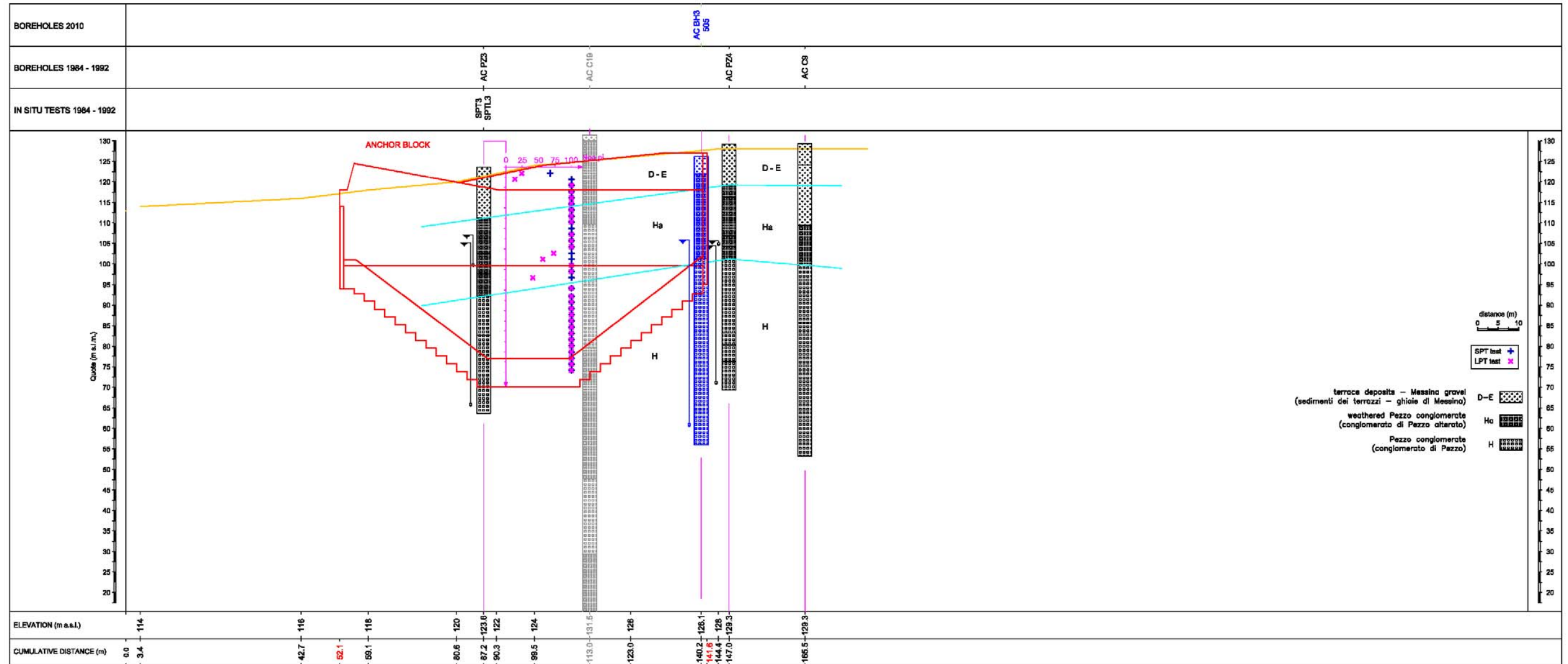
Figura 4: Blocco di Ancoraggio Calabria, sezione trasversale N. 2

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
		Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0067_0_ITA.doc	Rev 0

SEZIONE N. 3

SECTION N. 3

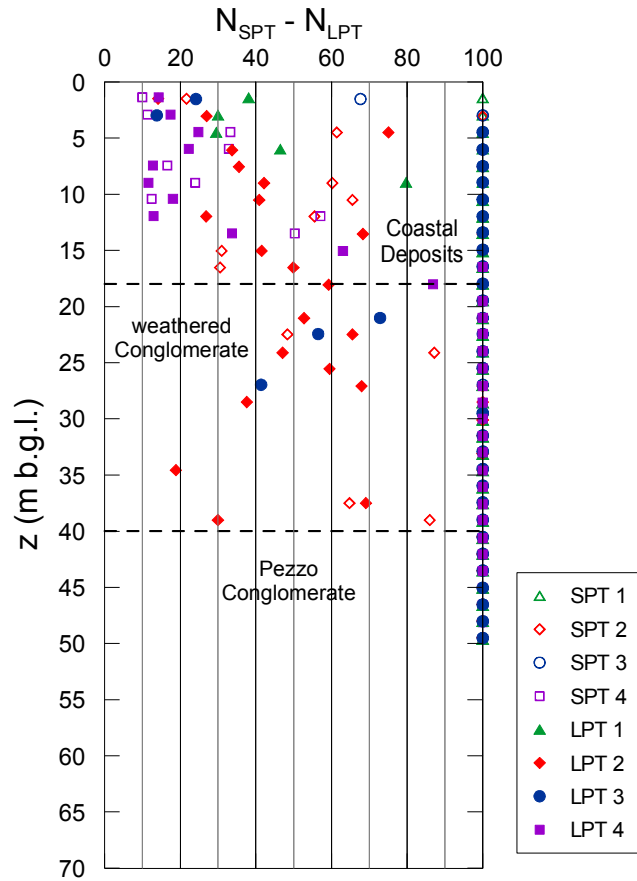


Boreholes = Fori di trivellazione    In situ tests = Prove locali    Elevation = Quota    Cumulative distance = Distanza cumulativa    Anchor block = Blocco d'ancoraggio

Figura 5: Blocco di Ancoraggio Calabria, sezione trasversale N. 3



		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0067_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011



Coastal Deposits = Depositi costieri    weathered Conglomerate = Conglomerato eroso  
 Pezzo Conglomerate = Conglomerato di Pezzo

*Figura 6: Blocco di Ancoraggio Calabria – Risultati delle prove SPT e LPT*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0067_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

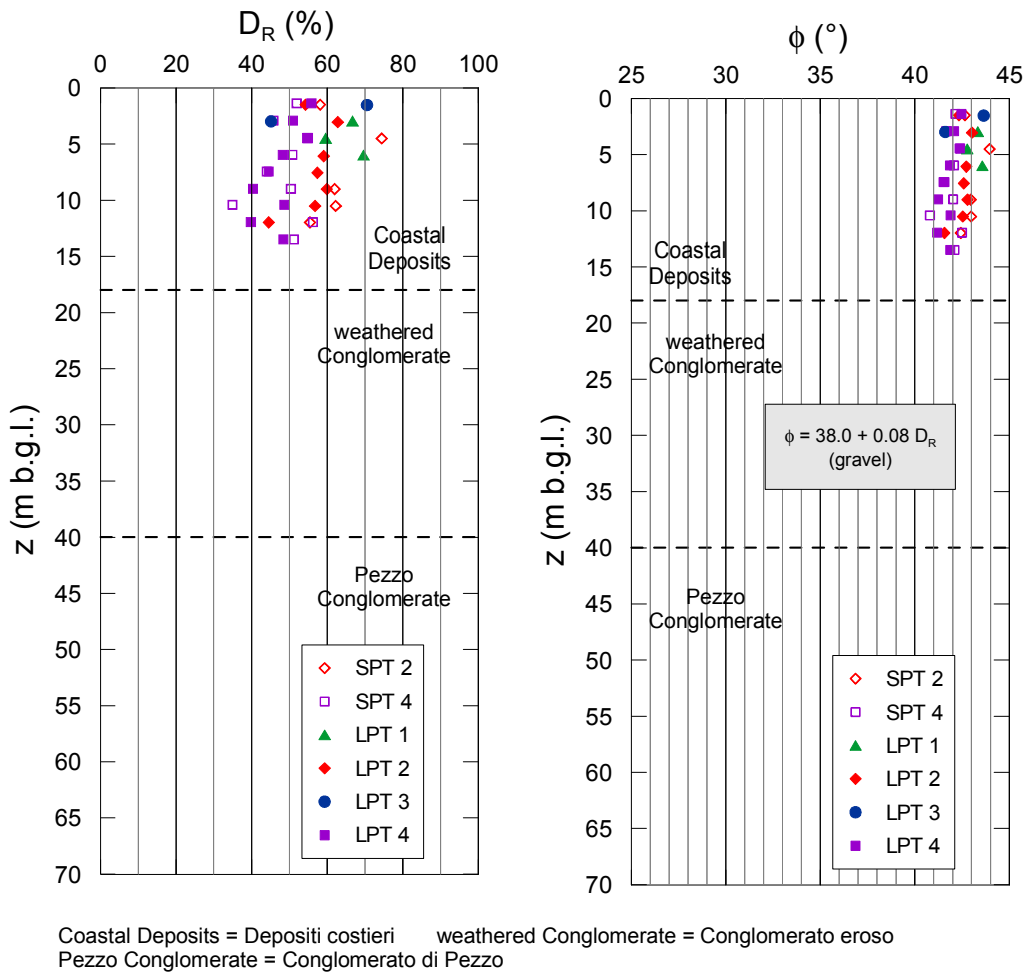


Figura 7: Blocco di Ancoraggio Calabria – densità relativa ed angolo di resistenza al taglio

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		Codice documento PF0067_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011

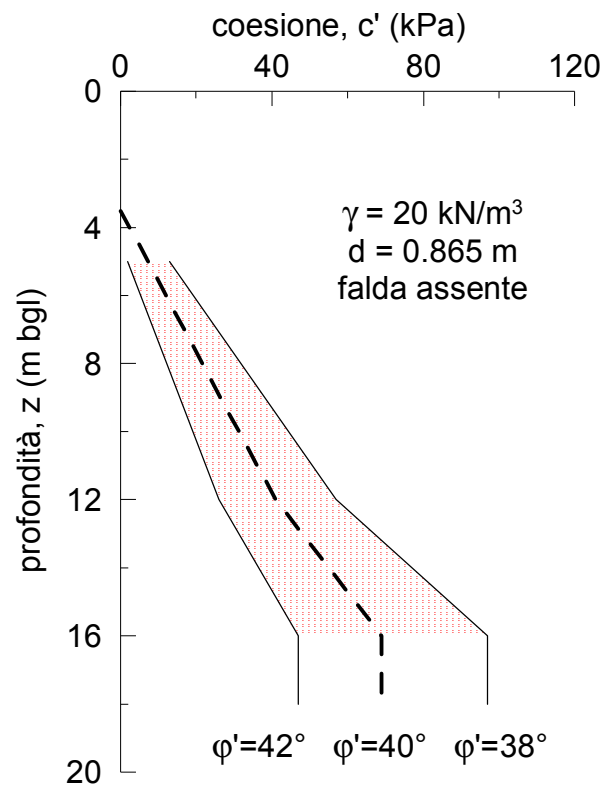


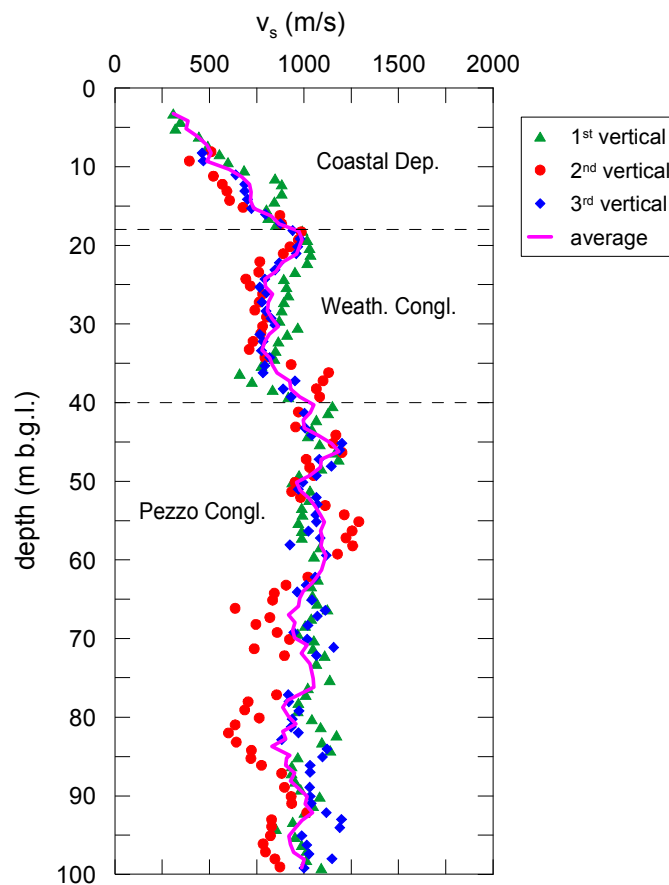


Figura 8: Blocco di Ancoraggio Calabria – profilo  $c'$  dalla prova di carico su piatto di grosso diametro



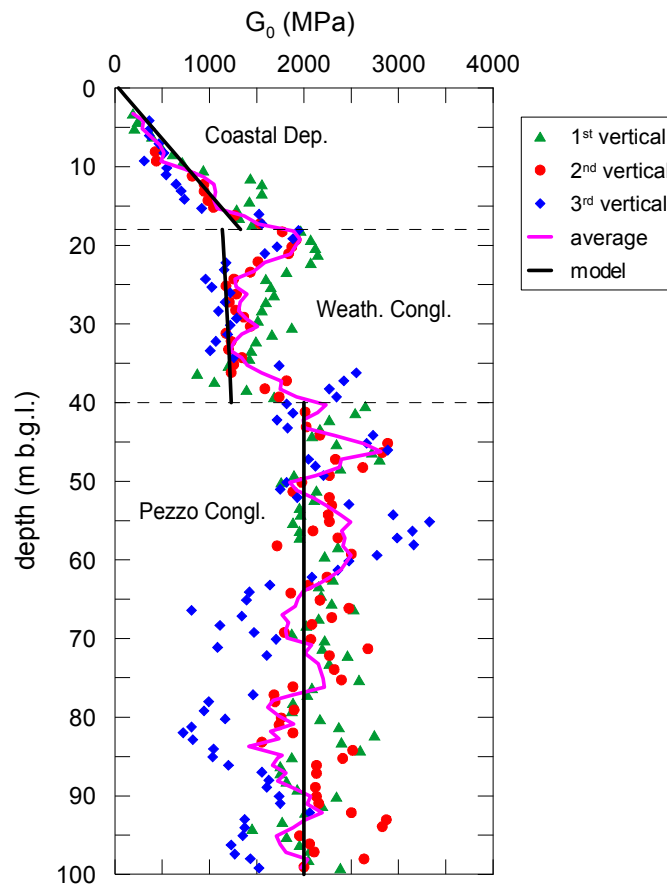
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20-06-2011</i>



Coastal Deposits = Depositi costieri    weathered Conglomerate = Conglomerato eroso  
 Pezzo Conglomerate = Conglomerato di Pezzo    vertical = verticale    average = media



Figura 9: Blocco di Ancoraggio Calabria, profilo  $v_s$  dalla prova del foro trasversale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011



*Coastal Deposits = Depositi costieri    weathered Conglomerate = Conglomerato eroso*  
*Pezzo Conglomerate = Conglomerato di Pezzo    depth = profondità*  
*vertical = verticale    average = media    model = modello*

*Figura 10: Blocco di Ancoraggio Calabria, profilo  $G_0$  dalla prova del foro trasversale e previsione del modello HS*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20-06-2011</i>	

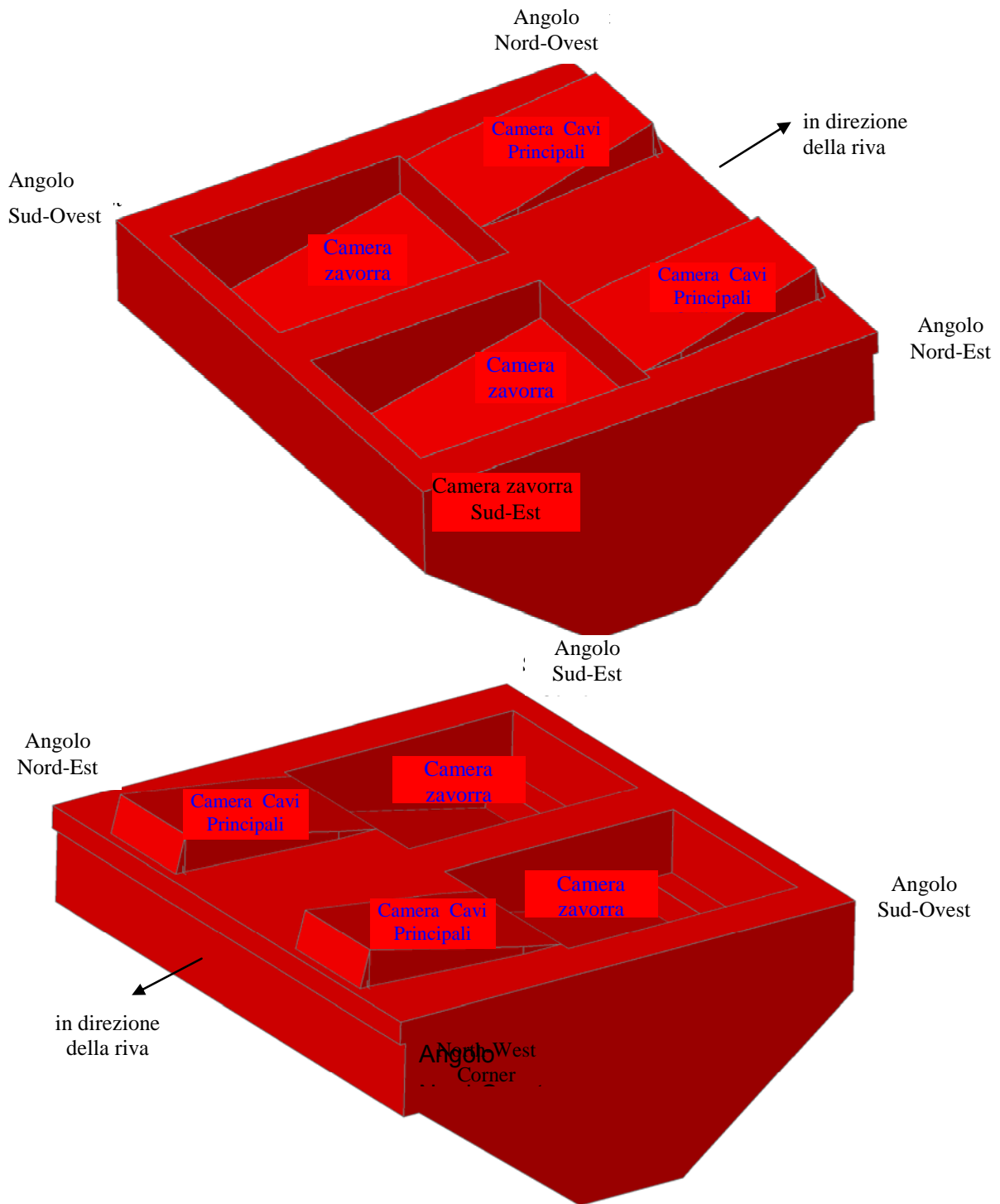


Figura 11: due viste assometriche del Blocco di Ancoraggio Calabria

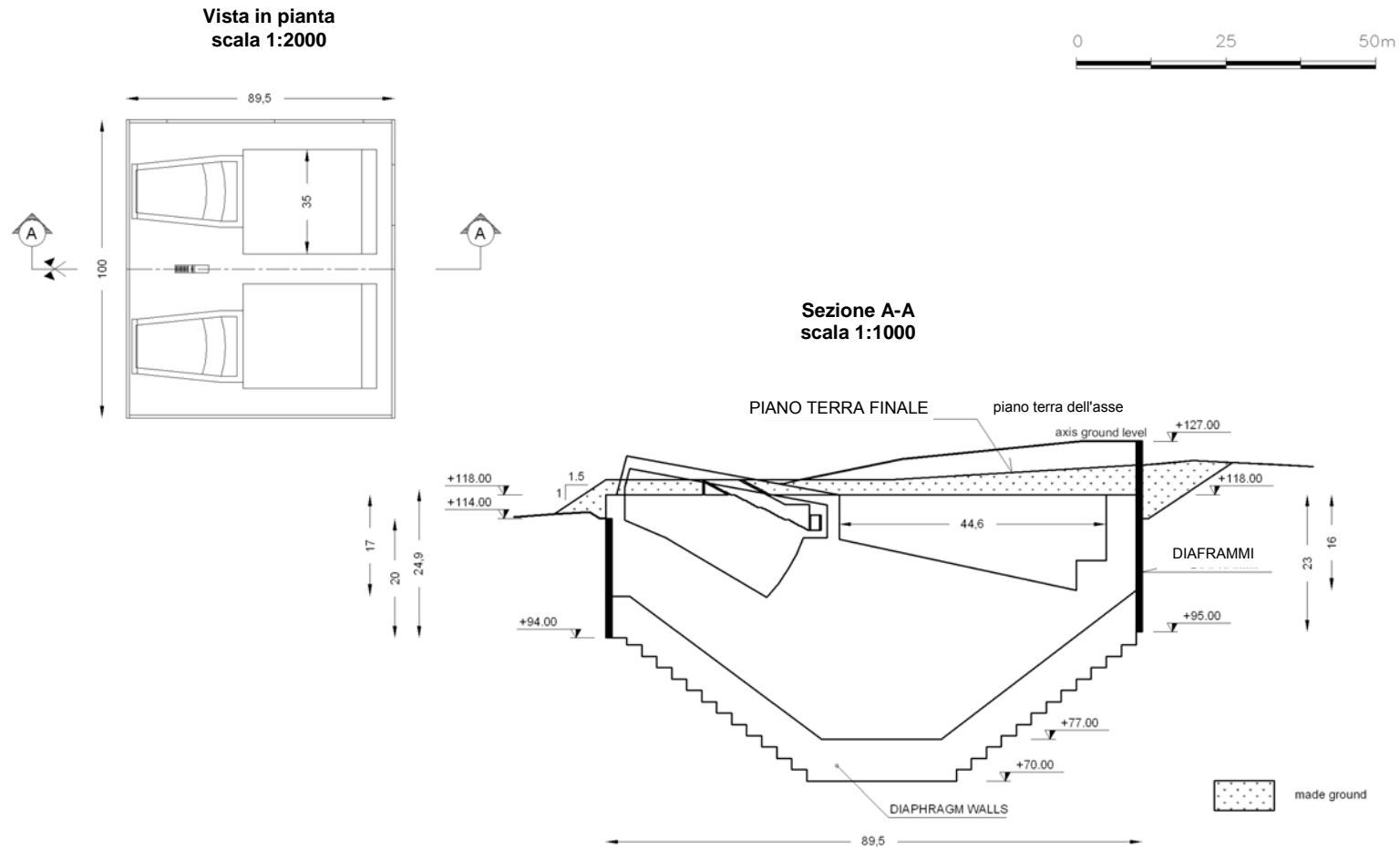


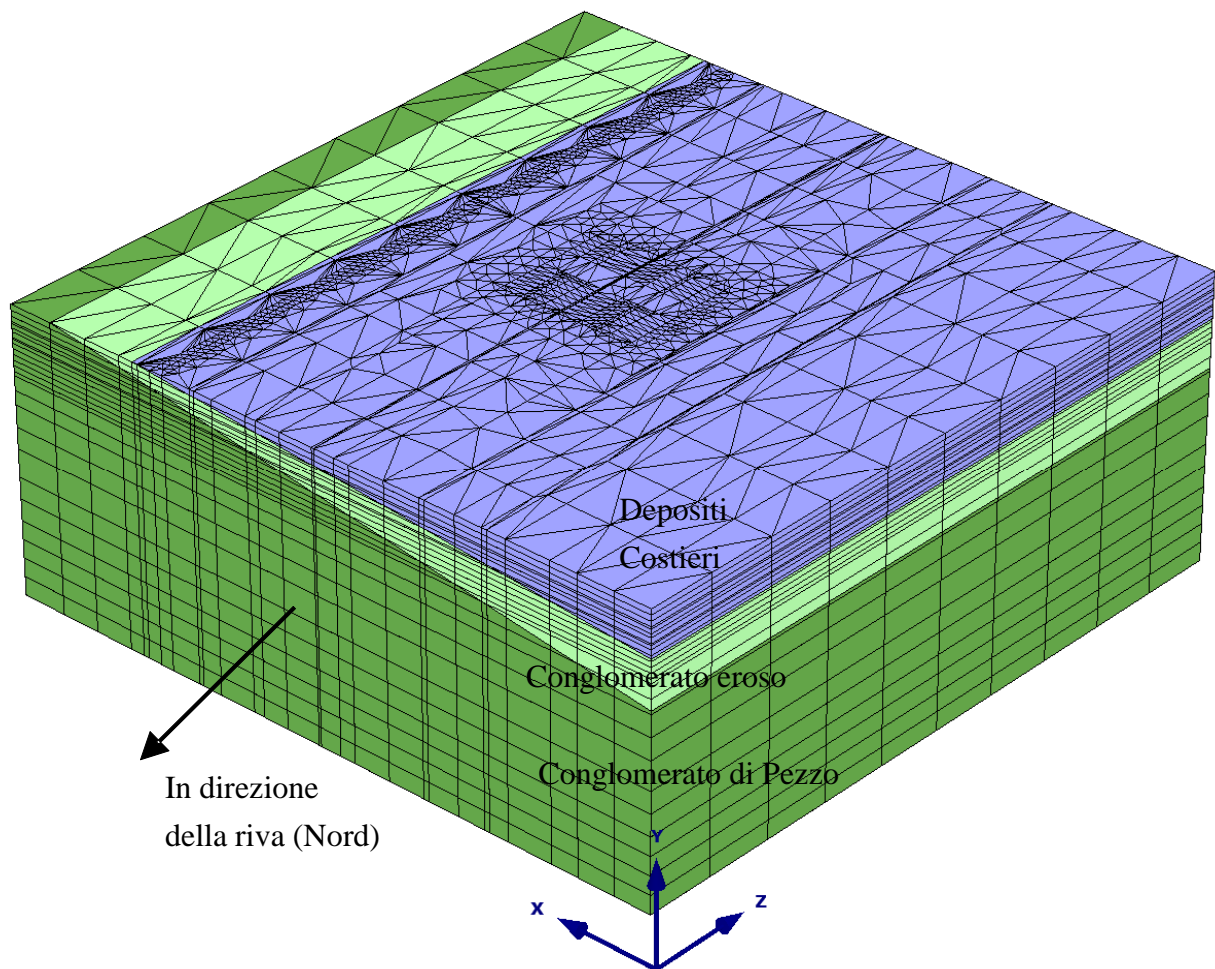


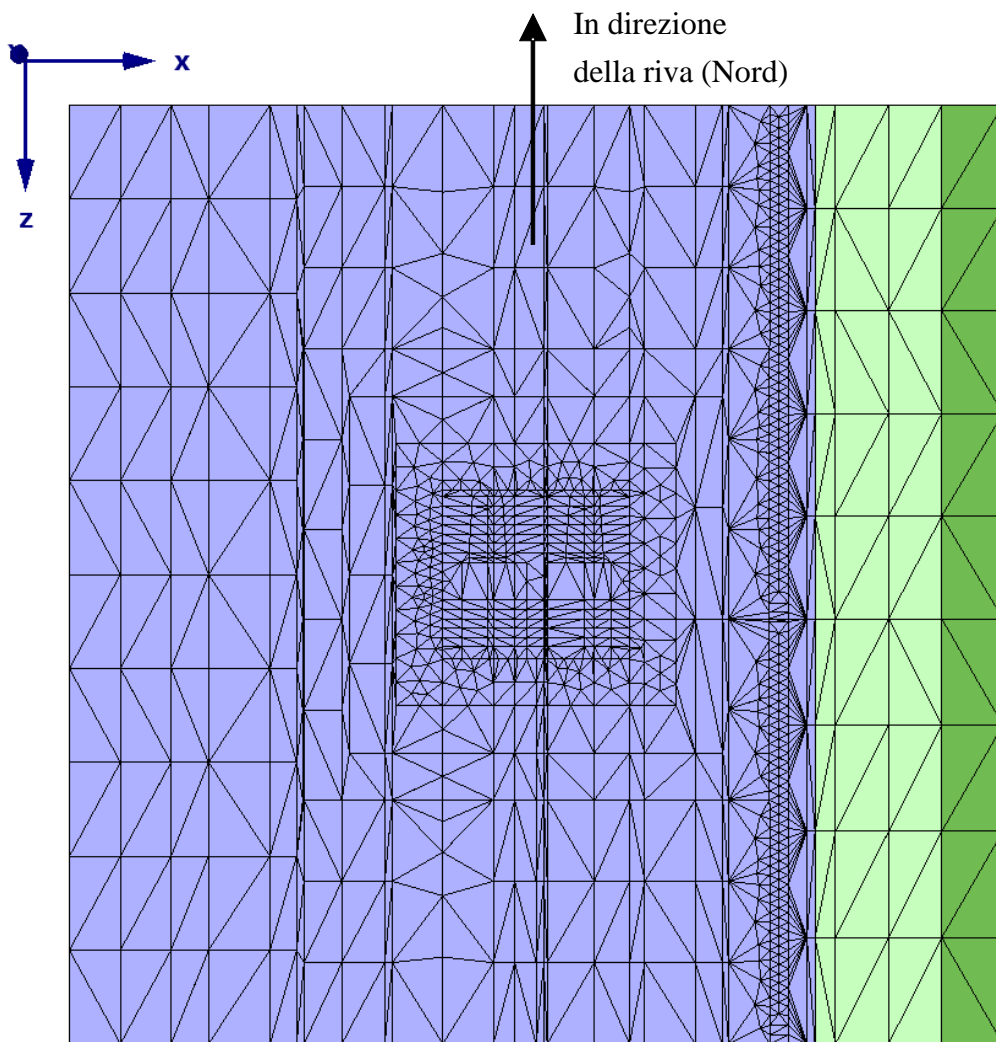
Figura 12: Vista in pianta e sezione trasversale del Blocco di Ancoraggio Calabria

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20-06-2011</i>





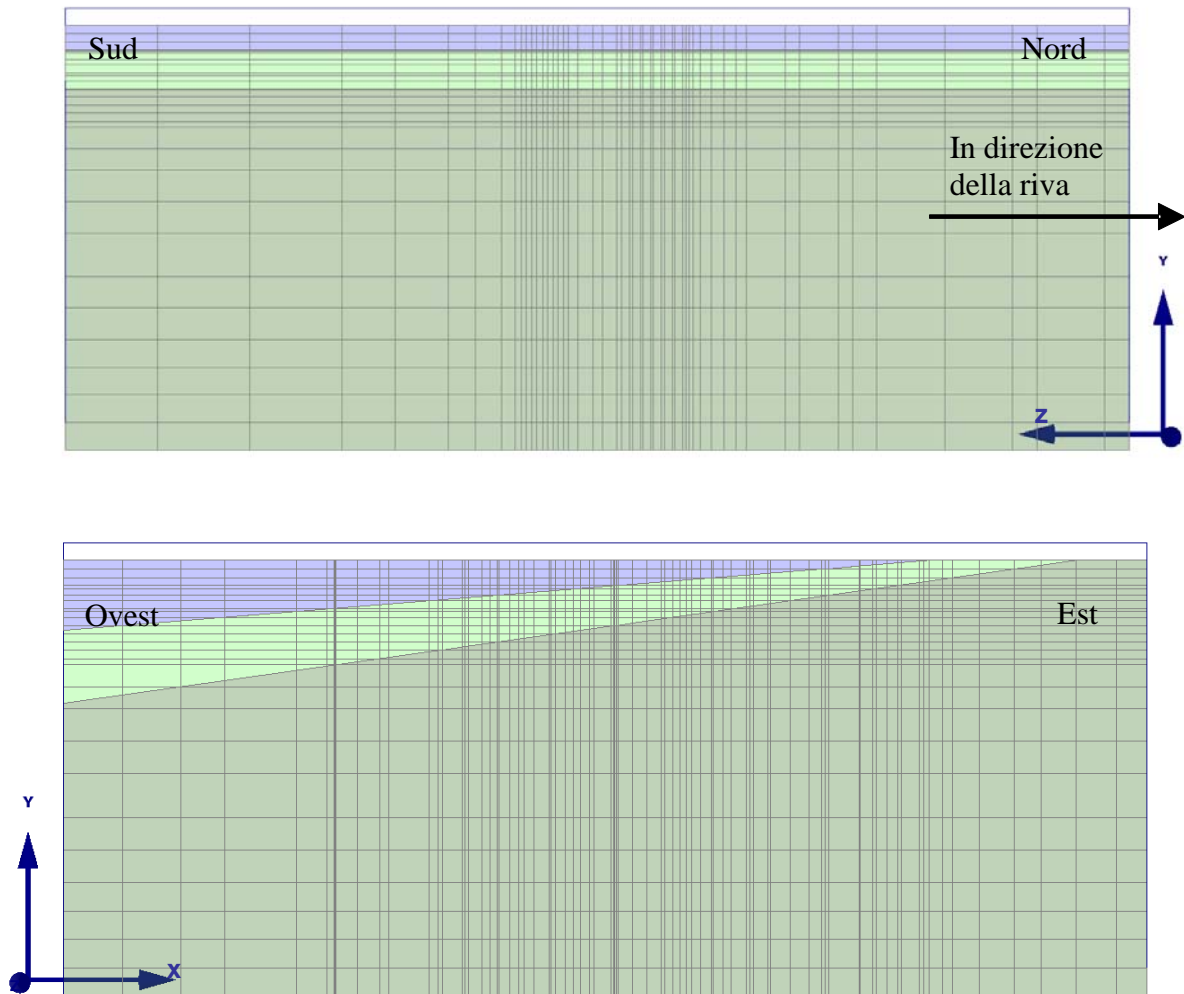
*Figura 13: Modello FEM nelle fasi iniziali: vista assometrica*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_0_ITA.doc</i>	Rev 0	Data 13-04-2011



*Figura 14: Modello FEM: vista dall'alto della maglia iniziale*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20-06-2011



*Figura 15: Modello FEM: sezioni longitudinali e trasversali della maglia iniziale*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_0_ITA.doc</i>	Rev 0	Data 13-04-2011

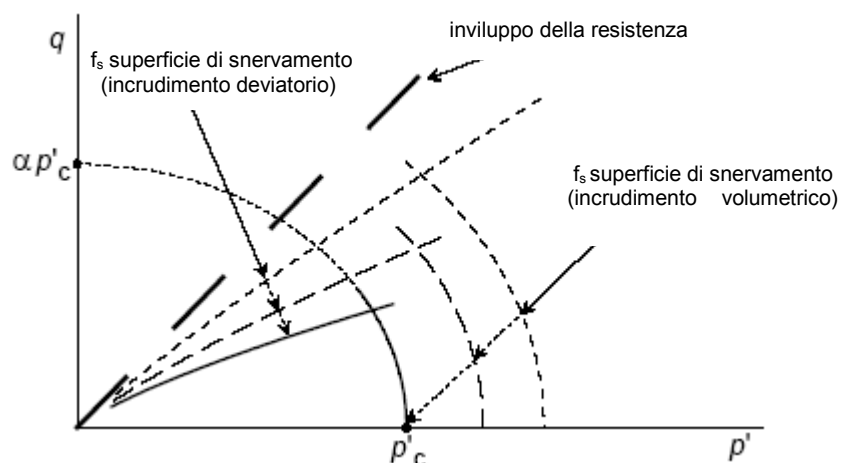


Figura 16: Superfici di snervamento del modello di Incrudimento del Suolo e loro evoluzione

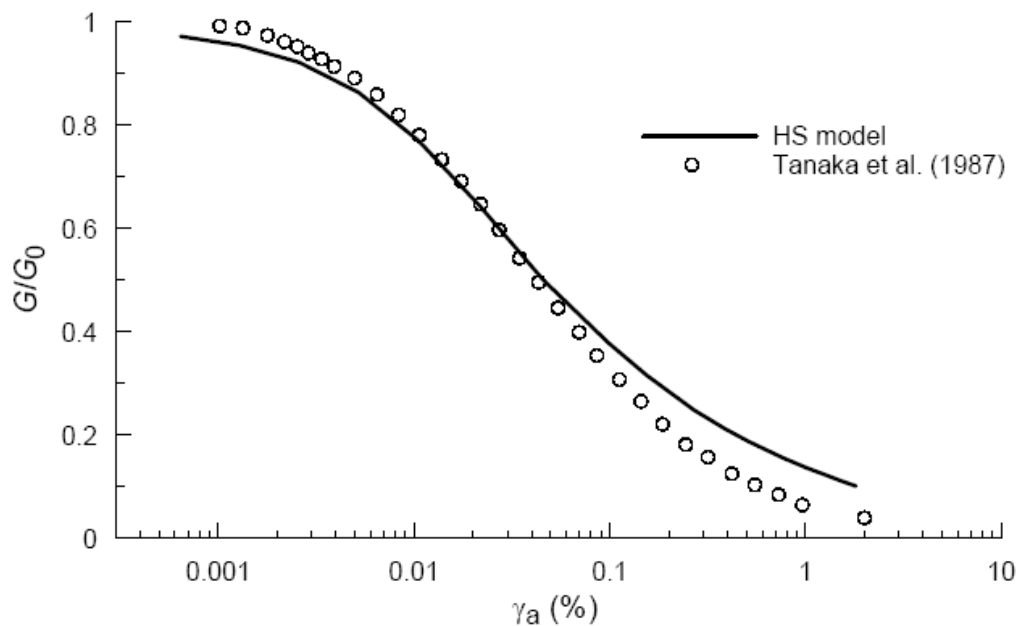




Figura 17: Confronto tra il decadimento della rigidezza osservato da Tanaka et al (1987) e calcolato con il modello HS



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20-06-2011</i>

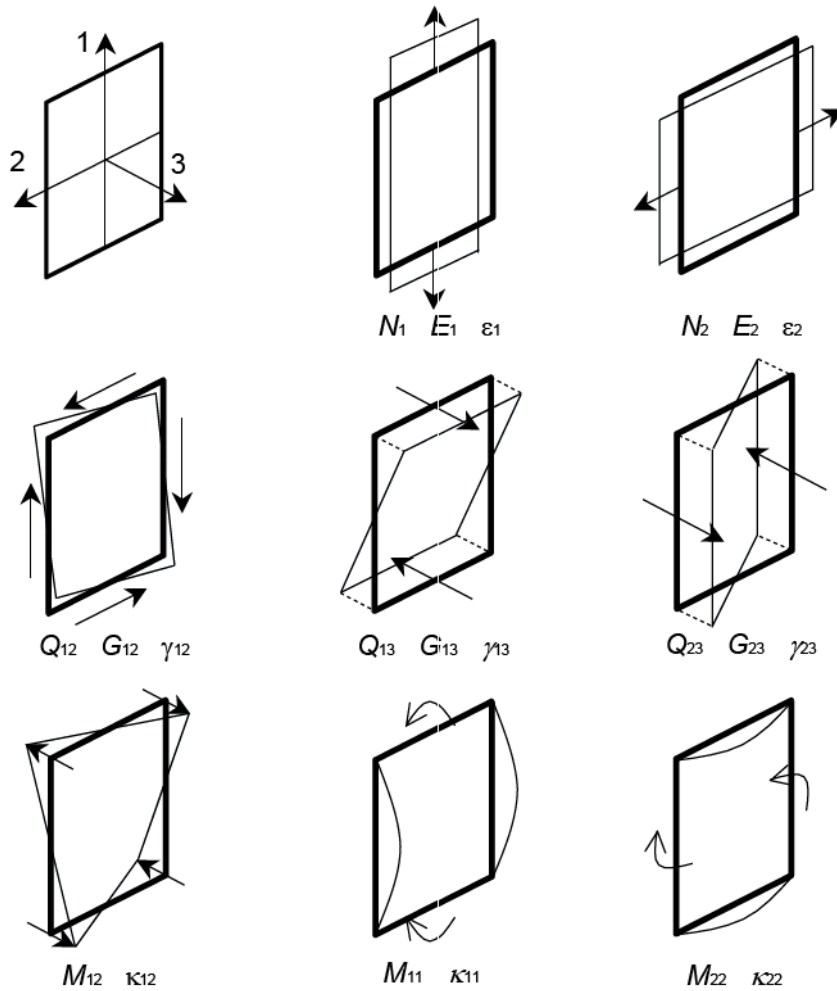


Figura 18: elementi WALL in Plaxis 3D Foundation

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0067_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	

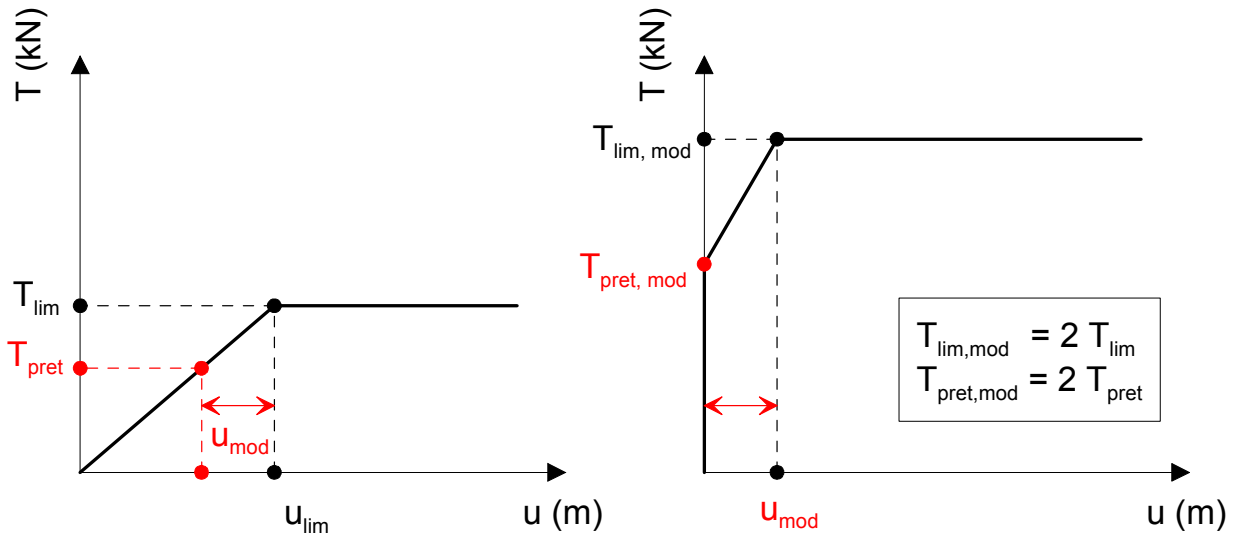


Figura 19: elementi SPRINGS: rigidezza non lineare e relazione (T-u) per le molle pre-tensionate nel modello

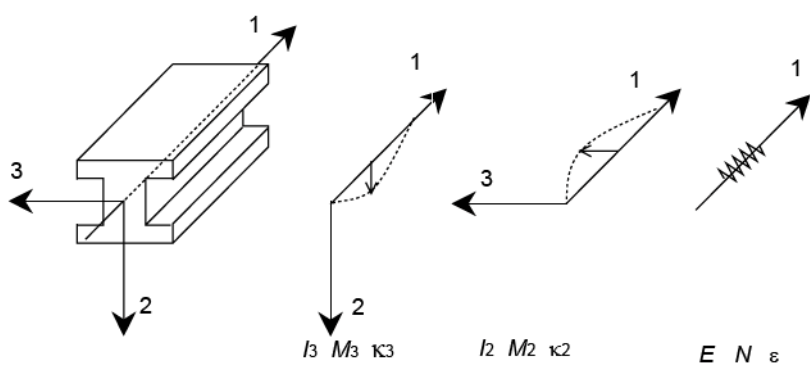


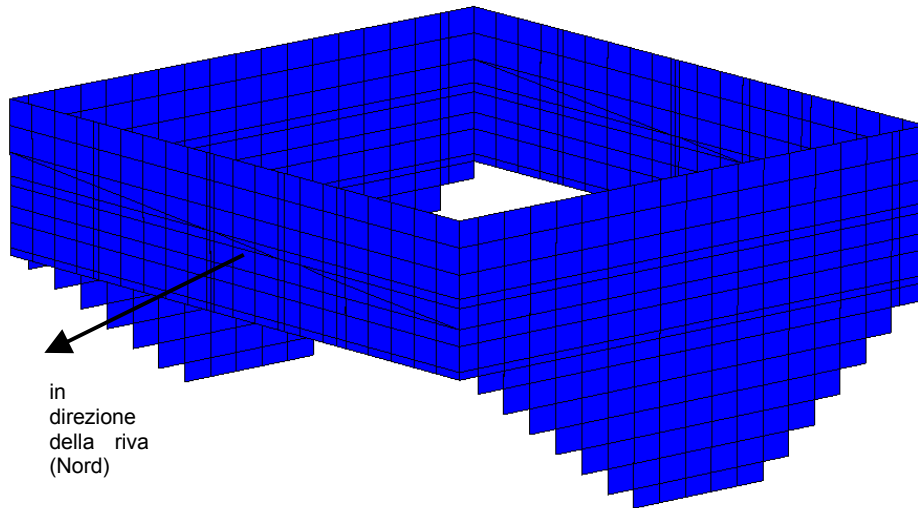
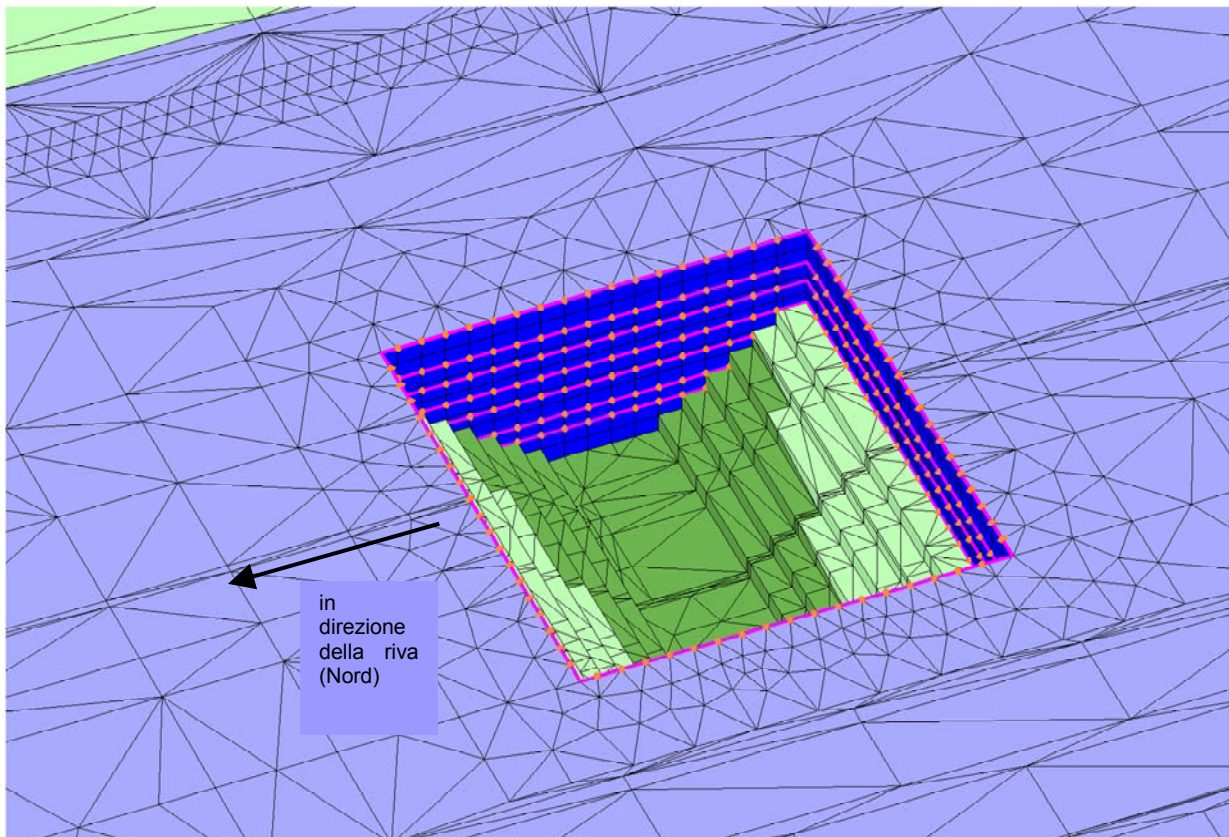


Figura 20: elementi BEAM orizzontali in Plaxis 3D Foundation

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20-06-2011</i>



*Figura 21: diaframmi: vista assonometrica*



*Figura 22: fase di scavo completata: vista assonometrica*

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

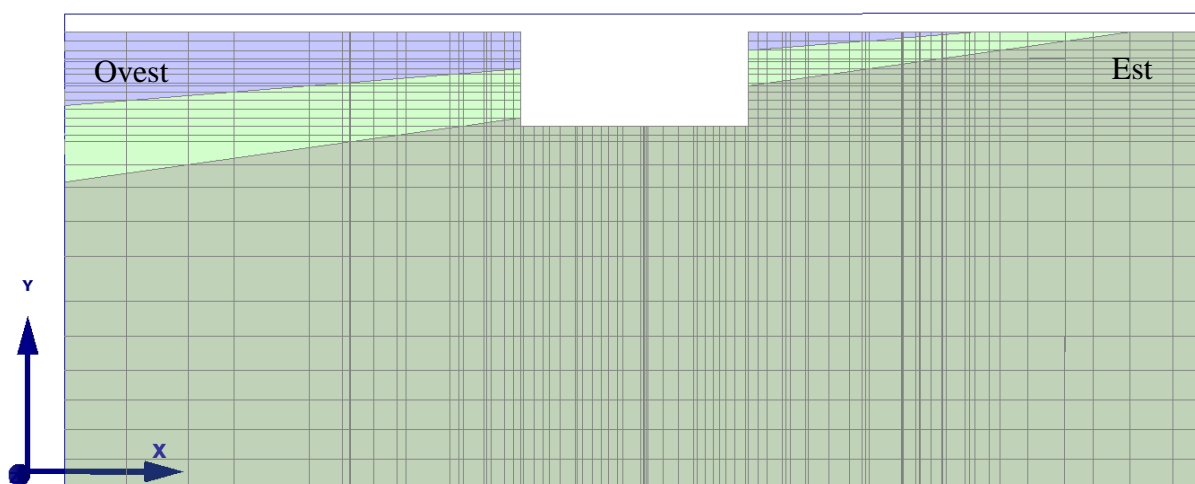
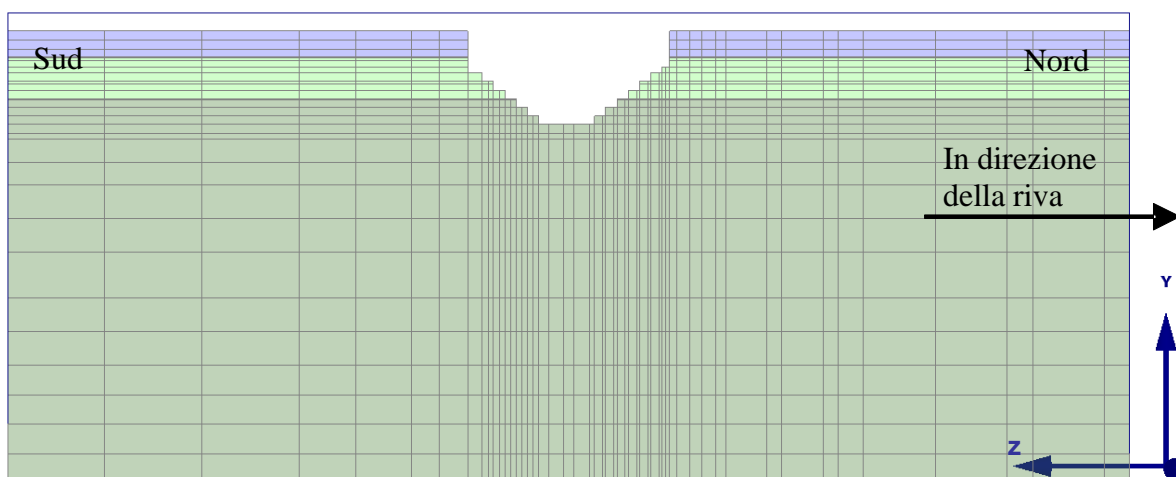


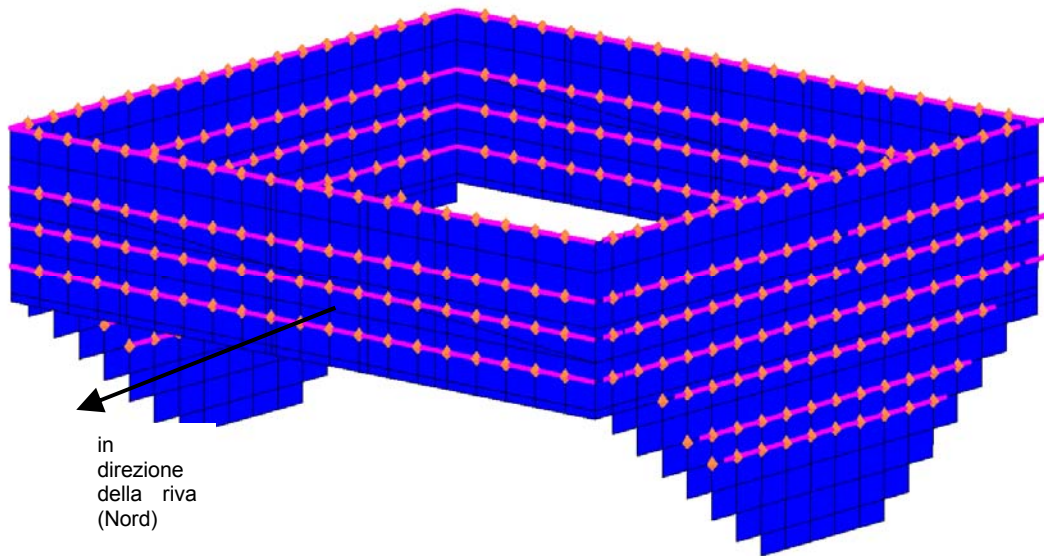


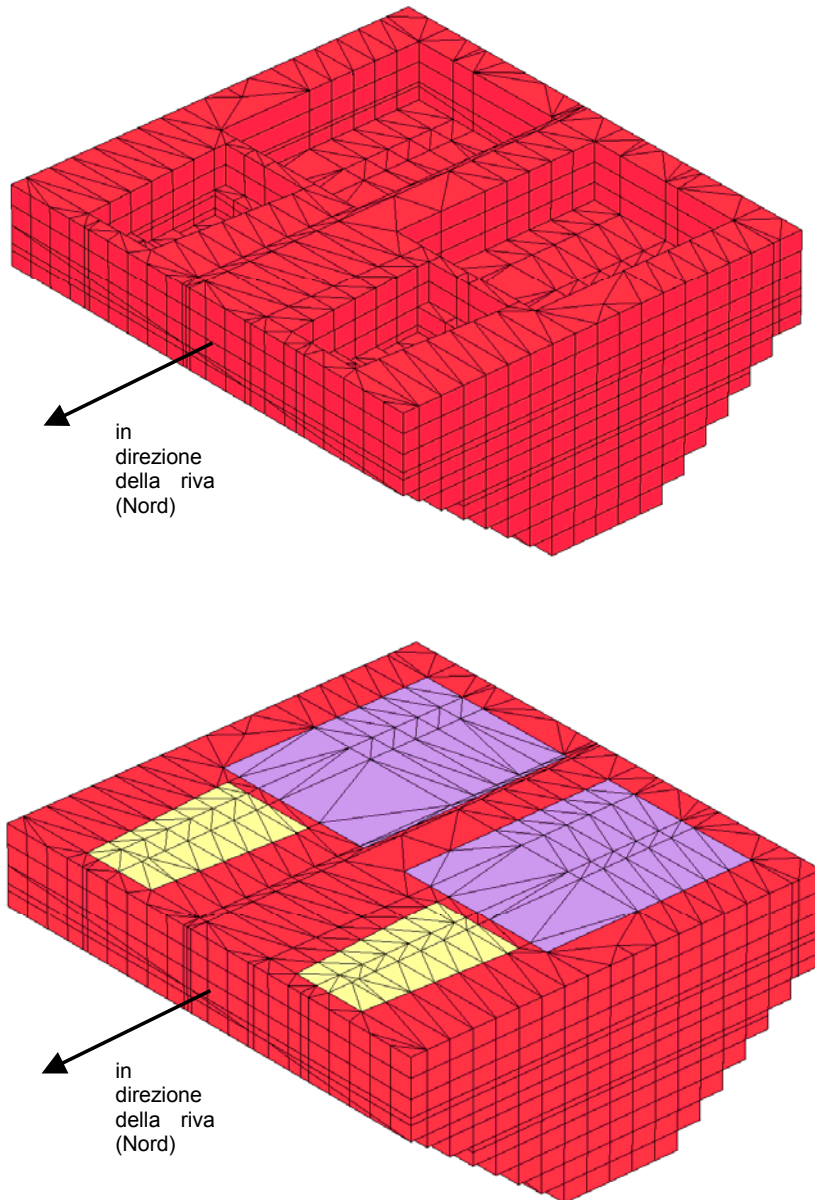
Figura 23: scavo completato: sezioni in direzione nord-sud (in alto) e in direzione est-ovest (in basso)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20-06-2011</i>





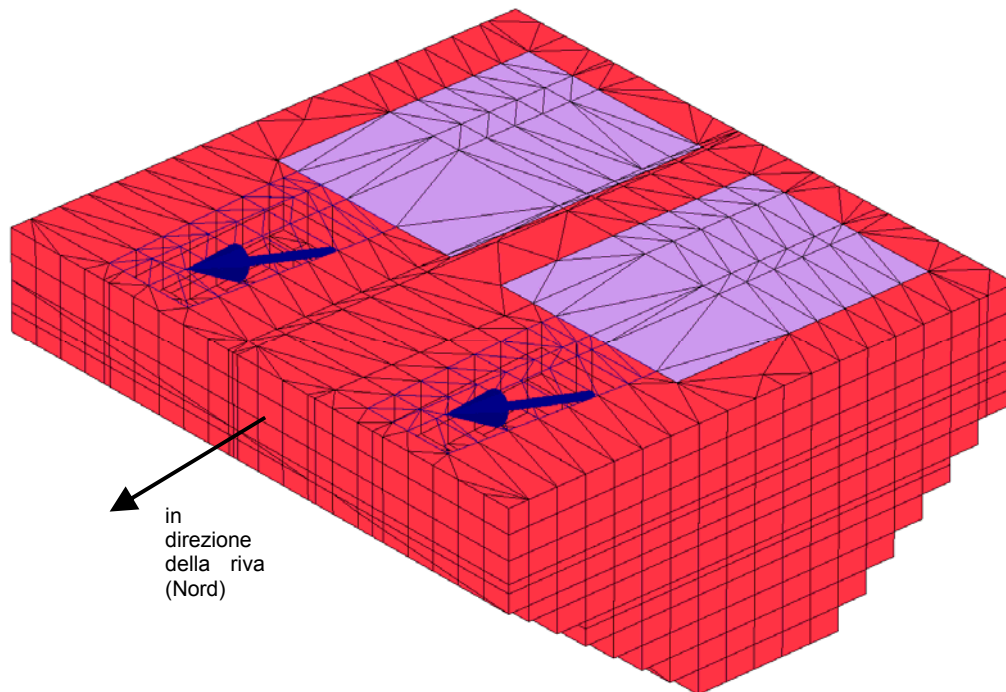
*Figura 24: scavo completato: vista assometrica dei diaframmi, dei tiranti di ancoraggio e delle travi di collegamento*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0067_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	



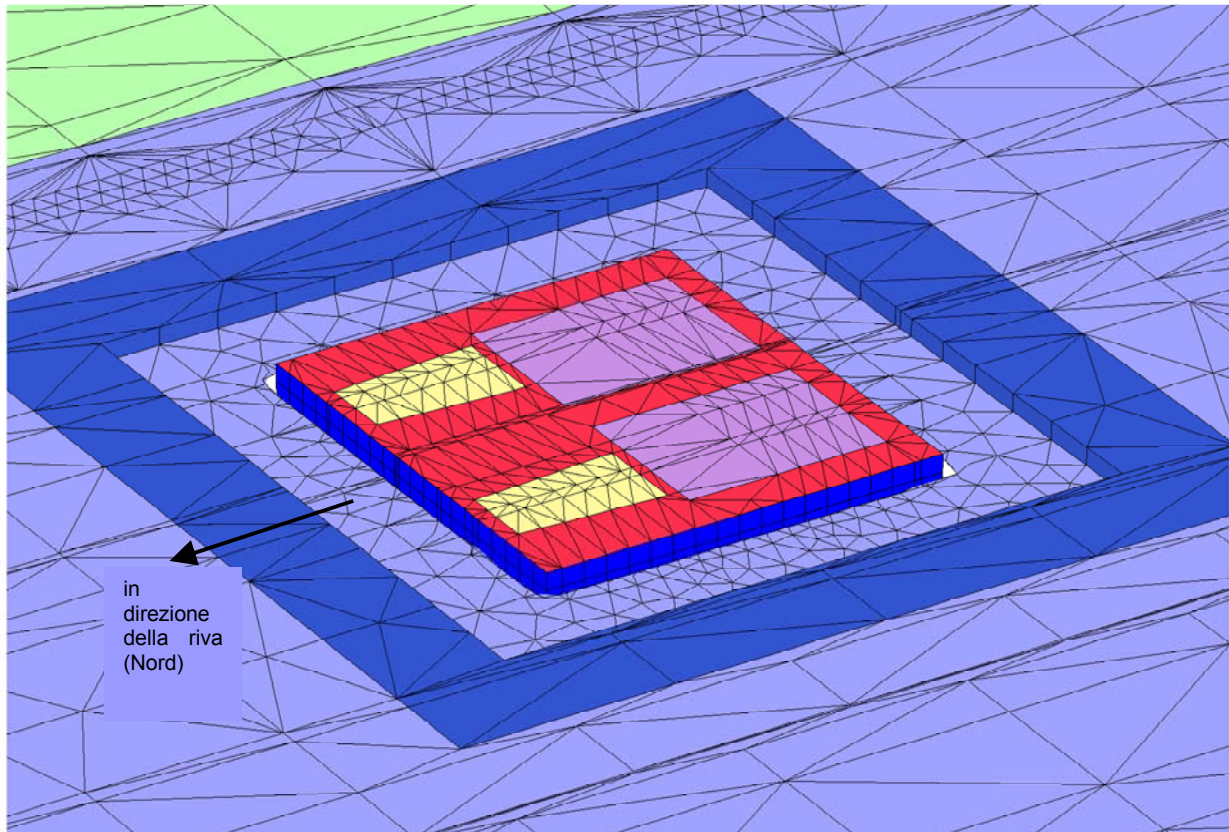
*Figura 25: Modello del blocco d'ancoraggio: vista assometrica prima del riempimento delle camere (in alto) e dopo il riempimento delle camere (in basso)*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011





*Figura 26: Modello del blocco d'ancoraggio: vista assometrica dell'applicazione delle forze esterne*

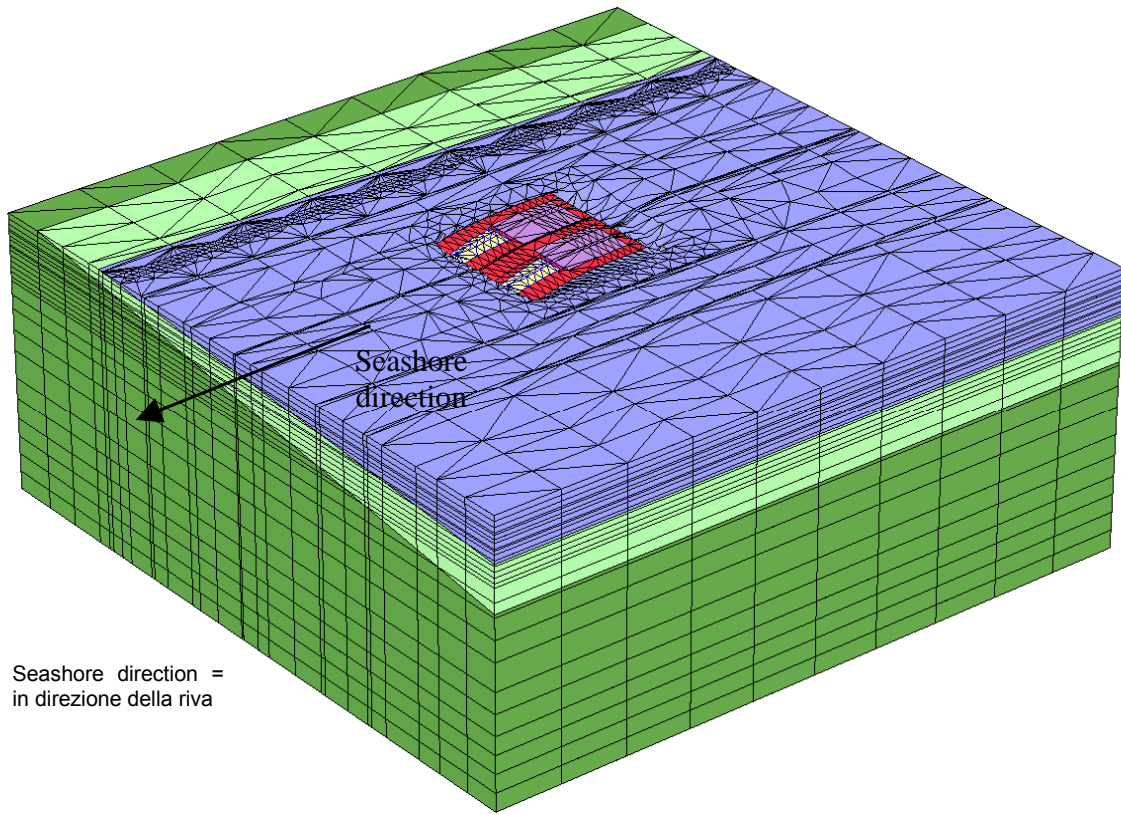
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_0_ITA.doc</i>	Rev 0	Data 13-04-2011	



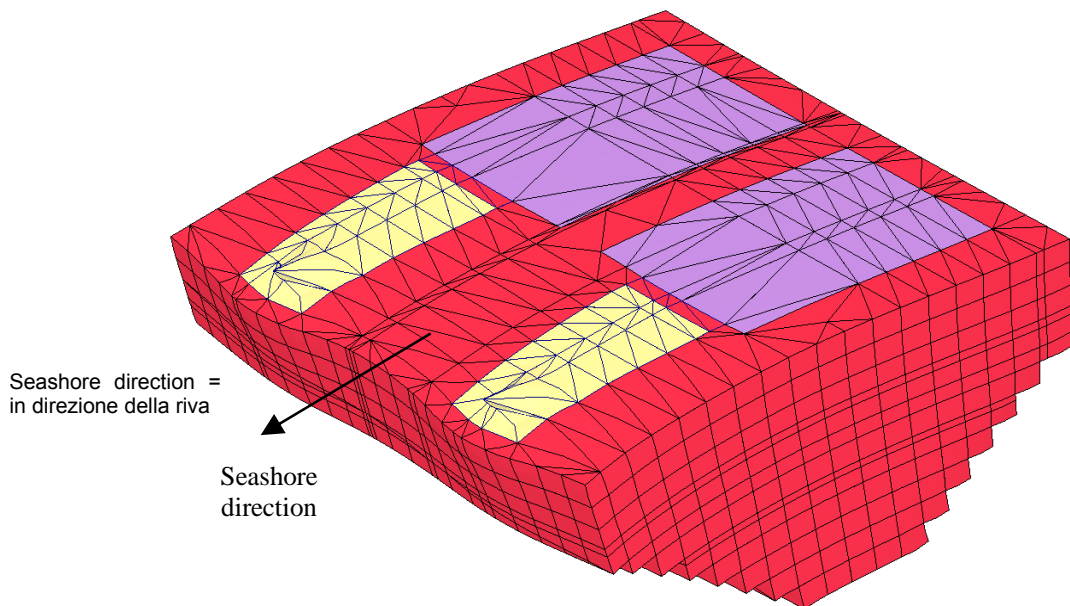
*Figura 27: Analisi comparativa: vista assometrica dello scavo profondo 4 m attorno al blocco*



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20-06-2011</i>



*Figura 28: maglia deformata all'applicazione del carico ULS (spostamenti aumentati di scala di 2000 volte)*



*Figura 29: maglia deformata del blocco d'ancoraggio all'applicazione del carico ULS (spostamenti aumentati di scala 2000 volte)*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0067_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	

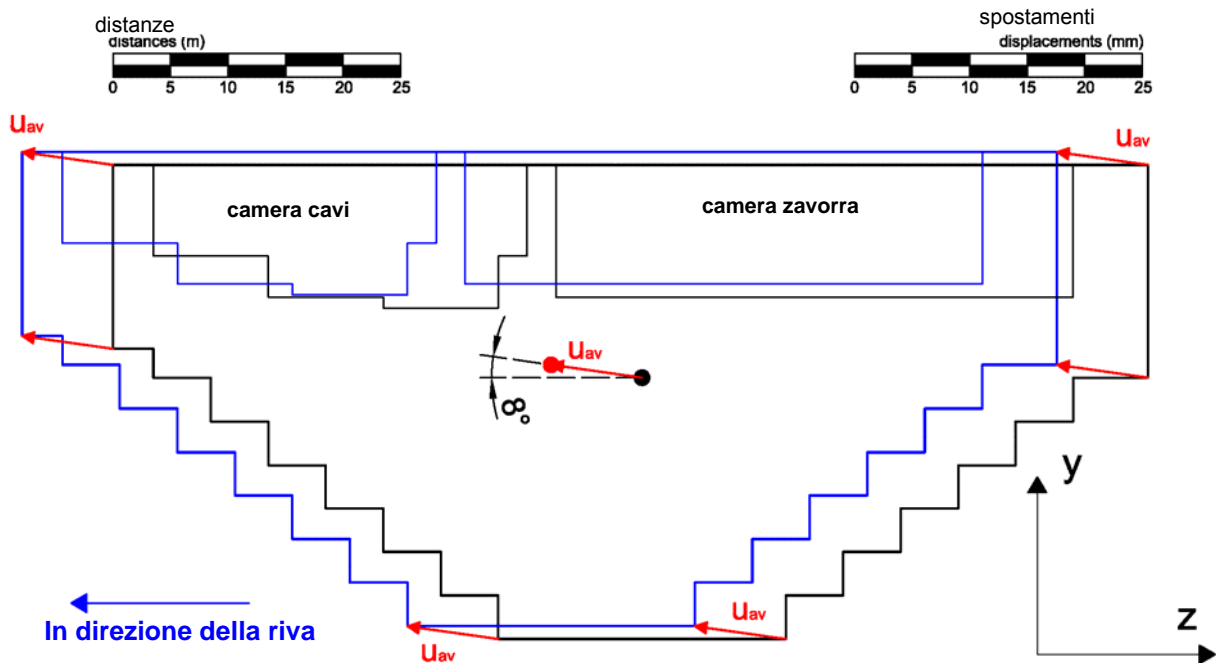


Figura 30: sezione del blocco d'ancoraggio: meccanismo traslatorio all'applicazione del carico ULS (spostamenti aumentati di scala 1000 volte)

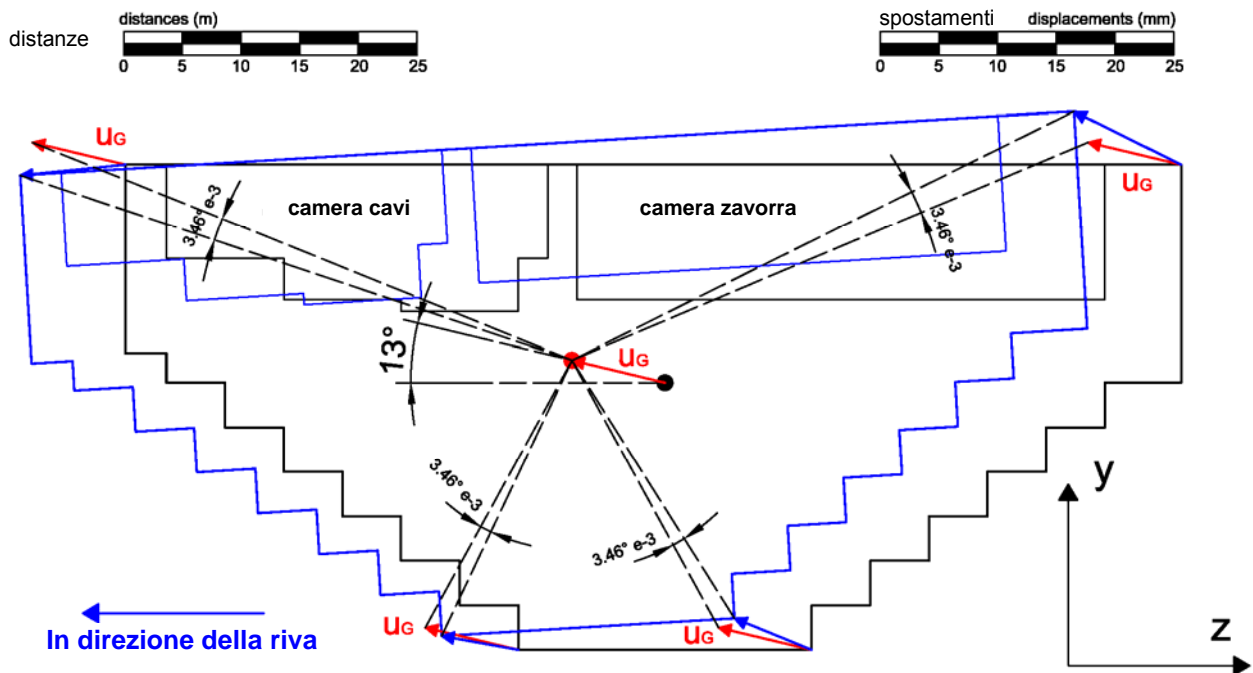


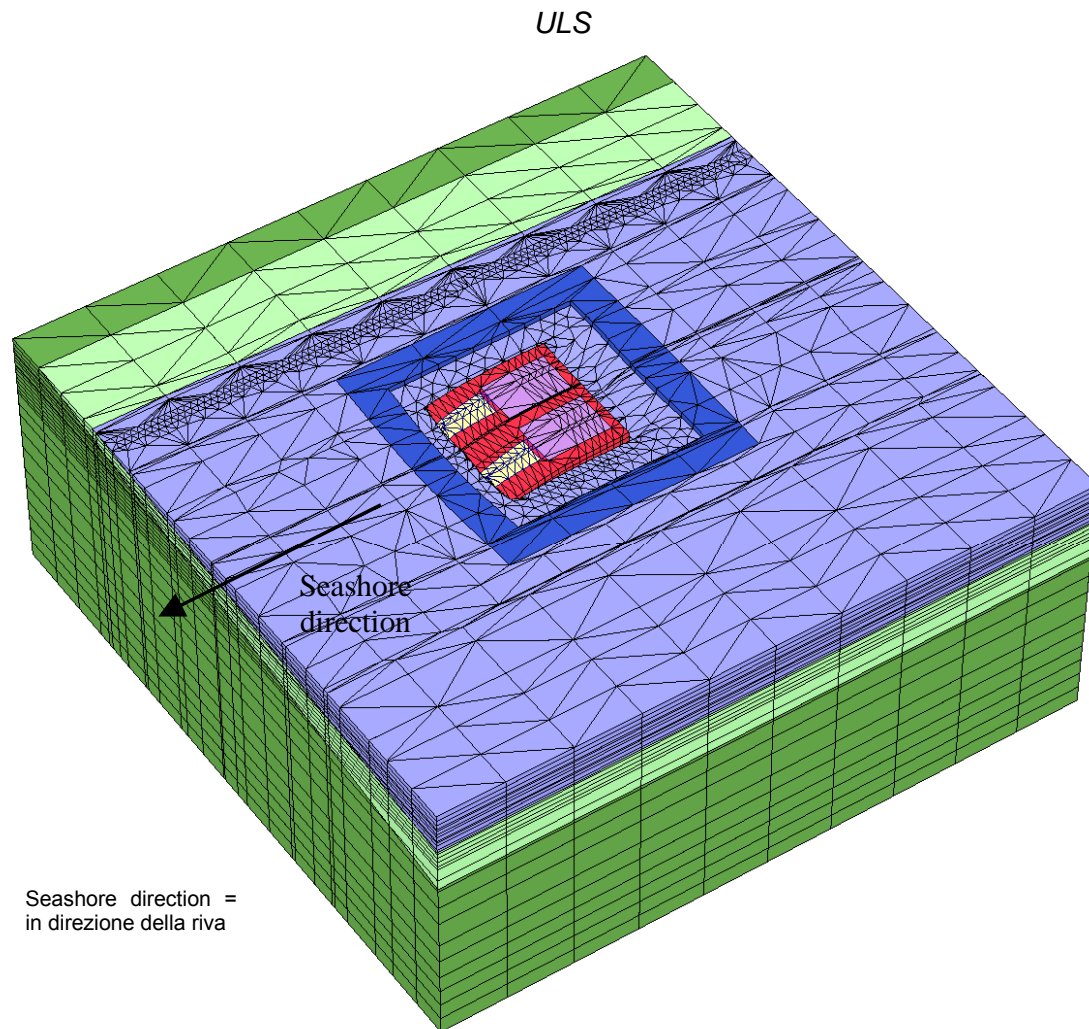


Figura 31: sezione del blocco d'ancoraggio: meccanismo roto-traslatorio all'applicazione del carico

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>	
<p>Analisi numeriche in condizioni tridimensionali</p>	<p>Codice documento PF0067_F0_ITA.doc</p>	<p>Rev F0</p>	<p>Data 20-06-2011</p>



*Figura 32: analisi di comparazione - maglia deformata all'applicazione del carico ULS  
(spostamenti aumentati di scala 2000 volte)*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		Codice documento PF0067_0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Rev</th> <th style="text-align: left;">Data</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: left;">13-04-2011</td> </tr> </tbody> </table>	Rev	Data	0	13-04-2011
Rev	Data						
0	13-04-2011						

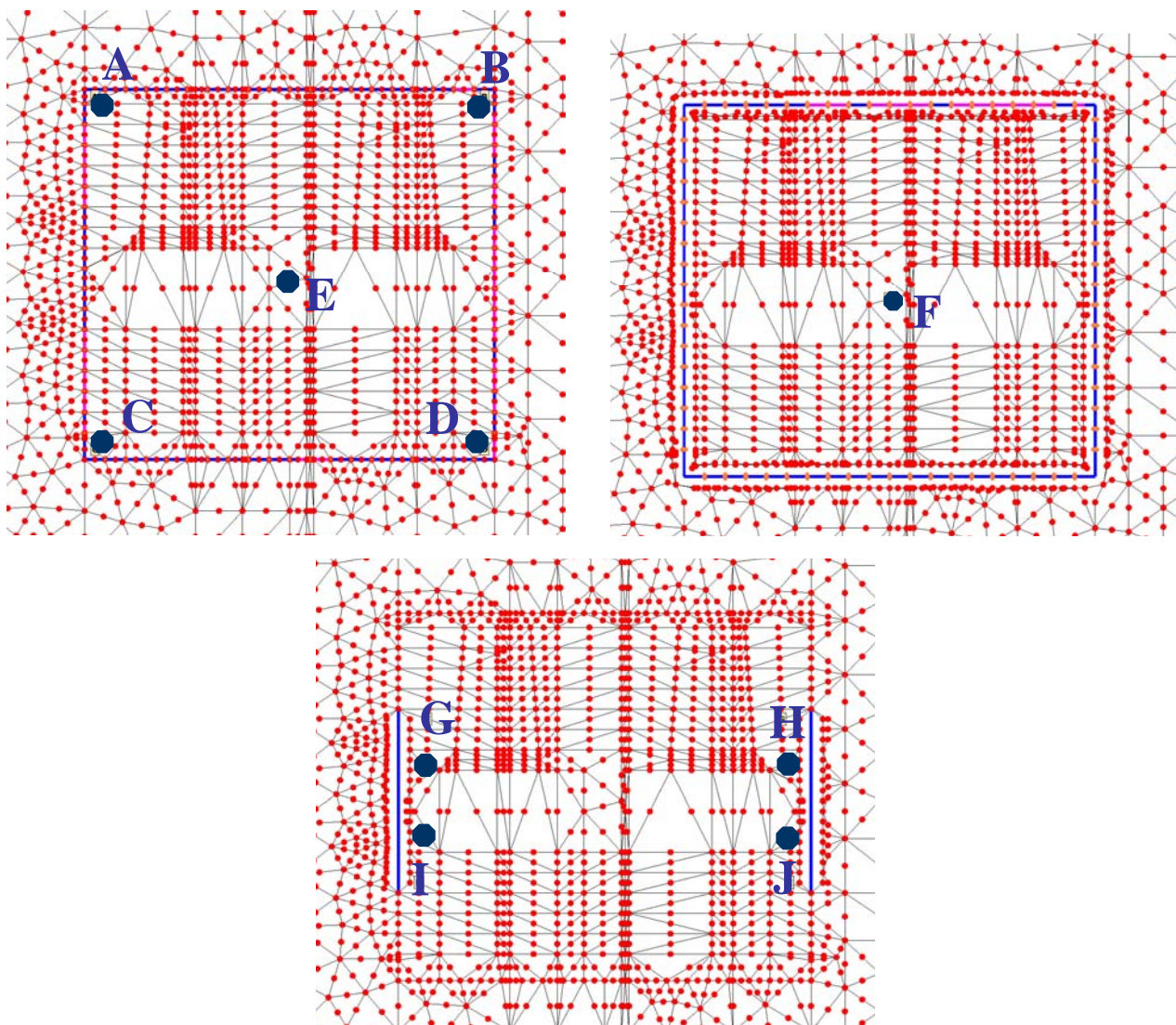
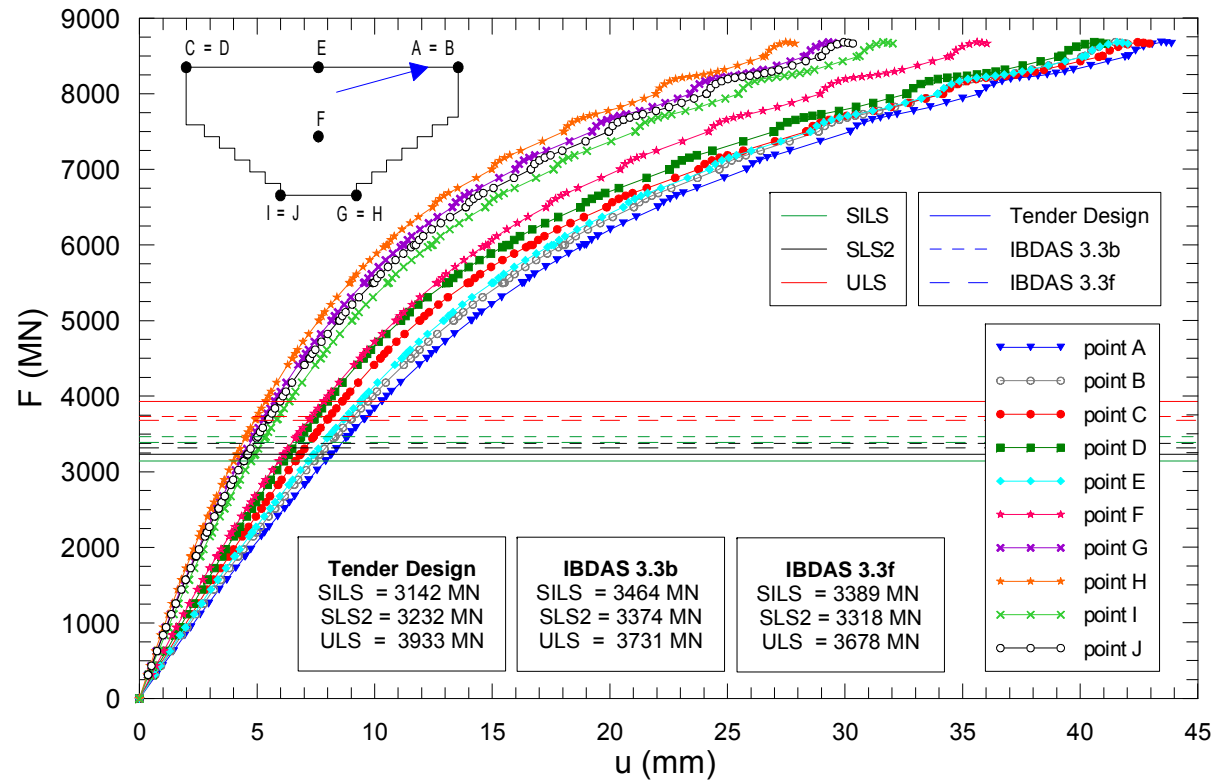
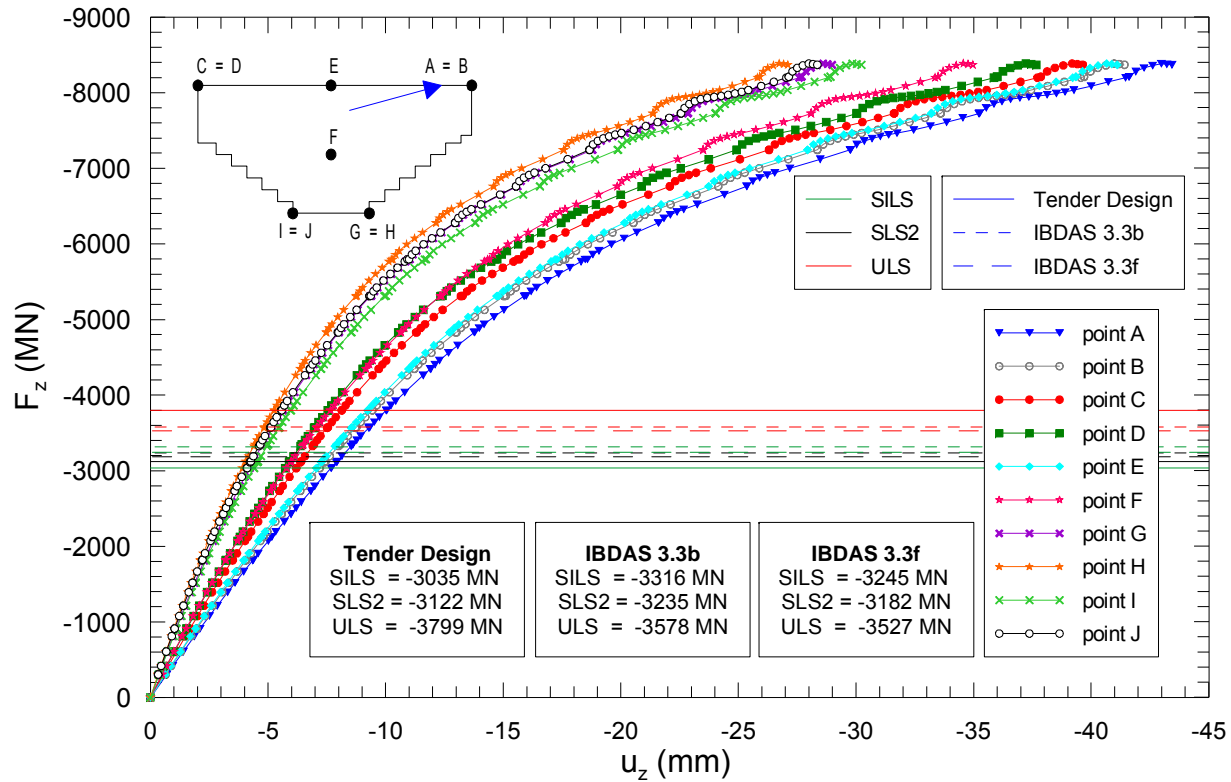


Figura 33: Posizione dei nodi selezionati a quota +118 m s.l.m. (in alto a sinistra), +95.65 m s.l.m. (in alto a destra) e +76.65 m s.l.m. (in basso)



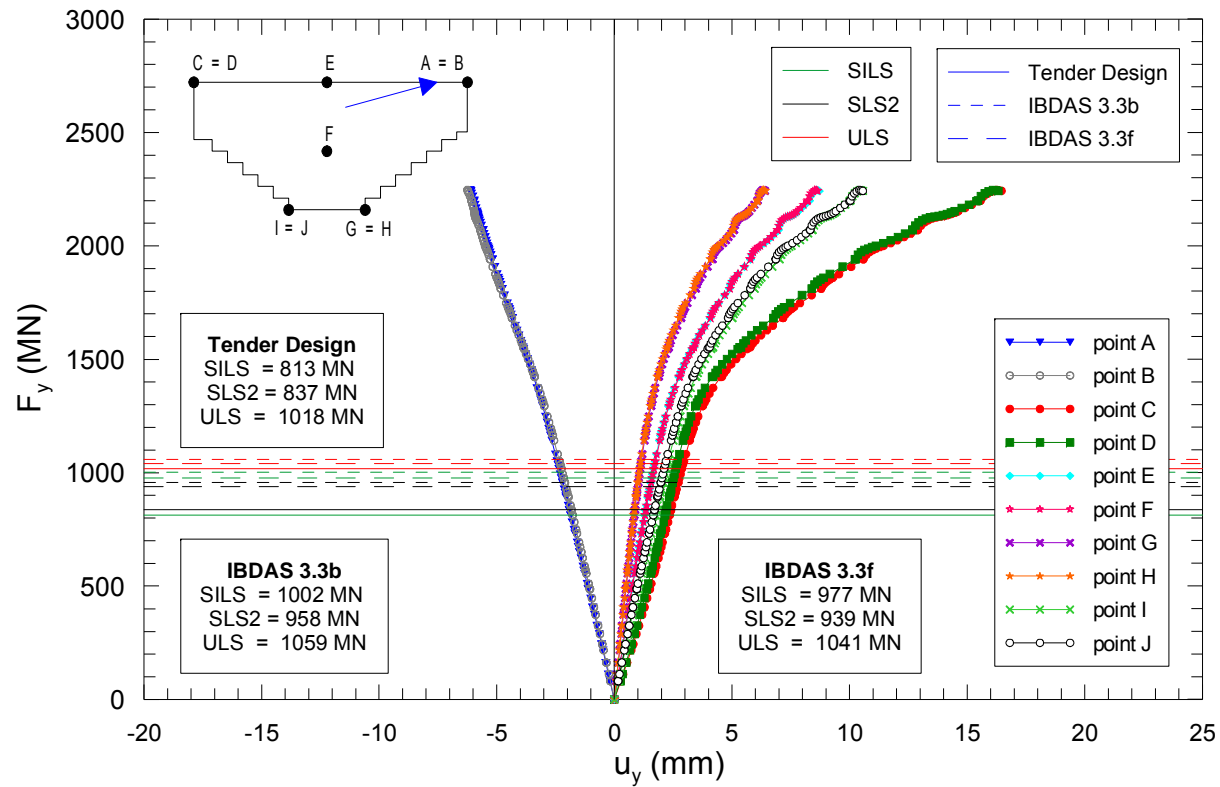
Tender Design = Progetto d'offerta

Figura 34: Risultati delle analisi: curve carico-spostamento per i punti selezionati del blocco



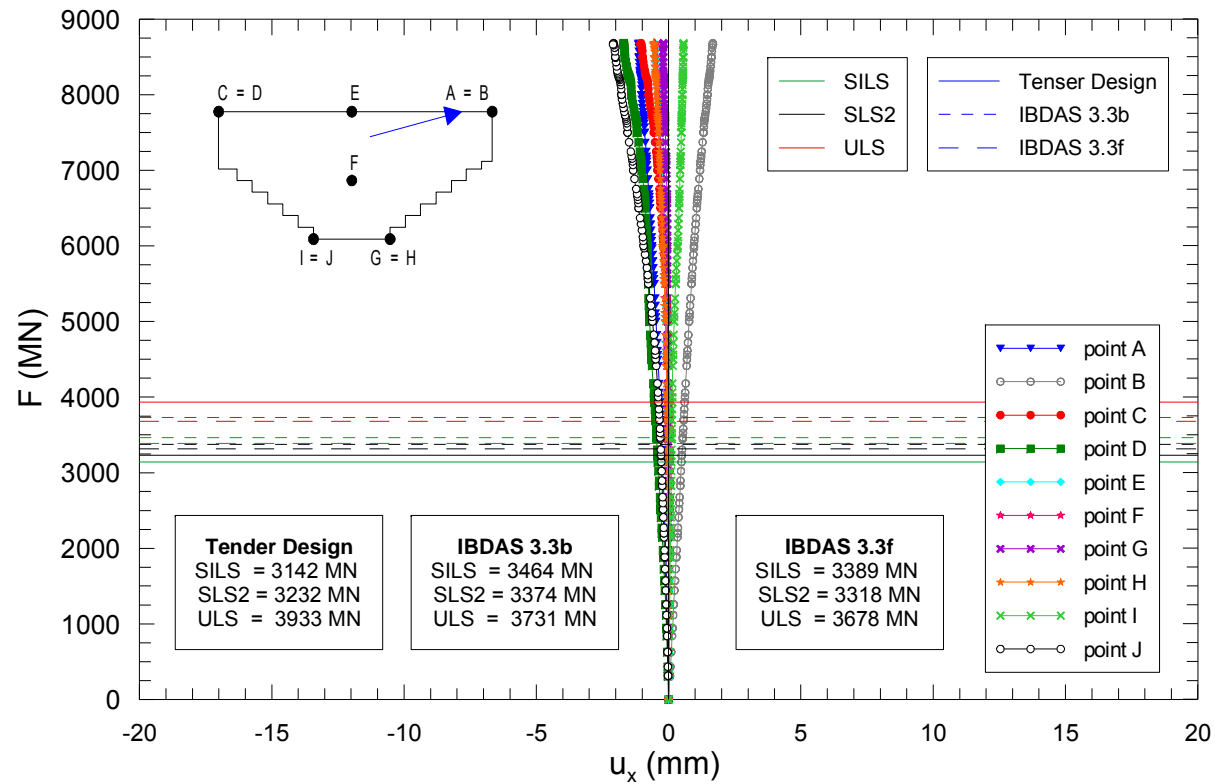
Tender Design = Progetto d'offerta

Figura 35: Risultati delle analisi: curve carico orizzontale-spostamento orizzontale per i punti selezionati del blocco (direzione z)



Tender Design = Progetto d'offerta

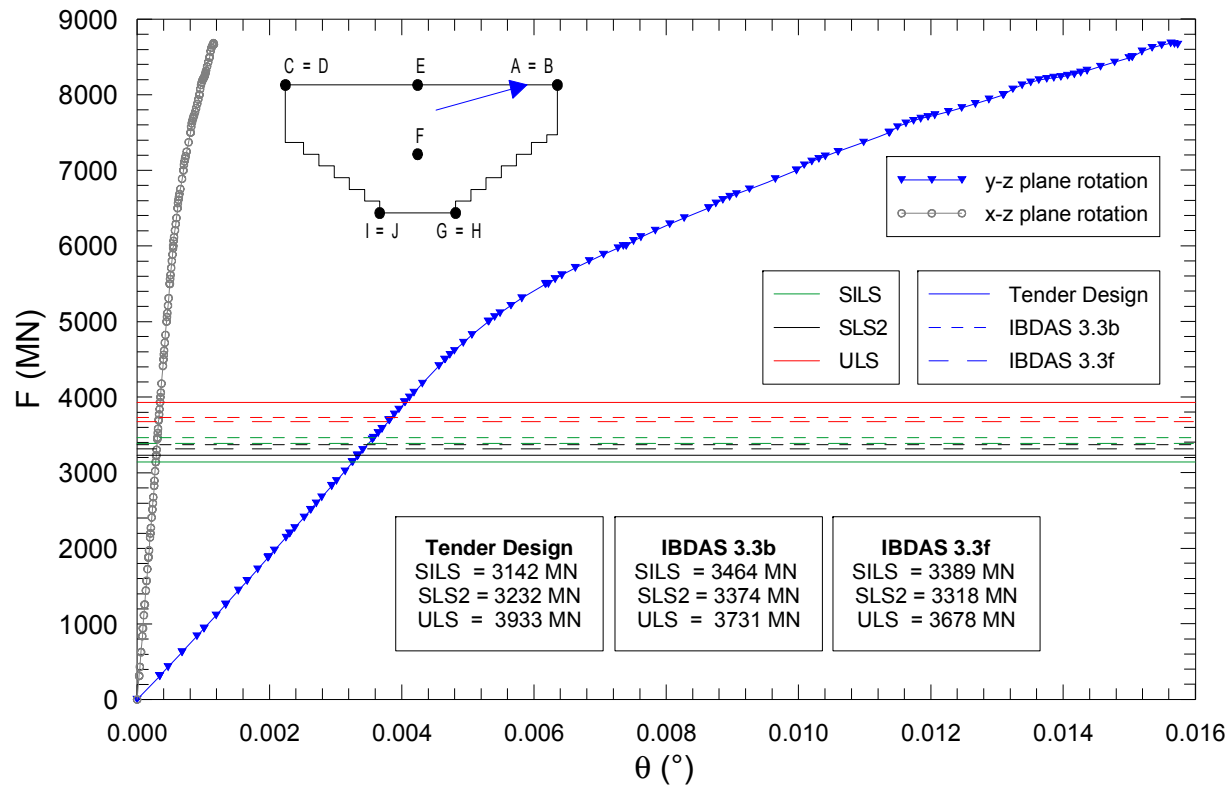
Figura 36: Risultati delle analisi: curve carico verticale-spostamento orizzontale per i punti selezionati del blocco (direzione y)



Tender Design = Progetto d'offerta

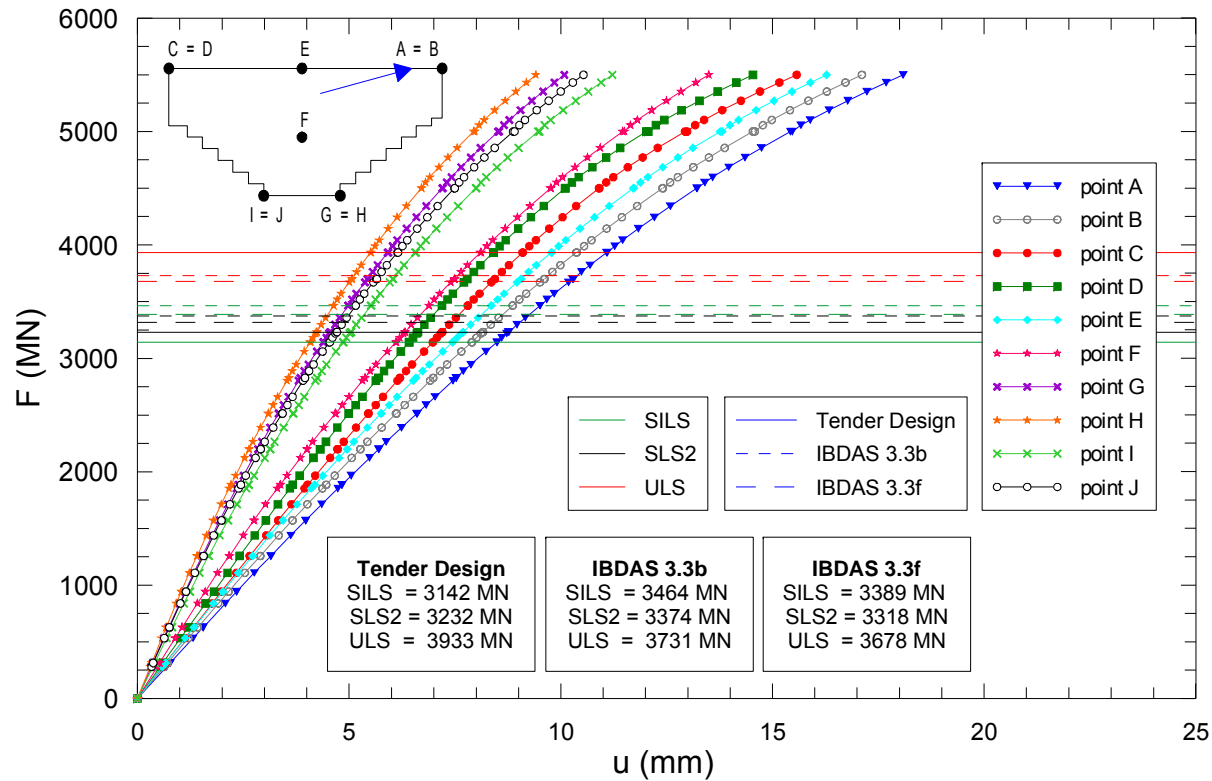
Figura 37: Risultati delle analisi: curve carico-spostamento orizzontale per i punti selezionati del blocco (direzione x, ortogonale alla forza)





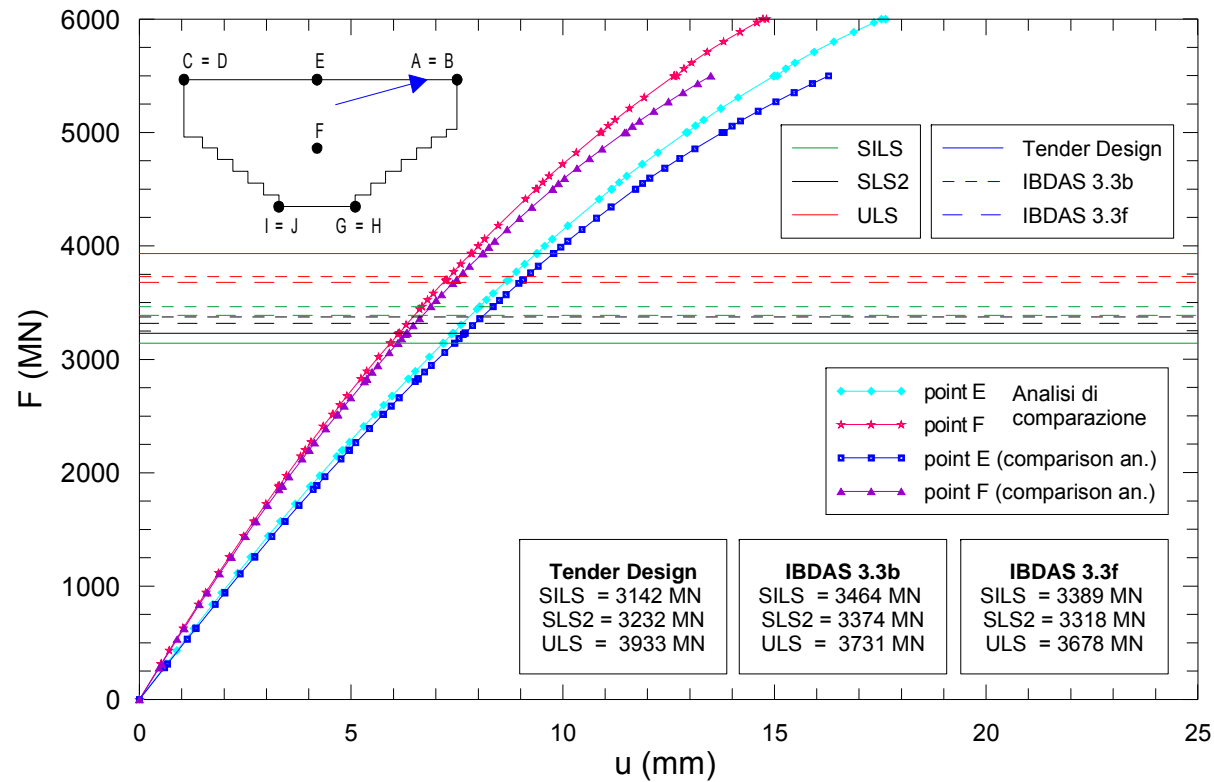
plane rotation = rotazione sul piano

Figura 38: curve carico-angolo di rotazione sul piano y-z e sul piano x-z



Tender Design = Progetto d'offerta

Figura 39: Risultati delle analisi di confronto : curve carico-spostamento dei punti selezionati del blocco



Tender Design = Progetto d'offerta

Figura 40: Punti E e F: congruenza delle curve carico-spostamento per le analisi standard e comparativa (scavo profondo 4 m attorno al blocco)

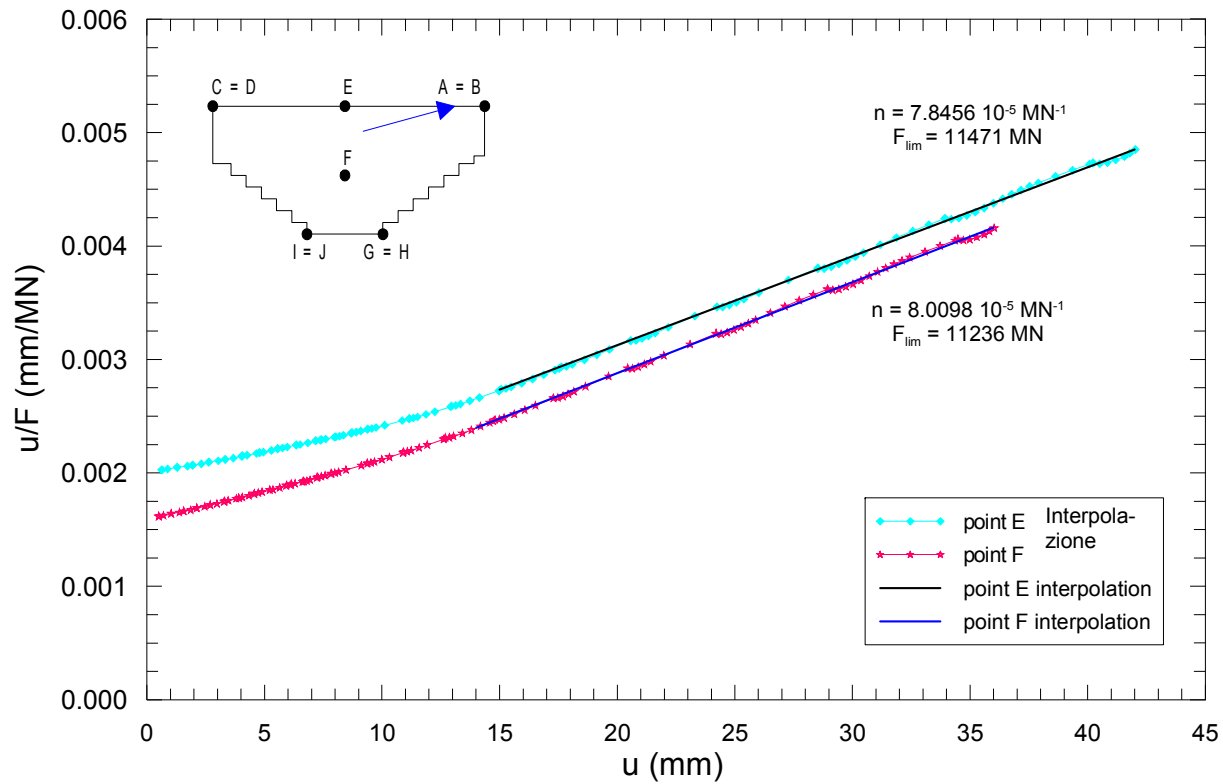
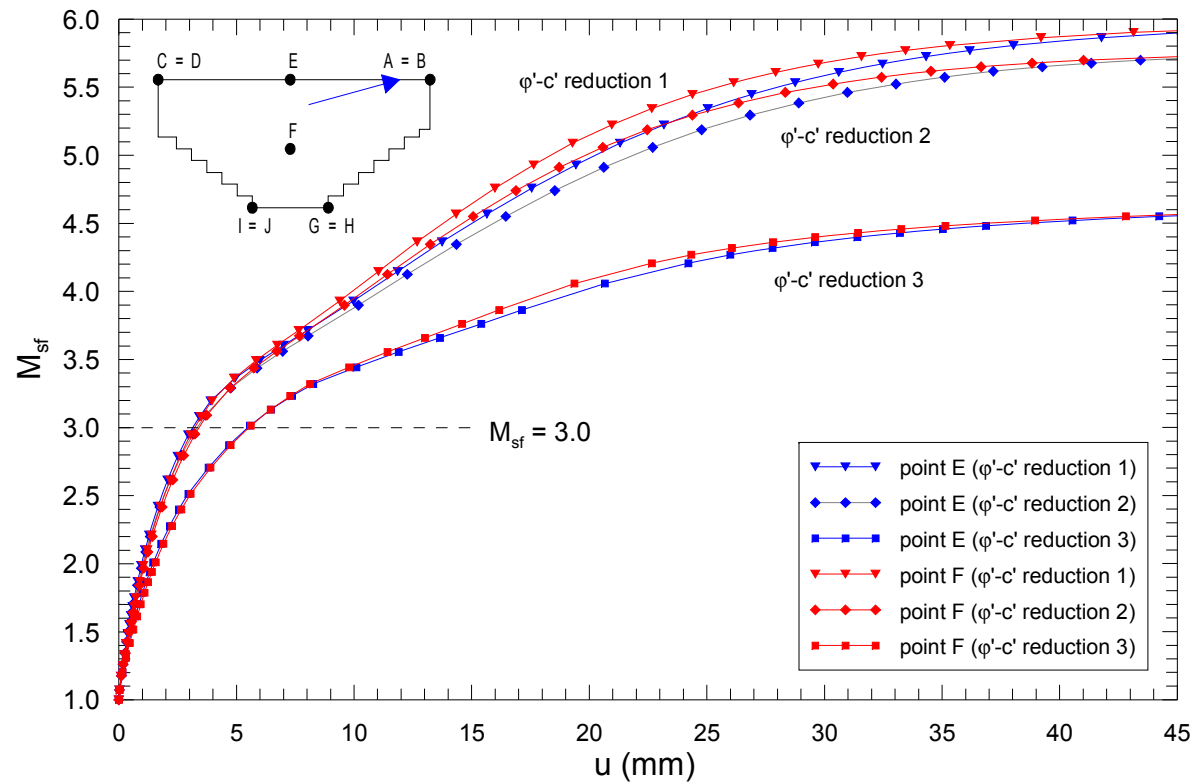
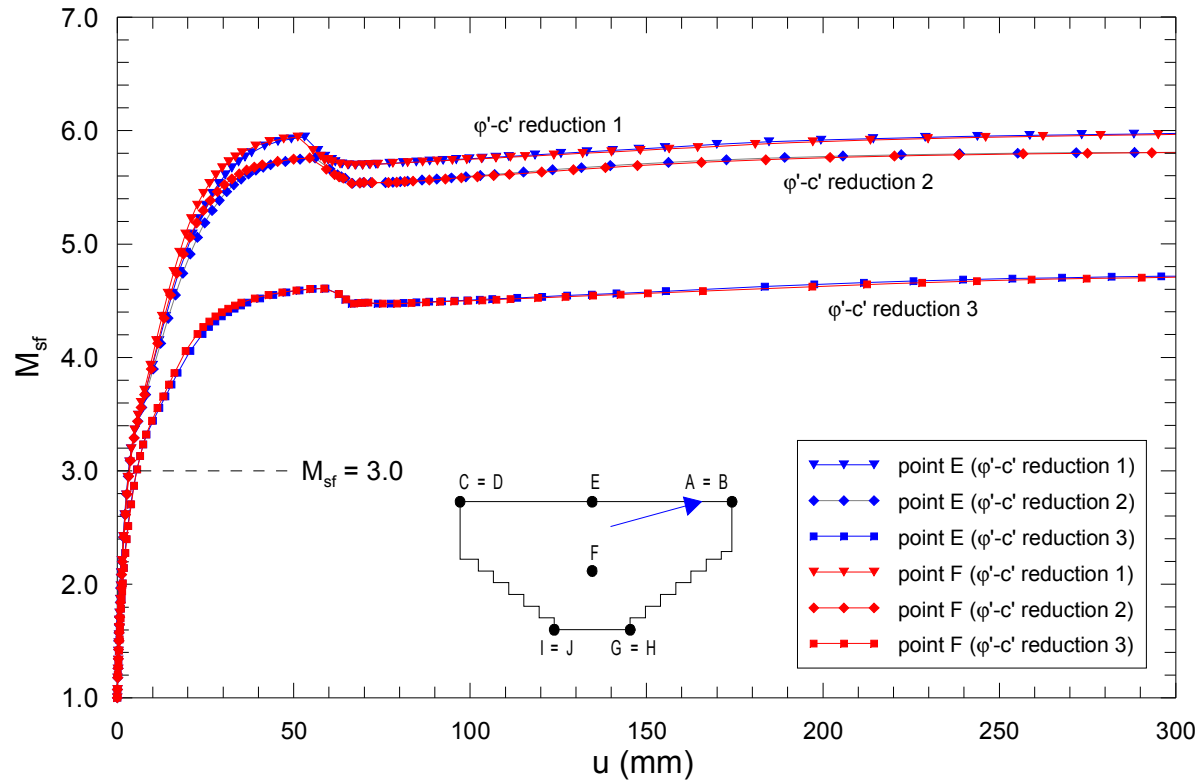


Figura 41: miglior adeguamento iperbolico dei dati carico-spostamento: carico ultimo



reduction = riduzione

Figura 42: analisi di riduzione  $\phi' - c'$ : curve  $M_{sf}$ -spostamento (punti E e F)



reduction = riduzione

Figura 43: analisi di riduzione  $\phi' - c'$ : curve  $M_{sf}$ -spostamento (punti E e F; vista ingrandita)

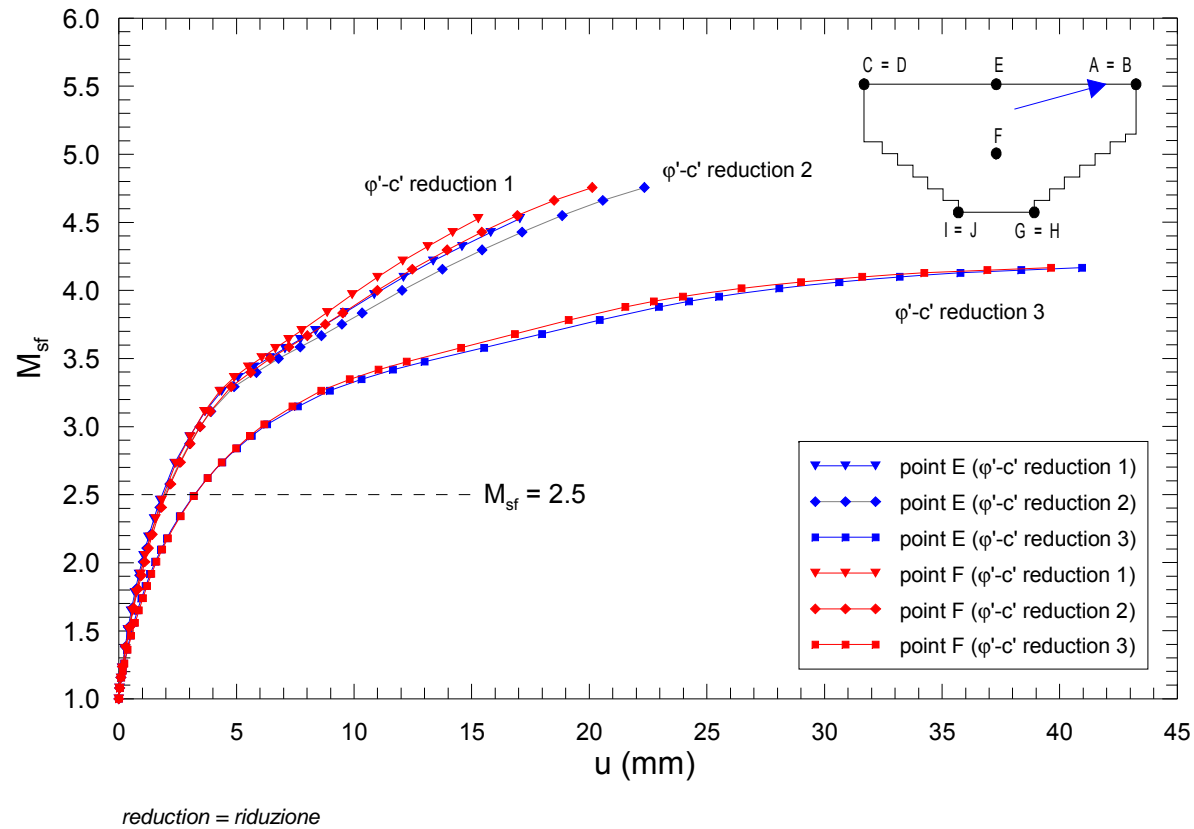


Figura 44: analisi di riduzione  $\phi' - c'$  (scavo profondo 4 m attorno al blocco): curve  $M_{sf}$ -spostamento (punti E e F)

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_0_ITA.doc</i>	Rev 0	Data 13-04-2011	

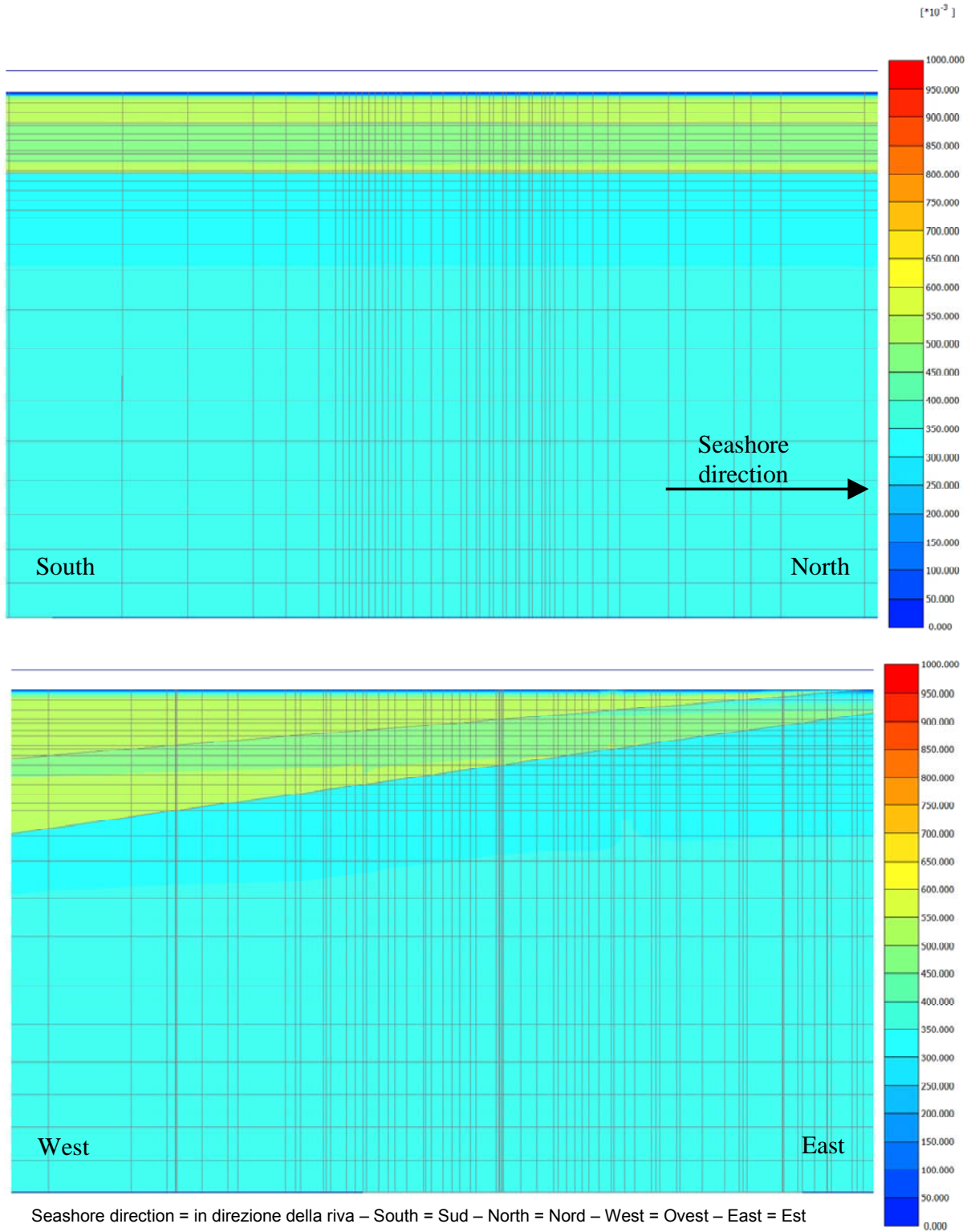


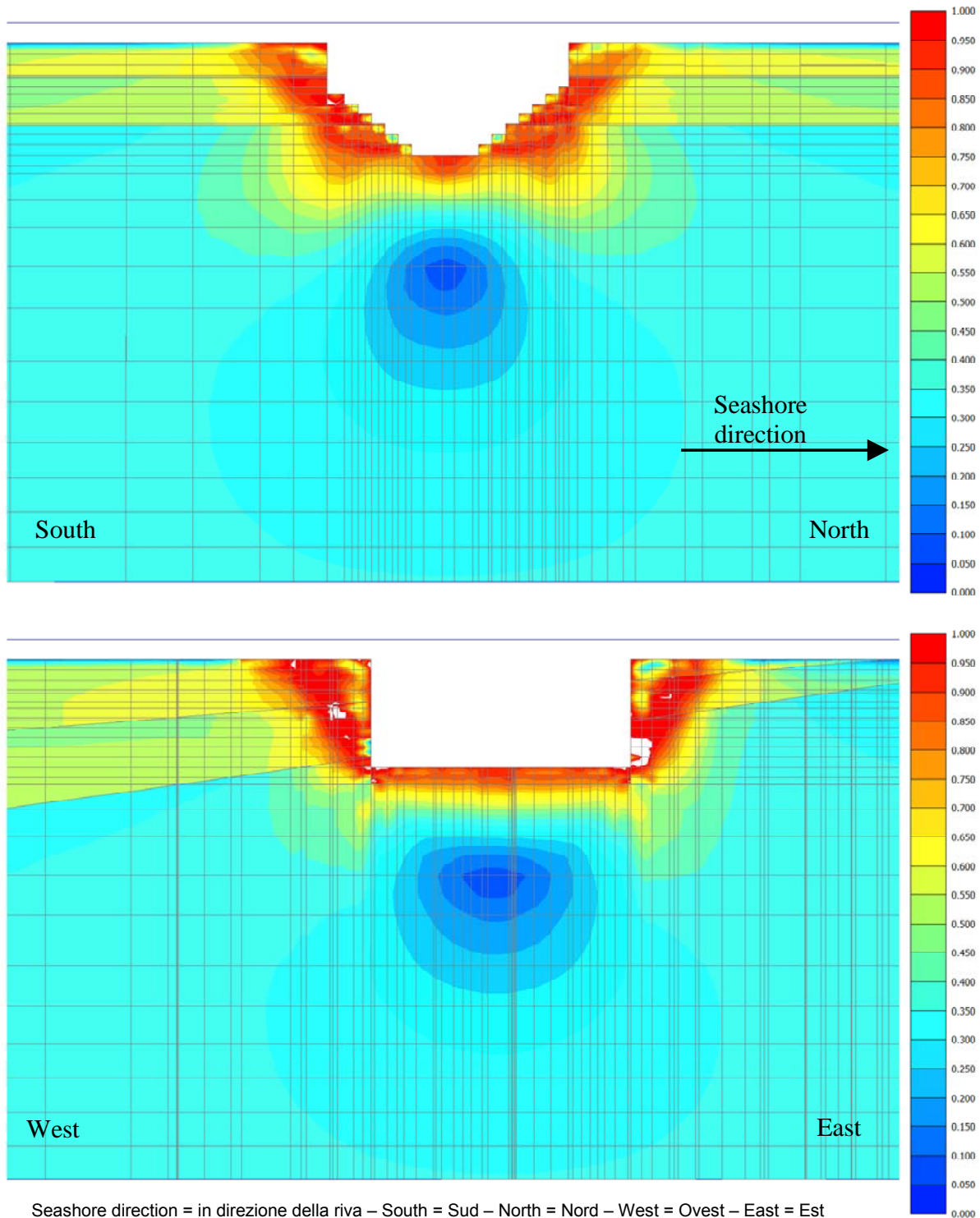


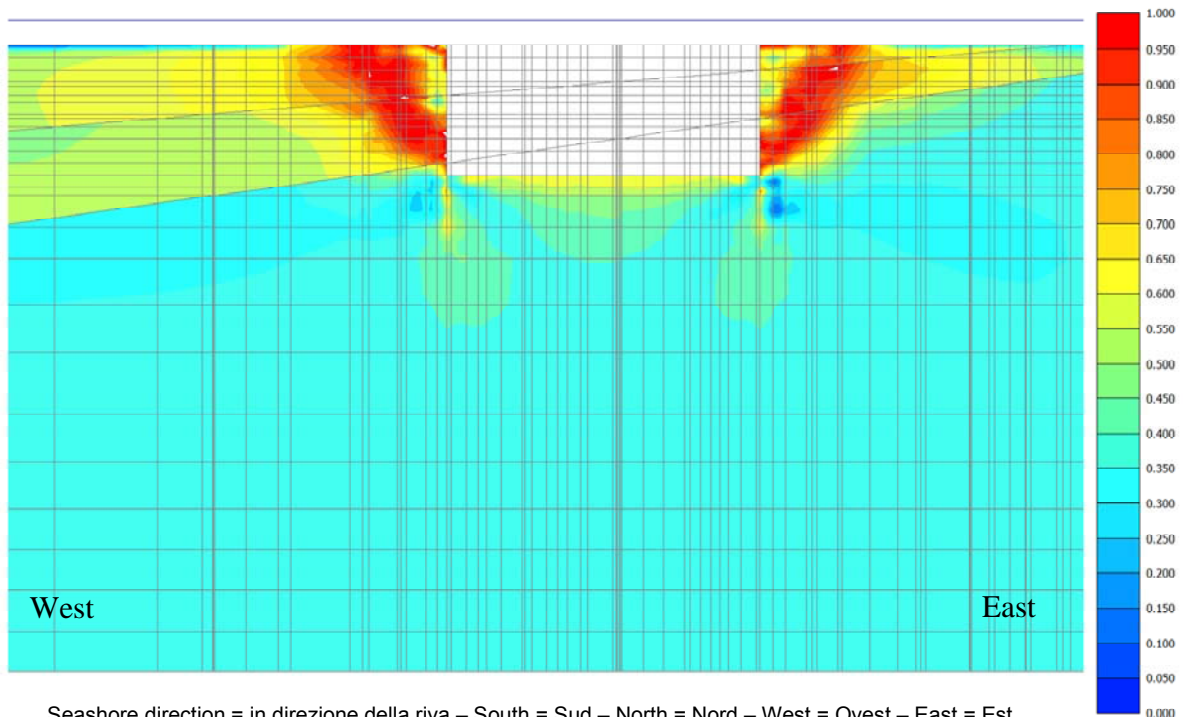
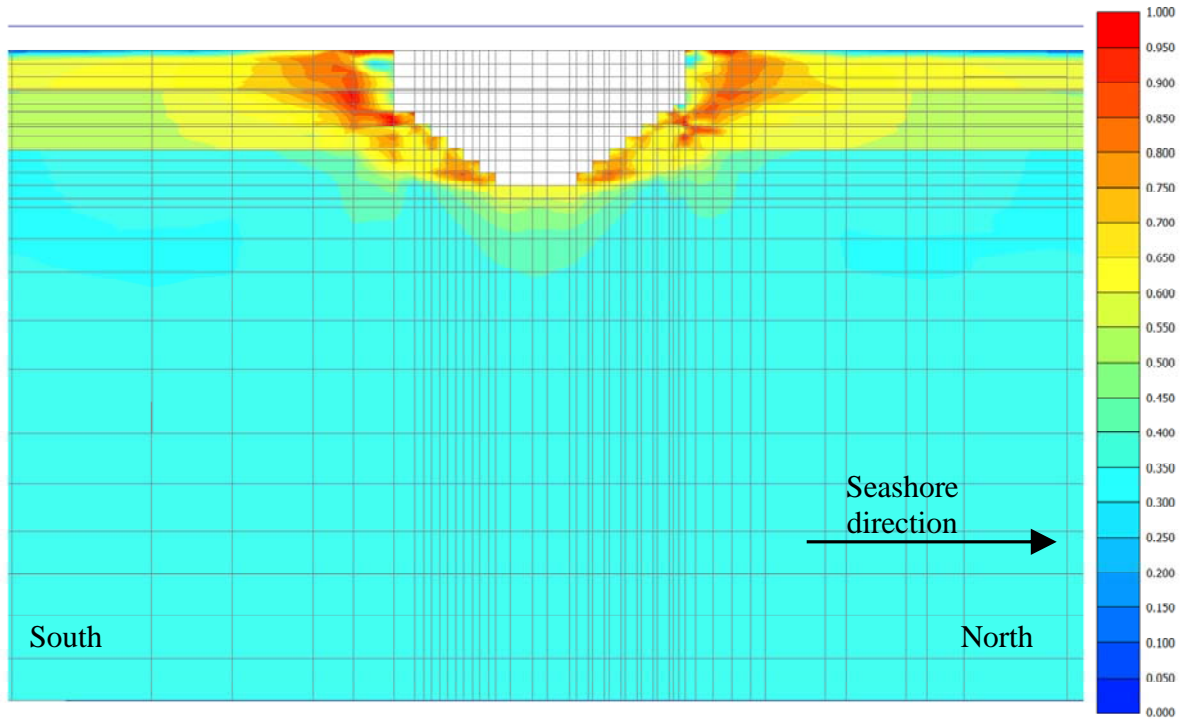
Figura 45: sollecitazione relativa al taglio nelle condizioni iniziali lungo le sezioni longitudinali e trasversale



 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20-06-2011	





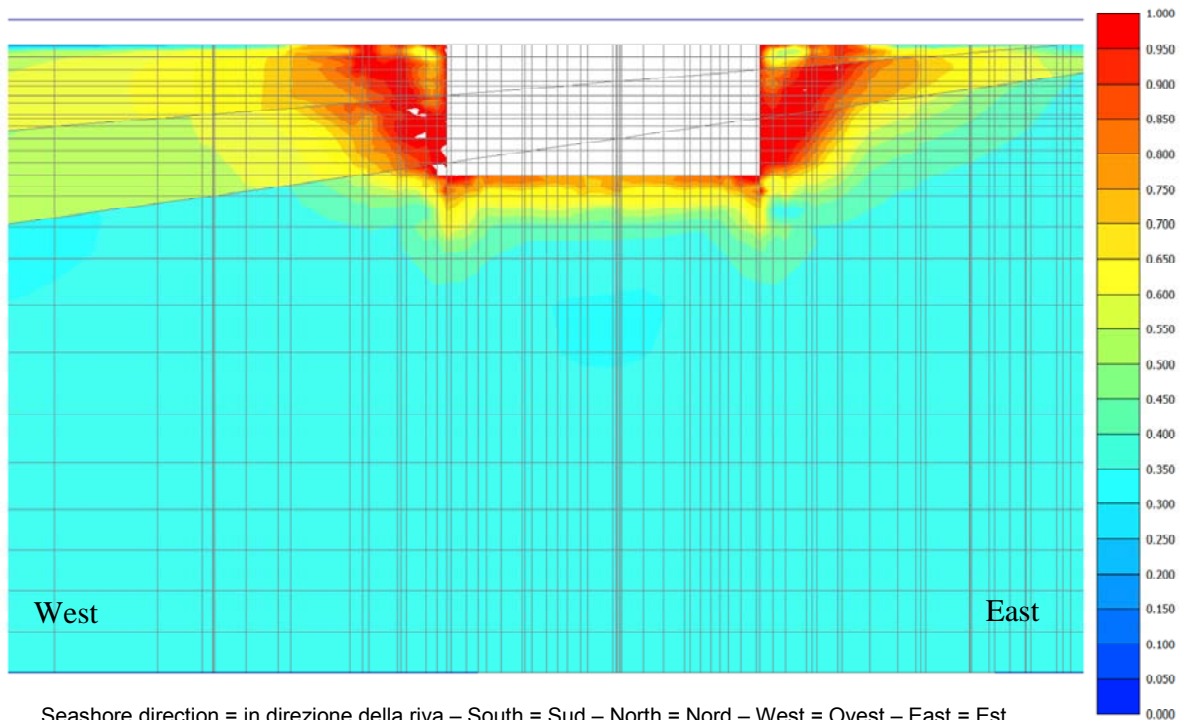
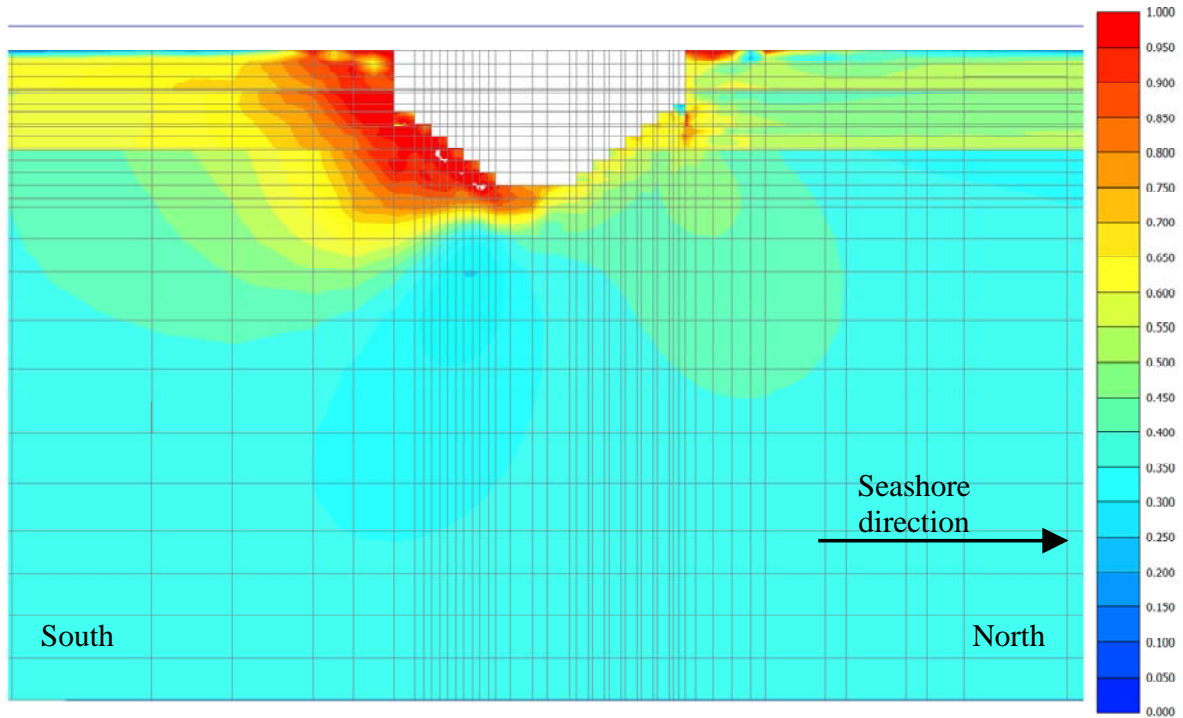
*Figura 46: sollecitazione relativa al taglio dopo lo scavo completo lungo le sezioni longitudinali e trasversali*



Seashore direction = in direzione della riva – South = Sud – North = Nord – West = Ovest – East = Est

*Figura 47: sollecitazione relativa al taglio dopo la costruzione del blocco lungo le sezioni longitudinali e trasversali*

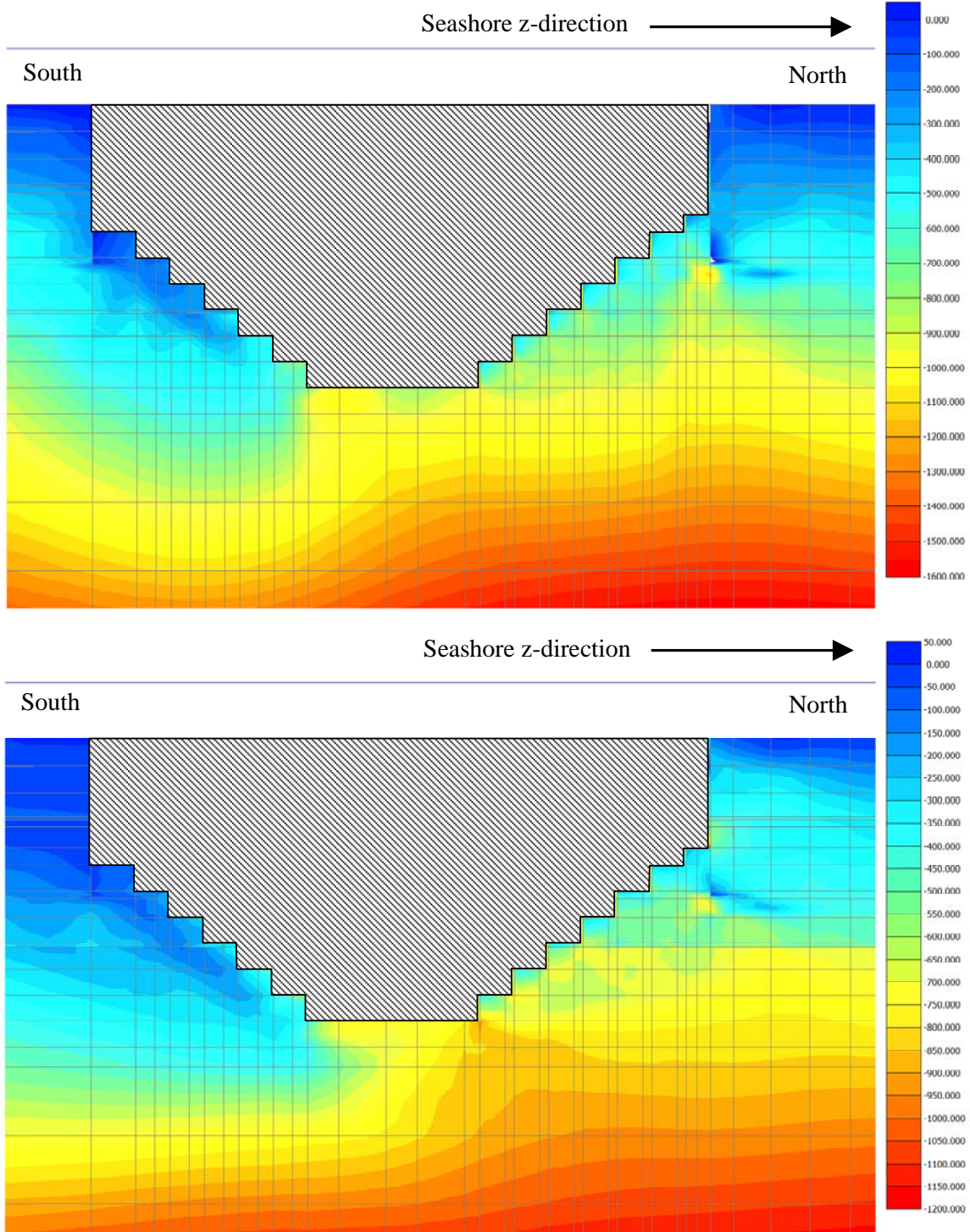
 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	



Seashore direction = in direzione della riva – South = Sud – North = Nord – West = Ovest – East = Est

Figura 48: sollecitazione relativa al taglio per carichi ULS lungo le sezioni longitudinali e trasversali

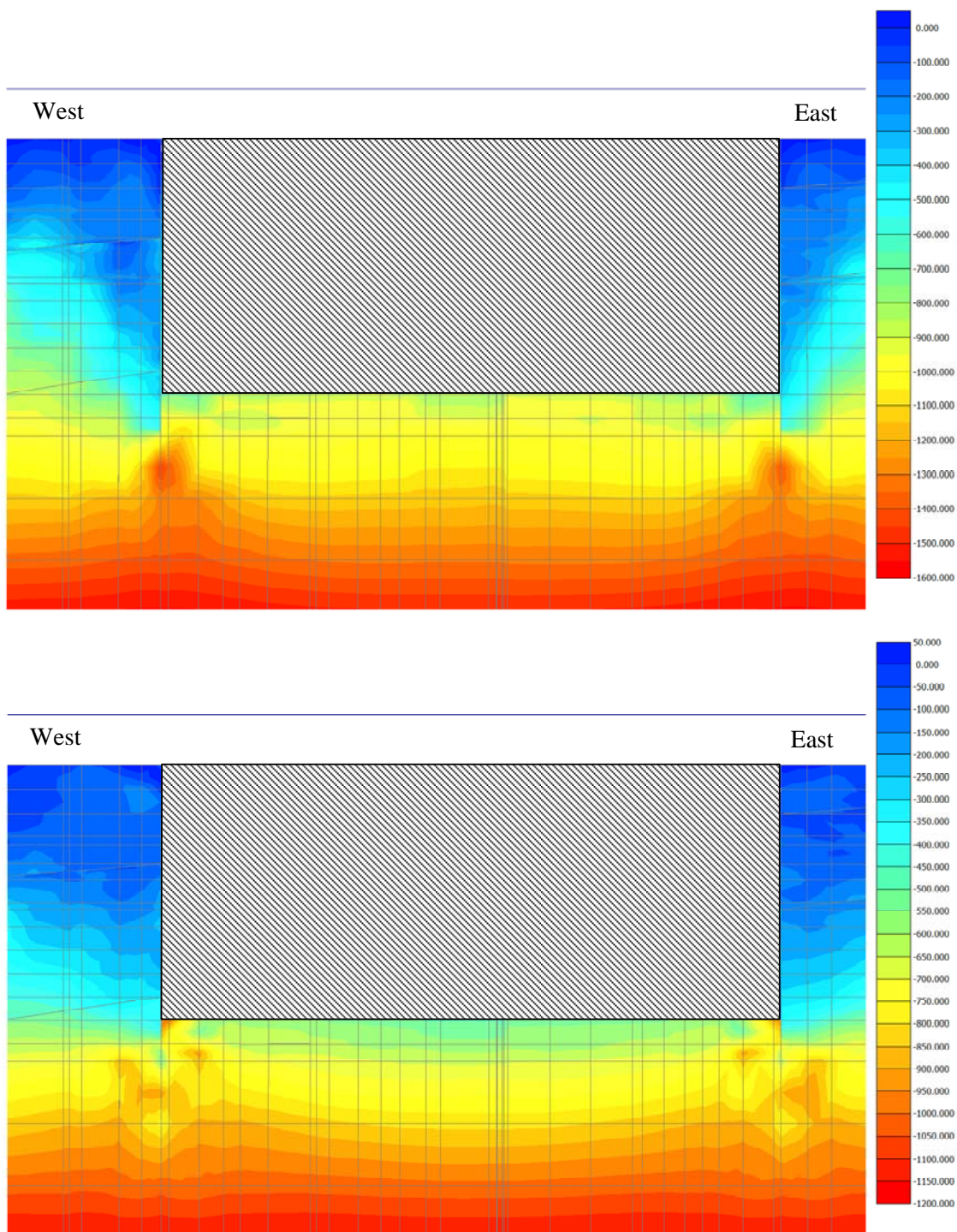
 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0067_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011



Seashore z-direction = Direzione z verso riva – South = Sud – North = Nord

*Figura 49: sollecitazioni verticali totali  $\sigma_y$  e sollecitazioni orizzontali totali  $\sigma_z$  (in kPa) per carichi ULS lungo la sezione centrale longitudinale*

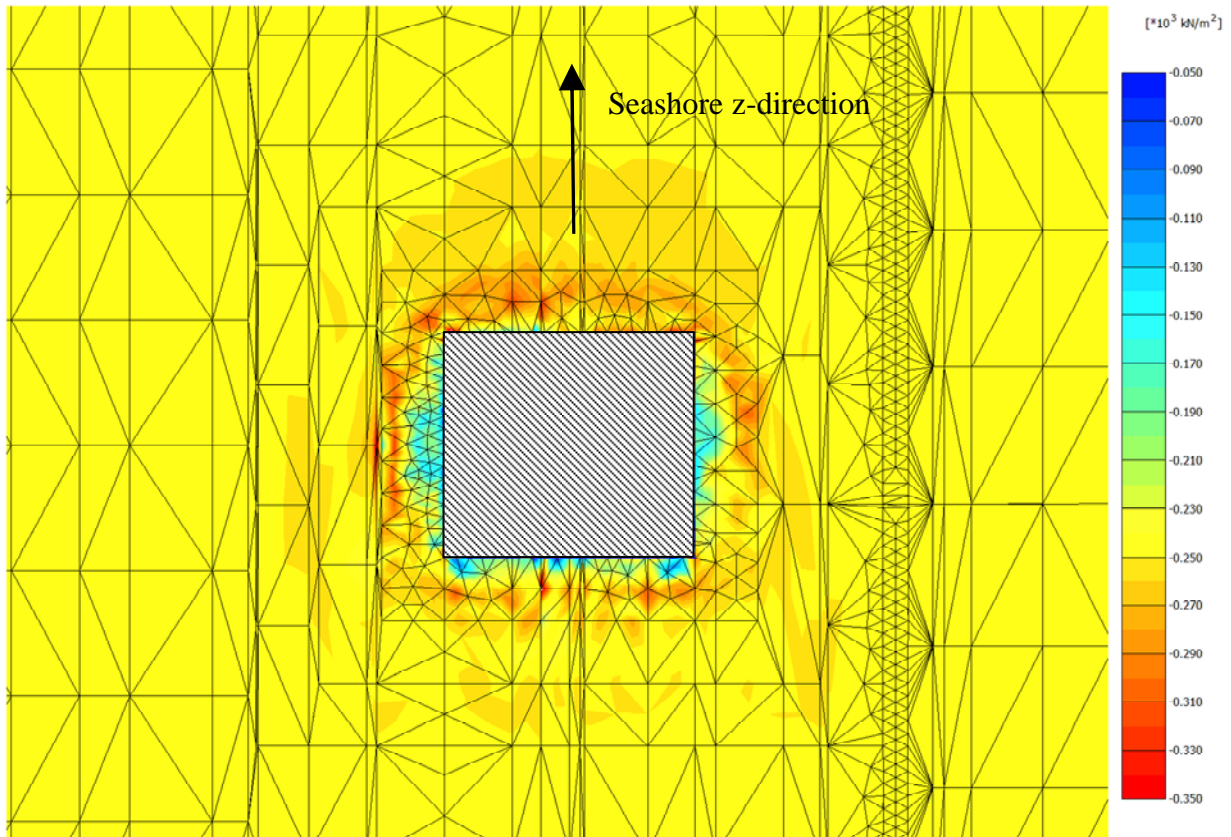
 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20-06-2011



West = Ovest – East = Est

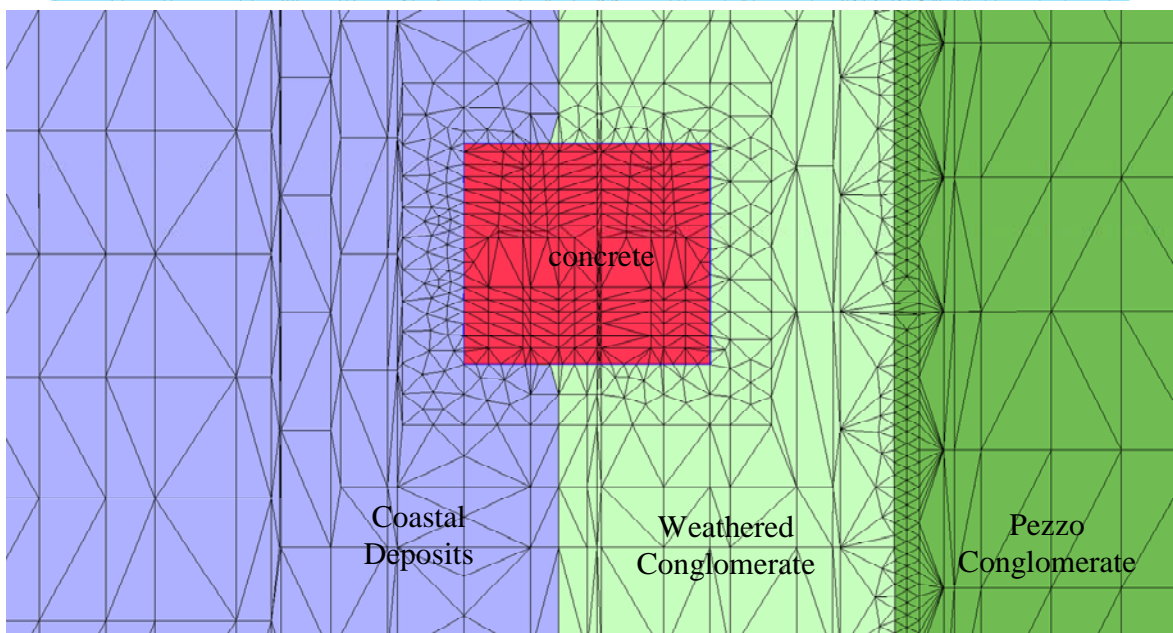
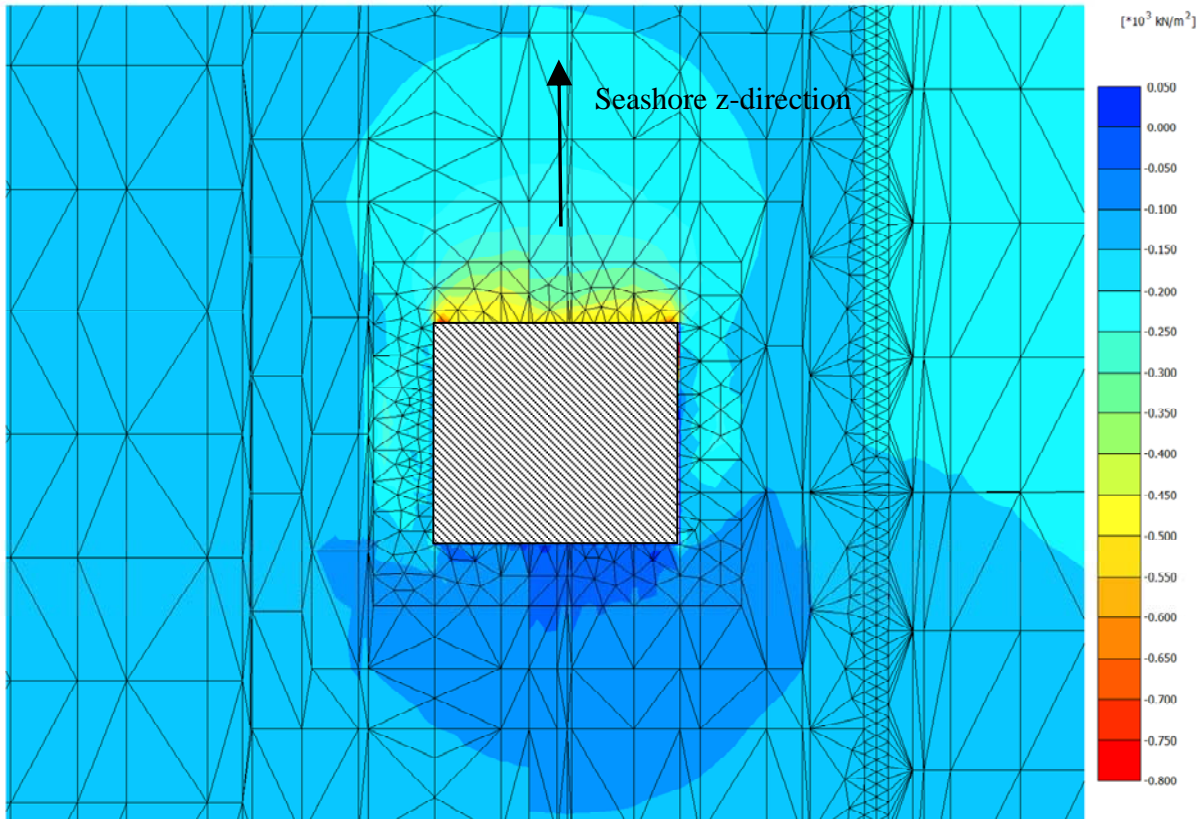
*Figura 50: sollecitazioni verticali totali  $\sigma_y$  e sollecitazioni orizzontali totali  $\sigma_x$  (in kPa) per carichi ULS lungo la sezione centrale trasversale*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0067_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011



Seashore z-direction = direzione z verso riva

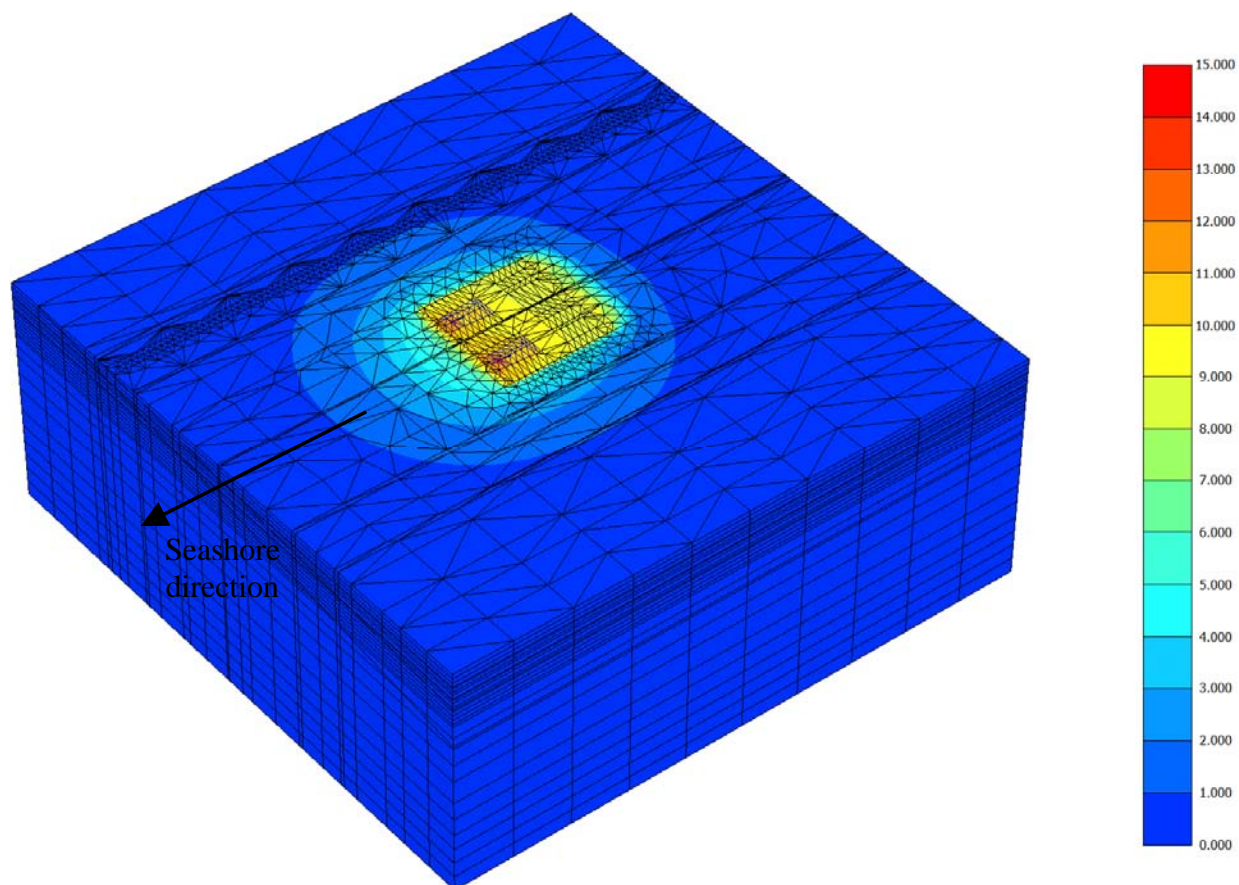
*Figura 51: sollecitazioni verticali totali  $\sigma_y$  (in kPa) per carichi ULS lungo la sezione orizzontale a quota 105,05 m s.l.m.*



Seashore z-direction = direzione z verso riva; concrete = calcestruzzo; Coastal Deposits = Depositi Costieri; Weathered Conglomerate = Conglomerato eroso; Pezzo Conglomerate = Conglomerato di Pozzo

**Figura 52: sollecitazioni orizzontali totali  $\sigma_z$  (in kPa) per carichi ULS lungo la sezione orizzontale a quota 105.05 m s.l.m. e posizione degli strati di terreno alla stessa quota**



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_0_ITA.doc</i>	Rev 0	Data 13-04-2011	



Seashore direction = in direzione della riva

*Figura 53: fase di carico ULS : spostamenti totali della maglia (in mm)*



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20-06-2011</i>

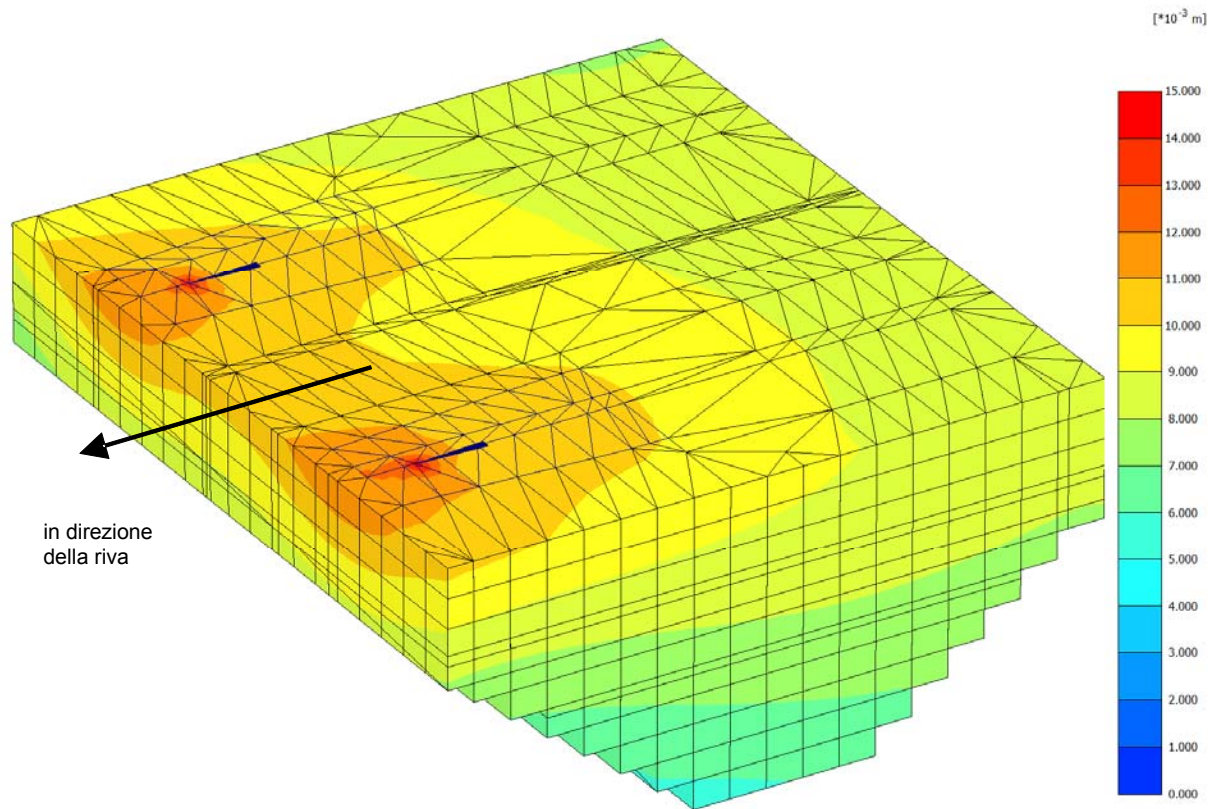
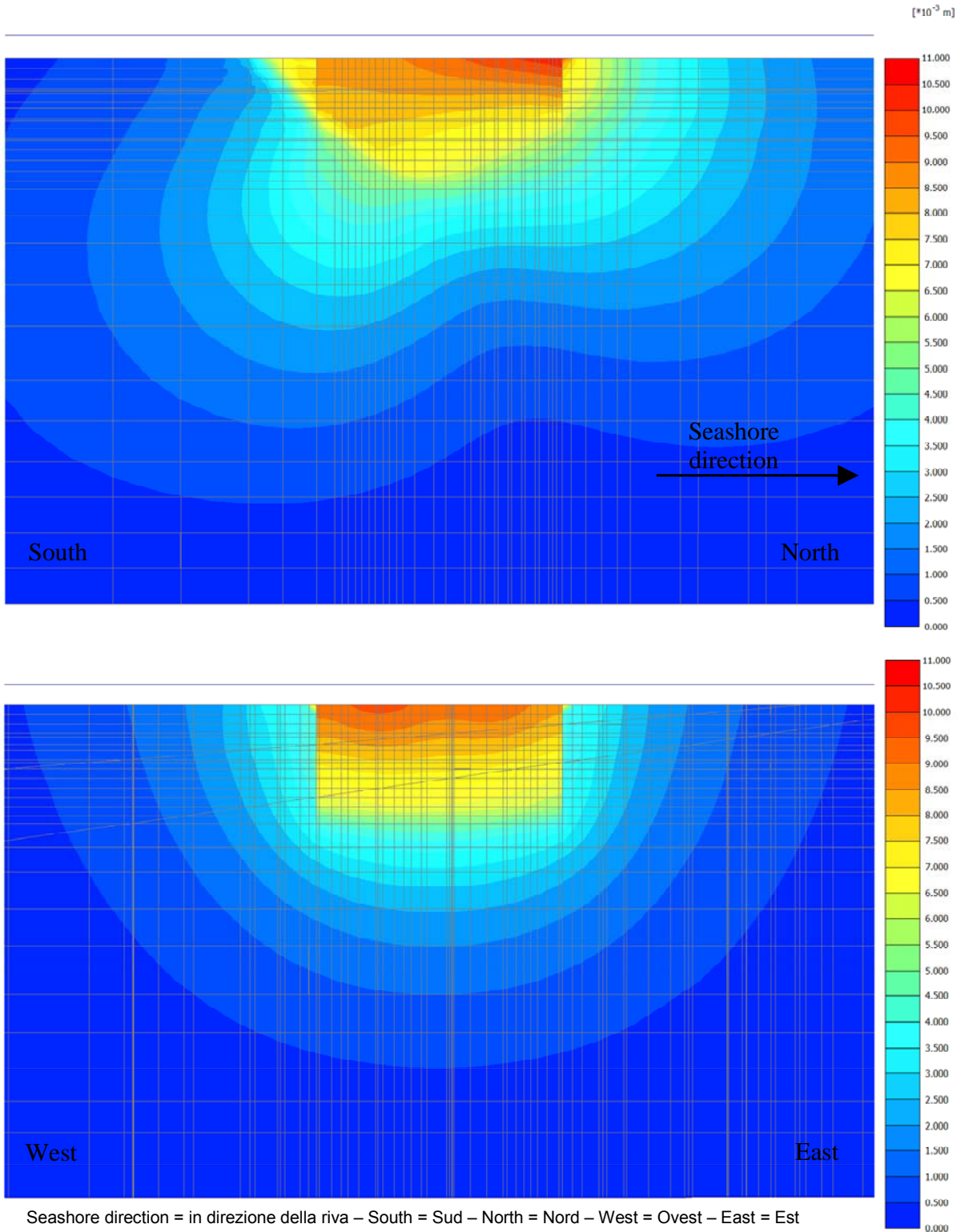


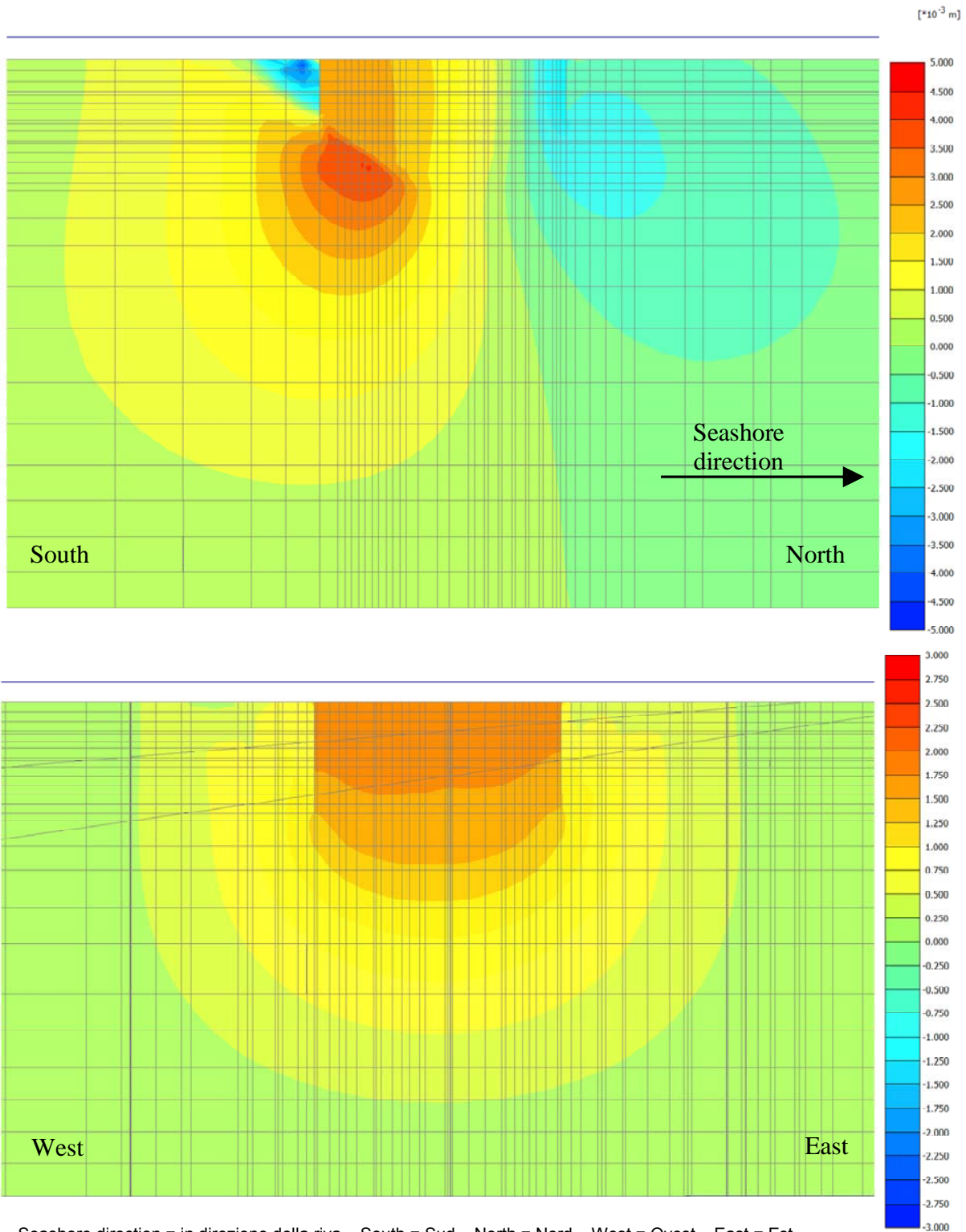
Figura 54: fase di carico ULS : spostamenti di maglia totali e del blocco di ancoraggio (in mm)

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	



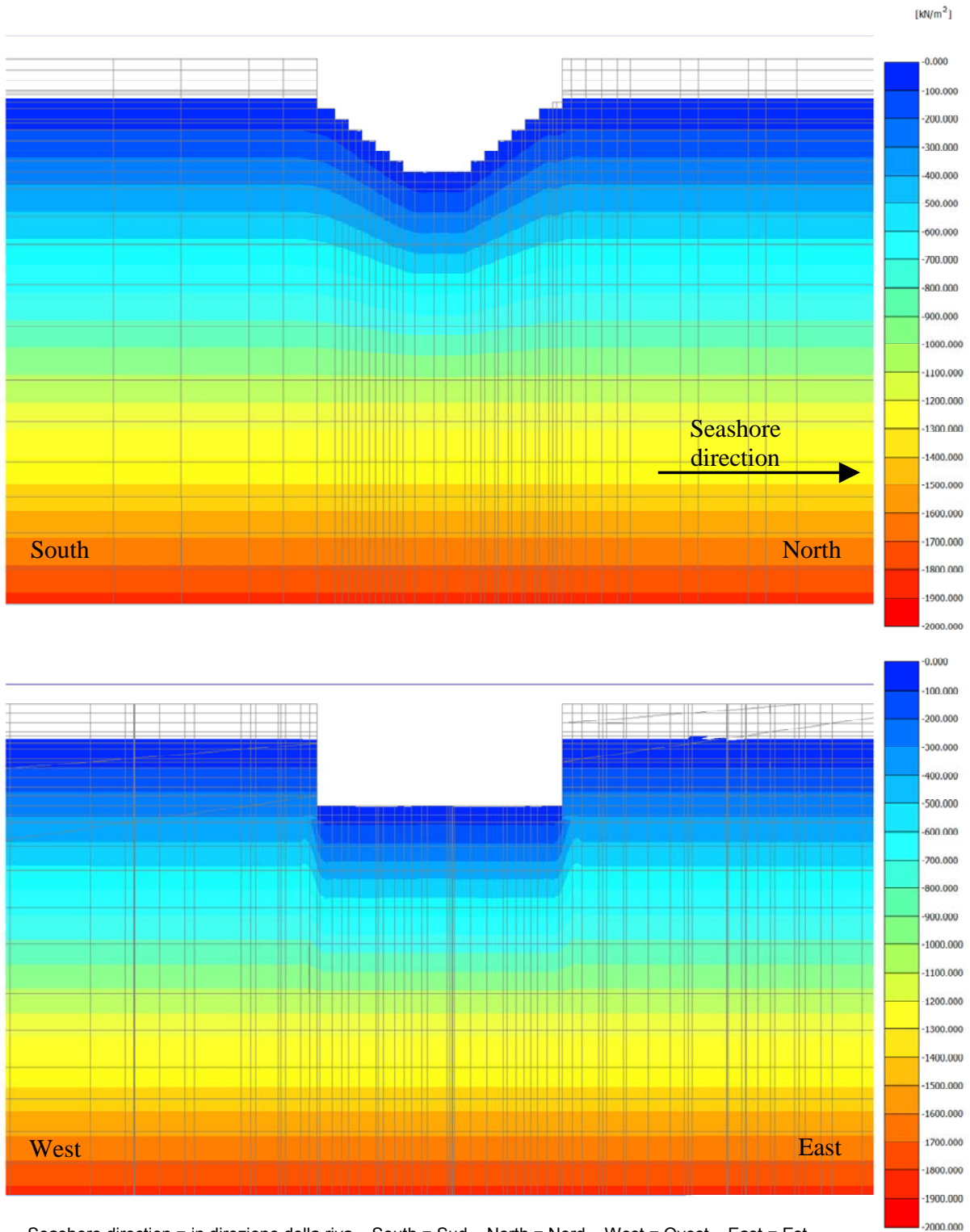
*Figura 55: fase di carico ULS: spostamenti totali lungo le sezioni longitudinali e trasversali*





Seashore direction = in direzione della riva – South = Sud – North = Nord – West = Ovest – East = Est

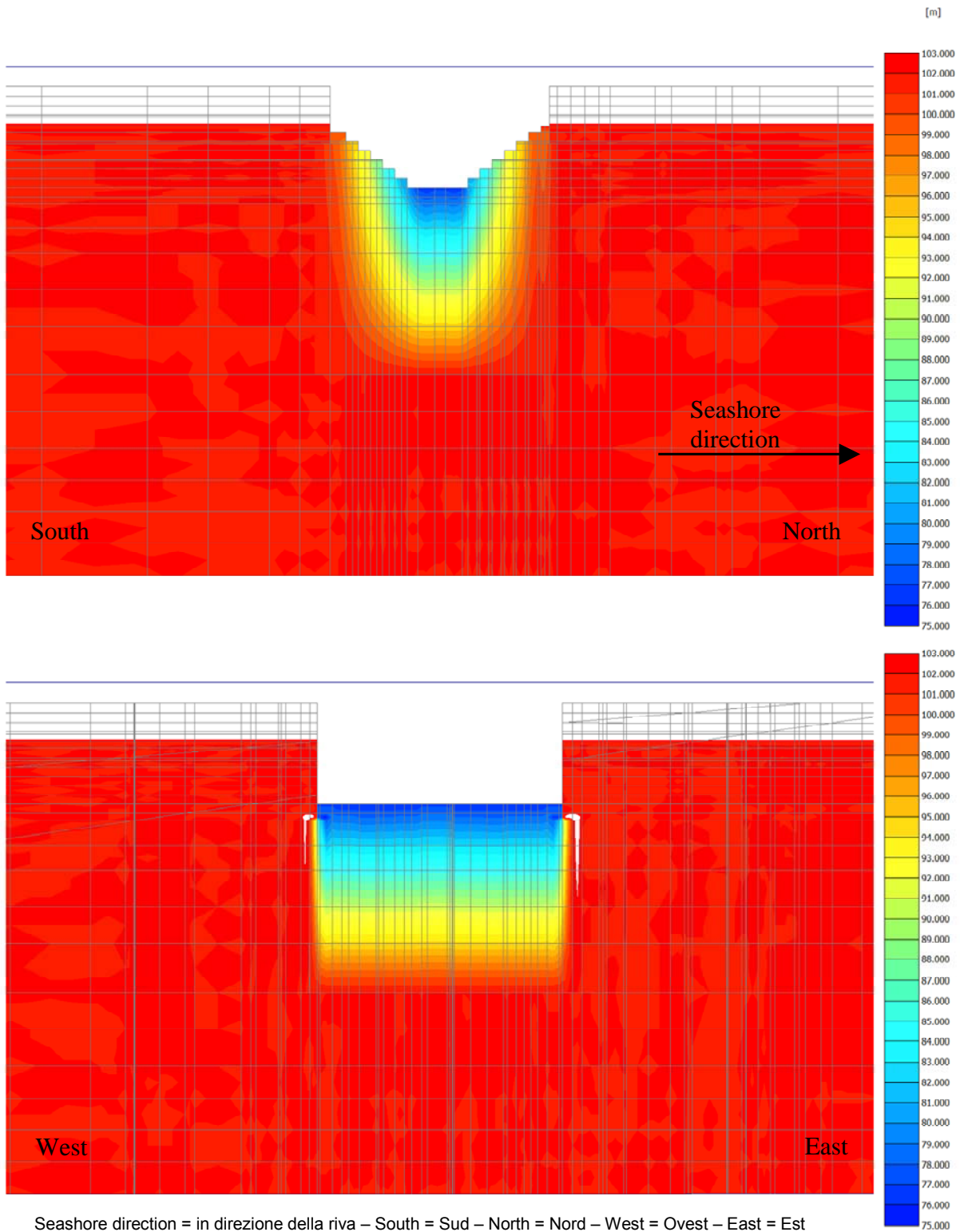
Figura 57: fase di carico ULS: spostamenti in direzione y e lungo le sezioni longitudinali e trasversali



Seashore direction = in direzione della riva – South = Sud – North = Nord – West = Ovest – East = Est

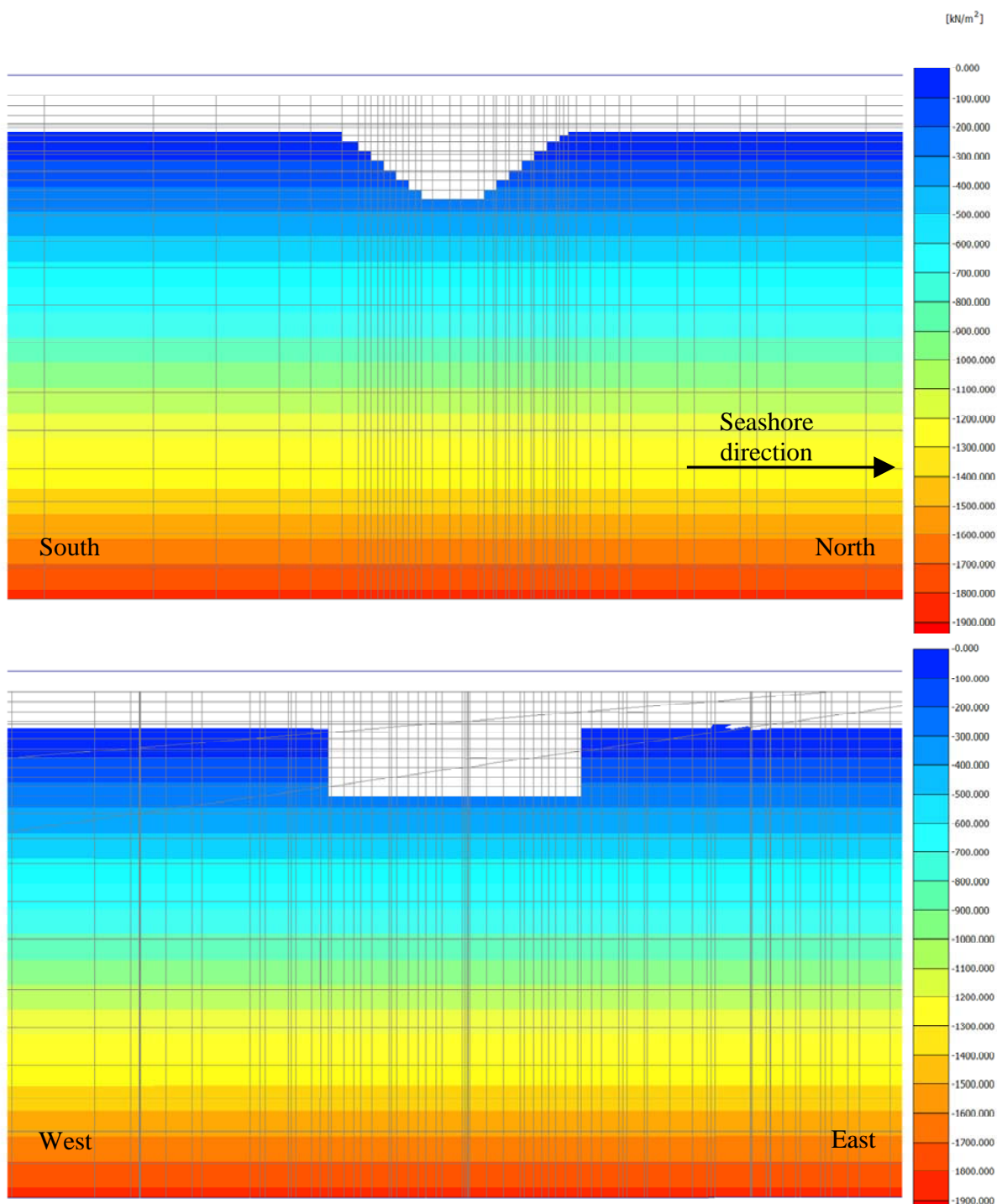
Figura 58: pressione idrica nei pori al termine dello scavo lungo le sezioni longitudinali e trasversali

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0067_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	



*Figura 59: altezza di falda al termine dello scavo lungo le sezioni longitudinali e trasversali*

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0067_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20-06-2011	



Seashore direction = in direzione della riva – South = Sud – North = Nord – West = Ovest – East = Est

*Figura 60: pressione idrica nei pori al termine della costruzione del blocco lungo le sezioni longitudinali e trasversali*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

## APPENDICE A – Forze cavi aggiornate ottenute con il modello IBDAS globale, versione 3.3b

Le forze trasmesse dai cavi principali al Blocco di Ancoraggio Calabria sono state nuovamente valutate usando il modello IBDAS globale, versione 3.3b. Per ciascun stato limite (SILS, SLS2 e ULS) sono state scelte le combinazioni di carico peggiori sia per le condizioni statiche sia per quelle sismiche usando 6 criteri diversi. La Tabella A.1 riassume i valori ottenuti per le condizioni di carico statico, mentre la Tabella A.2 si riferisce alle condizioni di carico sismico.

Si osservano piccole differenze tra i valori delle forze dei cavi calcolate nel Progetto d'Offerta e quelli recentemente forniti dal modello IBDAS globale, versione 3.3b. Se si considerano i valori massimi delle forze dei cavi ottenuti con i diversi criteri per ciascuna situazione di carico, il rapporto tra le forze dei cavi del Progetto d'Offerta e quelle fornite dal modello IBDAS variano tra 1.05 e 0.96 (Tabella A.3); il rapporto più alto si riferisce alla combinazione di carico ULS, mentre quello più basso si riferisce alla combinazione di carichi SILS.

Per lo Stato Limite Ultimo (ULS) le forze dei cavi fornite nel Progetto d'Offerta, cui viene fatto riferimento nelle analisi FE 3D, sono del 5% più alte rispetto ai corrispondenti valori IBDAS, con il risultato di una stima prudentiale del comportamento del Blocco di Ancoraggio Calabria. Le prestazioni del blocco di ancoraggio nelle situazioni di carico SILS e SLS2 vengono pure discusse nel § 4.





		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Tabella A.1 – Condizioni di carico statico – modello IBIDAS globale aggiornato, versione 3.3b

Criteria	Situazione di carico	F <sub>long</sub> (MN)	F <sub>vert</sub> (MN)	F (MN)
min u <sub>vert</sub>	ULS	-2183	593	2262
max u <sub>vert</sub>		-3578	1059	<b>3731</b>
min u <sub>hor</sub>		-3578	1058	3731
max u <sub>hor</sub>		-2183	594	2262
min R <sub>transv</sub>		-3578	1058	3731
max R <sub>transv</sub>		-2183	594	2262
min u <sub>vert</sub>	SILS	-2479	692	2574
max u <sub>vert</sub>		-3246	946	<b>3381</b>
min u <sub>hor</sub>		-3246	946	3381
max u <sub>hor</sub>		-2479	693	2574
min R <sub>transv</sub>		-3246	946	3381
max R <sub>transv</sub>		-2479	693	2574
min u <sub>vert</sub>	SLS2	-2187	595	2267
max u <sub>vert</sub>		-3217	938	<b>3351</b>
min u <sub>hor</sub>		-3217	938	3351
max u <sub>hor</sub>		-2187	595	2267
min R <sub>transv</sub>		-3217	938	3351
max R <sub>transv</sub>		-2187	595	2267

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

Tabella A.2 – Condizioni di carico sismico – modello IBIDAS globale aggiornato, versione 3.3b

Criteria	Situazione di carico	F <sub>long</sub> (MN)	F <sub>vert</sub> (MN)	F (MN)
min u <sub>vert</sub>	ULS	-2093	533	2160
max u <sub>vert</sub>		-3467	1052	<b>3623</b>
min u <sub>hor</sub>		-3434	989	3574
max u <sub>hor</sub>		-2125	596	2207
min R <sub>transv</sub>		-3439	989	3578
max R <sub>transv</sub>		-2121	596	2203
min u <sub>vert</sub>	SILS	-2383	627	2464
max u <sub>vert</sub>		-3316	1002	<b>3464</b>
min u <sub>hor</sub>		-3281	934	3411
max u <sub>hor</sub>		-2418	696	2516
min R <sub>transv</sub>		-3285	933	3415
max R <sub>transv</sub>		-2413	697	2512
min u <sub>vert</sub>	SLS2	-2152	570	2227
max u <sub>vert</sub>		-3235	958	<b>3374</b>
min u <sub>hor</sub>		-3220	929	3351
max u <sub>hor</sub>		-2167	598	2248
min R <sub>transv</sub>		-3222	929	3353
max R <sub>transv</sub>		-2165	598	2246

Tabella A.3: Forze dei cavi nel Blocco di Ancoraggio Calabria: Valori del Progetto d'Offerta e IBIDAS (modello versione 3.3b)

Situazione di carico	Progetto d'Offerta	IBIDAS statico	IBIDAS sismico	F <sub>TD</sub> /F <sub>IBIDAS</sub>
	F (MN)	F (MN)	F (MN)	
ULS	3933	3731	3623	1.05
SILS	3142	3381	3464	0.91
SLS2	3232	3351	3374	0.96

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## **APPENDICE B – Forze cavi aggiornate ottenute con il modello IBDAS globale, versione 3.3f**

Le forze trasmesse dai cavi principali al Blocco di Ancoraggio Calabria sono state nuovamente valutate usando il modello IBDAS globale, versione 3.3f. Per ciascun stato limite (SILS, SLS2 e ULS) sono state scelte le combinazioni di carico peggiori sia per le condizioni statiche sia per quelle sismiche usando 6 criteri diversi. La Tabella B.1 riassume i valori ottenuti per le condizioni di carico statico, mentre la Tabella B.2 si riferisce alle condizioni di carico sismico.

Si osservano piccole differenze tra i valori delle forze dei cavi calcolate nel Progetto d'Offerta e quelli recentemente forniti dal modello IBDAS globale, versione 3.3f. Se si considerano i valori massimi delle forze dei cavi ottenuti con i diversi criteri per ciascuna situazione di carico, il rapporto tra le forze dei cavi del Progetto d'Offerta e quelle fornite dal modello IBDAS variano tra 1.07 e 0.93 (Tabella B.3); il rapporto più alto si riferisce alla combinazione di carico ULS, mentre quello più basso si riferisce alla combinazione di carichi SILS.

Per lo Stato Limite Ultimo (ULS) le forze dei cavi fornite nel Progetto d'Offerta, cui viene fatto riferimento nelle analisi FE 3D, sono del 7% più alte rispetto ai corrispondenti valori IBDAS, con il risultato di una stima prudentiale del comportamento del Blocco di Ancoraggio Calabria. Le prestazioni del blocco di ancoraggio nelle situazioni di carico SILS e SLS2 vengono pure discusse nel § 4.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

Tabella B.1 – Condizioni di carico statico – modello IBIDAS globale aggiornato, versione 3.3f

Criteria	Situazione di carico	F <sub>long</sub> (MN)	F <sub>vert</sub> (MN)	F (MN)
min u <sub>vert</sub>	ULS	-2176	590	2254
max u <sub>vert</sub>		-3528	1041	<b>3678</b>
min u <sub>hor</sub>		-3528	1041	3678
max u <sub>hor</sub>		-2175	591	2254
min R <sub>transv</sub>		-3528	1041	3678
max R <sub>transv</sub>		-2175	591	2254
min u <sub>vert</sub>	SILS	-2440	679	2532
max u <sub>vert</sub>		-3206	932	<b>3338</b>
min u <sub>hor</sub>		-3206	932	3338
max u <sub>hor</sub>		-2439	679	2532
min R <sub>transv</sub>		-3206	932	3338
max R <sub>transv</sub>		-2439	679	2532
min u <sub>vert</sub>	SLS2	-2180	592	2259
max u <sub>vert</sub>		-3177	924	<b>3308</b>
min u <sub>hor</sub>		-3177	924	3308
max u <sub>hor</sub>		-2180	592	2259
min R <sub>transv</sub>		-3177	924	3308
max R <sub>transv</sub>		-2180	592	2259

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Tabella B.2 – Condizioni di carico sismico – modello IBIDAS globale aggiornato, versione 3.3f

Criteria	Situazione di carico	$F_{long}$ (MN)	$F_{vert}$ (MN)	F (MN)
min $u_{vert}$	ULS	-2114	540	2182
max $u_{vert}$		-3390	1024	<b>3541</b>
min $u_{hor}$		-3371	983	3512
max $u_{hor}$		-2132	581	2210
min $R_{transv}$		-3319	957	3454
max $R_{transv}$		-2185	608	2268
min $u_{vert}$	SILS	-2374	624	2454
max $u_{vert}$		-3245	977	<b>3389</b>
min $u_{hor}$		-3225	932	3357
max $u_{hor}$		-2394	670	2486
min $R_{transv}$		-3166	903	3292
max $R_{transv}$		-2452	699	2550
min $u_{vert}$	SLS2	-2158	571	2232
max $u_{vert}$		-3182	939	<b>3318</b>
min $u_{hor}$		-3174	920	3304
max $u_{hor}$		-2166	590	2245
min $R_{transv}$		-3150	908	3278
max $R_{transv}$		-2190	602	2272

Tabella B.3: Forze dei cavi nel Blocco di Ancoraggio Calabria: Valori del Progetto d'Offerta e IBIDAS (modello versione 3.3f)

Situazione di carico	Progetto d'Offerta	IBIDAS statico	IBIDAS sismico	$F_{TD}/F_{IBIDAS}$
	F (MN)	F (MN)	F (MN)	
ULS	3933	3678	3541	1.07
SILS	3142	3338	3389	0.93
SLS2	3232	3308	3318	0.97

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

## RIFERIMENTI

Berezantzev W.G. (1964). *Calculation of foundation basis*. Construction Literature, Leningrad, U.S.S.R.

Bustamante M., Doix B. (1985). *Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés*. Bull. Liaison Labs. Ponts et Chaussées, 140, pp. 75-95.

Cubrinovski M. and Ishihara K. (1999). *Empirical correlation between SPT N-value and relative density for sandy soils*. Soils and Foundations, 39 n. 5, 61 – 71.

Jamiolkowski M., Leroueil S., and Lo Presti D. C. F. (1991). "Theme lecture: Design parameters from theory to practice." Proc., Geo-Coast'91, 1–41.

Rowe P.W. (1962). *The stress – dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact*. Proceedings Royal Society, London, Ser. A 269, 500 – 527.

Schmertmann J.H. (1975). *Measurement of in situ shear strength. State – of – the – art report*. ASCE Speciality Conference on in Situ Measurements of Soil Properties, 2, 57 – 138

Tanaka Y., Kudo Y., Yoshida Y. & Ikemi M. (1987). *A study on the mechanical properties of sandy gravel – dynamic properties of reconstituted samples*. Central Research Institute of Electric Power Industry, Report U87019.

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0067_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011