

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

<p><i>Unità Funzionale</i>  <i>Tipo di sistema</i>  <i>Raggruppamento di opere/attività</i>  <i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i>  <i>Titolo del documento</i></p>	<p>OPERA DI ATTRAVERSAMENTO                  SOTTOSTRUTTURE                  BLOCCHI DI ANCORAGGIO                  Ancoraggio Sicilia                  Analisi numeriche in condizioni tridimensionali</p>	<p>PF0065_F0</p>
---	---	------------------

CODICE	C G 1 0 0 0	P	C L	D	P	S T	B 4	B S	0 0	0 0	0 0	0 3	F0
--------	-------------	---	-----	---	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	20-06-2011	EMISSIONE FINALE	FB	GV	SR



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>	

## INDICE

1	RELAZIONE DI SINTESI.....	5
2	PROFILO DEL TERRENO E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....	12
3	ANALISI NUMERICA TRIDIMENSIONALE DEL BLOCCO DI ANCORAGGIO SICILIA.....	15
3.1	Modello del terreno.....	15
3.1.1	Modello geometrico del terreno .....	15
3.1.2	Modello costitutivo del terreno.....	16
3.1.3	Parametri del terreno.....	19
3.2	Elementi strutturali.....	20
3.2.1	Blocco di ancoraggio .....	20
3.2.2	Diaframmi.....	22
3.2.3	Tiranti di ancoraggio.....	24
3.2.4	Colonne iniettate .....	28
3.3	Fasi di calcolo dell'analisi.....	29
4	RISULTATI DELLE ANALISI TRIDIMENSIONALI .....	34
4.1	Applicazione delle forze di progetto .....	34
4.2	Curve carico – spostamento: analisi incrementale .....	37
4.3	Risultati di Plaxis <sup>3D</sup> Foundation.....	38
4.3.1	Stato di sollecitazione del terreno.....	39
4.3.2	Spostamenti .....	40
5	CONCLUSIONI .....	42
6	FIGURE.....	45
	Appendice A – Forze cavi aggiornate ottenute con il modello IBDAS globale, versione 3.3b .....	91
	Appendice B – Forze cavi aggiornate ottenute con il modello IBDAS globale, versione 3.3f .....	94
	RIFERIMENTI.....	97

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>		
<p>Analisi numeriche in condizioni tridimensionali</p>	<p><i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc</p>	<p><i>Rev</i> 0</p>	<p><i>Data</i> 13-04-2011</p>	

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_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 eseguite per il Blocco di Ancoraggio Sicilia. 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 IBIDAS, versione 3.3b e 3.3f. Le analisi vengono condotte usando il codice commerciale *Plaxis<sup>3D</sup> Foundation*.

Gli spostamenti del blocco indotti dal sisma e la sicurezza nei confronti dello scorrimento, della rotazione e del collasso della capacità portante vengono valutati nella relazione di guida "Blocco di ancoraggio Sicilia: spostamenti indotti dal sisma e sicurezza nei confronti degli stati limite ultimi", mediante l'approccio basato sugli spostamenti e l'approccio pseudo-statico.

**Il capitolo 2** descrive il profilo del terreno della costa siciliana (Figura 1). Partendo dal livello di terra e scendendo verso il basso si incontrano le seguenti unità geologiche: *Depositi Costieri* (Coastal Deposits); *Ghiaie di Messina* (Messina Gravel); *Depositi Continentali* (Continental Deposits); *Conglomerato di Pezzo* (Pezzo Conglomerate); *Cristallino* (Crystalline bedrock). La Sicilia Anchor Block = Blocco di ancoraggio Sicilia

Figura 2 mostra una vista in pianta dell'area del Blocco di Ancoraggio Sicilia. Le due sezioni longitudinali e la sezione trasversale indicate in Sicilia Anchor Block = Blocco di ancoraggio Sicilia

Figura 2 sono illustrate in SECTION 1 = SEZIONE 1 – Boreholes = Fori di trivellazione In situ tests = Prove locali  
 Elevation = Quota Cumulative distance = Distanza cumulativa Anchor block = Blocco d'ancoraggio

Figura 3, SECTION 2 - Boreholes = Fori di trivellazione In situ tests = Prove locali Elevation = Quota Cumulative distance = Distanza cumulativa Anchor block = Blocco d'ancoraggio

Figura 4 and SECTION 3= SEZIONE 3 - Boreholes = Fori di trivellazione In situ tests = Prove locali Terrace deposits = Depositi dei Terrazzi Messina gravel = Ghiaie di Messina Elevation = Quota Cumulative distance = Distanza cumulativa Anchor block = Blocco d'ancoraggio

Figura 5. Per il Blocco di Ancoraggio Sicilia, l'unità geologica di riferimento sono le Ghiaie di Messina con un profondo strato più rigido  $z < -75$  m s.l.m. La **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riassume i principali parametri meccanici ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica dei relativi strati.

**Il Capitolo 3** fornisce il dettaglio dei dati di input delle analisi FEM 3D.

La S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

Figura 12, Figura 13 e Ghiaie di Messina a rigidità minore

Ghiaie di Messina a rigidità maggiore    phreatic level= Livello freatico

*S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O*

Figura 14 mostrano una vista prospettica, una vista in pianta ed una vista laterale del reticolo 3D usato nelle analisi con un'estensione di 400 m parallela all'asse del ponte, 450 m ortogonale all'asse del ponte, 150 m al di sotto del piano terra più alto e 106.5 m al di sotto del piano terra più basso. Il piano terra più alto si trova a +56.0 m s.l.m. ed è orizzontale per ca. 187 m, mentre il piano terra più basso si trova a +12.5 m s.l.m. ed è orizzontale per ca. 114 m; i restanti 99 m sono costituiti da 13 gradini di terreno con un'altezza inferiore a 4.5 m, che è la massima compatibile con la resistenza di coesione assegnata al terreno.

Il livello di falda coincide con il livello del mare a 0 m s.l.m.

La *S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-W corner = angolo S-O; N-W corner = angolo N-O*

Figura 15 e la *Ground level = piano terra      pre-excavation level = livello di pre-scavo*

Figura 16 mostrano una vista prospettica e una vista in pianta del pre-scavo di un'area di fondazione attorno al sito di costruzione.

Il modello costitutivo adottato per il terreno nelle analisi FEM è un modello elasto-plastico indipendente dalla velocità con incrudimento isotropo (Incrudimento del terreno) disponibile nella libreria del codice *Plaxis<sup>3D</sup> Foundation*. Nel modello, il comportamento elastico viene definito dall'elasticità isotropa mediante il modulo di Young dipendente dalle sollecitazioni,  $E'$ . Per il carico plastico derivante da stati di sollecitazione isotropa, il modello prevede una relazione non lineare di sollecitazione-deformazione con modulo tangenziale iniziale uguale a  $E'$ . I valori di  $E'$  sono stati correlati al modulo di taglio in presenza di piccola deformazione  $G_0$  ottenuti dalla prova del foro trasversale eseguito in loco. In particolare, i valori dei parametri riportati in Tabella 2 sono stati ottenuti adattando al meglio i risultati della prova del foro trasversale in *Plaxis simulation* = simulazione

Plaxis

Figura 19.

Il Blocco di Ancoraggio Sicilia è un blocco in cemento armato di forma trapezoidale in piano, lungo 100 m in direzione nord-sud; in direzione est-ovest, la base più piccola del trapezio è lunga ca. 80 m, mentre la base più grande è lunga ca. 120 m, per cui il blocco ha una larghezza media di 100 m. La parte superiore e inferiore del blocco sono costituite rispettivamente da due piani diversi: in direzione nord-sud, la parte anteriore del blocco ha un'inclinazione di ca. 15° in alto e ca. 25° in basso; l'estremità posteriore del blocco ha un'inclinazione di ca. 7° in alto e ca. 8° in basso. Il livello massimo del blocco si trova a +60 m s.l.m. e l'estremità più profonda della struttura a +1 m s.l.m. Il blocco di ancoraggio comprende quattro camere, di cui due per i cavi principali e le

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

altre due riempite con materiale granulare dopo l'installazione dei cavi principali. Il modello 3D per il blocco d'ancoraggio ha la stessa forma in pianta del progetto reale, mentre in sezione è stato necessario introdurre alcune semplificazioni a causa dell'incapacità di *Plaxis<sup>3D</sup> Foundation* di gestire piani inclinati; in tali semplificazioni, sono stati mantenuti gli stessi volumi (e pesi) del progetto reale. La north-west top view = nord-ovest vista dall'alto; south-west bottom view= sud-ovest vista dal basso; main cables chambers detail = cavi principali dettaglio delle camere; ballast chamber = camera zavorrata; main cable chambre = Camera Cavi Principali

Figura 20 mostra una vista dall'alto nord-ovest, una vista dal basso sud-ovest e una vista prospettica delle camere dei cavi principali. Il blocco di ancoraggio è stato modellato come un elemento in calcestruzzo armato, con i parametri riportati in Tabella 3; il materiale granulare della camera zavorrata, *materiale di riempimento*, è stato modellato come un materiale Mohr-Coulomb con le caratteristiche del deposito del terreno locale; la camera principale verrà riempita con un materiale rigido lineare-elastico senza massa, *materiale vuoto*, al solo scopo di creare dei nodi del reticolo per l'applicazione delle forze di progetto.

Ciascun muro del sistema di sostegno dello scavo (in rosso in

Final ground level = Piano terra finale; Diaphragm wall = diaframmi

Figura 10) ha una larghezza di 2.5 m, uno spessore di 1 m ed una lunghezza complessiva variabile. Le due linee dei diaframmi in direzione est-ovest (diaframmi trasversali) hanno la stessa lunghezza complessiva di 23 m; quindi, le due linee dei diaframmi in direzione nord-sud (diaframmi longitudinali) hanno la stessa lunghezza complessiva, ma ciascun muro ha una lunghezza diversa che varia da 23 m a ca. 40 m nella parte posteriore del blocco di ancoraggio e da 27 m a 23 m nella parte anteriore. La S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

Figura 21 mostra una vista prospettica del modello tridimensionale dei diaframmi; la scavo sul fondo

Figura 22 mostra uno schema dei diaframmi longitudinali con indicazione di una targhetta per ciascun tipo di muro; la Tabella 4 riassume il livello della parte alta e della parte bassa di ciascun muro, la sua lunghezza globale e le profondità di scavo; la Tabella 5 riassume le caratteristiche geometriche e meccaniche dei diaframmi.

I tiranti di ancoraggio nel terreno pre-tensionati sono distanziati di 2.5 m orizzontalmente con una distanza verticale variabile di 5 m mediamente. Le barre di ancoraggio ed i corpi iniettati hanno superfici e lunghezze diverse. Per semplicità, i tiranti di ancoraggio nel terreno sono stati modellati nel *Plaxis<sup>3D</sup> Foundation* come elementi *spring* Plaxis con un modello costitutivo elasto-plastico: la pre-tensione è stata scelta come forza di servizio; la forza massima è stata associata

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>0</i>	<i>Data</i> <i>13-04-2011</i>	

all'estensione elastica della barra d'ancoraggio, mantenendo però la stessa rigidità del caso senza pre-tensione. Nel modello 3D, la spaziatura orizzontale è di 5 m, invece di 2.5 m come da progetto e quindi la forza massima considerata è doppia; per ridurre l'effetto della distanza maggiore tra due tiranti consecutivi rispetto al progetto, è stata introdotta una *trave* Plaxis per collegare tutti i tiranti d'ancoraggio co-planari. La Tabella 6,

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>	

Tabella 7 e Tabella 8 riassumono le caratteristiche geometriche e meccaniche degli elementi strutturali; la Tabella 9 riassume i livelli dei diversi livelli delle molle; la Figura 25 introduce .... di diverse quantità secondo il sistema di assi locale della trave; la S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

Figura 26 mostra una vista prospettica dei livelli delle molle e delle travi di collegamento.

Il terreno al centro del e di fronte al sito di costruzione viene trattato usando colonne secanti dello spessore di 18.5 m iniettate fino ad una profondità massima di 30 m e dello spessore di 7 m iniettate fino ad una profondità di 20 m; le colonne iniettate verranno circonscritte da diaframmi. Il modello 3D di iniezione ha in pianta praticamente la stessa dimensione di quello del progetto reale, mentre in sezione è stato necessario apportare qualche semplificazione a causa dell'incapacità di *Plaxis*<sup>3D</sup> Foundation di gestire piani inclinati, vengono tuttavia mantenuti gli stessi volumi (e pesi) delle aree iniettate previste nel progetto. La general view = Vista generale; jet grouting detail = dettaglio di jet

grouting;

S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

Figura 27 mostra una vista prospettica del modello di iniezione; la Tabella 10 riassume le caratteristiche meccaniche delle colonne iniettate.

Scopo principale delle analisi è quello di valutare gli spostamenti del blocco di ancoraggio dovuti all'applicazione delle forze di progetto. A tale scopo, nell'analisi è stata riprodotta l'intera sequenza costruttiva con l'intento di ottenere, prima dell'applicazione dei carichi di progetto, uno stato di tensione nel terreno il più vicino possibile allo stato di tensione reale. Le analisi sono state eseguite in termini di tensioni effettive, assumendo condizioni drenate per tutti i depositi di terreno. Le fasi di calcolo definite nelle analisi sono: generazione dello stato di sollecitazione iniziale e della configurazione del piano terra; pre-scavo; attivazione dei diaframmi e del jet grouting; scavo a livello di fondazione con simultanea attivazione di molle; costruzione del blocco di ancoraggio; riempimento del pre-scavo e delle camere zavorrate con materiale granulare; applicazione dei carichi di progetto. E' stata eseguita un'analisi incrementale dei carichi di progetto onde ottenere la forza massima.

Il **Capitolo 4** fornisce il dettaglio dei risultati ottenuti dalle analisi FEM tridimensionali.

Sulla base dei risultati ottenuti, sono stati ricostruiti per il blocco due meccanismi cinematici: uno è puramente traslatorio e l'altro è roto-traslatorio attorno al centro di gravità. La Figura 33 e la Figura 34 mostrano la configurazione non deformata (in nero) e quella deformata (in rosso, con una scala maggiorata di 200 volte) del blocco per i due meccanismi in situazione di carico ULS. Sono stati

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

selezionati dieci punti per l'output lungo una sezione longitudinale attraverso il centro di gravità; tutti i punti sono situati ad una quota diversa dell'estremità posteriore e di quella inferiore del blocco; un punto,  $F$ , è situato approssimativamente al centro del blocco. La posizione dei dieci punti è dettagliata in Figura 35. La Tabella 17 riassume gli spostamenti del centro di gravità, la sua direzione rispetto alla linea orizzontale e la rotazione attorno al baricentro del Blocco di Ancoraggio Sicilia per i due meccanismi cinematici e per le tre condizioni di carico considerate. Nella condizione di carico SILS, lo spostamento medio è di ca. 27 mm e la direzione media è di ca. 14° rispetto alla linea orizzontale; si può dire che questa inclinazione è quella della superficie di scorrimento più probabile in questa situazione di carico; nella situazione di carico SLS2, lo spostamento medio è di ca. 28 mm e la direzione media è di nuovo ca. 14° rispetto alla linea orizzontale; nella condizione di carico ULS, lo spostamento medio è di ca. 33 mm e la direzione media è di ca. 15.5° rispetto alla linea orizzontale.

Le curve carico-cedimenti ottenute per i dieci punti nell'analisi incrementale dei carichi di progetto sono tracciate nella Tender design = progetto d'offerta

Figura 36 fino alla Tender design = progetto d'offerta

Figura 40.

Per stimare la forza massima che può essere applicata al blocco d'ancoraggio e quindi la "distanza" dal collasso del terreno attorno al Blocco di Ancoraggio Sicilia, le curve carico-cedimenti sono state interpolate con una funzione iperbolica (Figura 41); tale procedura ha dato un valore di  $F_{max}$  tra 15100 MN e 16500 MN, vale a dire un fattore di sicurezza a fronte delle forze di progetto in aumento di ca. 3.75 – 4.15 nella condizione di carico ULS e di ca. 5 – 5.5 nella condizione di carico SILS.

La Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale*  
*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

Figura 42 fino alla Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale*  
*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

Figura 60 mostrano i risultati di *Plaxis<sup>3D</sup> Foundation* in termini di profili di sollecitazione relativa al taglio, di spostamento orizzontale e verticale in una sezione longitudinale ed una sezione trasversale, profili di spostamento totale nel reticolo 3D FE, sollecitazioni normali effettive sull'elemento di interfaccia dei diaframmi trasversali per le principali fasi di calcolo: fase iniziale, scavo completo all'interno dei diaframmi, fine della costruzione del blocco d'ancoraggio, applicazione delle forze corrispondenti alla condizione di carico SILS ed alle condizioni di calcolo ULS.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>	

### **Appendice A e appendice B. Forze cavi aggiornate ottenute con il modello IBDAS globale versione 3.3b e versione 3.3f**

Le forze trasmesse dai cavi principali al Blocco di Ancoraggio Sicilia 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 1.06 e 0.90 per IBDAS 3.3b (Tabella A.3) e tra 1.08 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 5.8% più alte rispetto ai corrispondenti valori IBDAS 3.3b e dell'8% più alte rispetto ai corrispondenti valori di IBDAS 3.3f, il che porta ad una stima prudentiale del comportamento del Blocco di Ancoraggio Sicilia. 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> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

## 2 PROFILO DEL TERRENO E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostra il profilo del terreno sulla costa siciliana dello stretto. L'attuale livello del terreno nel punto in cui si situa il blocco di ancoraggio varia da +22 m s.l.m. a +59 m s.l.m. con un angolo discendente di ca. 25° verso nord. Il livello di falda coincide con il livello del mare, a 0 m s.l.m. Partendo dal piano terra e spostandosi verso il basso si incontrano le seguenti unità:

- *Depositi Costieri.* Sabbia e ghiaia con pochissimo o nessun contenuto di fini. Occasionalmente si intravedono strati limoso-torbosi nella parte inferiore della formazione. E' difficile valutare lo spessore di questa formazione, in quanto poggia sulla formazione molto simile delle *Ghiaie di Messina*.
- *Ghiaie di Messina /Sedimenti dei terrazzi.* Ghiaia e sabbia con strati limosi molto occasionali. Lo spessore di questa formazione può arrivare a più di 170 m.
- *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 limoso-sabbiosa e arenaria. Lo spessore di questa formazione è maggiore di 200 m.
- *Cristallino.* Granito tettonizzato.

La Sicilia Anchor Block = Blocco di ancoraggio Sicilia

Figura 2 mostra una vista in pianta del punto in cui è localizzato il Blocco di Ancoraggio Sicilia unitamente alle indagini locali disponibili. Le tre sezioni longitudinali e la sezione trasversale indicate in Sicilia Anchor Block = Blocco di ancoraggio Sicilia

Figura 2 sono illustrate in SECTION 1 = SEZIONE 1 – Boreholes = Fori di trivellazione In situ tests = Prove locali

Elevation = Quota Cumulative distance = Distanza cumulativa Anchor block = Blocco d'ancoraggio

Figura 3, SECTION 2 - Boreholes = Fori di trivellazione In situ tests = Prove locali Elevation = Quota Cumulative distance = Distanza cumulativa Anchor block = Blocco d'ancoraggio

Figura 4, SECTION 3= SEZIONE 3 - Boreholes = Fori di trivellazione In situ tests = Prove locali Terrace deposits = Depositi dei Terrazzi Messina gravel = Ghiaie di Messina Elevation = Quota Cumulative distance = Distanza cumulativa Anchor block = Blocco d'ancoraggio

Figura 5 e SECTION 4= SEZIONE 4 - Bore holes = Fori di trivellazione In situ tests = Prove locali Anchor Block = Blocco di ancoraggio Elevation = Quota Cumulative distance = Distanza cumulativa Distance = Distanza

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Figura 6. L'unità Ghiaie di Messina/Sedimenti dei Terrazzi si estende a partire dal piano terra per uno spessore di ca. 200m, tuttavia a ca. -75 m s.l.m. si osserva un aumento della rigidità .

La permeabilità dei depositi è stata valutata mediante prove di pompaggio da un pozzo situato nella zona della Torre Sicilia, estese per 40 m al di sotto del piano terra e prove di permeabilità Lefranc eseguite in un foro di trivellazione a profondità variabili di 10 m e 38 m al di sotto del piano terra.

Grazie alla breve distanza della fonte (mare) dal pozzo, all'elevata permeabilità ed alla piccola compressibilità dei depositi, le prove di pompaggio sono state interpretate assumendo delle condizioni a regime (Mansur e Kauffman, 1962). Il valore risultante della permeabilità orizzontale è di  $k_h = 5 \times 10^{-3}$  m/s.

Le prove di permeabilità di Lefranc hanno un carattere più locale rispetto alle prove di pompaggio dal pozzo e sono interessate dal disturbo creato durante la formazione del foro trasversale; inoltre la loro interpretazione dipende dal rapporto  $k_h/k_v$  assunto. I loro risultati devono quindi essere considerati affidabili entro un ordine di grandezza. I valori di  $k_v$  assumendo  $k_h/k_v = 10$  variano da  $2 \times 10^{-3}$  a  $5 \times 10^{-2}$  (m/s); con  $k_h/k_v = 1$ ,  $k_v$  non è sostanzialmente diverso da quello ottenuto con la prova di pompaggio da pozzo, trovandosi nel campo di  $2.6 \times 10^{-4}$  -  $5.8 \times 10^{-3}$  (m/s).

Poichè non è stata eseguita alcuna valutazione *in-situ* della permeabilità nel luogo in cui si trova il Blocco di Ancoraggio Sicilia, sono stati adottati i dati ottenuti dalla prova *in-situ* eseguita nel punto in cui è situata la Torre Sicilia.

Nell'area del Blocco di Ancoraggio Sicilia, i fenomeni di erosione delle Ghiaie di Messina sono meno importanti di quelli che interessano il sito della Torre Sicilia, per cui la deviazione di  $K_0$  dal suo valore normalmente consolidato è dovuto principalmente a effetti di invecchiamento:

$$\frac{K_0}{K_0(\text{NC})} = \left( \frac{t}{t_p} \right)^{C_{\alpha e}/C_c} \quad (1)$$

dove  $t$  è il tempo trascorso dal momento della sedimentazione delle Ghiaie di Messina, tra  $4 \times 10^5$  e  $6 \times 10^5$  anni,  $t_p$  è il termine del periodo di consolidamento primario, ca.  $10^{-2}$  anni,  $C_{\alpha e}$  è il coefficiente di compressione secondario e  $C_c$  è l'indice di compressione. Per i terreni granulari, i valori tipici del rapporto  $C_{\alpha e}/C_c$  sono pari a ca. 0.02 (Mesri, 1989) e quindi l'aumento massimo stimato di  $K_0$  dovuto ad effetti di invecchiamento è dell'ordine del 42%. Ne consegue:

$$K_0 = 1.42 \times K_0(\text{NC}) = 1.42 \times (1 - \sin \phi'_p) = 0.47 \quad (2)$$

dove  $\phi'_p = 42^\circ$  come più avanti descritto.

La densità relativa delle Ghiaie di Messina è stata stimata sulla base dei risultati SPT e LPT

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

usando la procedura proposta da Cubrinovski e Ishihara (1999): valori di  $D_R = 40\% - 60\%$  sono stati ottenuti come indicato in Figura 7. L'angolo di resistenza al taglio in corrispondenza del picco  $\phi'_p = 41^\circ - 44^\circ$  è stato quindi valutato mediante la relazione proposta da Schmertmann (1975) (Figura 7).

L'angolo di attrito a volume costante è stato valutato secondo Bolton (1986):

$$\phi'_{cv} = \phi'_p - 3 D_R(10 - \ln p') + 3^\circ \quad (3)$$

che, per  $\phi'_p = 40^\circ$ ,  $D_R = 50\%$  e  $p' = 200 \text{ kPa}$ , dà  $\phi'_{cv} = 36^\circ$ .

Il profilo di rigidità delle Ghiaie di Messina è stato ottenuto da due prove del foro trasversale in vicinanza del Blocco di Ancoraggio Sicilia, fino ad una profondità di 100 m al di sotto del piano terra. I risultati delle prove del foro trasversale in termini di velocità dell'onda di taglio,  $V_s$ , rispetto alla profondità sono indicati in Figura 8. Gli stessi risultati sono indicati nella figura sotto forma di profili del modulo di taglio in presenza di piccola deformazione,  $G_0$ :

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (4)$$

$G_0$  aumenta da ca. 100 MPa a piano terra a ca. 400 MPa ad una profondità di 80 m al di sotto del piano terra; al di sotto di questa profondità i dati sono più dispersivi con un valore medio di 450 MPa.

La Tabella 1 riassume i principali parametri meccanici ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica di cui sopra.

Tabella 1. Caratteristiche del terreno

	profondità (m al di sotto del piano terra)	$K_0$	$\phi'_p$ (°)	$\phi'_{cv}$ (°)	$K_h$ (m/s)	$G_0$ (MPa)
Ghiaie di Messina	0÷20	0.43	44	35	$5 \times 10^{-3}$	50÷150
Ghiaie di Messina	20÷80	0.47	42	37	$5 \times 10^{-3}$	150÷400
Ghiaie di Messina	> 80	0.47	42	37	$5 \times 10^{-3}$	450

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

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

La Existing ground *level side B = Piano terra esistente, lato A e B*      *Diaphragm walls = diaframmi*

Figura 9 mostra una vista in pianta e una sezione longitudinale del blocco di ancoraggio quale definito nel progetto d'offerta; in

*Final ground level = Piano terra finale; Diaphragm wall = diaframmi*

Figura 10 le linee rosse indicano il profilo esterno dei diaframmi necessari per il sostegno dello scavo. Due viste del blocco d'ancoraggio previsto nel progetto d'offerta sono indicate in Bridge longitudinal axis = asse longitudinale del ponte

Figura 11.

Il Blocco di Ancoraggio Sicilia è un blocco in cemento armato di forma trapezoidale sul piano. E' lungo 100 m in direzione nord-sud; in direzione est-ovest, il lato più piccolo è lungo ca. 80 m, mentre quello più largo è lungo ca. 120 m, per cui il blocco ha una larghezza media di 100 m. La parte superiore e inferiore del blocco sono costituite rispettivamente da due piani diversi: la parte anteriore del blocco ha un'inclinazione di ca. 15° in alto e ca. 25° in basso; l'estremità posteriore del blocco ha un'inclinazione di ca. 7° in alto e ca. 8° in basso. La quota massima del blocco di ancoraggio si trova a +60 m s.l.m. e l'estremità più profonda della struttura si trova a +1 m s.l.m. Il blocco comprende quattro camere, di cui due per i cavi principali e le altre due da riempire con materiale granulare dopo l'installazione dei cavi principali.

L'incapacità di *Plaxis<sup>3D</sup> Foundation* di modellare piani inclinati non ha permesso di riprodurre l'esatta geometria del blocco e la pendenza del piano terra attorno al blocco. In ogni caso, si è ottenuta una stima ravvicinata della forma del blocco e della superficie del terreno descrivendo i piani inclinati come se fossero delle superfici a gradini.

#### 3.1 Modello del terreno

##### 3.1.1 Modello geometrico del terreno

La S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

Figura 12 fino alla Ghiaie di Messina a rigidità minore

*Ghiaie di Messina a rigidità maggiore      phreatic level= Livello freatico*

S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

Figura 14 mostra una vista prospettica, una vista in pianta ed una vista laterale del reticolo 3D usato nelle analisi. Il reticolo è lungo 400 m in direzione parallela all'asse del ponte, largo 450 m in direzione ortogonale all'asse del ponte ed alto 150 m dalla quota massima del piano terra.

Il piano terra massimo, a +56.0 m s.l.m. si estende orizzontalmente per ca. 187 m, mentre il piano terra minore, a +12.5 m s.l.m., è orizzontale per ca. 114 m; i restanti 99 m sono costituiti da 13 gradini di terreno alti meno di 4.5 m.

Il profilo del terreno è costituito da due strati orizzontali, entrambi di Ghiaie di Messina: lo strato superiore si estende dal piano terra a ca. -75 m s.l.m., quello inferiore si estende fino al fondo del reticolo ed è caratterizzato da una rigidità maggiore.

Il livello della falda coincide con il livello del mare, a 0 m s.l.m.

Le assunzioni di progetto per la costruzione del blocco di ancoraggio prevedono un pre-scavo della zona di fondazione attorno al sito di costruzione ( S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-W corner = angolo S-O; N-W corner = angolo N-O

Figura 15 e Ground level = *piano terra* pre-excavation level = *livello di pre-scavo*

Figura 16), che è circondato da diaframmi. La zona di fondazione è la zona necessaria per le attività di costruzione .

Nel modello 3D, il pre-scavo interessa la zona di fronte al blocco di ancoraggio, scavata dal piano terra fino a +51 m s.l.m., la zona nell'estremità posteriore del blocco, scavata dal piano terra a +17 m s.l.m., e la zona intermedia, scavata tra i due livelli sopra indicati mediante 13 gradini di terreno alti meno di 4.5 m .

Il livello di pre-scavo è collegato al piano terra anche in direzione trasversale mediante gradini di terreno alti meno di 4.5 m , in numero sufficiente a garantire un'inclinazione uguale a ca. 2/3.

### 3.1.2 Modello costitutivo del terreno

Il comportamento del blocco d'ancoraggio è stato analizzato mediante analisi FE tridimensionali eseguite usando il codice *Plaxis<sup>3D</sup> Foundation 2.2*. Il comportamento meccanico del terreno è stato descritto usando 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  $E'_0$ ,

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

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 pubblicate in letteratura.

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 modulo di Young dipendente dalla sollecitazione:

$$E' = E^{\text{ref}} \left( \frac{c' \cdot \cot \varphi' + \sigma_3'}{c' \cdot \cot \varphi' + p^{\text{ref}}} \right)^m \quad (5)$$

dove  $\sigma_3'$  è l'effettiva sollecitazione principale minima,  $c'$  è la coesione,  $\varphi'$  è l'angolo della resistenza al taglio,  $p^{\text{ref}} = 100$  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

$$f_s = \frac{1}{E'_{50}} \frac{q}{(1 - 0.9 \cdot q/q_f)} - \frac{2q}{E'} - \gamma^p = 0 \quad (6)$$

$$f_v = \frac{\tilde{q}^2}{\alpha^2} + p'^2 - p_c'^2 = 0 \quad (7)$$

Nell' eqn. (6),  $E'_{50}$  è dato da un'espressione simile all' eqn. (5), 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. (7),  $p'$  è la sollecitazione effettiva media;  $\tilde{q}$  è una tensione generalizzata nel piano dei deviatori 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

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

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

$$d\varepsilon_v^p = \frac{\beta}{p_{ref}} \left( \frac{p'_c}{p_{ref}} \right)^m \cdot dp'_c \quad (5)$$

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  $E'_{oed}$ , 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:

$$E'_{oed} = E'_{oed,ref} \cdot \left( \frac{c' \cdot \cot \varphi' + \sigma'_3}{c' \cdot \cot \varphi' + p_{ref}} \right)^m \quad (6)$$

dove  $\sigma'_3$  è l'effettiva tensione principale minima.

Il valore iniziale del parametro di incrudimento  $p'_c$  è correlato al limite di snervamento verticale unidimensionale 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, cosicché 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  $\varphi'_m$  e dall'angolo di attrito a volume costante  $\varphi'_{cv}$ :

$$\sin \psi_m = \frac{\sin \varphi'_m - \sin \varphi'_{cv}}{1 - \sin \varphi'_m \sin \varphi'_{cv}} \quad (7)$$

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

$$\sin \varphi'_{cv} = \frac{\sin \varphi' - \sin \psi}{1 - \sin \varphi' \sin \psi} \quad (8)$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

La **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** 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 dalle prove del foro trasversale eseguite in loco. In particolare, valori di  $E'^{ref}$  e  $m$  sono stati ottenuti adattando al meglio i risultati di tali prove con l'uso dell' eqn. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** ed assumendo  $\nu' = 0.2$ .

I restanti parametri  $E'_{50}{}^{ref}$  e  $E'_{oed}{}^{ref}$  del modello sono stati tarati sui risultati delle prove di compressione triassiale eseguite su campioni ricostituiti di terreni ghiaiosi di grosso diametro (Tanaka et al., 1987). La Figura 18 mostra il confronto tra simulazioni del modello ed i risultati sperimentali sopra citati.

### 3.1.3 Parametri del terreno

*La Plaxis simulation = simulazione Plaxis*

Figura 19 mostra il profilo di  $G_0$  rispetto alla profondità al di sotto del piano terra. La linea continua in figura rappresenta la previsione di  $G_0$  ottenuta usando l' eqn. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** con i valori di  $c'$ ,  $\varphi'$ ,  $E'^{ref}$  e  $m$  riportati in Tabella 2. Specificatamente, i valori di  $\sigma'_3$  sono stati ottenuti usando i valori di  $K_0$  contenuti in Tabella 2. I valori di  $E'^{ref}$  e  $m$  sono stati ottenuti adeguando al meglio i risultati delle prove del foro trasversale ed assumendo  $\nu' = 0.2$ . Per le Ghiaie di Messina, è stato introdotto un valore di coesione diverso da zero per simulare valori di rigidità diversi da zero a basse profondità (ved.

*Plaxis simulation = simulazione Plaxis*

Figura 19); questo basso valore di coesione non pregiudica in modo significativo il comportamento dello strato in termini di resistenza.

Si è assunto il decadimento della rigidità con la deformazione da taglio usando rapporti di  $E'^{ref} / E'_{50}{}^{ref} = 20$  e di  $E'_{50}{}^{ref} / E'_{oed}{}^{ref} = 1.0$ ; per l'angolo di dilatanza al collasso è stato adottato un valore  $\psi = 0$ .

Valori di  $YSR > 1$  sono stati usati per le Ghiaie di Messina per riprodurre un limite di snervamento maggiore della tensione in situ.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011

Tabella 2. Parametri di incrudimento del terreno per il terreno di fondazione

Terreno	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$K_0$	YSR	$\nu$	$E^{ref}$ (kPa)	$m$	$E'_{50}^{ref}$ (kPa)	$E'_{oed}^{ref}$ (kPa)
Ghiaie di Messina (z < -75 m s.l.m.)	20.0	20.0	42	0.47	2.0	0.2	$4.08 \cdot 10^5$	0.6	$2.04 \cdot 10^4$	$2.04 \cdot 10^4$
Ghiaie di Messina (z > -75 m s.l.m.)	20.0	20.0	42	0.47	2.0	0.2	$1.08 \cdot 10^6$	0.1	$5.40 \cdot 10^4$	$5.00 \cdot 10^4$

La permeabilità del terreno è stata valutata sulla base delle misurazioni locali riportate nella Relazione Geotecnica del progetto d'offerta (PP/2R/A24); nelle analisi è stato adottato un valore costante di  $k = 10^{-3}$  m/s.

## 3.2 Elementi strutturali

### 3.2.1 Blocco di ancoraggio

Come già detto, il Blocco di Ancoraggio Sicilia (Existing ground level side B = Piano terra esistente, lato A e B

*Diaphragm walls = diaframmi*

Figura 9 a Bridge longitudinal axis = asse longitudinale del ponte

Figura 11) è un blocco in cemento armato di forma trapezoidale sul piano. E' lungo 100 m in direzione nord-sud; in direzione est-ovest, il lato più piccolo è lungo ca. 80 m, mentre quello più largo è lungo ca. 120 m, per cui il blocco ha una larghezza media di 100 m. In direzione est-ovest, a quote più elevate della sommità dei diaframmi longitudinali, il blocco è ca. 5 m più largo. La parte superiore e inferiore del blocco sono costituite rispettivamente da due piani diversi: la parte anteriore del blocco ha un'inclinazione di ca. 15° in alto e ca. 25° in basso; l'estremità posteriore del blocco ha un'inclinazione di ca. 7° in alto e ca. 8° in basso. La quota massima del blocco di ancoraggio si trova a +60 m s.l.m. e l'estremità più profonda della struttura si trova a +1 m s.l.m. Il blocco comprende quattro camere, di cui due per i cavi principali e le altre due da riempire con materiale granulare dopo l'installazione dei cavi principali.

L'incapacità di *Plaxis<sup>3D</sup> Foundation* di modellare piani inclinati non ha permesso di riprodurre l'esatta geometria del blocco e la pendenza del piano terra attorno al blocco. In ogni caso, si è ottenuta una stima ravvicinata della forma del blocco e della superficie del terreno descrivendo i piani inclinati come se fossero delle superfici a gradini.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

In ogni caso, il modello del blocco di ancoraggio ha la stessa forma in piano specificata nel progetto d'offerta.

La north-west top view = nord-ovest vista dall'alto; south-west bottom view= sud-ovest vista dal basso; main cables chambers detail = cavi principali dettaglio delle camere; ballast chamber = camera zavorrata; main cable chambre = Camera Cavi Principali

Figura 20 mostra una vista dall'alto nord-ovest e una vista dal basso sud-ovest del modello del blocco nonché una vista prospettica delle camere dei cavi principali.

La parte alta del blocco è stata limitata da due piani orizzontali a quota +48.5 m s.l.m. e +56 m s.l.m; la base del blocco è stata descritta, in direzione longitudinale, come una superficie a gradini riproducendo l'inclinazione delle parti inferiori del blocco sopra citate. La parte anteriore del blocco è stata modellata con tre gradini alti ca. 4.5 m (+35.2; +29.2; +25.0 e +21.0 m s.l.m.) e la parte posteriore del blocco con quattro gradini alti ca. 2 m (+8.5; +6.2; +4.0; +1.5 e 0.0 m s.l.m.).

Lungo la sezione longitudinale, le camere sono state modellate usando un numero di gradini (1 – 3) sufficiente a riprodurre la reale distribuzione dei pesi: per semplicità, le camere dei cavi principali hanno una forma leggermente diversa in piano, ma è stato mantenuto lo stesso volume.

Il blocco d'ancoraggio è stato modellato come cemento armato usando i parametri riportati in Tabella 3. Il materiale granulare per le camere zavorrate, denominato *materiale di riempimento*, è stato modellato come materiale Mohr-Coulomb con caratteristiche simili a quelle delle Ghiaie di Messina a 2.5 m al di sotto del piano terra; in particolare, è stato adottato un modulo di taglio operativo uguale al 40% di  $G_0$  delle Ghiaie di Messina insieme ai valori di coesione effettiva e ad un angolo di resistenza al taglio elencati in Tabella 3. Le camere dei cavi principali sono state riempite con del materiale lineare-elastico rigido e privo di peso, denominato *materiale vuoto*, al solo scopo di creare dei nodi del reticolo per l'applicazione delle forze di progetto.

Tabella 3. Parametri del terreno per il blocco di ancoraggio

Terreno	Modello costitutivo	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E^{ref}$ (kPa)	$G^{ref}$ (kPa)	$\nu$	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
Blocco di ancoraggio	Lineare-elastico	25.0	3.0E+07	1.3E+07	0.15	---	---
Materiale di riempimento	Mohr Coulomb	19.0	9.0E+04	3.9E+04	0.20	25	40
Materiale vuoto	Lineare-elastico	0.0	3.0E+07	1.3E+07	0.15	---	---

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

### 3.2.2 Diaframmi

La

*Final ground level = Piano terra finale*; Diaphragm wall = diaframmi

Figura 10 mostra i diaframmi necessari a sostenere lo scavo (linee rosse nella figura): ciascun diaframma è largo 2.5 m , spesso 1 m ed è caratterizzato da una lunghezza variabile. I diaframmi da installare in direzione est-ovest (diaframmi trasversali) hanno una lunghezza costante di 23 m; quelli installati lungo la direzione nord-sud (diaframmi longitudinali) hanno una lunghezza che varia da 23 m a ca. 40 m nella parte posteriore del blocco d'ancoraggio e da 27 m a 23 m nella parte frontale del blocco. Prima dell'installazione dei diaframmi, si dovrà procedere ad uno scavo a partire dal piano terra fino a scendere a ca. 12 m sulla parte anteriore del blocco ed a ca. 27 m al centro della parte posteriore del blocco (*Ground level = piano terra pre-excavation level = livello di pre-scavo* Figura 16).

La S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

Figura 21 mostra una vista prospettica del modello tridimensionale dei diaframmi. Per semplicità, non tutti i diaframmi longitudinali sono stati modellati nella loro reale lunghezza. Sono state considerate per i diaframmi 12 diverse altezze che meglio riproducono la reale quota del fondo dei diaframmi stessi; la scavo sul fondo

Figura 22 mostra uno schema dei diaframmi longitudinali insieme all'indicazione del fondo dello scavo.

La sommità dei diaframmi coincide con il livello di pre-scavo che, nel modello, ha una quota leggermente più bassa rispetto a quella reale, con il risultato di una lunghezza dei diaframmi leggermente inferiore.

La Tabella 4 riassume le quote della sommità e del fondo di ciascun diaframma, la sua lunghezza e la profondità di pre-scavo.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

Tabella 4. Geometria dei diaframmi

diaframma	sommità (m s.l.m.)	fondo (m s.l.m.)	lunghezza (m)	Profondità di pre-scavo (m)
A - 1	+17.0	+6.0	11.0	17.0-15.5
B	+21.0	+6.0	15.0	19.5
C	+25.0	+3.0	22.0	21.0
D	+28.0	+3.0	25.0	21.8
E	+32.0	0.0	32.0	25.8
F	+35.2	0.0	35.2	26.7
G	+39.0	+6.5	32.5	18.0
H	+42.5	+17.0	25.5	17.5
I	+46.0	+21.0	25.0	16.8
J	+48.5	+25.0	23.5	13.3
K - 2	+51.0	+28.0	23.0	15.8

I diaframmi sono stati modellati come elementi Plaxis *wall*. Si tratta di elementi shell con uno spessore  $d=1$  m ed un peso per volume unità di volume  $\gamma$ . Al fine di definire il loro comportamento, il codice richiede 6 valori di rigidezza, vale a dire  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{23}$ ,  $\nu_{12}$ . I valori richiesti per i moduli di rigidezza sono stati ottenuti usando la procedura sotto descritta (ved. Figura 23); la rigidezza lungo la direzione 1 è stata ottenuta come segue:

$$E_1 = E_{cls} = 3 \times 10^7 \text{ kPa} \quad (9)$$

Per tener conto della mancanza di continuità strutturale tra diaframmi contigui, il modulo elastico  $E_2$  è stato diminuito di un ordine di grandezza: la rigidezza lungo la direzione 2 è stata ottenuta come segue:

$$E_2 = \frac{E_{cls}}{10} = 3 \times 10^6 \text{ kPa} \quad (10)$$

Con lo stesso criterio, la rigidezza al taglio  $G_{12}$  e  $G_{13}$  è stata calcolata sulla base del modulo elastico del cemento armato, mentre la rigidezza al taglio  $G_{23}$  è stata ridotta di un ordine di grandezza:

$$G_{12} = G_{13} = \frac{E_{cls}}{2 \cdot (1 + \nu)} = 1.30 \times 10^7 \text{ kPa} \quad (11)$$

$$G_{23} = \frac{E_{cls} / 10}{2 \cdot (1 + \nu)} = 1.30 \times 10^6 \text{ kPa} \quad (12)$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

La Tabella 5 riassume le caratteristiche geometriche e meccaniche dei diaframmi.

Tabella 5. Caratteristiche dei diaframmi

	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	d (m)	E <sub>1</sub> (GPa)	E <sub>2</sub> (GPa)	G <sub>12</sub> = G <sub>13</sub> (GPa)	G <sub>23</sub> (GPa)	$\nu$
diaframmi	5.0	1.0	3.00×10 <sup>7</sup>	3.00×10 <sup>6</sup>	1.30×10 <sup>7</sup>	1.30×10 <sup>6</sup>	0.15

Il contatto tra i diaframmi ed il terreno viene modellato usando elementi Plaxis *interface* costituiti da otto paia di nodi, compatibili con il lato quadrilatero a 8 nodi degli elementi del terreno. Nella formulazione FE, le coordinate di ciascuna coppia di nodi sono identiche, il che significa che l'elemento ha uno spessore zero. Tuttavia, a ciascuna interfaccia viene assegnato uno "spessore virtuale", che rappresenta una dimensione immaginaria usata per calcolare le caratteristiche di rigidità dell'interfaccia. L'irregolarità dell'interazione viene modellata scegliendo un valore adeguato per il fattore di riduzione della resistenza nell'interfaccia,  $R_{inter}$ ; questo fattore si riferisce alla resistenza dell'interfaccia (attrito e adesione dei diaframmi) con la resistenza del terreno (angolo d'attrito e coesione) usando un modello elasto-plastico (criterio di Coulomb):

$$\begin{aligned}
 c_i &= R_{inter} c_{soil} \\
 \tan(\varphi_i) &= R_{inter} \tan(\varphi_{soil})
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Nelle analisi,  $R_{inter}$  è stato considerato uguale a 0.67.

### 3.2.3 Tiranti di ancoraggio

Alcuni livelli di tiranti d'ancoraggio, variabili nel numero lungo i diversi lati della fossa a seconda della profondità dello scavo, sono stati progettati per contribuire con i diaframmi al sostegno dello scavo. In genere, per ciascun livello di supporto, sono previsti uno o due tiranti d'ancoraggio per ciascun diaframma con una spaziatura orizzontale di 2,5 m. I tiranti d'ancoraggio hanno un'inclinazione sulla linea orizzontale di 15 gradi e verranno pre-tesi.

Le barre di ancoraggio ed i corpi iniettati hanno superfici e lunghezze diverse. La superficie delle barre di ancoraggio varia da 6 trefoli del diametro nominale di 0.6" a 8 trefoli del diametro nominale di; la loro lunghezza varia da 20 m a 29 m, mentre la lunghezza dei corpi iniettati varia da 10 m a 12 m.

Nelle analisi FE, i tiranti d'ancoraggio sono stati modellati come elementi Plaxis SPRINGS, che simulano i tiranti in modo semplificato senza tener conto dell'interazione tirante - terreno. A ciascuna molla viene assegnata una rigidità bi-lineare mediante un diagramma forza-

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

spostamento (T-u) (Figura 24 lato sinistro).

La forza massima del tirante d'ancoraggio è stata valutata usando il metodo proposto da Bustamante e Doix (1985) per micro-pali eseguiti mediante ripetute e selettive iniezioni:

$$T_{lim} = \pi \cdot d_g \cdot L_g \cdot \tau \quad (14)$$

dove  $d_g$  e  $L_g$  rappresentano il diametro e la lunghezza del corpo iniettato e  $\tau$  la sollecitazione al taglio in corrispondenza dell'interfaccia terreno - corpo di iniezione. Il diametro reale del corpo iniettato è  $d_g = \alpha d$ , essendo  $\alpha$  un parametro che dipende dalla tecnologia di iniezione e dalle caratteristiche meccaniche del terreno iniettato, ed essendo  $d$  il diametro nominale del corpo iniettato; nel seguito si assume  $\alpha = 1.5$  e  $d = 15$  cm.

I valori di pre-tensionamento  $T_{pret}$  dei tiranti sono stati definiti dividendo la resistenza di pelle limite  $T_{lim}$  per un fattore di 2.5.

L'estensione elastica  $u_{lim}$  della barra di ancoraggio indotta dalla forza massima  $T_{lim}$ , dipende dalla superficie  $A_{bar}$  e dalla lunghezza libera  $L_{bar}$  della barra d'ancoraggio, mediante l'equazione:

$$u_{lim} = \frac{T_{lim} \cdot L_{bar}}{E_{steel} \cdot A_{bar}} \quad (15)$$

con  $E_{steel} = 210$  GPa. La superficie media prevede 7 trefoli del diametro nominale di 0.6", mentre  $u_{lim}$  è stato valutato per ciascun valore di  $L_{bar}$ . Sulla base dei valori di  $T_{lim}$  e  $u_{lim}$  elencati in Tabella 6, calcolati per valori diversi di  $L_{bar}$ , nelle analisi sono stati adottati i valori medi di  $T_{lim}$  e  $u_{lim}$ .

Tabella 6. Caratteristiche dei tiranti d'ancoraggio

$E_{strand}$ (kPa)	$A_{bar}$ (m <sup>2</sup> )	$T_{lim}$ (kN)	$L_{bar}$ (m)	$u_{lim}$ (m)
2.10E+08	1.28E-03	1413.7	20	1.05E-01
			25	1.32E-01
			29	1.53E-01
		1555.1	20	1.16E-01
			22	1.28E-01
			1696.5	20
media		1555.0	---	1.3E-01

La spaziatura verticale dei tiranti varia da 5 a 8 m, a seconda della geometria del sistema di ancoraggio nel modello tridimensionale. Per ragioni di calcolo, la spaziatura longitudinale considerata è di 5.0 m, invece di 2.5 m come nel progetto d'offerta, per cui ciascuna molla rappresenta una coppia di tiranti d'ancoraggio. Di ciò si è tenuto conto nella definizione delle

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>0</i>	<i>Data</i> <i>13-04-2011</i>	

caratteristiche raddoppiando la resistenza di pelle limite e la forza di pre-tensionamento di ciascun tirante:  $T_{lim,mod} = 2T_{lim}$ ,  $T_{pret,mod} = 2T_{pret}$ . Inoltre, è stata posizionata una trave di collegamento alla quota di ciascun livello dei tiranti per simulare una distribuzione omogenea delle forze sui muri d'ancoraggio. Le dimensioni geometriche della trave sono state selezionate per ridurre di ca. 10 volte lo spostamento orizzontale libero di un punto posizionato tra due tiranti.

La Figura 24 (destra) mostra la relazione forza-spostamento (T-u) adottata per le molle pre-tensionate.

La

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>	

Tabella 7 riassume le caratteristiche di rigidezza assegnate alle molle nel modello numerico; i valori  $u_{\text{mod}}$  sono stati assegnati usando l'equazione:

$$u_{\text{mod}} = \left( 1 - \frac{T_{\text{pret}}}{T_{\text{lim}}} \right) \cdot u_{\text{lim}} \quad (16)$$

La Tabella 8 riassume le caratteristiche geometriche e meccaniche della trave. La Figura 25 mostra le definizioni delle varie quantità secondo il sistema di assi locale della trave. La S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

Figura 26 mostra una vista prospettica dei livelli delle molle con le travi di collegamento. La Tabella 9 riassume la quota dei livelli dei tiranti d'ancoraggio.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

Tabella 7. Caratteristiche delle molle

	Pendenza orizzontale (°)	$T_{lim,model}$ (kN)	$T_{pret,model}$ (kN)	$u_{mod}$ (m)
molle	15	3110	1245	7.80E-02

Tabella 8. Caratteristiche delle travi

	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	b (m)	h (m)	E (GPa)	$I_2$ (m <sup>4</sup> )	$I_3$ (m <sup>4</sup> )	$I_{23}$ (m <sup>4</sup> )
travi	0.0	2.3	0.5	3.0E+07	5.07E-01	2.40E-02	0

Tabella 9. Spaziatura verticale delle molle

	Quota (m s.l.m.)	interasse (m)
Sommità del muro	+51.0	---
1° livello	+46.0	5.0
2° livello	+39.0	7.0
3° livello	+32.0	7.0
4° livello	+28.0	4.0
5° livello	+21.0	7.0
6° livello	+12.5	8.5
7° livello	+6.2	6.3
8° livello	+1.5	4.7

### 3.2.4 Colonne iniettate

Una parte limitata di terreno nella zona di scavo del blocco di ancoraggio deve essere trattata usando il jet-grouting. Il trattamento, localizzato nella parte anteriore ed al centro del sito di scavo, prevede delle colonne secanti iniettate fino ad una profondità massima di 30 m (da +25.5 m s.l.m. a +7.0 m s.l.m.), con una larghezza in piano di 18.5 m e fino ad una profondità massima di 20 m (da +35 m s.l.m. a +28 m s.l.m.), con una larghezza di 7 m; le colonne iniettate saranno circoscritte da diaframmi.

Il modello 3D dell'area iniettata ha in pianta praticamente la stessa dimensione di quello del progetto reale, mentre lungo la sezione longitudinale è stata prevista una superficie a gradini caratterizzata dagli stessi volumi del progetto reale.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

La zona iniettata prevista al centro dell'area di costruzione varia da +25.0 m s.l.m. a +8.5 m s.l.m., mentre, nella parte anteriore dell'area di costruzione, è situata tra +35.2 m s.l.m. e +28.0 m

s.l.m. (*general view* = Vista generale; *jet grouting detail* = dettaglio di jet grouting;  
*S-E corner* = angolo S-E; *N-E corner* = angolo N-E; *S-O corner* = angolo S-O; *N-O corner* = angolo N-O

Figura 27).

Le caratteristiche meccaniche delle colonne iniettate sono state selezionate usando i risultati pubblicati (Croce *et al.*, 2004). La Tabella 10 riassume le quantità adottate; in particolare, si è assunta per le colonne una resistenza libera  $\sigma_c = 10$  MPa, con un rapporto  $E'/\sigma_c = 500$  ed un decadimento della rigidezza descritto da  $E'^{ref}/E'_{50}^{ref} = 2$  e  $E'_{50}^{ref}/E'_{oed}^{ref} = 1$ .

Tabella 10. Parametri di incrudimento del terreno per il terreno iniettato

Terreno	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'_{cv}$ (°)	$E'^{ref}$ (kPa)	$m$	$E'_{50}^{ref}$ (kPa)	$E'_{oed}^{ref}$ (kPa)
jet-grouting	22.0	2600	35	$5 \cdot 10^6$	0.2	$2.5 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^6$

Per il terreno iniettato è stato assunto un valore costante di permeabilità  $k = 10^{-7}$  m/s.

### 3.3 Fasi di calcolo dell'analisi

L'analisi FE tridimensionale è focalizzata principalmente sulla valutazione degli spostamenti del blocco indotti dalle forze dei cavi. A tale scopo, è stata riprodotta l'intera sequenza di costruzione tesa a riprodurre lo stato di sollecitazione del terreno esistente prima dell'applicazione delle forze dei cavi.

Le analisi sono state eseguite in termini di sollecitazioni effettive assumendo delle condizioni drenate delle Ghiaie di Messina.

Le fasi di calcolo definite nell'analisi vengono riassunte qui di seguito:

1. Calcolo dello stato di sollecitazione iniziale.
2. Fasi di pre-scavo.
3. Attivazione dei diaframmi e del jet grouting.
4. Scavo progressivo all'interno dei diaframmi fino alla base del blocco di ancoraggio con attivazione simultanea delle molle.
5. Attivazione progressiva del blocco di ancoraggio.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

6. Riempimento dell'area di pre-scavo e delle camere zavorrate con materiale granulare.
7. Riazzamento degli spostamenti ed applicazione delle forze dei cavi.
8. Analisi incrementale con aumento delle forze dei cavi (8a) o con riduzione dei parametri di resistenza del terreno (8b).

Lo stato di sollecitazione iniziale viene generato mediante la procedura  $K_0$  disponibile in *Plaxis<sup>3D</sup> Foundation*, nella quale la sollecitazione verticale iniziale effettiva  $\sigma'_{v0}$  è correlata alla sollecitazione orizzontale iniziale effettiva  $\sigma'_{h0}$  usando il coefficiente di pressione di terra a riposo  $K_0$  ( $\sigma'_{h0} = K_0 \sigma'_{v0}$ ).

Per riprodurre la superficie inclinata del terreno, si è prima definito un piano terra orizzontale nel *Input Program* di *Plaxis<sup>3D</sup> Foundation*, a quota +56 m s.l.m., e si sono poi definite le fasi di scavo nel *Calculation Program* di *Plaxis<sup>3D</sup> Foundation*, in modo da ottenere la configurazione a gradini finale della superficie del terreno, come indicato in S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

Figura 12. E' stata infine aggiunta una fase zero onde ottenere una configurazione bilanciata.

La configurazione di pre-scavo indicata in S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-W corner = angolo S-O; N-W corner = angolo N-O

Figura 15 è stata ottenuta mediante fasi di scavo successive di altezza inferiore a 4.5 m.

I diaframmi e le zone iniettate sono stati attivati usando la tecnica wished-in-place, *vale a dire* cambiando le caratteristiche dei corrispondenti gruppi di elementi.

Alla base del blocco si è arrivati mediante scavi successivi e l'installazione simultanea dei tiranti d'ancoraggio. La S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-W corner = angolo S-O; N-W corner = angolo N-O

Figura 28 mostra due viste prospettiche della configurazione più profonda dell'area scavata.

Ciascun diaframma aveva una lunghezza ed un numero di livelli di molle diversi, come riassunto in Tabella 11.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Tabella 11. Altezze di scavo per ciascun tipo di diaframma

diaframma	Lunghezza max del diaframma (m)	Numero dei livelli delle molle
A - 1	17.0 – 15.5	3
B	19.5	2
C	21.0	3
D	21.8	2
E	25.8	3
F	26.7	4
G	18.0	2
H	17.5	3
I	16.8	2
J	13.3	2
K - 2	15.8	2

La costruzione del blocco di ancoraggio è avvenuta progressivamente, usando un numero di fasi costruttive. In particolare, viene attivato prima uno strato di calcestruzzo fluido, alto ca. 3 m; viene quindi simulato l'indurimento del calcestruzzo modificando le caratteristiche dei cluster con quelle del calcestruzzo solido; viene infine aggiunto un nuovo strato di calcestruzzo fluido. Tale procedura prosegue fino al termine della costruzione del blocco. I livelli dei tiranti di ancoraggio e le corrispondenti travi di collegamento sono state progressivamente disattivate prima di attivare il cluster di calcestruzzo fluido. La Figura 29 mostra una fase intermedia di costruzione del blocco nella quale vengono installati il calcestruzzo solido e quello fluido.

L'installazione del calcestruzzo fluido è stato simulato per riprodurre la pressione laterale che agisce sul diaframma quando viene gettato il calcestruzzo. Il calcestruzzo fluido è stato assimilato ad un materiale lineare-elastico con una piccola rigidità al taglio ed un rapporto di Poisson vicino a 0.5 (Tabella 12).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

Tabella 12. Parametri Lineare-elastici del terreno per il blocco di ancoraggio

Terreno	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E^{ref}$ (kPa)	$G^{ref}$ (kPa)	$\nu$
Calcestruzzo solido	25.0	3.0E+07	1.3E+07	0.150
Calcestruzzo fluido	25.0	3.0E+02	1.0E+02	0.495

Al termine della costruzione del blocco, la zona di pre-scavo è stata riempita con materiale granulare per ripristinare la superficie originale del terreno. Il materiale di riempimento è stato assimilato ad un materiale elastico-perfettamente plastico secondo il criterio di collasso di Mohr-Coulomb; le sue caratteristiche sono quelle elencate in Tabella 3.

I carichi da applicare al Blocco di Ancoraggio Sicilia sono stati quelli ottenuti dalle analisi strutturali del progetto d'offerta. La Tabella 13 indica le tre condizioni di carico corrispondenti agli stati limite SILS, SLS2 e ULS; i valori delle forze dei cavi elencati in Tabella 13 comprendono i fattori di carico parziale. Le forze sono rivolte verso l'alto, con un'inclinazione di 15 gradi rispetto all'orizzontale. Nel § 4 viene inoltre discussa l'influenza delle forze dei cavi calcolata usando il modello IBIDAS globale versione 3.3b (Tabella A.1 – Tabella A.2) e versione 3.3f (Tabella B.1 – Tabella B.2).

Tabella 13. Forze dei cavi nel Blocco di Ancoraggio Sicilia (progetto d'offerta)

Situazione di carico	Forze nel cavo principale
SILS	3146 MN
SLS2	3250 MN
ULS	3964 MN

Nel modello tridimensionale, per ogni condizione di carico, le forze sono state divise tra i due cavi principali; ciascuna forza viene applicata in un punto (ved. punto T.S. in

Final ground level = Piano terra finale; Diaphragm wall = diaframmi

Figura 10). La Figura 30 e la design forces = forze di progetto anchor block = blocco di ancoraggio diaphragm walls = diaframmi

Figura 31 mostrano una vista prospettica ed una vista frontale del blocco di ancoraggio e delle forze applicate.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>	

Le forze dei cavi sono state applicate per fasi per ridurre la forza di squilibrio della procedura di calcolo. Per raggiungere la forza corrispondente allo stato limite SILS , sono stati adottati 11 incrementi; l'incremento successivo raggiunge la situazione di carico SLS2 e con altri due incrementi si ottiene la condizione dello stato limite ULS.

In queste analisi FE 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 dello stato limite, il progettista dovrebbe valutare e confrontare le Azioni di Progetto con le Resistenze di Progetto. Se le azioni sono inferiori o uguali alle resistenze, si ha una prestazione soddisfacente del blocco di ancoraggio nei confronti dello stato limite ultimo. Nelle analisi FE , similmente a quelle descritte nei precedenti paragrafi, tale confronto non ha alcun significato in quanto o l'analisi numerica converge verso una soluzione o non lo fa, vale a dire che la convergenza non è raggiunta. Queste due opzioni dipendono fortemente dagli algoritmi presenti nel software (un calcolo può non convergere perchè una piccola parte non significativa del modello è soggetta ad un'elevata deformazione da taglio).

Quindi, per valutare la sicurezza del blocco di ancoraggio a fronte del verificarsi di uno stato limite, è stata eseguita una serie di analisi incrementali aventi lo scopo di valutare la "distanza" da una condizione di collasso generale. In particolare, partendo dalle condizioni di carico SILS, SLS2 e ULS, sono state condotte delle analisi, nelle quali i carichi sono stati aumentati fino allo sviluppo di spostamenti sostanziali che indicavano che si stava per raggiungere un meccanismo di collasso.

Un altro modo possibile per valutare la sicurezza a fronte di stati limite ultimi è quello di eseguire analisi di riduzione  $\phi' - c'$  , nelle quali le caratteristiche di resistenza dei terreni vengono gradualmente ridotte fino ad avvicinarsi ad un meccanismo di collasso. Tale procedura non ha potuto essere applicata al Blocco di Ancoraggio Sicilia a causa dell'instabilità locale della superficie del terreno a gradini, non orizzontale verificatasi nella fase di riduzione di  $\phi'$  e  $c'$ .

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_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 Ghiaie di Messina con rigidità minore

Ghiaie di Messina con rigidità maggiore  
 Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale

Figura 32 mostra il reticolo FE deformato per la condizione di carico ULS, con scala maggiorata di 300 volte.

La risposta del blocco di ancoraggio all'applicazione dei carichi esterni consiste principalmente in una traslazione verso la torre Sicilia associata ad una rotazione verso il basso. In particolare, sulla base degli spostamenti calcolati, sono stati valutati due meccanismi di deformazione: uno di pura traslazione e l'altro di roto-traslazione attorno al centro di gravità.

Il primo meccanismo è caratterizzato dallo spostamento medio e dall'inclinazione media  $\alpha$ , così come ottenuti dalle quantità calcolate al centro di gravità e nei nodi selezionati del blocco; l'altro è caratterizzato dallo spostamento del centro di gravità e dalla rotazione attorno ad esso.

La Figura 33 mostra la configurazione del blocco non deformata (in nero) e quella deformata (in rosso, con maggiorazione della scala di 200 volte) ottenute per il primo meccanismo, per la condizione di carico ULS. La Figura 34 mostra la traslazione del centro di gravità (con maggiorazione della scala di 200 volte) e la relativa direzione nonché la rotazione dell'intero blocco attorno ad esso nella situazione di carico ULS.

Per i risultati sono stati selezionati dieci punti illustrati in Figura 35. A causa della simmetria del problema, tutti i punti sono stati localizzati lungo la sezione longitudinale attraverso il centro di gravità, a diverse quote dell'estremità posteriore e della parte anteriore del blocco; il punto *F* è all'interno del blocco. I punti *A* e *B* sono situati sulla sommità del blocco, a +56.0 m s.l.m.; i punti *C* e *D* si trovano a +48.4 m s.l.m.; i punti *E*, *F* e *G* a +21.0 m s.l.m.; i punti *H* e *I* a +8.5 m s.l.m. e il punto *J* a 0.0 m s.l.m.

La Tabella 14 – Tabella 16 riportano gli spostamenti calcolati, la loro inclinazione  $\alpha$  rispetto alla linea orizzontale e la rotazione attorno al centro di gravità per le tre condizioni di carico elencate in Tabella 13, insieme ai loro valori medi. Gli spostamenti massimi orizzontali (direzione *X*) e verticali (direzione *Y*) sono contrassegnati in grassetto.

La Tabella 17 riassume lo spostamento del centro di gravità, la sua inclinazione rispetto alla linea orizzontale e la rotazione attorno al baricentro del Blocco di Ancoraggio Sicilia, per i due meccanismi cinematici e per le tre condizioni di carico considerate nel progetto d'offerta.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>	

In condizioni di carico SILS, lo spostamento medio è di ca. 27 mm e l'inclinazione media  $\alpha$  è di ca. 14° rispetto alla linea orizzontale; nelle condizioni di carico SLS2, lo spostamento medio è di ca. 28 mm e l'inclinazione media  $\alpha$  è di nuovo di ca. 14° rispetto alla linea orizzontale; nelle condizioni di carico ULS, lo spostamento medio è di ca. 35 mm e l'inclinazione media è di nuovo  $\alpha = 14^\circ$  rispetto alla linea orizzontale.

E' opportuno notare che l'inclinazione  $\alpha$  calcolata nelle analisi tridimensionali è in ottimo accordo con quella ottenuta nelle analisi piano-deformazione ( $\alpha = 14.2$ ) eseguite per valutare gli spostamenti del blocco indotti dal sisma, discussi nella relazione guida "Blocco di ancoraggio Sicilia: spostamenti indotti dal sisma e sicurezza nei confronti degli stati limite ultimi".

Tabella 14. Spostamenti dei punti selezionati al termine della situazione di carico SILS (F=3146 MN)

punto	X (m)	Y (m)	$U_x$ (mm)	$U_y$ (mm)	$ U $ (mm)	$\alpha$ (°)	$\beta_{CG}$ (°)
A	240.0	56.0	<b>34.70</b>	-7.85	35.58	-12.74	0.04
B	212.6	56.0	34.26	2.91	34.38	4.86	0.04
C	240.0	48.5	31.53	-7.82	32.49	-13.93	0.04
D	170.0	48.5	27.70	11.29	29.91	22.17	0.02
E	212.6	21.0	21.83	2.17	21.94	5.69	0.07
F	155.0	0.0	21.86	7.51	23.11	18.96	0.02
G	155.0	21.0	21.68	<b>14.25</b>	25.94	33.31	0.02
H	212.6	8.5	18.59	2.05	18.70	6.31	0.05
I	155.0	8.5	19.02	14.16	23.71	36.66	0.01
J	155.0	0.0	17.04	13.97	22.04	39.35	0.01
CG	193.0	28.0	23.54	6.75	24.49	15.99	---
media	---	---	---	---	26.57	14.24	0.031

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

Tabella 15. Spostamenti dei punti selezionati al termine della situazione di carico SLS2 (F=3250 MN)

punto	X (m)	Y (m)	U <sub>x</sub> (mm)	U <sub>y</sub> (mm)	U  (mm)	α (°)	β <sub>CG</sub> (°)
A	240.0	56.0	<b>36.04</b>	-8.18	36.96	-12.79	0.04
B	212.6	56.0	35.58	3.00	35.70	4.83	0.04
C	240.0	48.5	32.75	-8.16	33.75	-13.99	0.04
D	170.0	48.5	28.78	11.73	31.08	22.18	0.02
E	212.6	21.0	22.66	2.24	22.77	5.64	0.07
F	155.0	0.0	22.69	7.80	23.99	18.96	0.02
G	155.0	21.0	22.51	<b>14.82</b>	26.95	33.36	0.02
H	212.6	8.5	19.29	2.11	19.40	6.25	0.04
I	155.0	8.5	19.74	14.73	24.63	36.73	0.01
J	155.0	0.0	17.67	14.54	22.88	39.43	0.01
CG	193.0	28.0	24.44	7.00	25.42	15.98	---
media	---	---	---	---	27.59	14.23	0.031

Tabella 16. Spostamenti dei punti selezionati al termine della situazione di carico ULS (F=3964 MN)

punto	X (m)	Y (m)	U <sub>x</sub> (mm)	U <sub>y</sub> (mm)	U  (mm)	α (°)	β <sub>CG</sub> (°)
A	240.0	56.0	<b>45.29</b>	-10.51	46.49	-13.06	0.05
B	212.6	56.0	44.70	3.61	44.85	4.62	0.06
C	240.0	48.5	41.13	-10.47	42.44	-14.29	0.05
D	170.0	48.5	36.24	14.81	39.15	22.23	0.01
E	212.6	21.0	28.40	2.66	28.52	5.35	0.07
F	155.0	0.0	28.45	9.76	30.07	18.93	0.02
G	155.0	21.0	28.24	<b>18.77</b>	33.91	33.61	0.02
H	212.6	8.5	24.11	2.51	24.24	5.93	0.04
I	155.0	8.5	24.69	18.66	30.95	37.08	0.01
J	155.0	0.0	22.06	18.42	28.74	39.87	0.01
CG	193.0	28.0	30.68	8.73	31.90	15.89	---
media	---	---	---	---	34.66	14.20	0.030

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Tabella 17. Sommario degli spostamenti e delle rotazioni per i due meccanismi cinematici e per le tre situazioni di carico

Situazioni di carico	Traslazione		Roto-traslazione		
	$ U _{av}$ (mm)	$\alpha_{av}$ (°)	$ U _{CG}$ (mm)	$\alpha_{CG}$ (°)	$\beta_{CG}$ (°)
SILS	26.6	14.2	24.49	15.99	0.031
SLS2	27.6	14.2	25.42	15.98	0.031
ULS	34.7	14.2	31.90	15.89	0.030

## 4.2 Curve carico – spostamento: analisi incrementale

I commenti sul significato di un calcolo ULS eseguito usando analisi numeriche giustificano l'uso di curve carico-spostamento come strumento di valutazione della sicurezza del blocco di ancoraggio nei confronti degli stati limite ultimi. Nel seguito, verranno riportate e commentate le curve carico-cedimento dei punti selezionati.

Prima di avviare le analisi incrementali, gli spostamenti calcolati nelle fasi preliminari di scavo e costruzione del blocco sono stati riazzerati, cosicché le curve carico-spostamento discusse nel seguito si riferiscono solo all'applicazione dei carichi esterni. Le fasi di scavo e costruzione sono state infatti solo simulate per riprodurre lo stato di sollecitazione all'inizio del processo di carico.

Le curve carico-spostamento calcolate con le analisi incrementali dei dieci punti selezionati sono tracciate dalla Tender design = progetto d'offerta

Figura 36 alla Tender design = progetto d'offerta

Figura 38. La Tender design = progetto d'offerta

Figura 39 e la Tender design = progetto d'offerta

Figura 40 mostrano l'aumento rotazionale degli allineamenti orizzontali e verticali rispettivamente, con carico in aumento. 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 con il 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 fornite dai modelli IBDAS globali comportano delle differenze trascurabili nel campo degli spostamenti del blocco di ancoraggio. I commenti che seguono si riferiscono alle forze dei cavi del progetto d'offerta che hanno fornito valori più alti per le condizioni di carico ULS.

Dai dati in Tabella 14 – Tabella 16 e dalla Tender design = progetto d'offerta

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

Figura 36 – Tender design = progetto d'offerta

Figura 40 è possibile osservare che:

- dalle condizioni di carico SILS alle condizioni di carico ULS, vale a dire in presenza di un aumento della forza di progetto di ca. il 26%, gli spostamenti massimi orizzontali ( $X$ ) e verticali ( $Y$ ) aumentano rispettivamente di ca. il 30.5% ed il 32%;
- i cedimenti dei punti appartenenti agli stessi allineamenti verticali e orizzontali non sono gli stessi a causa di una piccola deformazione del blocco d'ancoraggio;
- le differenze nelle curve carico-rotazione di tutti gli allineamenti, ad eccezione degli allineamenti E – G e H – I, possono di nuovo essere attribuite ad una piccola deformazione del blocco di ancoraggio;
- i punti A e C hanno uno spostamento negativo nel senso che si muovono verso il basso, a causa della rotazione antioraria del blocco.

Per valutare il carico ultimo di collasso e quindi la "distanza" dallo sviluppo di un meccanismo di collasso nel terreno attorno al blocco di ancoraggio, si può eseguire il miglior adeguamento iperbolico delle curve carico-spostamento. La Figura 41 mostra le curve carico - spostamento in un diagramma, dove  $|u|$  è sull'asse x e  $|u|/|F|$  è sull'asse y; in questo modo, le curve, ad eccezione della loro parte iniziale, si muovono lungo una linea con un'inclinazione rispetto all'orizzontale indicata con  $n$ . La forza massima è il valore limite del carico in quanto lo spostamento si avvicina all'infinito, vale a dire  $F_{max}=1/n$ ; in genere, questo valore viene assunto prudenzialmente come  $F_{max}=0.9/n$ .

Il campo dei valori di  $n$  e  $F_{max}$  è indicato in figura: si è valutato che  $F_{max}$  possa variare tra 15100 MN e 16500 MN, che, nella condizione di carico ULS, dà un fattore di sicurezza globale di 3.75 - 4.15.

### 4.3 Risultati di Plaxis<sup>3D</sup> Foundation

Qui di seguito verrà presentata una scelta dei risultati delle fasi interessate. Secondo i segni convenzionali di *Plaxis<sup>3D</sup> Foundation*, le sollecitazioni e le deformazioni da compressione sono negative.

Lo stato di sollecitazione del terreno durante le fasi principali delle analisi viene indicato usando i contorni del relativo rapporto di sollecitazione da taglio  $\tau_{rel}$ , che dà un'indicazione della prossimità dello stato di sollecitazione rispetto alla resistenza al taglio disponibile definito come segue:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

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

dove  $\tau_{mob}$  è la resistenza al taglio mobilizzata (vale a dire il raggio del cerchio di sollecitazione di Mohr) e  $\tau_{max}$  è il valore massimo della sollecitazione al taglio nel caso in cui il cerchio di Mohr venga espanso per toccare l'involuppo del collasso di Coulomb, pur mantenendo costante il centro del cerchio di Mohr.

Nel seguito, le figure saranno riferite a due sezioni: una sezione longitudinale attraverso il centro di gravità del blocco, in direzione nord-sud, con  $Z = 225$  m, ed una sezione trasversale, in direzione est-ovest, con  $X = 172$  m.

#### 4.3.1 Stato di sollecitazione del terreno

La Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale*  
*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

*Figura 42 e la Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale*  
*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

*Figura 43* mostrano i contorni della sollecitazione relativa al taglio calcolata nelle sezioni longitudinale e trasversale rispettivamente nella fase iniziale ed in quella finale di scavo. Al termine dello scavo, si osserva un grado elevato di mobilizzazione della resistenza al taglio nel terreno vicino ai diaframmi.

Al termine della costruzione del blocco, i contorni di  $\tau_{rel}$  indicati in Suspension bridge *longitudinal axis =*  
*ponte sospeso      asse longitudinale*  
*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

*Figura 44* mostrano una diminuzione della resistenza al taglio mobilizzata dovuta ad un aumento della sollecitazione effettiva normale indotta dal peso del blocco di ancoraggio.

La Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale*  
*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

*Figura 45* mostra i contorni di  $\tau_{rel}$  calcolati per la situazione di carico SILS (forza di progetto minima), mentre la *East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

*Figura 47* si riferisce alla condizione di carico ULS (forza di progetto massima).

L'applicazione delle forze dei cavi provoca un aumento della resistenza al taglio mobilizzata nell'estremità posteriore del blocco ed una riduzione alla sua base, sebbene i valori di  $\tau_{rel}$  indotti dalle condizioni di carico ULS siano maggiori di quelli ottenuti per la situazione di carico SILS.

La Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale*  
*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

Figura 46 e la Figura 48 mostrano le sollecitazioni normali effettive che agiscono sugli elementi di interfaccia terreno-muro dei diaframmi trasversali (direzione est-ovest) rispettivamente per le condizioni di carico SILS e ULS. Per entrambe le condizioni di carico esaminate, SILS e ULS, la sollecitazione normale da compressione agisce sui diaframmi anteriori e posteriori con valori massimi di  $-280 \div -300$  kPa per la condizione di carico SILS e di  $-300 \div -360$  kPa per la condizione di carico ULS.

Per la condizione di carico ULS, la Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale*

Figura 49 mostra i contorni della sollecitazione verticale effettiva  $\sigma_{YY}$  e della sollecitazione orizzontale effettiva  $\sigma_{XX}$  che agiscono sul piano orizzontale in corrispondenza di  $Y = 42.5$  m s.l.m.,

mentre la Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale*

*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

Figura 50 mostra i contorni della sollecitazione orizzontale effettiva  $\sigma_{XX}$  che agisce nella sezione longitudinale e della sollecitazione orizzontale effettiva  $\sigma_{ZZ}$  che agisce nella sezione trasversale.

Infine, nuovamente per la condizione di carico ULS, la Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso*

*asse longitudinale*

*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

Figura 51 mostra i contorni della sollecitazione verticale effettiva  $\sigma_{YY}$  calcolata nelle sezioni longitudinale e trasversale del blocco di ancoraggio.

#### 4.3.2 Spostamenti

La Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale*

*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

Figura 52 mostra i contorni degli spostamenti verticali indotti nel suolo di fondazione dalla costruzione del blocco con cedimenti massimi di ca. 50 mm, dove i contorni mostrano che i cedimenti si avvicinano allo zero a ca. -65 m s.l.m., vale a dire ad una profondità di ca. 60 m al di sotto della base del blocco.

Le Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale*

*N-E corner = angolo N-E; S-E corner = angolo S-E; N-W corner = angolo N-O; S-W corner = angolo S-O*

Figura 53 – Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale*

*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

Figura 56 mostrano i contorni degli spostamenti calcolati per la condizione di carico SILS (forza di progetto minimo), mentre le Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale*

*N-E corner = angolo N-E; S-E corner = angolo S-E; N-W corner = angolo N-O; S-W corner = angolo S-O*

Figura 57 – Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale*

*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Figura 60 si riferiscono alla condizione di carico ULS (forza di progetto massima). I campi degli spostamenti discussi qui di seguito si riferiscono solo all'applicazione delle forze dei cavi, in quanto gli spostamenti indotti dalle precedenti fasi di scavo e di costruzione del blocco sono stati riassetati prima della loro applicazione.

Gli spostamenti tracciati in Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale*  
*N-E corner = angolo N-E; S-E corner = angolo S-E; N-W corner = angolo N-O; S-W corner = angolo S-O*

Figura 53 per le condizioni di carico SILS mostrano che i valori massimi vengono raggiunti nel punto di applicazione delle forze dei cavi; il massimo spostamento sulla sommità del blocco di ancoraggio si trova tra 32 e 36 mm; gli spostamenti nel terreno in superficie si avvicinano allo zero ad una distanza di ca. 100 m dal fronte del blocco ( $X = 350$  m). In direzione trasversale, gli spostamenti del terreno diventano trascurabili ad una distanza di ca. 90 m dai lati del blocco. La Figura 54 mostra due viste prospettiche dei contorni degli spostamenti del blocco di ancoraggio.

La Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale*  
*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

Figura 55 e la Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale*  
*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

Figura 56 mostrano i contorni degli spostamenti orizzontali (direzione  $X$ ) e verticali (direzione  $Y$ ) calcolati nelle sezioni centrali longitudinali e trasversali.

Gli spostamenti tracciati in Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale*  
*N-E corner = angolo N-E; S-E corner = angolo S-E; N-W corner = angolo N-O; S-W corner = angolo S-O*

Figura 57 per la condizione di carico ULS mostrano che i valori massimi vengono raggiunti nel punto di applicazione delle forze dei cavi; lo spostamento totale massimo sulla sommità del blocco si trova tra 44 e 48 mm; gli spostamenti nel terreno a livello di terra si avvicinano allo zero ad una distanza di ca. 110 m dalla parte anteriore del blocco ( $X = 360$  m). Di nuovo, in direzione trasversale, gli spostamenti del terreno diventano trascurabili ad una distanza di ca. 90 m dai lati del blocco come nel caso della condizione di carico SILS. La

*suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale; north-west top view = nord-ovest vista dall'alto; south-west bottom view = sud-ovest vista dal basso; ballast chamber = camera zavorrata*

Figura 58 mostra due viste prospettiche dei contorni di spostamento del blocco di ancoraggio.

La Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale*  
*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

Figura 59 e la Suspension bridge *longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale*  
*North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

Figura 60 mostrano i contorni degli spostamenti orizzontali (direzione  $X$ ) e verticali (direzione  $Y$ ) calcolati nelle sezioni centrali longitudinali e trasversali.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>0</i>	<i>Data</i> <i>13-04-2011</i>	

## 5 CONCLUSIONI

Nella presente relazione, si è studiato il comportamento del Blocco di Ancoraggio Sicilia, cui sono state applicate le condizioni di carico SILS, SLS2 e ULS, mediante l'analisi statica FE tridimensionale usando il codice *Plaxis<sup>3D</sup> Foundation*. I calcoli si basano sui disegni e sulle forze dei cavi previsti nel progetto d'offerta; si tiene anche 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 nei confronti degli stati limite ultimi viene discussa nella relazione guida "Blocco di ancoraggio Sicilia: spostamenti indotti dal sisma e sicurezza nei confronti degli stati limite ultimi".

Il Blocco di Ancoraggio Sicilia è un blocco in cemento armato massiccio di forma trapezoidale in piano. E' lungo 100 m in direzione nord-sud, mentre in direzione est-ovest il lato più piccolo ha una lunghezza di 80 m e quello più grande una lunghezza di 120 m, con il risultato di una larghezza media di 100 m. In direzione est-ovest, a quote più elevate della parte alta dei diaframmi longitudinali, il blocco è più largo di ca. 5 m.

La parte alta e la parte bassa del blocco sono costituite da due piani diversi: la parte anteriore del blocco ha un'inclinazione di ca. 15° in alto e ca. 25° in basso; l'estremità posteriore del blocco di ancoraggio ha un'inclinazione di ca. 7° in alto e ca. 8° in basso. La quota massima del blocco è di +60 m s.l.m., mentre l'estremità più profonda della struttura si trova a +1 m s.l.m.

Il blocco di ancoraggio comprende quattro camere, di cui due per i cavi principali e le altre due da riempire con materiale granulare dopo l'installazione dei cavi principali.

Lo scavo necessario per la costruzione del blocco è sostenuto da diaframmi dello spessore di 1.0 m e della larghezza di 2.5 m, la cui lunghezza varia a seconda della forma del blocco. Il sistema di ancoraggio a terra comprende livelli di tiranti che variano di numero lungo i diversi lati della fossa. Al centro e di fronte al sito di costruzione è prevista l'iniezione di colonne fino ad una profondità massima di 30 m con uno spessore di 18.5 m e ad una profondità massima di 20 m con uno spessore di 7 m rispettivamente; le colonne iniettate sono circoscritte dai diaframmi.

Sulla costa siciliana, partendo dal piano terra e scendendo verso il basso si incontrano le seguenti unità: *Depositi Costieri* (Coastal Deposits); *Ghiaie di Messina* (Messina Gravel); *Depositi Continentali* (Continental Deposits); *Conglomerato di Pezzo* (Pezzo Conglomerate); *Cristallino* (Crystalline bedrock). Per il Blocco di Ancoraggio Sicilia, l'unità geologica di interesse sono le Ghiaie di Messina caratterizzate da un aumento della rigidità al tagli in presenza di piccola deformazione ad una quota di ca. -75 m s.l.m.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Il reticolo FE tridimensionale usato nelle analisi è lungo 400 m in direzione parallela rispetto all'asse del ponte, largo 450 m in direzione ortogonale all'asse del ponte e alto 150 m, considerando la quota massima del piano terra a +56.0 m s.l.m. Il livello di falda coincide con il livello del mare a 0 m s.l.m.

Nelle analisi FE, il comportamento meccanico del terreno è stato descritto usando il modello di Incrudimento del Suolo; si tratta di un modello elasto-plastico indipendente dalla velocità con incrudimento isotropo in grado di riprodurre la non linearità del terreno a causa del verificarsi di deformazioni plastiche dall'inizio del processo di carico. Il calcestruzzo del blocco ed il materiale di zavorra sono stati descritti come materiali lineari elastici. I diaframmi sono stati modellati come elementi WALL shell ed i tiranti di ancoraggio come elementi SPRINGS. Il terreno iniettato è stato assimilato ad un materiale elasto-plastico con il criterio di collasso di Mohr-Coulomb.

Le analisi FE sono state eseguite con lo scopo principale di valutare il campo degli spostamenti e lo stato delle sollecitazioni indotte nel terreno di fondazione dalle forze dei cavi. A tale scopo, l'intera sequenza costruttiva è stata simulata nelle analisi che sono state eseguite in termini di sollecitazioni effettive, assumendo condizioni drenate del terreno. E' stata considerata la seguente sequenza di fasi: calcolo dello stato di sollecitazione iniziale; pre-scavo dell'area di costruzione; attivazione dei diaframmi e del jet grouting; scavo progressivo di raggiungimento della base del blocco di ancoraggio con attivazione simultanea dei livelli dei tiranti; attivazione progressiva del blocco di ancoraggio; riempimento della zona pre-scavata e delle camere zavorrate con materiale granulare; applicazione dei carichi di progetto (condizioni di carico SILS, SLS2 e ULS); analisi incrementale con forze esterne in aumento.

Le forze nei cavi principali del blocco di ancoraggio Sicilia sono state fornite dalle analisi strutturali per tre diverse combinazioni di carichi del progetto d'offerta (SILS, SLS2 e ULS). La direzione della forza è inclinata di 15 gradi rispetto all'orizzontale e rivolta in alto, verso la torre Sicilia. Viene pure discussa l'influenza delle forze dei cavi calcolate usando il modello IBDAS globale, versione 3.3b e versione 3.3f.

Partendo dagli spostamenti calcolati, sono stati ricostruiti per il blocco due meccanismi cinematici: uno di pura traslazione e l'altro di roto-traslazione attorno al centro di gravità. Nelle condizioni di carico SILS, SLS2 e ULS, lo spostamento medio è di ca. 27 mm, 28 mm e 35 mm, rispettivamente; l'inclinazione media è di ca. 14° rispetto all'orizzontale per tutte le condizioni di carico (SILS, SLS2 e ULS). Il comportamento del blocco di ancoraggio all'applicazione dei carichi esterni consiste principalmente in un movimento traslatorio in direzione della torre associato ad una rotazione verso il basso.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>0</i>	<i>Data</i> <i>13-04-2011</i>	

Una valutazione del carico di collasso ultimo eseguita per il blocco usando il miglior adeguamento iperbolico dei dati carico-spostamento ha fornito un carico ultimo che varia tra 15100 e 16500 MN. Ciò comporta un fattore di sicurezza nei confronti delle forze incrementali esterne di 3.75 - 4.15 per la condizione di carico ULS .

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

## 6 FIGURE

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>0</i>	<i>Data</i> <i>13-04-2011</i>	

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		Codice documento PF0065_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

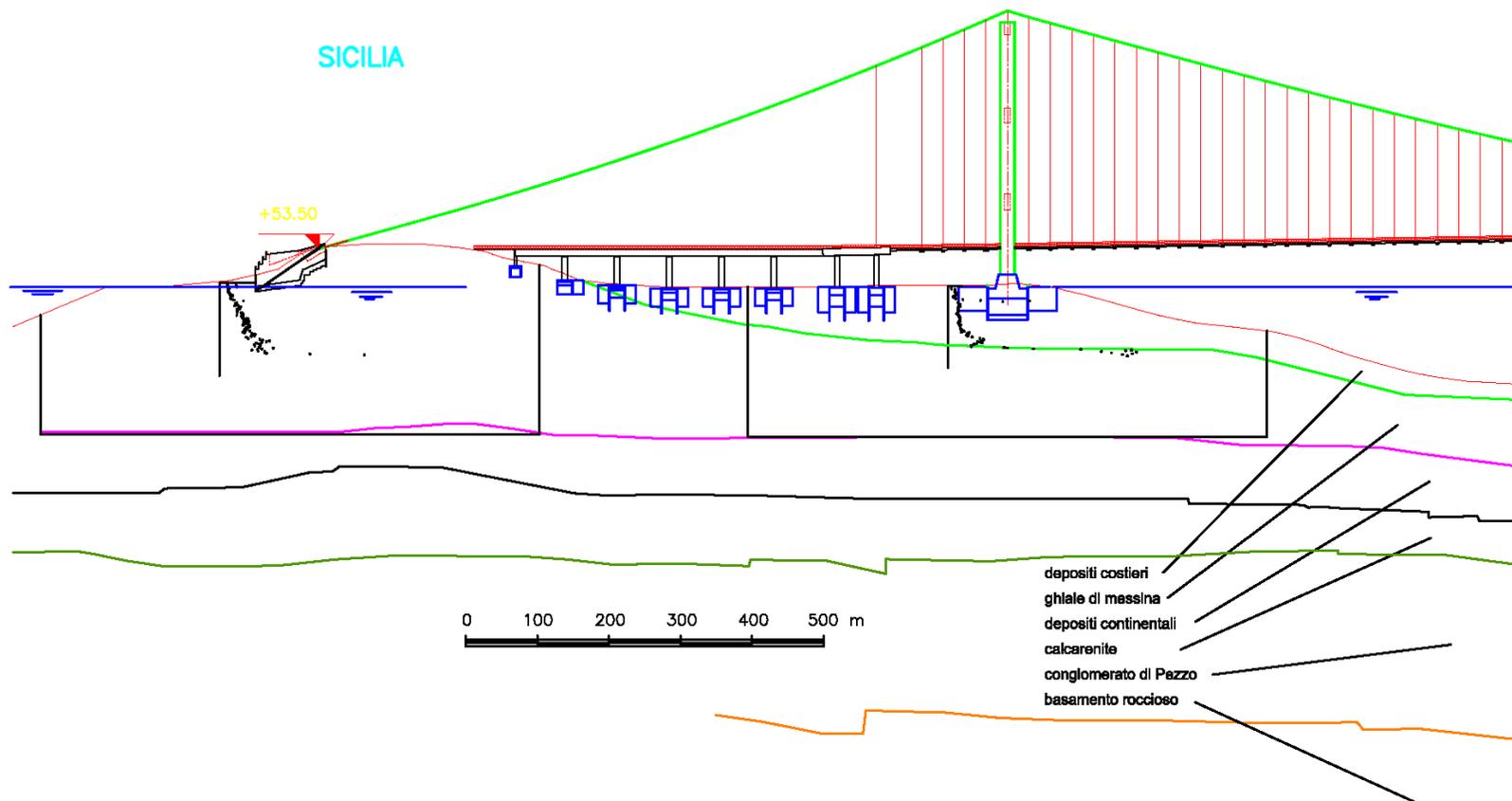
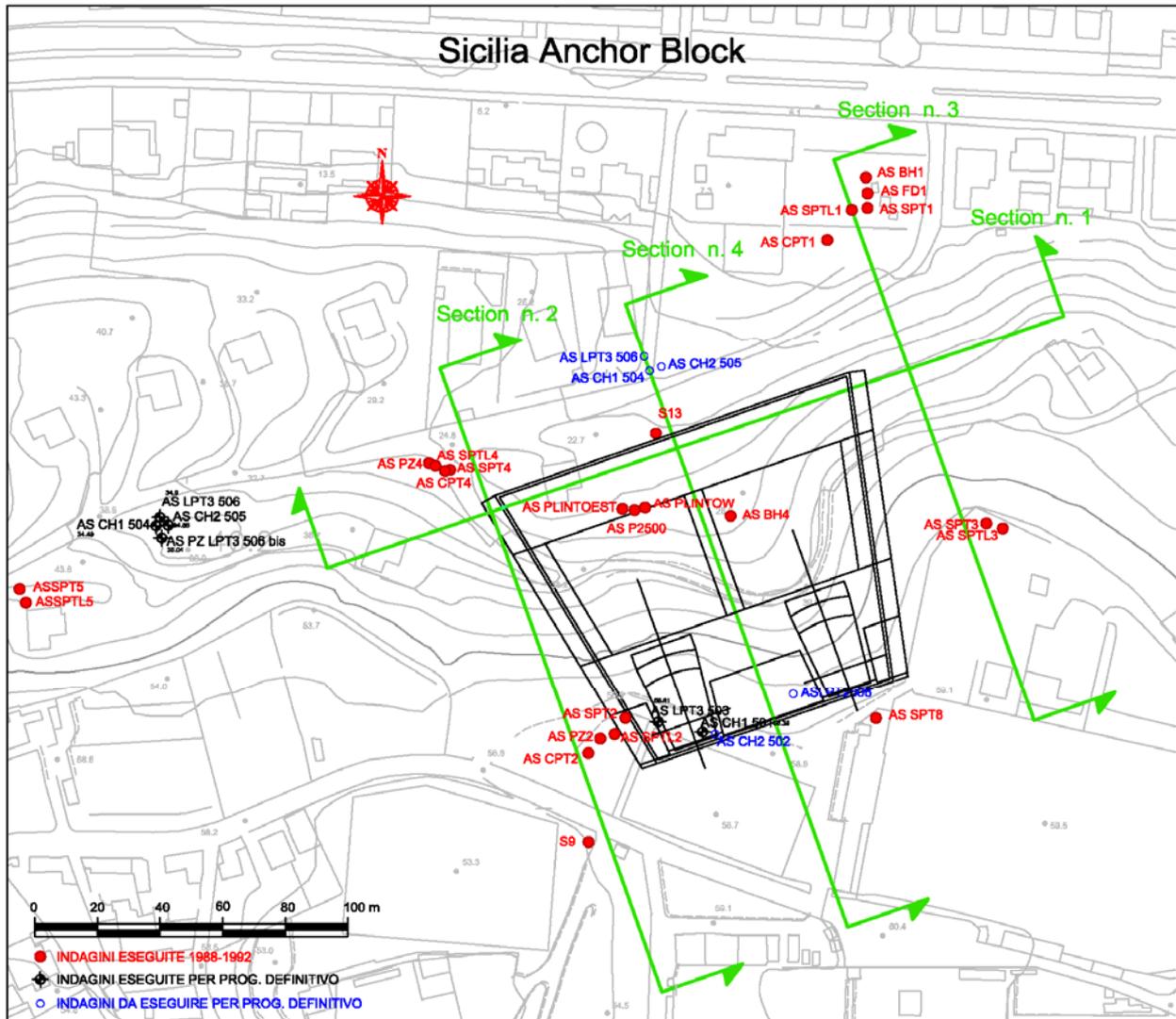


Figura1. Profilo del terreno sulla costa siciliana dello Stretto di Messina

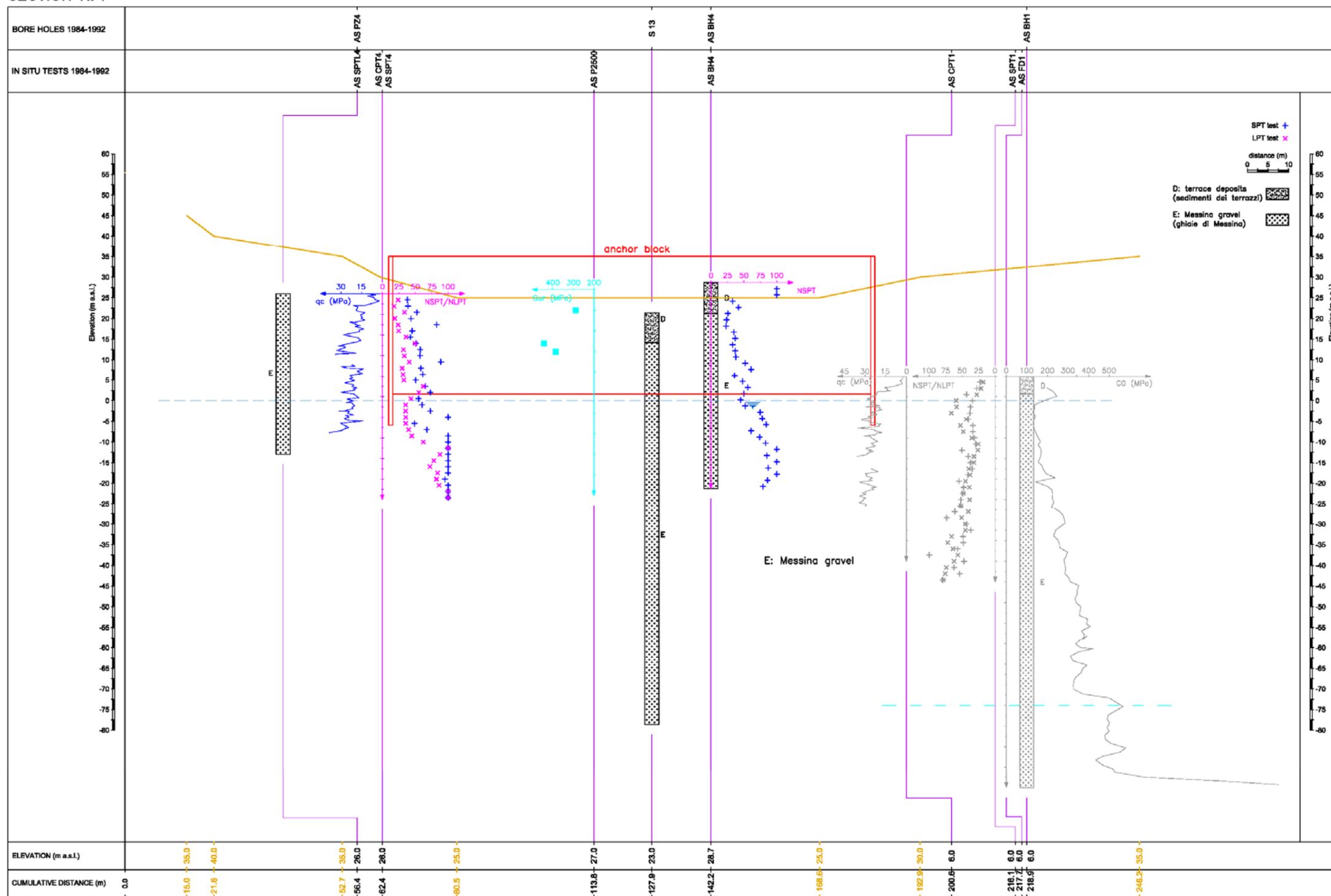
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	



Sicilia Anchor Block = Blocco di ancoraggio Sicilia

Figura 2. Vista in pianta del blocco di ancoraggio Sicilia

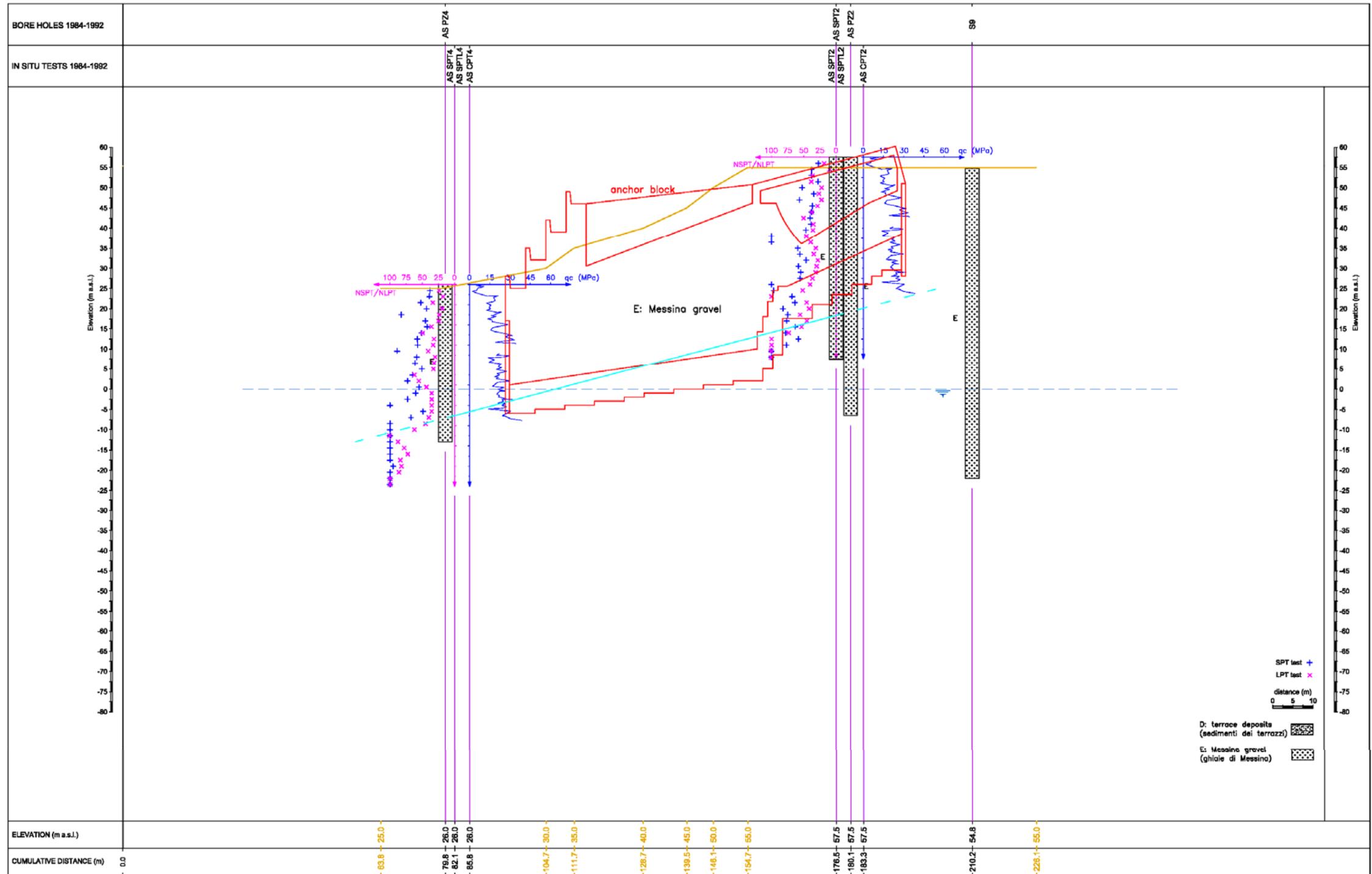
SECTION N. 1



SECTION 1 = SEZIONE 1 – Boreholes = Fori di trivellazione In situ tests = Prove locali Elevation = Quota Cumulative distance = Distanza cumulativa Anchor block = Blocco d'ancoraggio

Figura 3. Sezione trasversale (sezione n. 1)

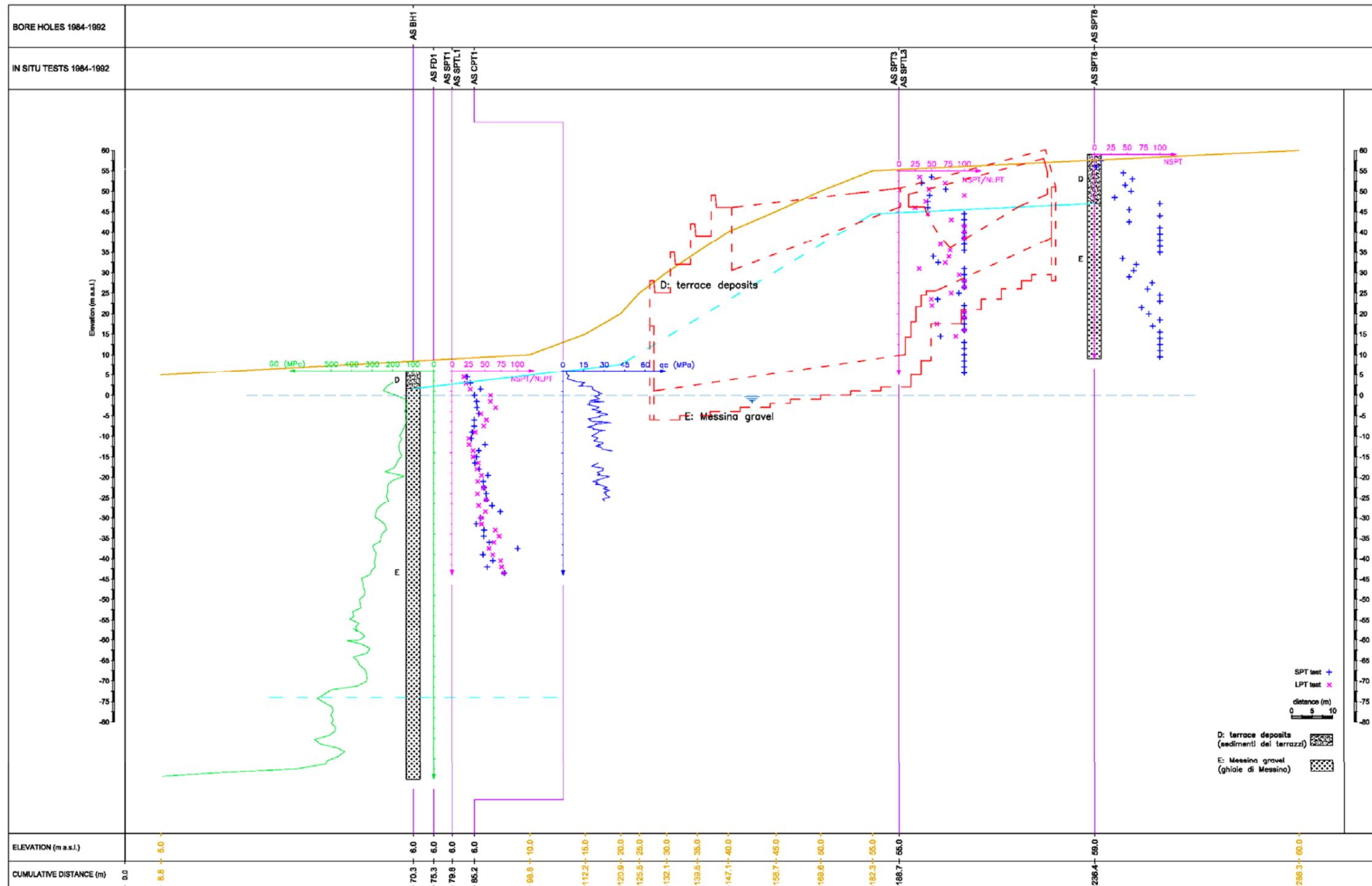
SECTION N. 2



SECTION 2 - Boreholes = Fori di trivellazione    In situ tests = Prove locali    Elevation = Quota    Cumulative distance = Distanza cumulativa    Anchor block = Blocco d'ancoraggio

Figura 4. Sezione longitudinale (sezione n. 2)

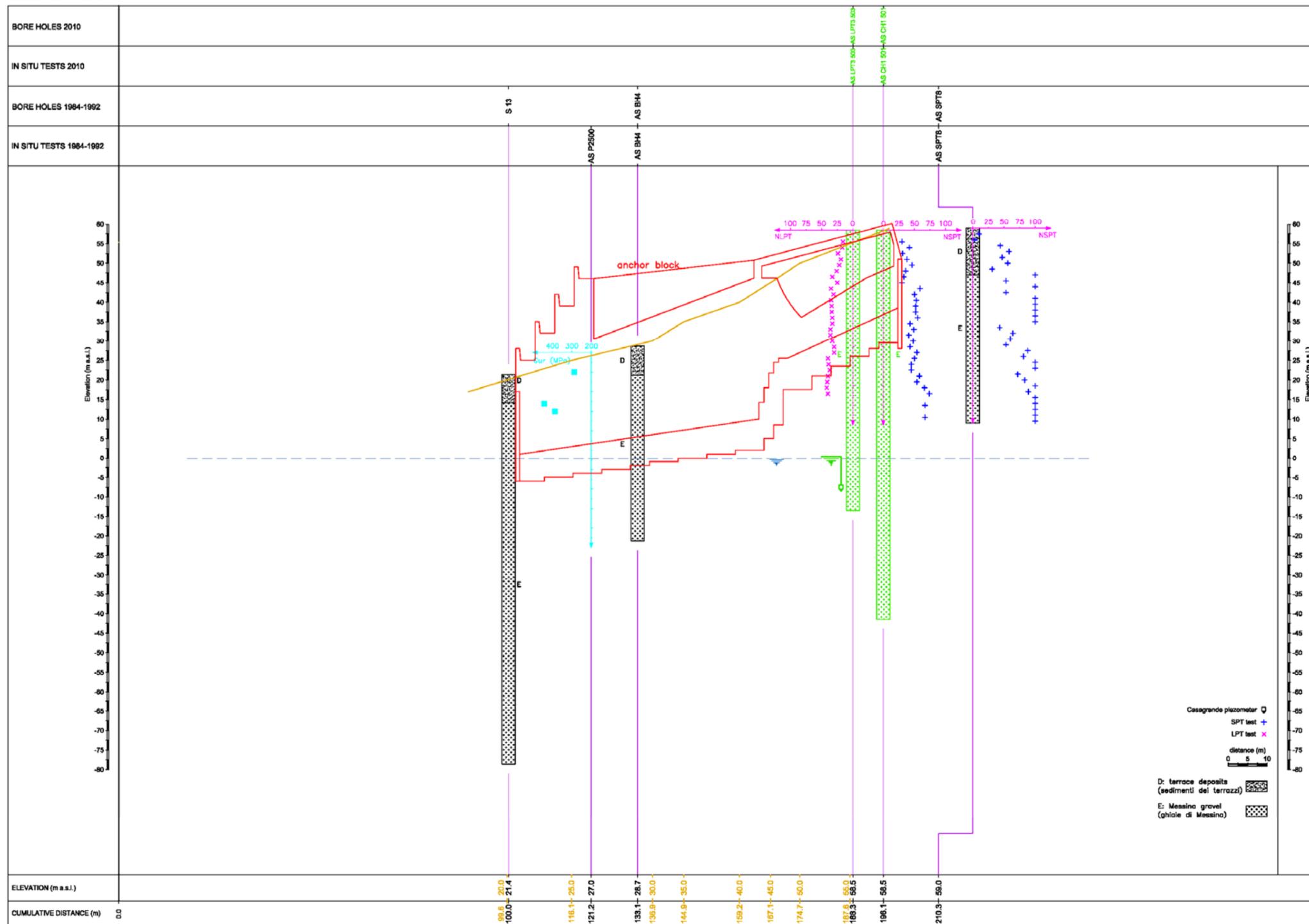
SECTION N. 3



SECTION 3= SEZIONE 3 - Boreholes = Fori di trivellazione In situ tests = Prove locali Terrace deposits = Depositi dei Terrazzi Messina gravel = Ghiaie di Messina Elevation = Quota Cumulative distance = Distanza cumulativa Anchor block = Blocco d'ancoraggio

Figura 5. Sezione longitudinale (sezione n. 3)

SECTION N. 4



SECTION 4= SEZIONE 4 - Bore holes = Fori di trivellazione In situ tests = Prove locali Anchor Block = Blocco di ancoraggio Elevation = Quota Cumulative distance = Distanza cumulativa Distance = Distanza

Figura 6. Sezione longitudinale (sezione n. 4)

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	

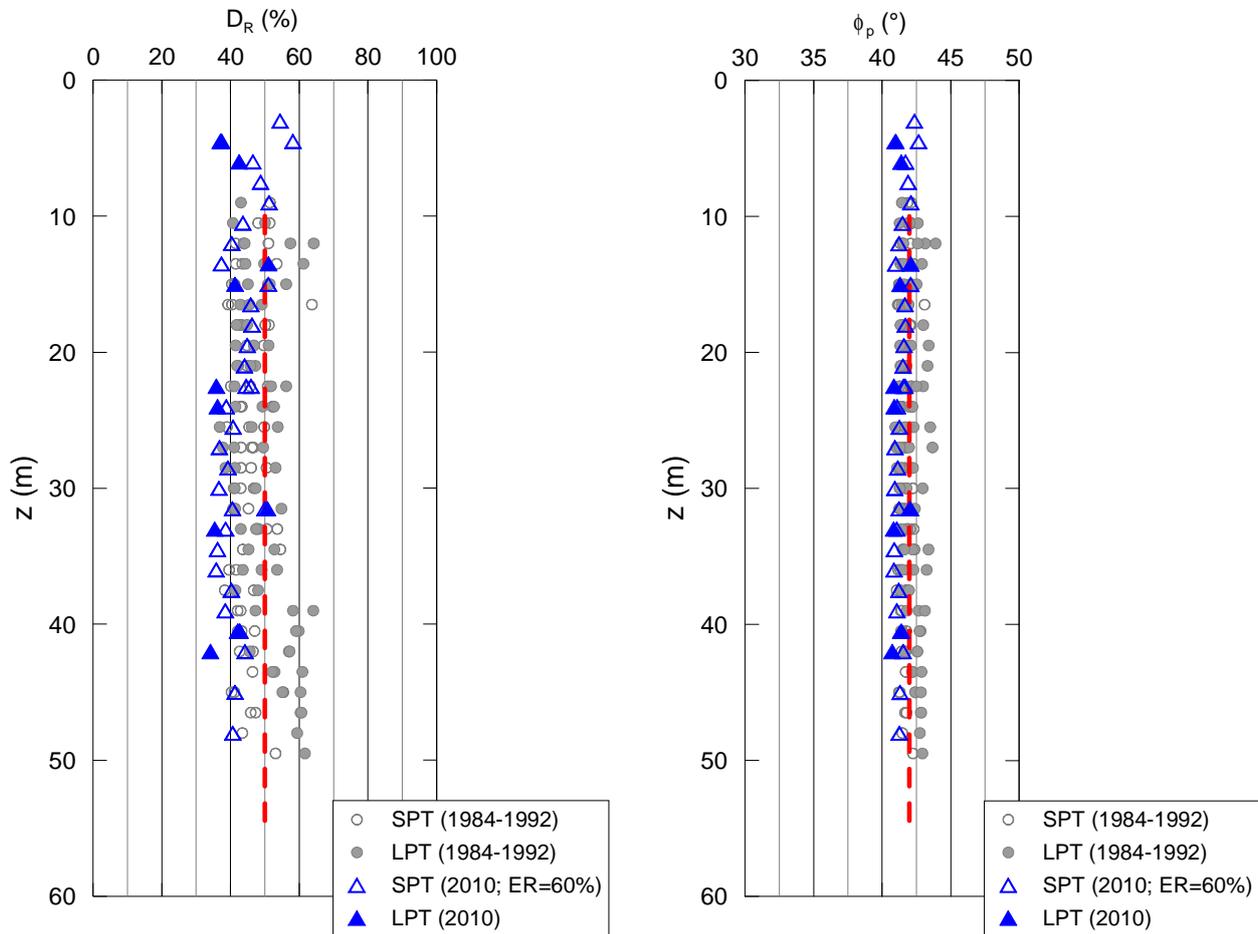


Figura 7. Blocco di Ancoraggio Sicilia: densità relativa e angolo di resistenza al taglio ricavati dai risultati delle prove SPT e LPT

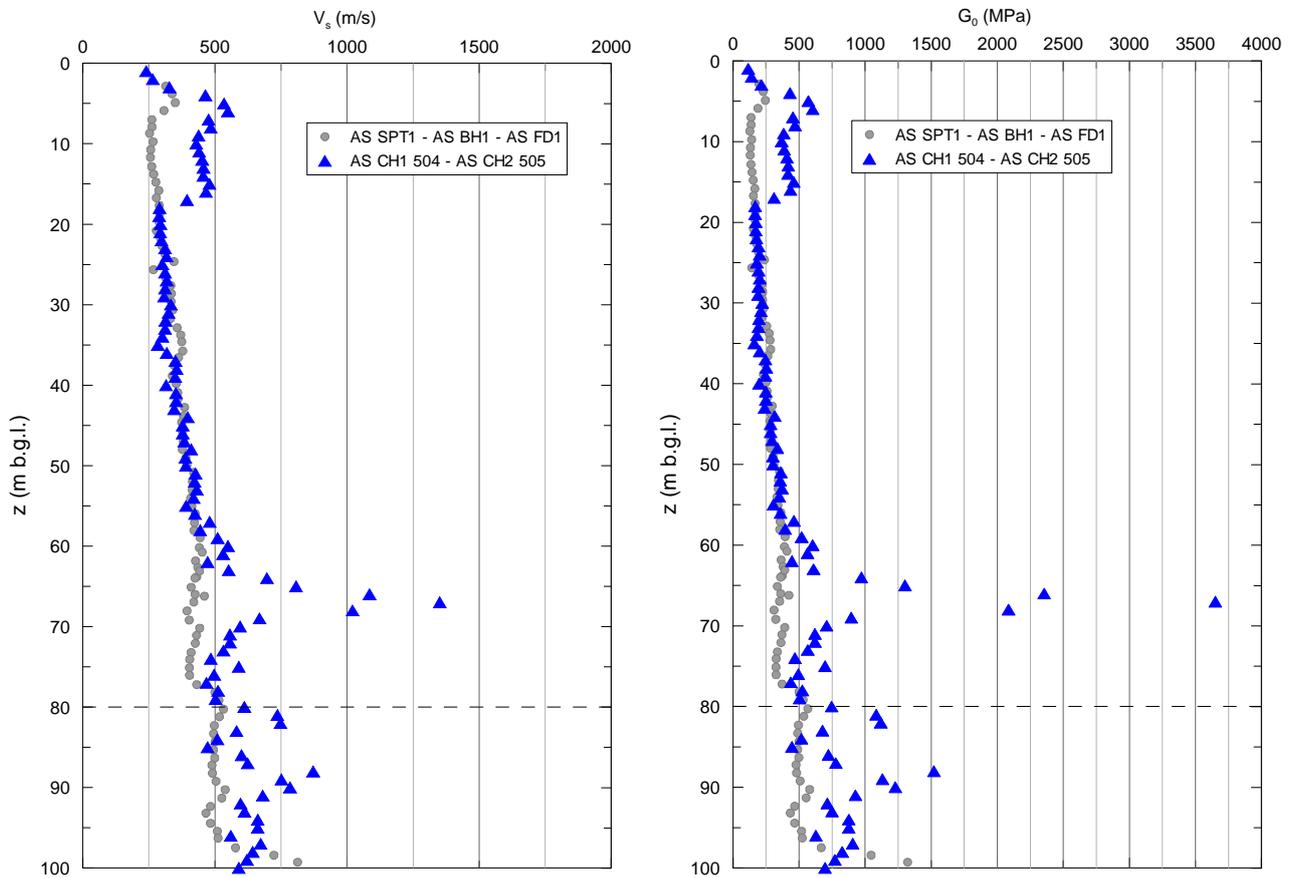
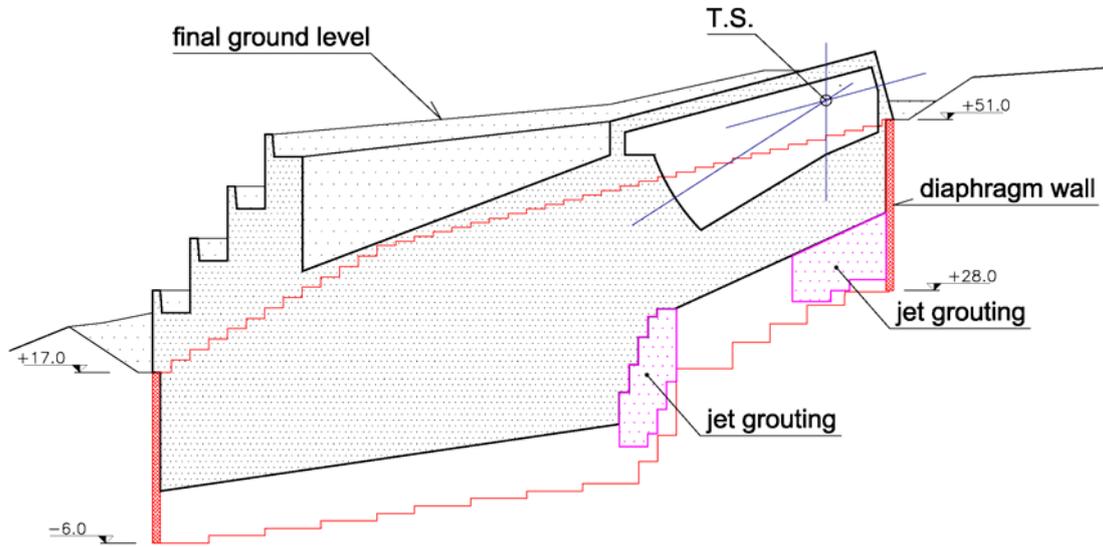


Figura 8. Blocco di Ancoraggio Sicilia, profili  $V_s$  e  $G_0$  dalle prove del foro trasversale



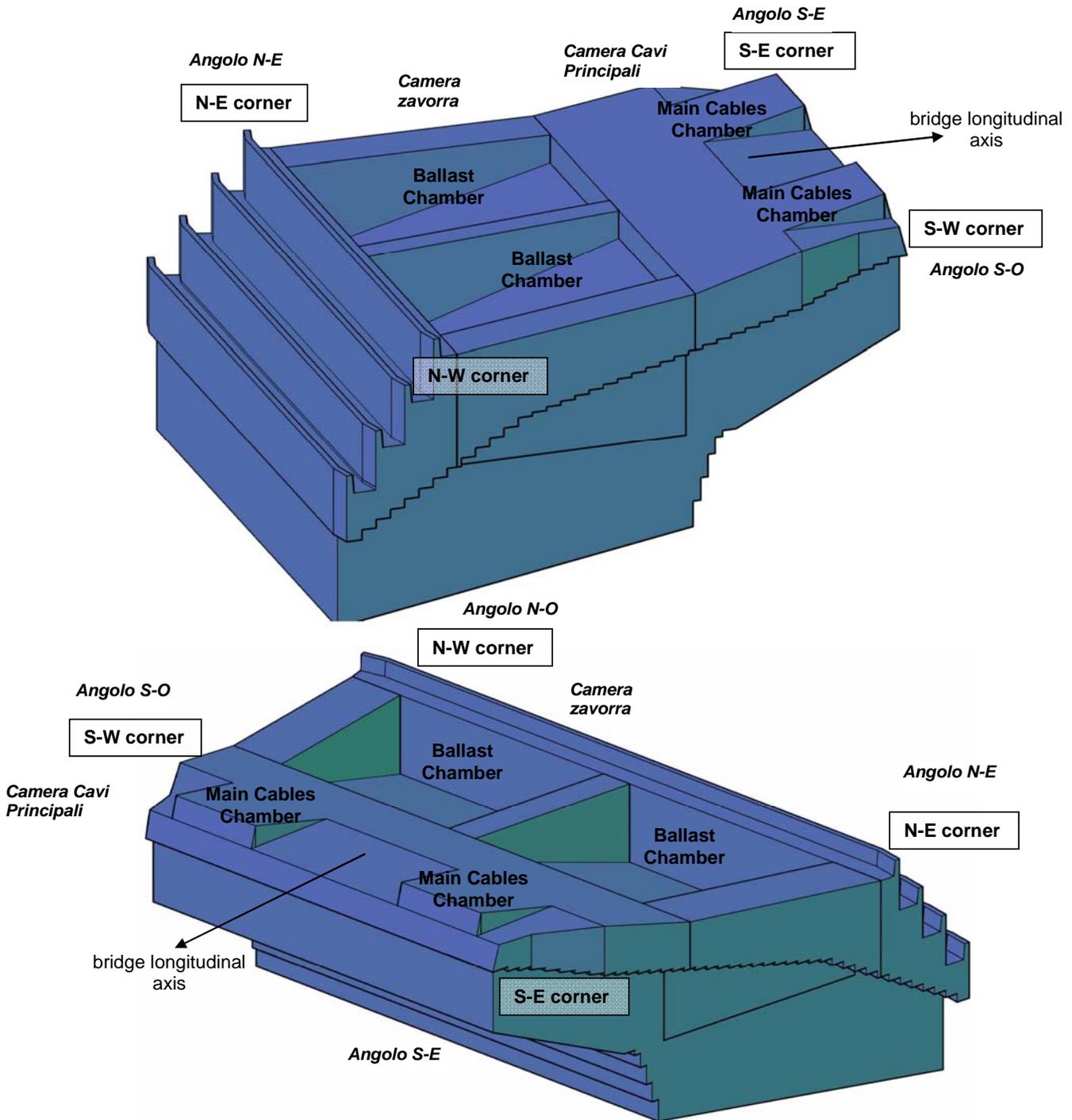
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20-06-2011	



Final ground level = Piano terra finale; Diaphragm wall = diaframmi

Figura 10. Sezione longitudinale del Blocco di Ancoraggio Sicilia

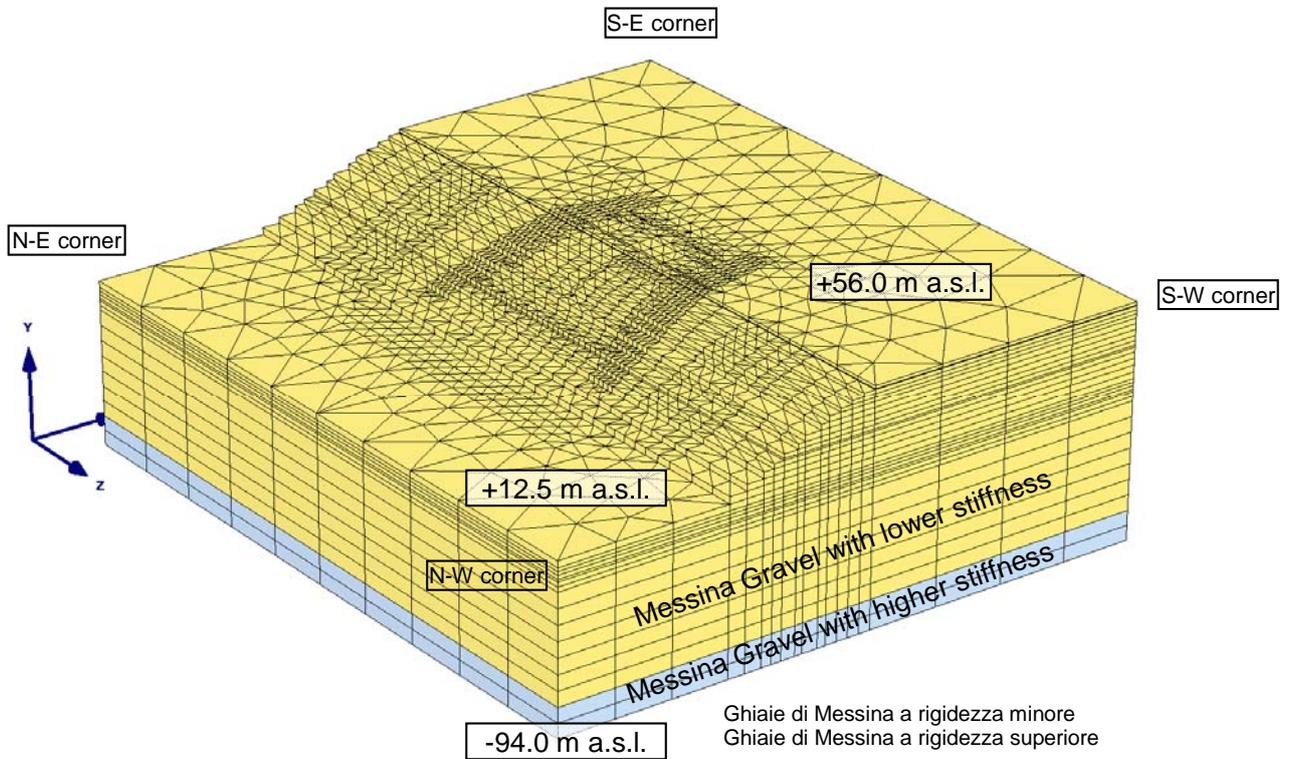
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	



Bridge longitudinal axis = asse longitudinale del ponte

Figura 11. Vista prospettica del progetto del blocco di ancoraggio

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	



S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

Figura 12. Vista prospettica del reticolo FE nella fase iniziale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	

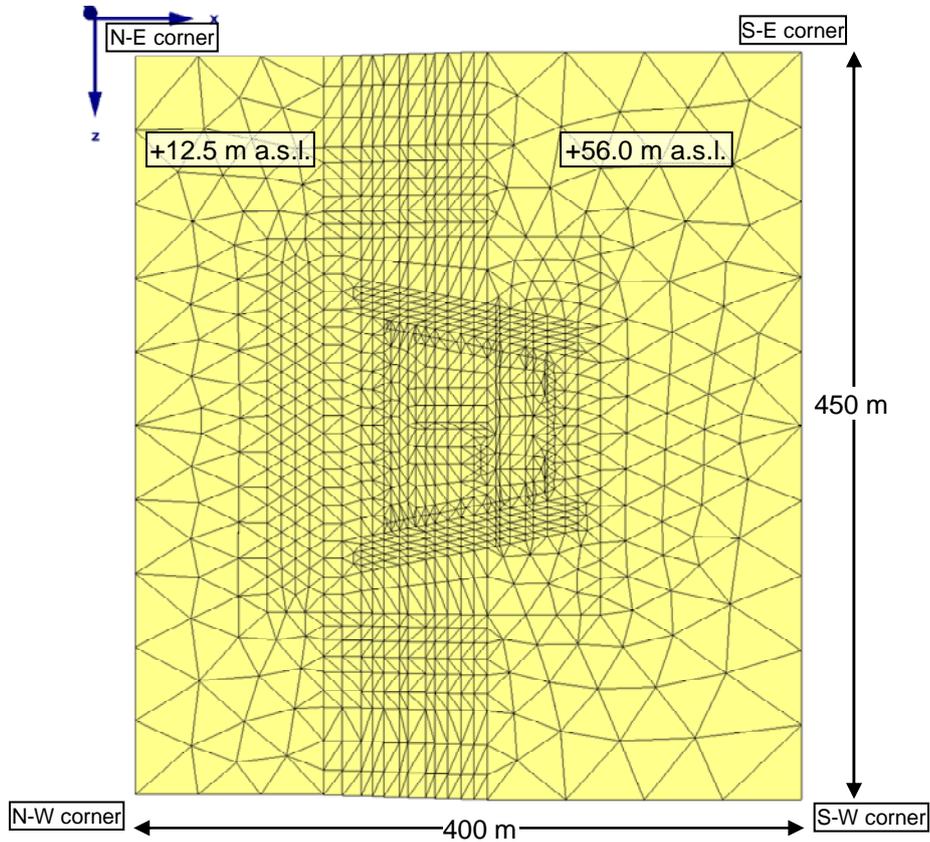
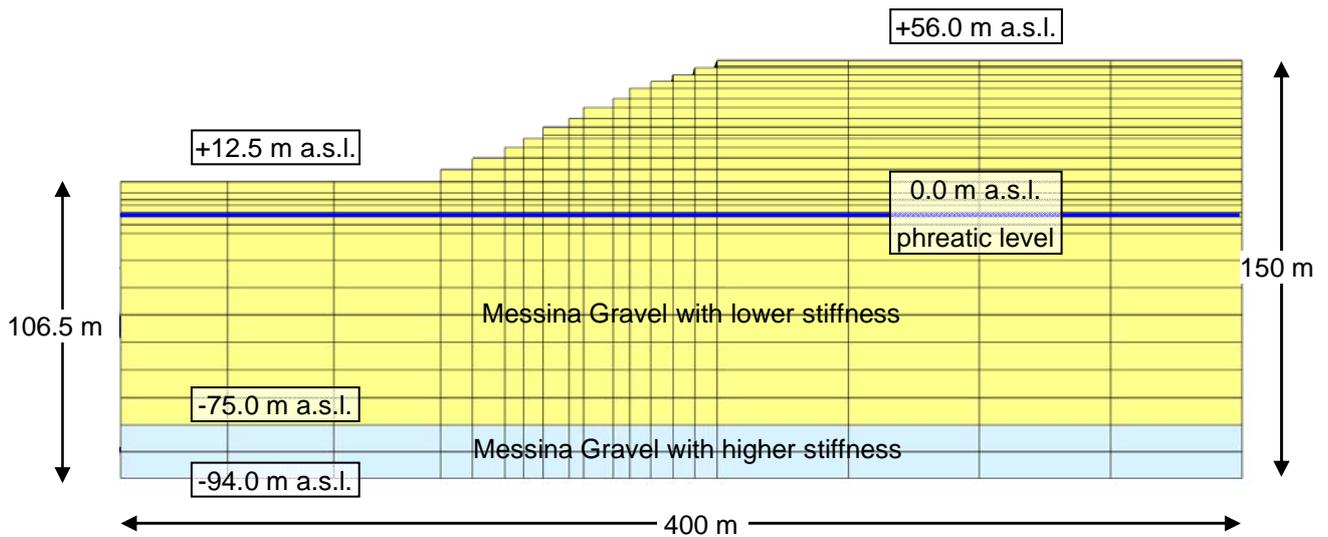


Figura 13. Vista in pianta del reticolo FE nella fase iniziale.



Ghiaie di Messina a rigidezza minore

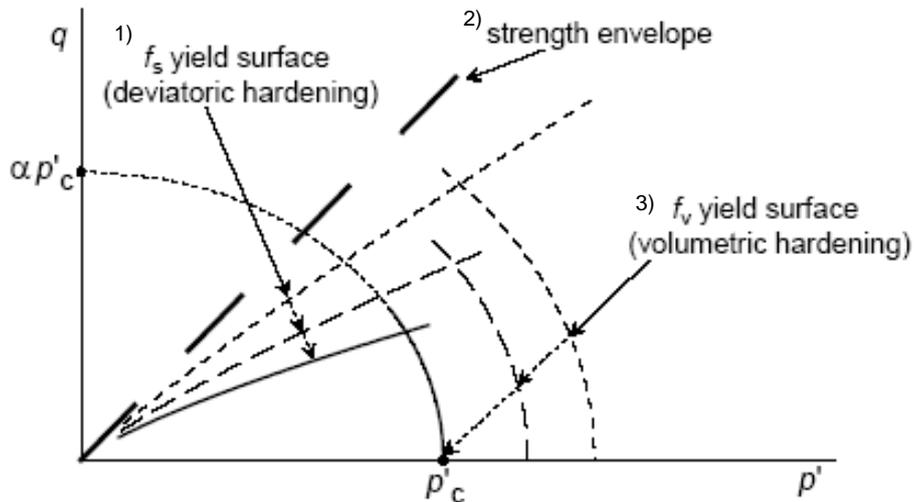
Ghiaie di Messina a rigidezza maggiore    phreatic level= Livello freatico

S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

Figura 14. Vista frontale del reticolo FE nella fase iniziale



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	



1) superficie di snervamento (incrudimento nel piano dei deviatori)

2) involucro di resistenza

3) superficie di snervamento (incrudimento volumetrico)

Figura 17. Superfici di snervamento del modello di Incrudimento del terreno e loro evoluzione

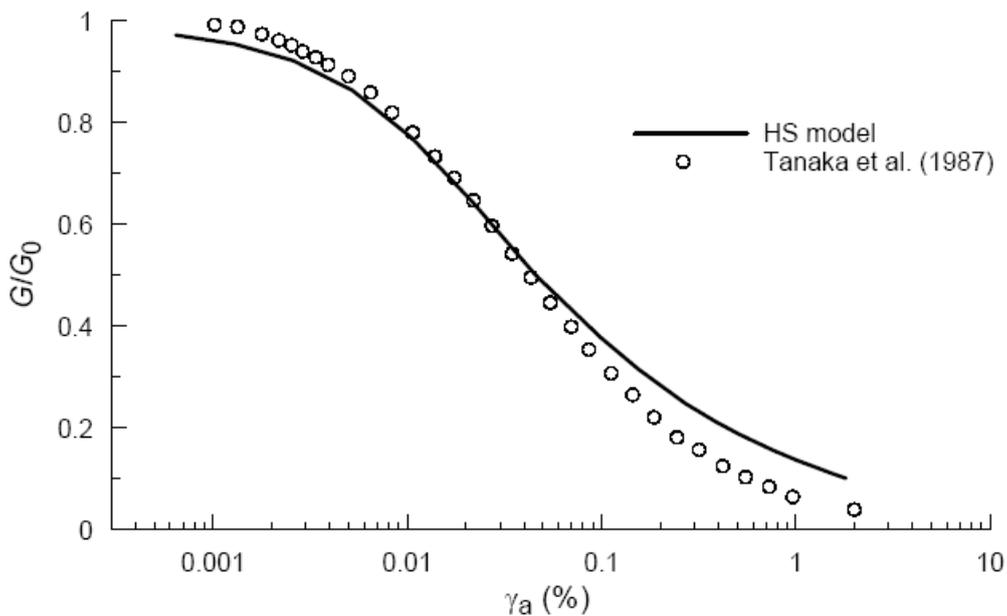
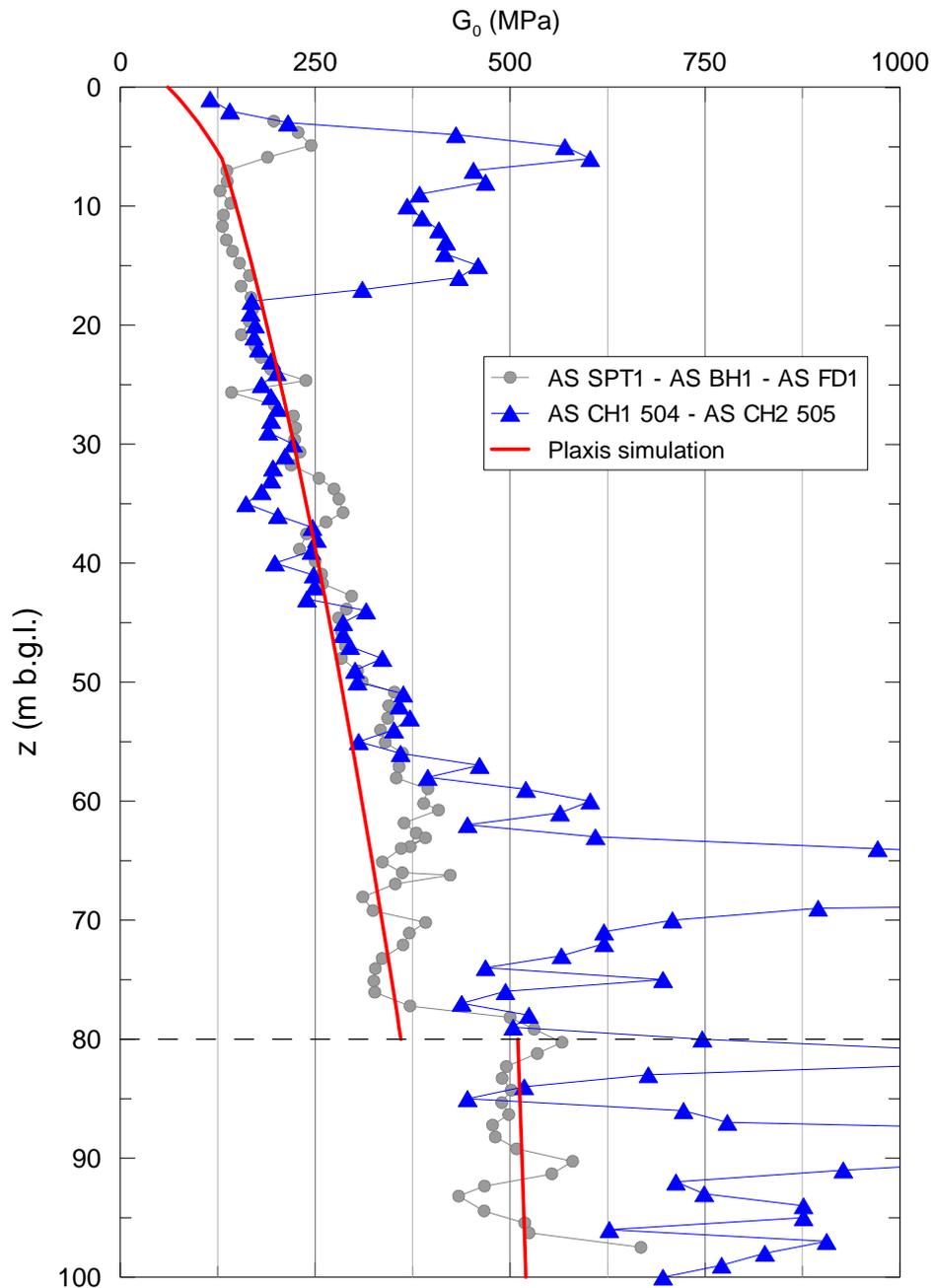


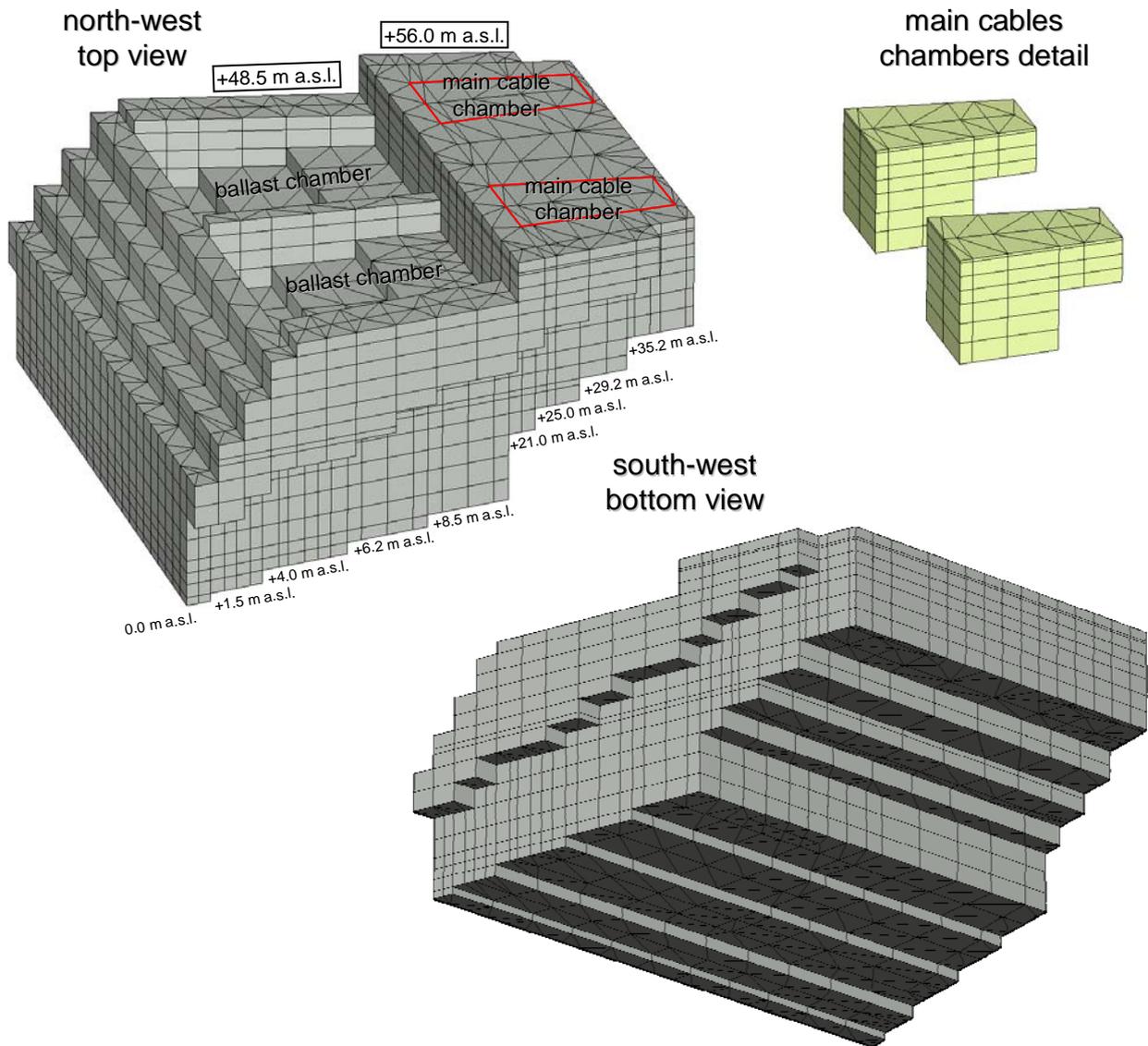
Figura 18. Confronto tra la curva di decadenza del modulo prevista dal modello HS e quella ottenuta da Tanaka et al (1987)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	



Plaxis simulation = simulazione Plaxis

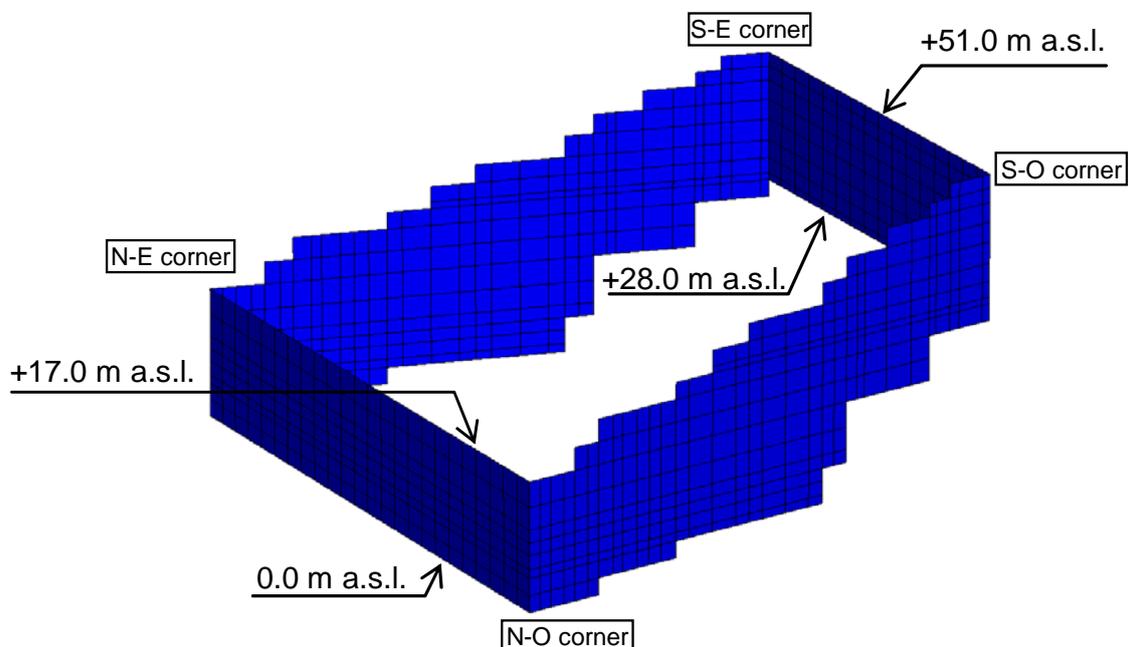
Figura 19. Profilo  $G_0$  secondo la prova del foro trasversale e la previsione del modello HS



north-west top view = nord-ovest vista dall'alto; south-west bottom view= sud-ovest vista dal basso; main cables chambers detail = cavi principali dettaglio delle camere; ballast chamber = camera zavorrata; main cable chambre = Camera Cavi Principali

**Figura 20. Vista prospettica del modello del blocco di ancoraggio senza materiale di riempimento**

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	



S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

Figura 21. Vista prospettica dei diaframmi Angolo N-O

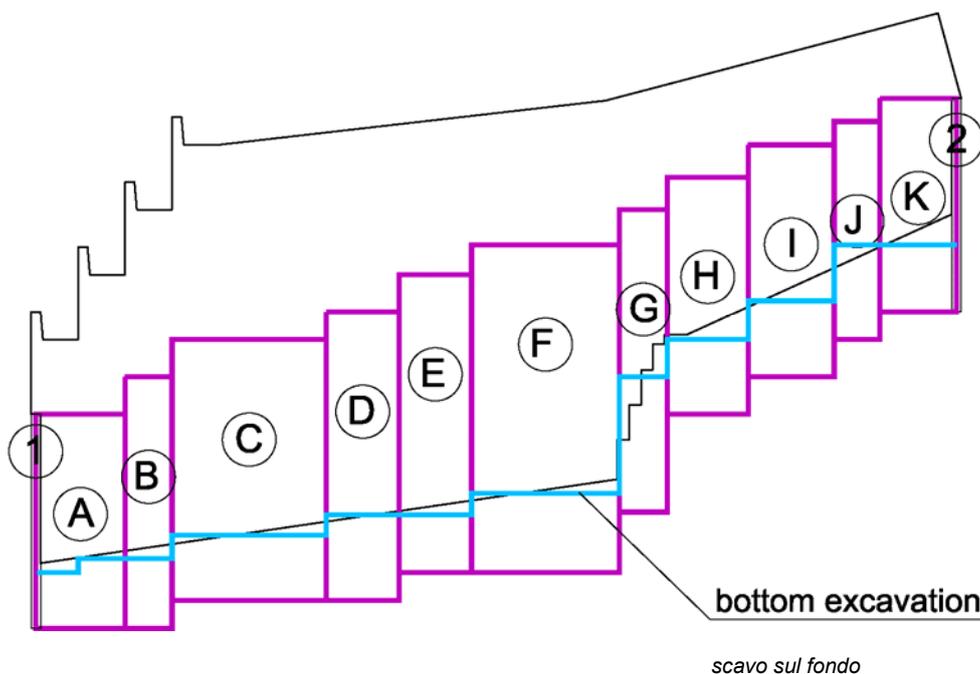


Figura 22. Schema dei diaframmi longitudinali

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	

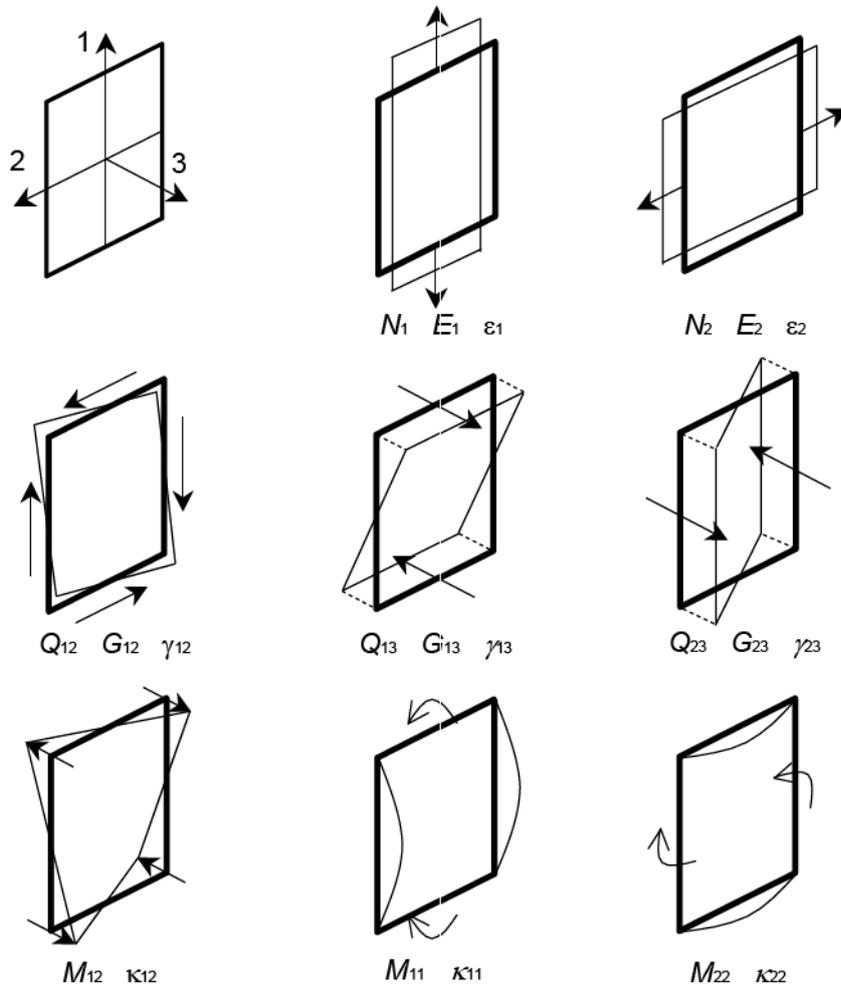


Figura 23. Elementi Wall in PLAXIS

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

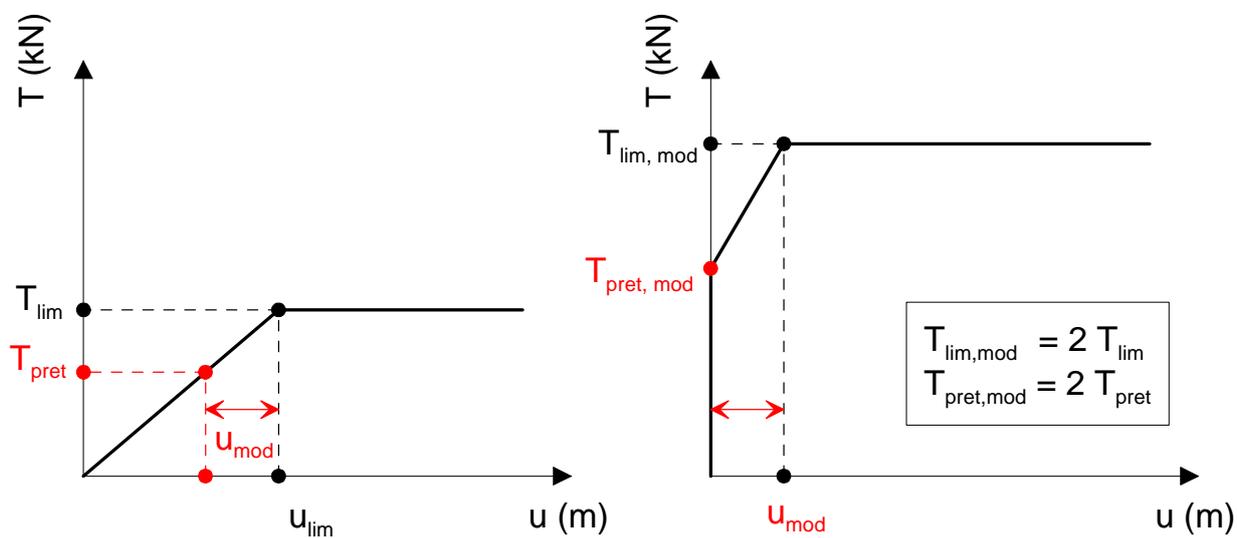


Figura 24. Elementi SPRINGS: rigidezza non lineare e relazione (T-u) per le molle pre-tensionate nel modello

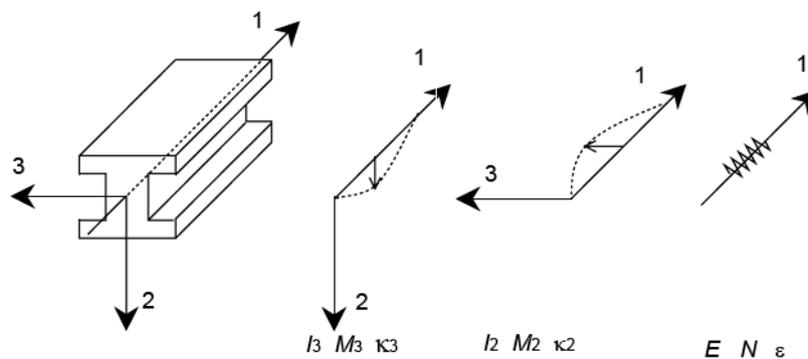
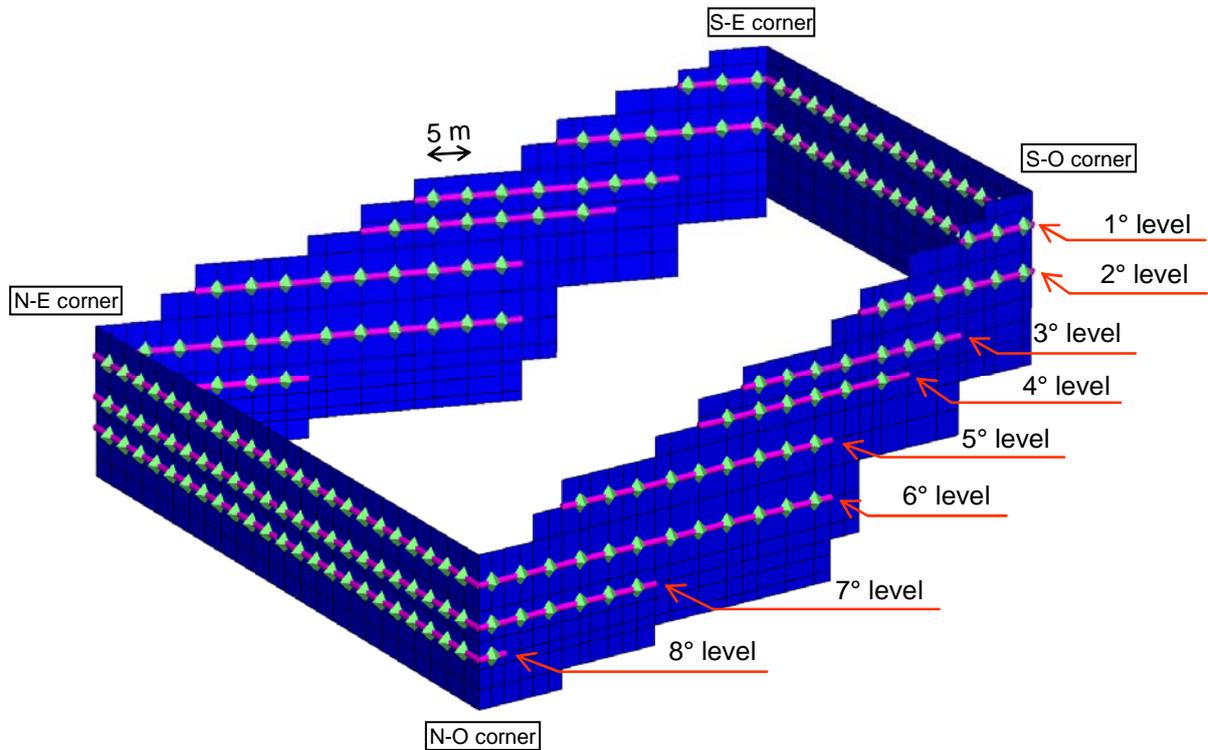


Figura 25 Elementi Beam in PLAXIS

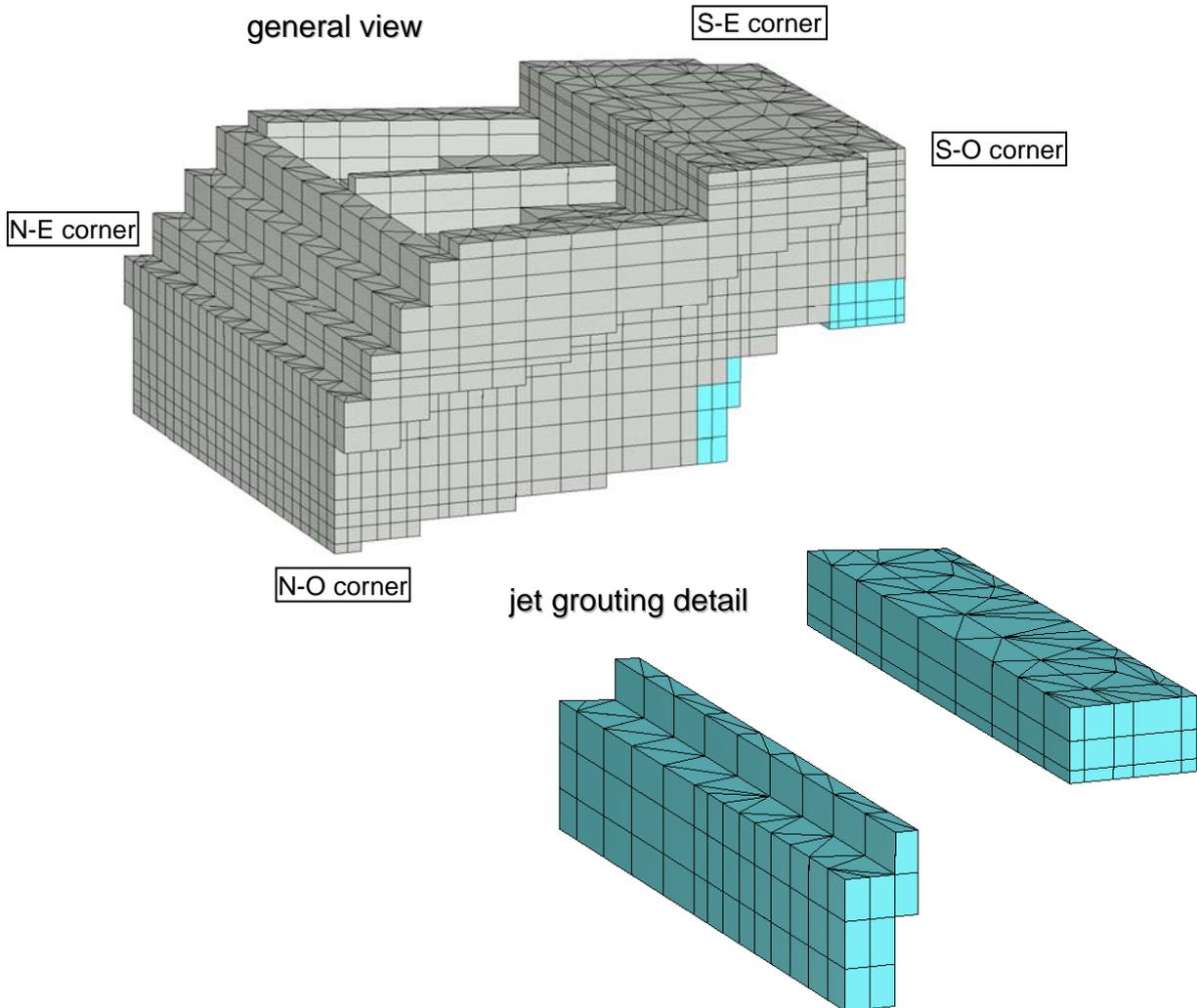
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	



S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

Figura 26. Vista prospettica delle molle e delle loro travi di collegamento

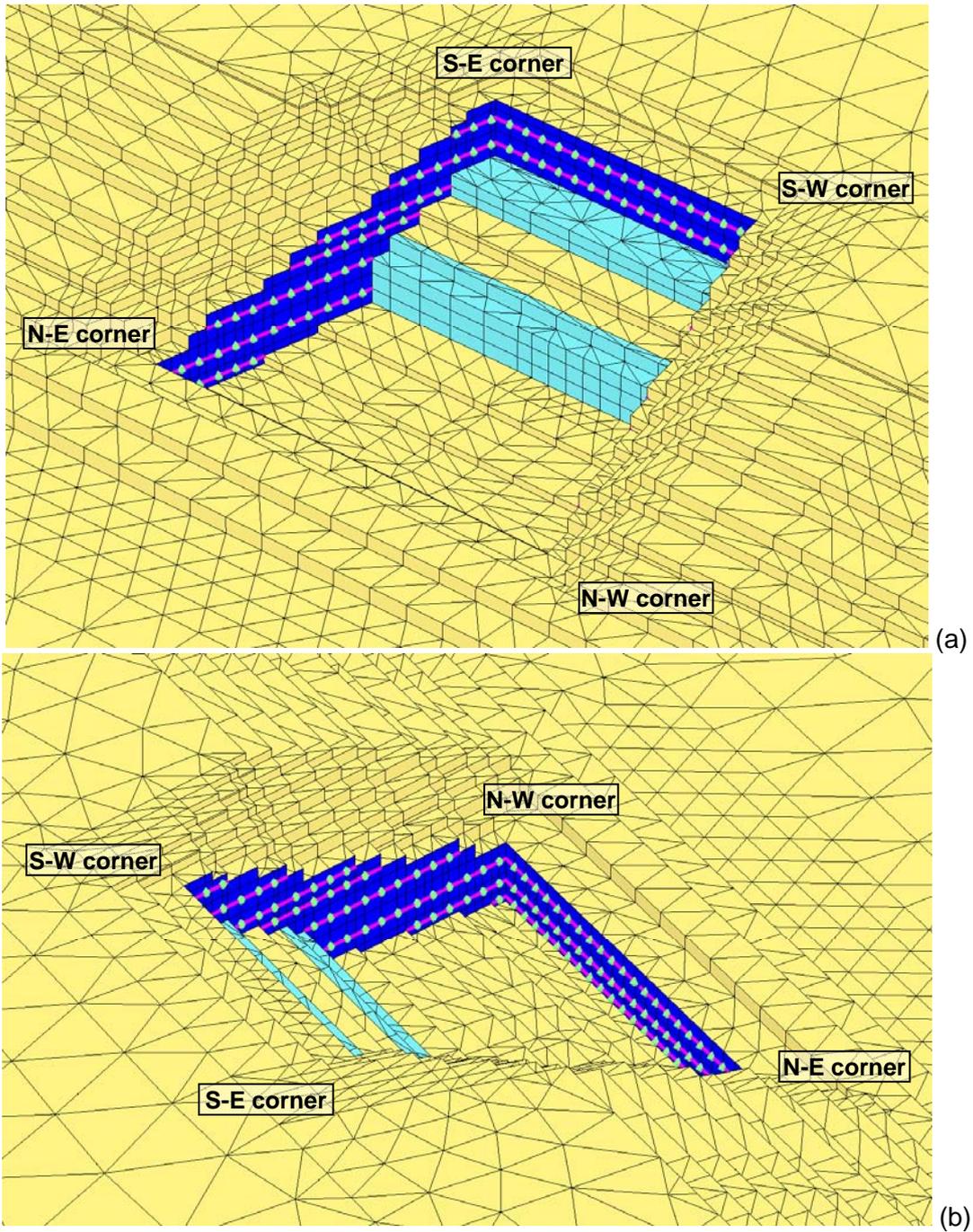
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	



general view = Vista generale; jet grouting detail = dettaglio di jet grouting;

S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-O corner = angolo S-O; N-O corner = angolo N-O

**Figura 27. Vista prospettica del terreno iniettato**



S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-W corner = angolo S-O; N-W corner = angolo N-O

Figura 28. Vista prospettica del livello di scavo più profondo: (a) vista dall'alto nord-ovest e (b) vista dall'alto sud-est

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

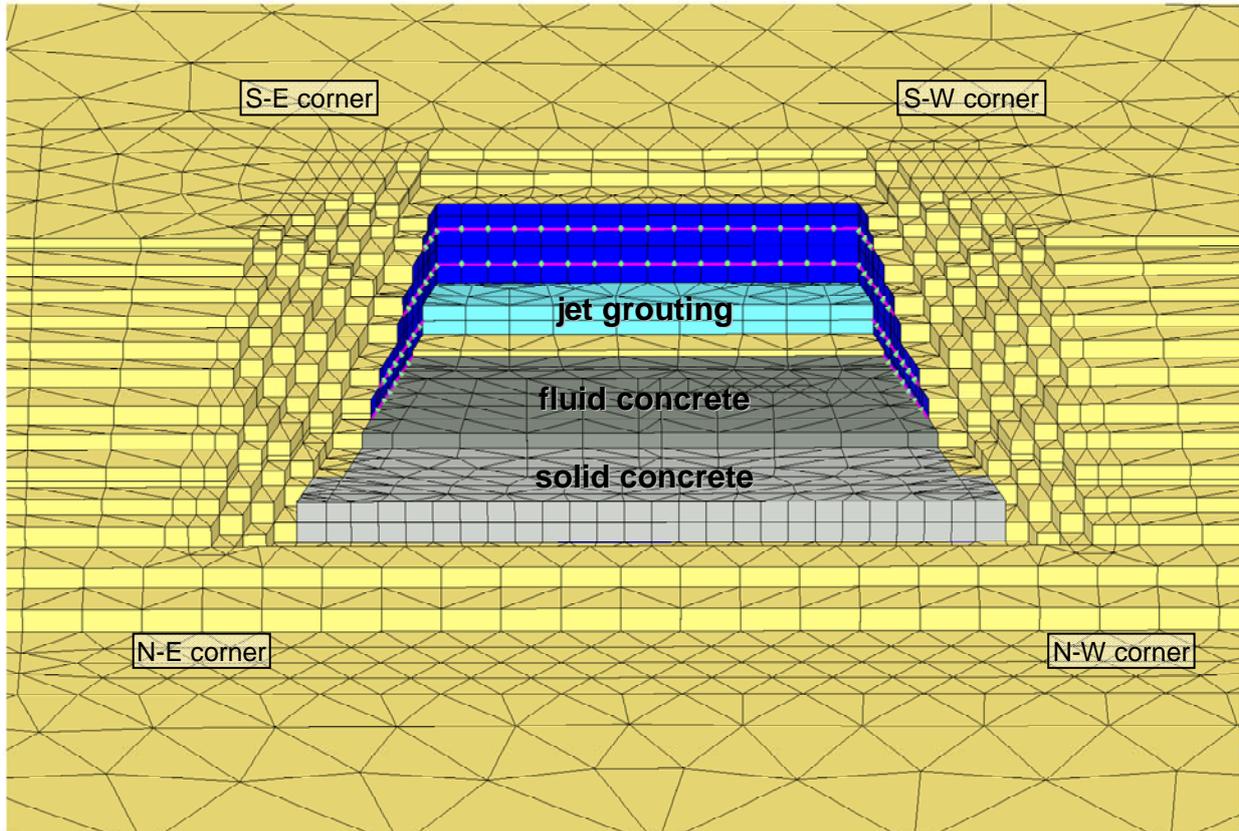


Figura 29. Vista prospettica di una fase intermedia della costruzione del blocco

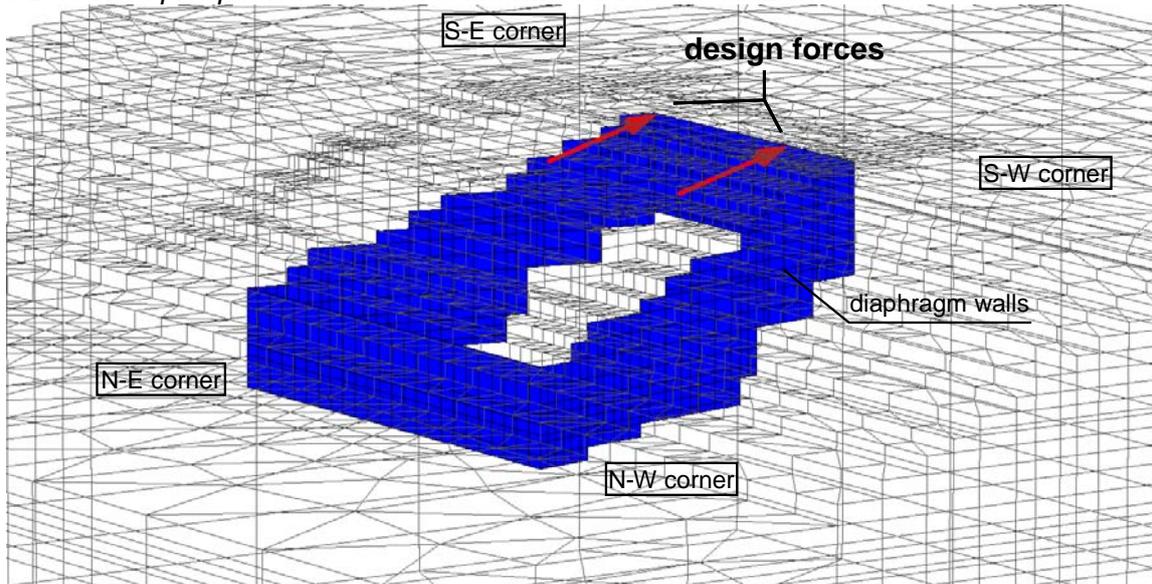
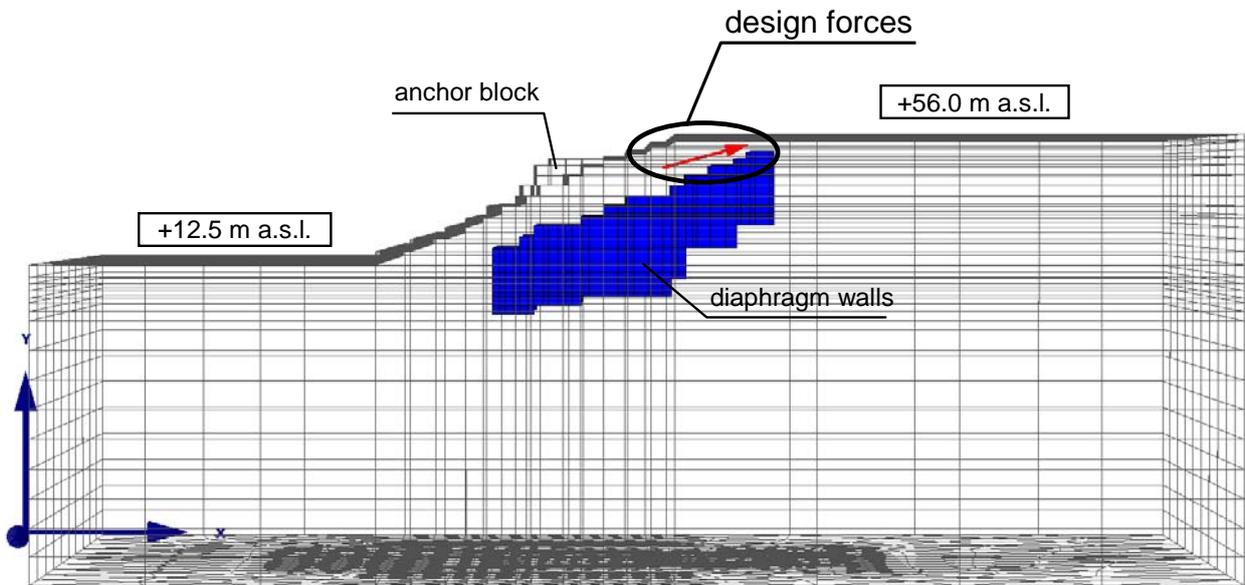


Figura 30. Vista prospettica del blocco di ancoraggio con indicazione delle forze di progetto

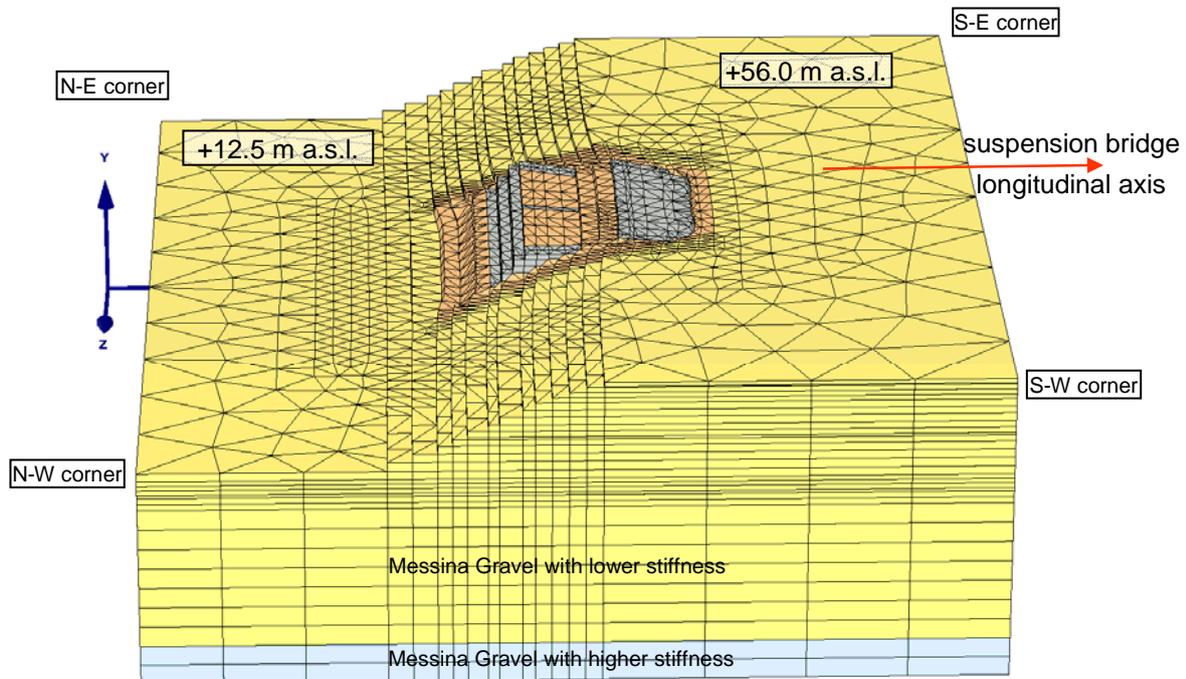
fluid concrete = calcestruzzo fluido; solid concrete = calcestruzzo solido; diaphragm walls = diaframmi; design force = forze di progetto; S-E corner = angolo S-E; N-E corner = angolo N-E; S-W corner = angolo S-O; N-W corner = angolo N-O

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	



design forces = forze di progetto      anchor block = blocco di ancoraggio      diaphragm walls = diaframmi

Figura 31. Vista frontale del blocco di ancoraggio con indicazione delle forze di progetto



Ghiaie di Messina con rigidezza minore  
 Ghiaie di Messina con rigidezza maggiore  
 Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale

Figura 32. Reticolo FE per condizioni di carico ULS (aumento della scala di 300 volte)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

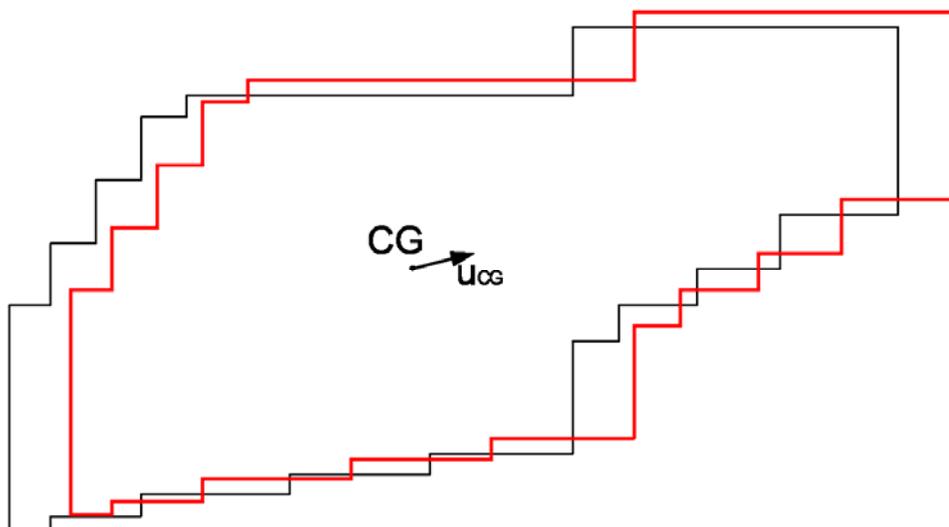


Figura 33. *Traslazione del blocco nella situazione di carico ULS (spostamento in scala maggiorata di 200 volte)*

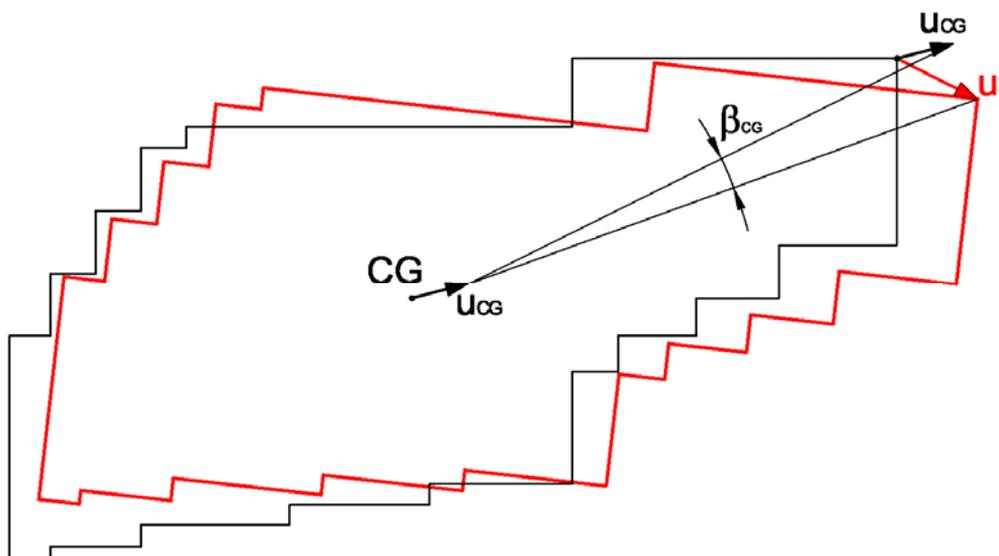


Figura 34. *Rotazione e traslazione del blocco nella situazione di carico ULS (spostamento in scala maggiorata di 200 volte)*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
		Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_0_ITA.doc	Rev 0

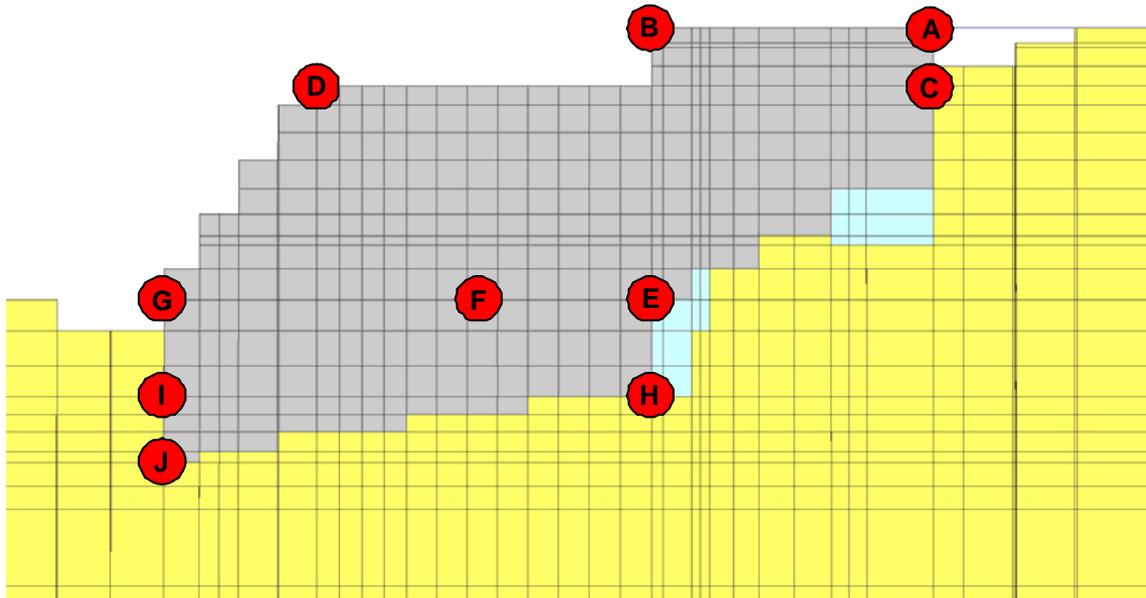
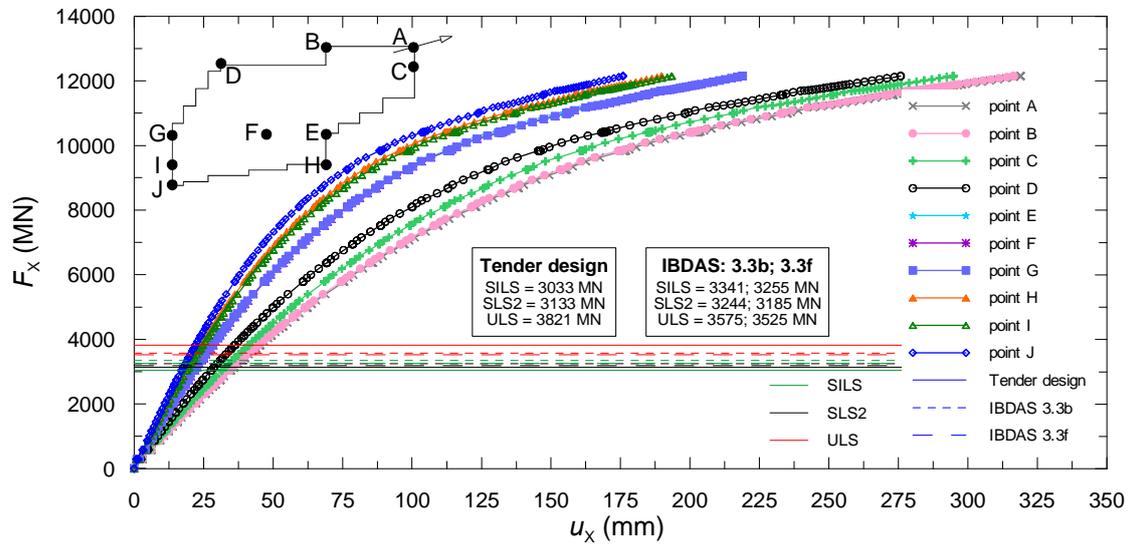
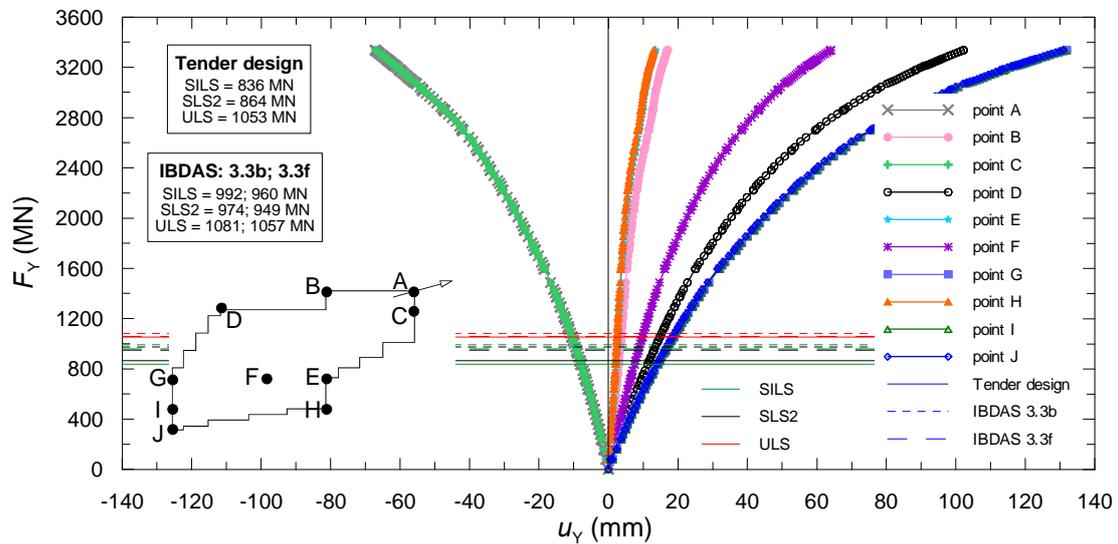


Figura 35. Localizzazione di punti – sezione longitudinale attraverso il centro di gravità



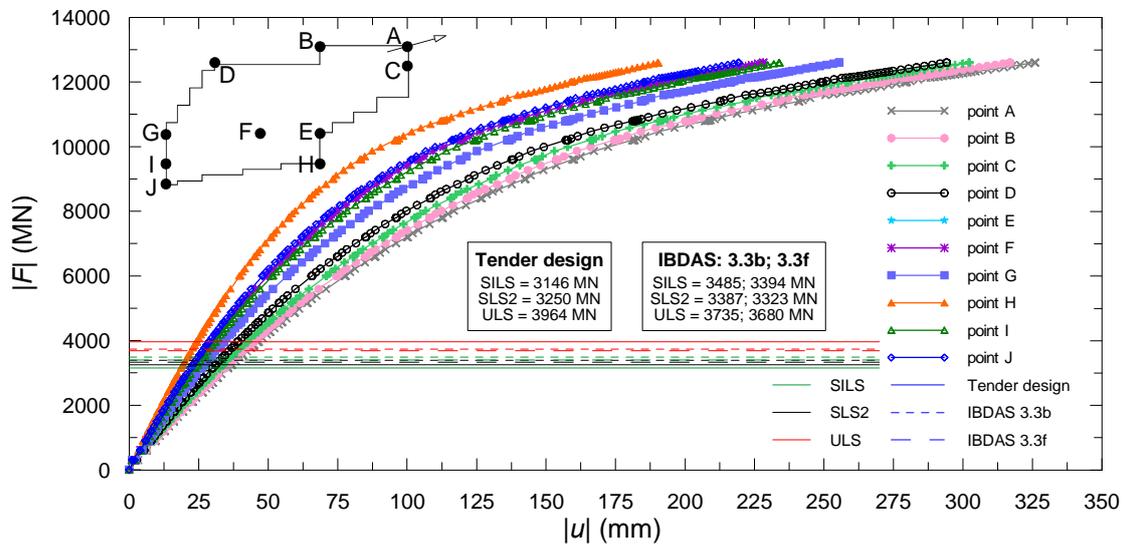
Tender design = progetto d'offerta

Figura 36. Curve carico – spostamento per i punti selezionati; direzione orizzontale



Tender design = progetto d'offerta

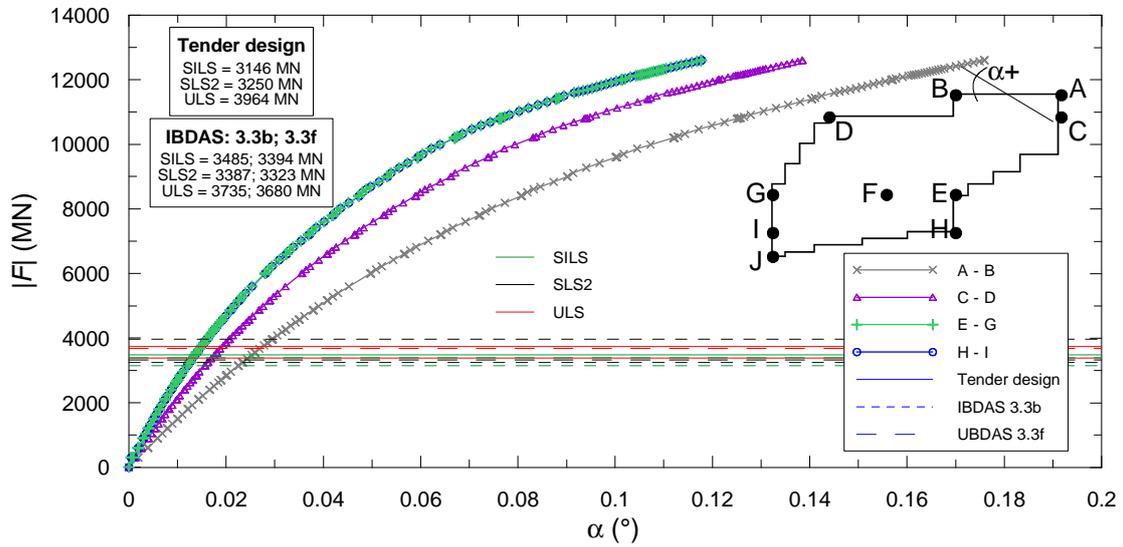
Figura 37. Curve carico – spostamento per tutti i dieci punti; direzione verticale



Tender design = progetto d'offerta

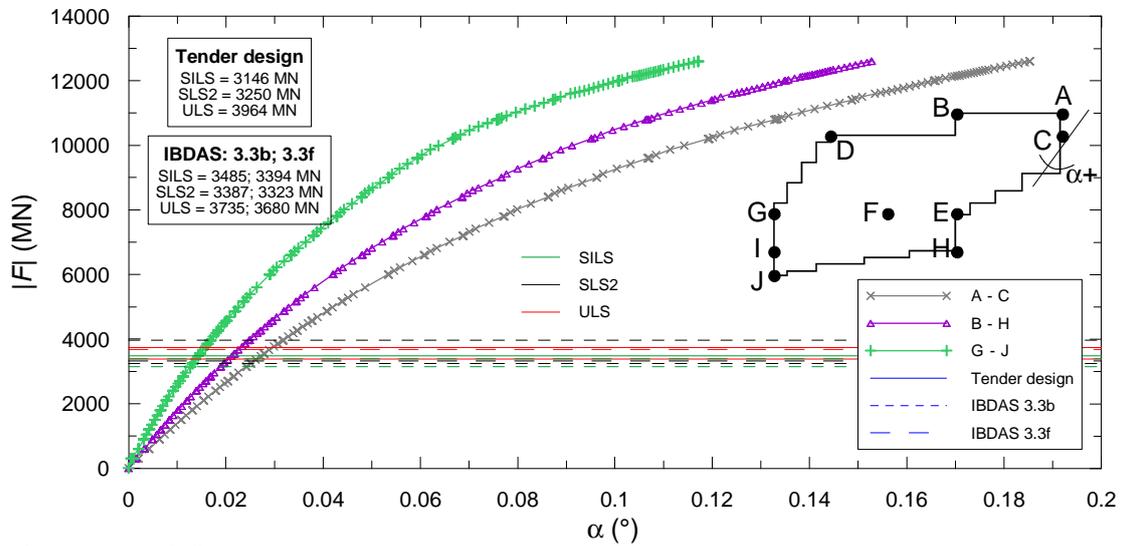
Figura 38. Curve carico – spostamento dei punti selezionati

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0065_0_ITA.doc</i>	Rev 0	Data 13-04-2011	



Tender design = progetto d'offerta

**Figura 39. Curve carico – rotazione per l'allineamento orizzontale**



Tender design = progetto d'offerta

**Figura 40. Curve carico – rotazione per l'allineamento verticale**

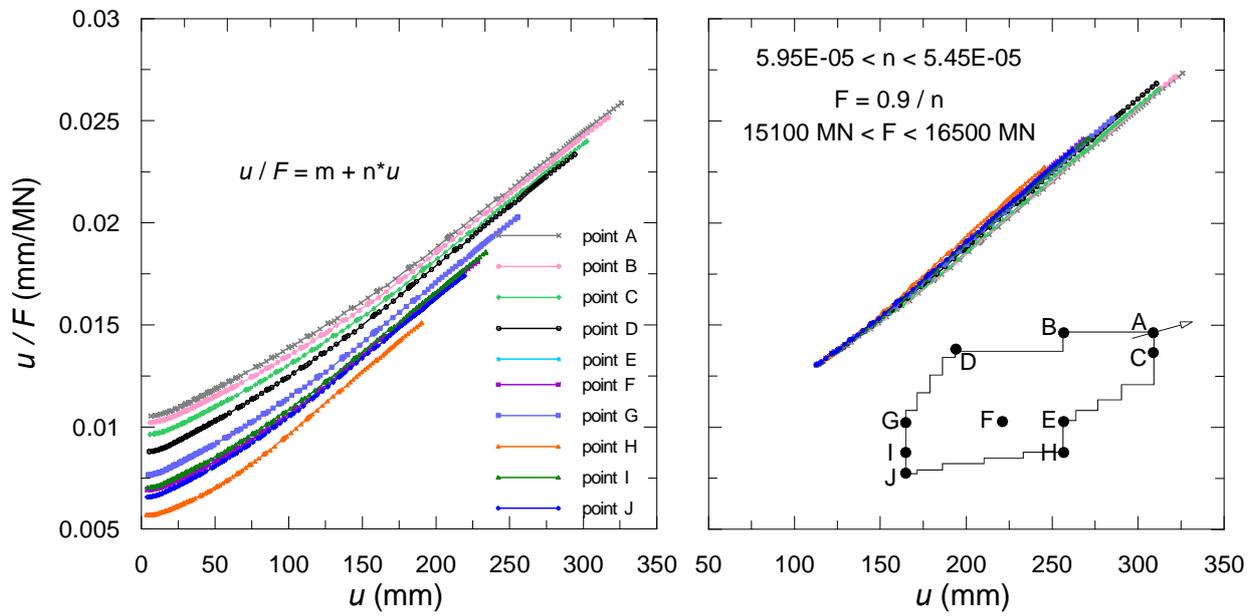
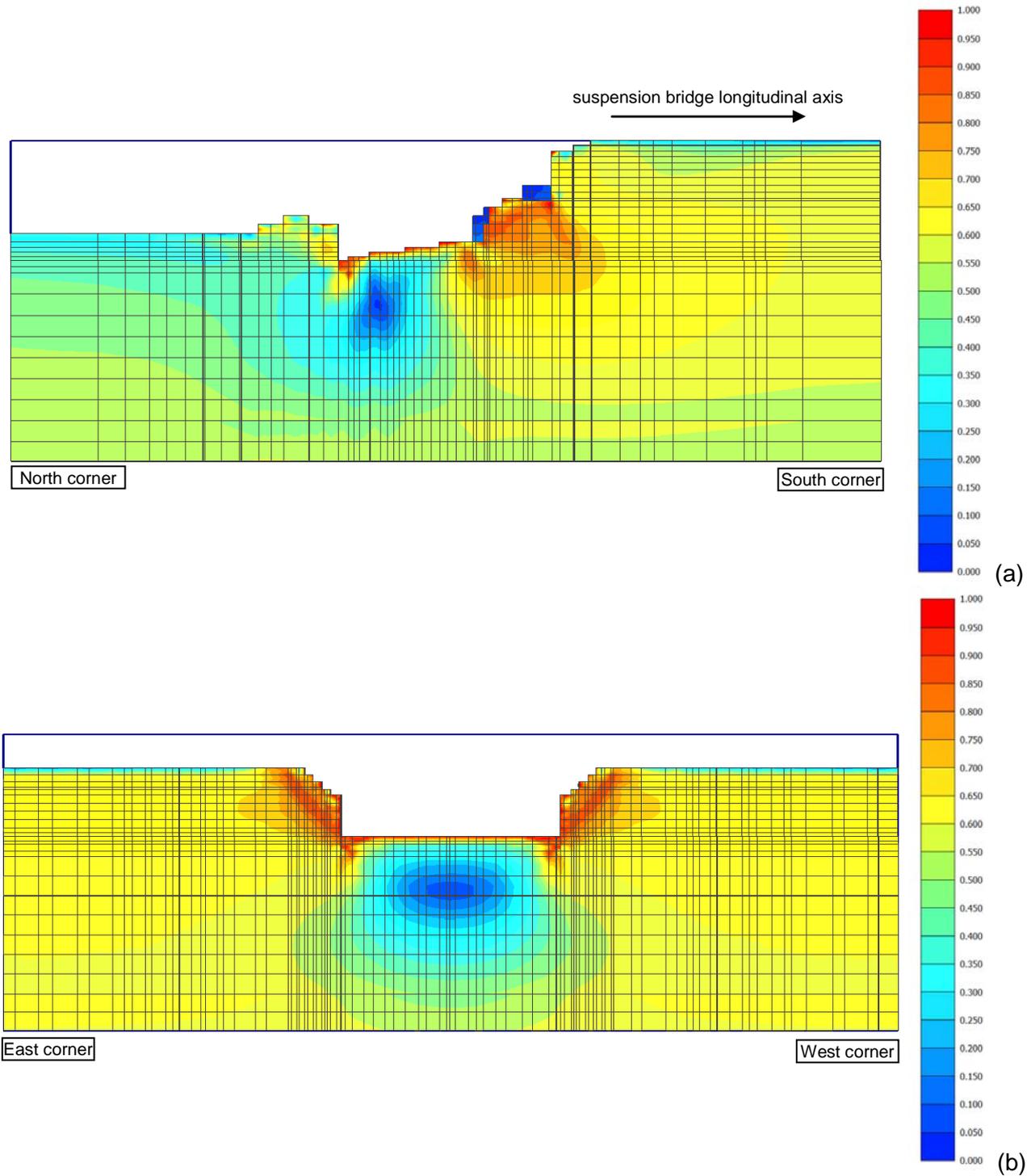


Figura 41. Curve carico – spostamento - miglior adeguamento iperbolico

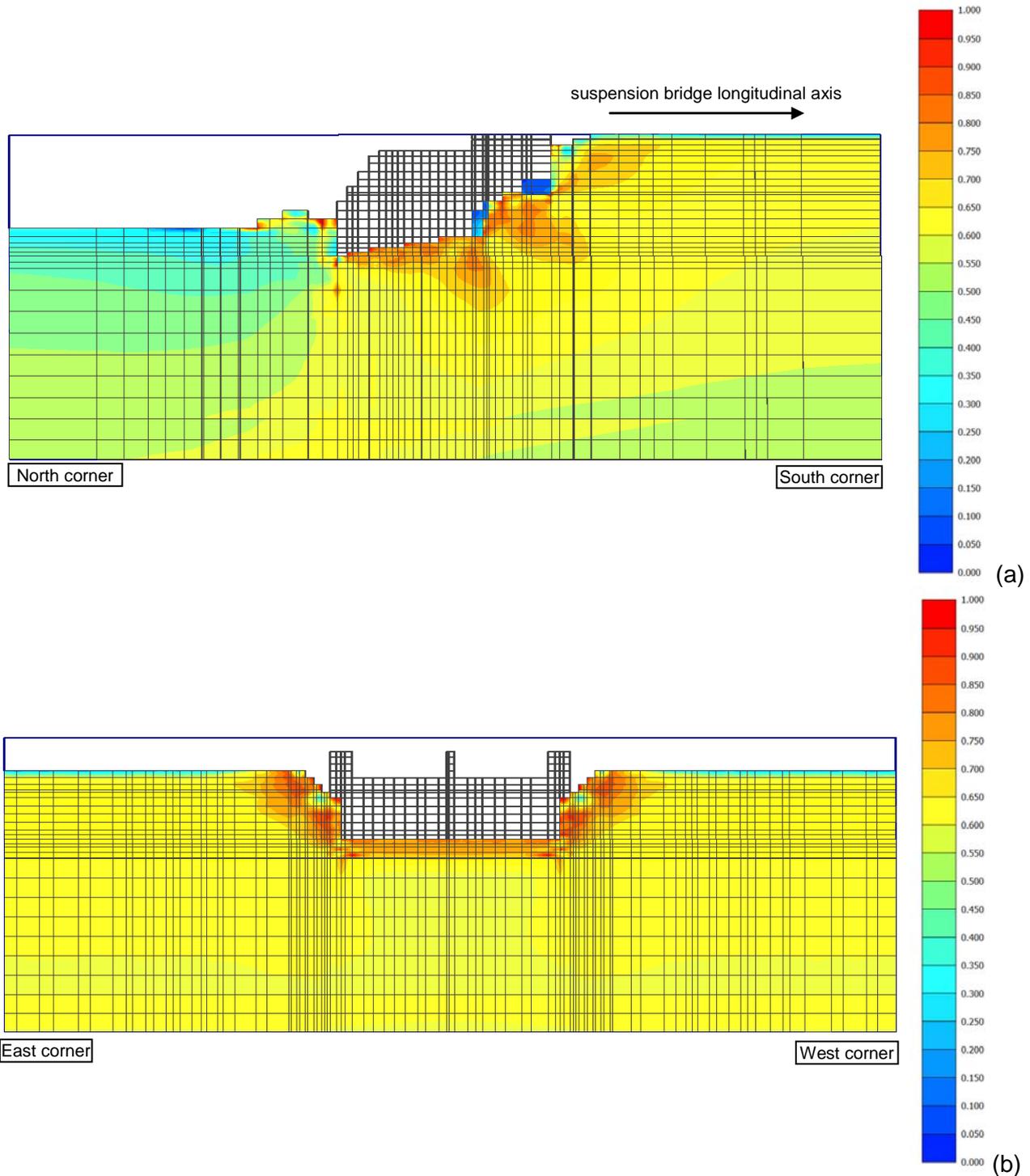




Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale

North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest

**Figura 43. Scavo completo: contorni di  $\tau_{rel}$  (a) in una sezione longitudinale attraverso il centro di gravità ( $Z = 225$  m) e (b) in una sezione trasversale ( $X = 172$  m)**



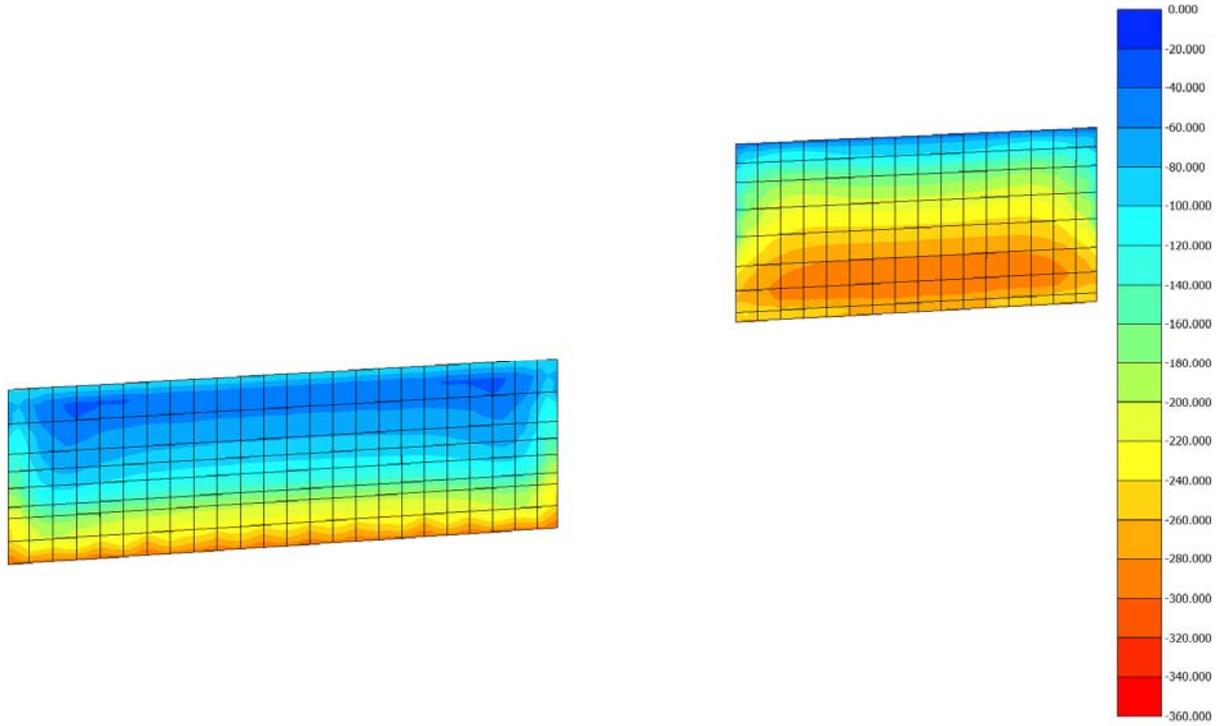
Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale

North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest

**Figura 44. Costruzione completa della blocco: contorni di  $\tau_{rel}$  (a) in una sezione longitudinale attraverso il centro di gravità ( $Z = 225$  m) e (b) in una sezione trasversale ( $X = 172$  m)**

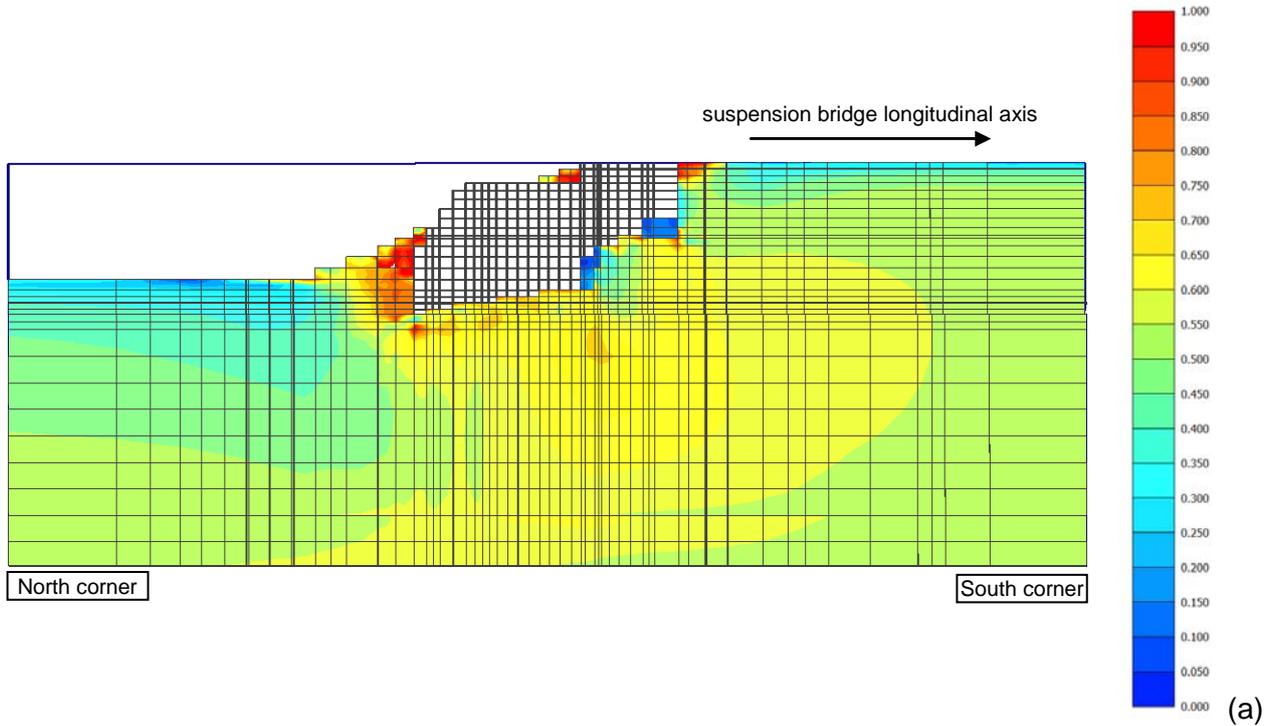


		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	

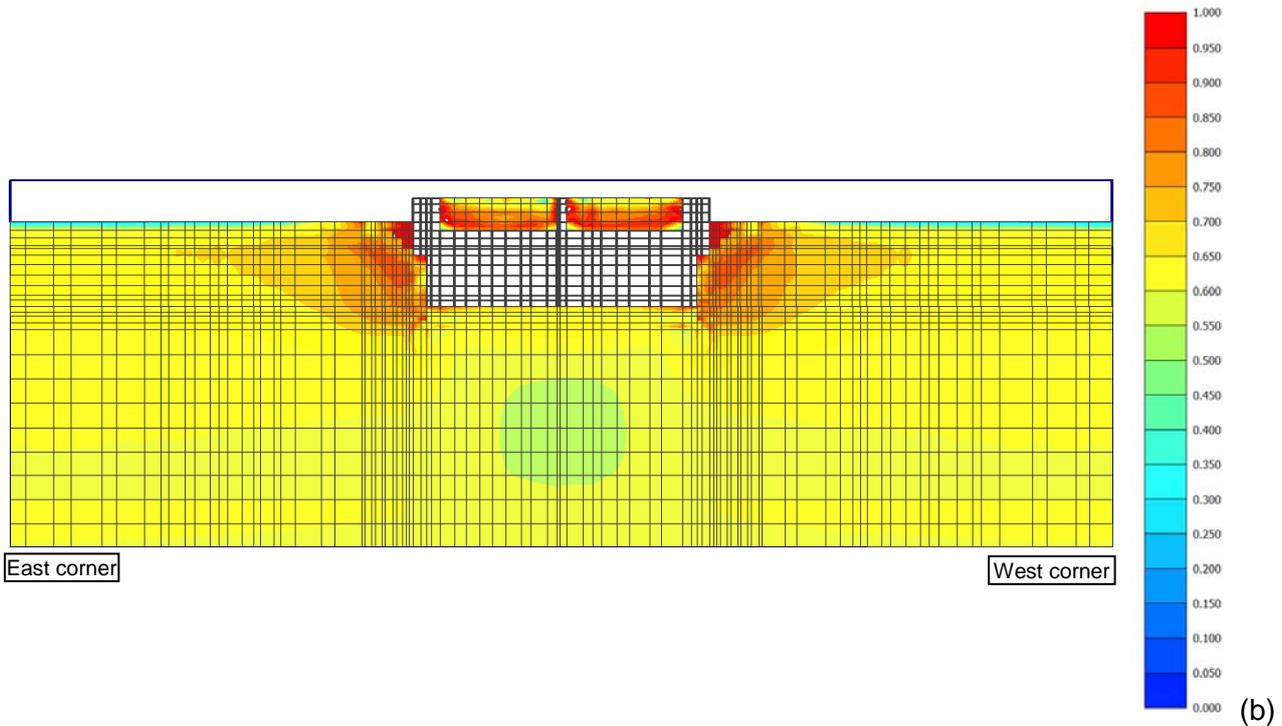


Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale  
 North corner = angolo Nord;    South corner = angolo Sud;    East corner = angolo Est;    West corner = angolo Ovest

**Figura 46. Condizione di carico SILS: contorni di  $\sigma_N$  (in kPa) che agiscono sull'elemento di interfaccia terreno-muro dei diaframmi trasversali**



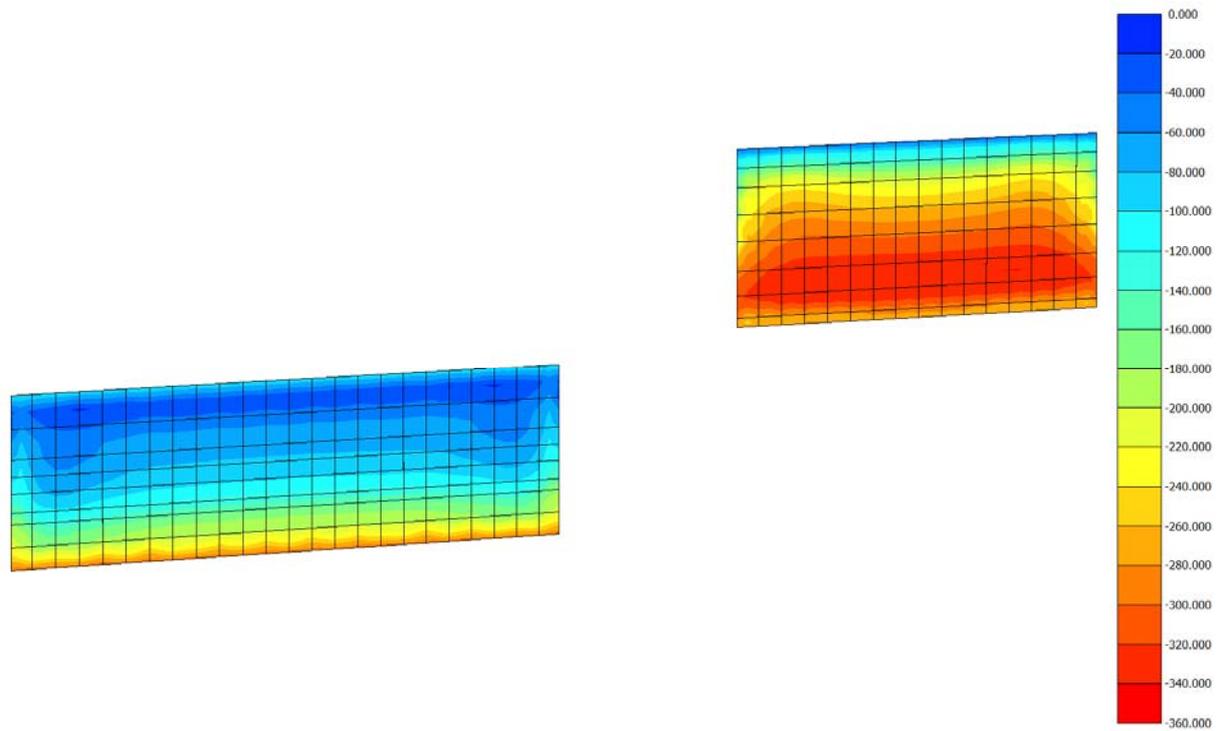
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>	



*East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest*

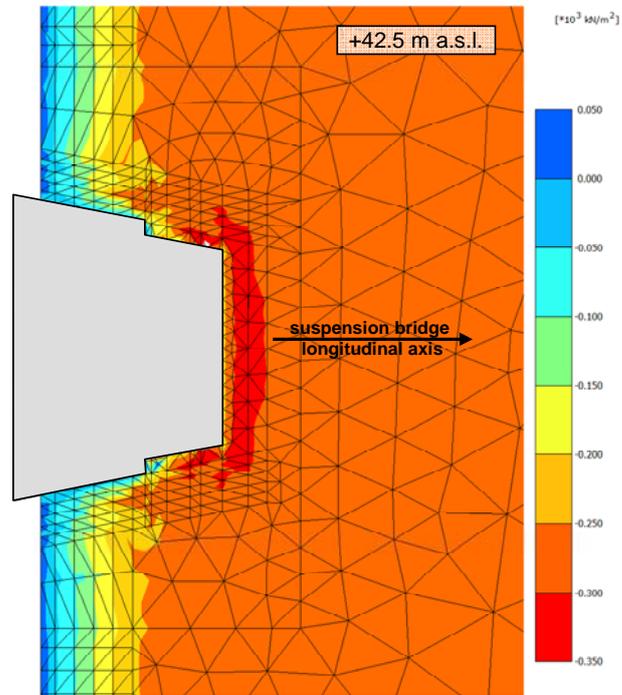
**Figura 47.** *Condizione di carico ULS: contorni di  $\tau_{rel}$  (a) in una sezione longitudinale attraverso il centro di gravità ( $Z = 225$  m) e (b) in una sezione trasversale ( $X = 172$  m)*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0065_0_ITA.doc</i>	Rev 0	Data 13-04-2011	

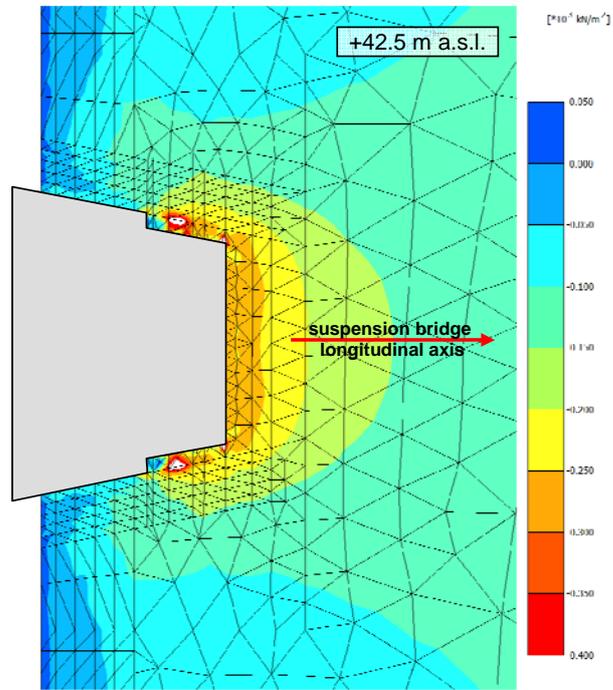


*Figura 48. Condizione di carico ULS: contorni di  $\sigma_N$  (in kPa) che agiscono sull'elemento di interfaccia terreno-muro dei diaframmi trasversali*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	



(a)

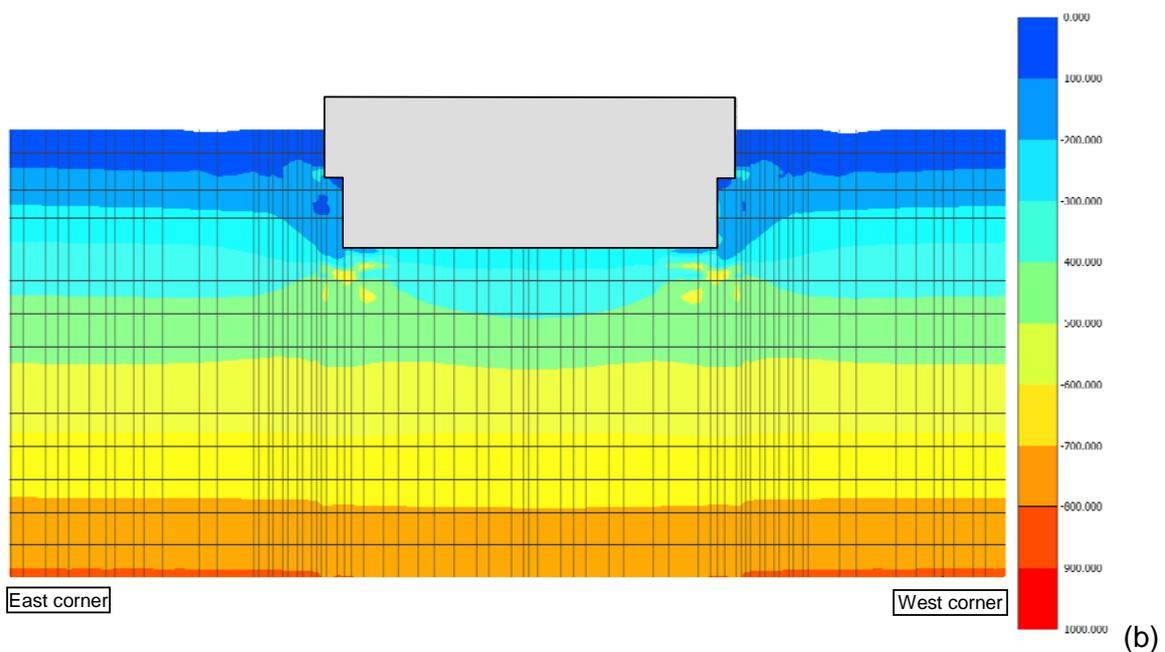
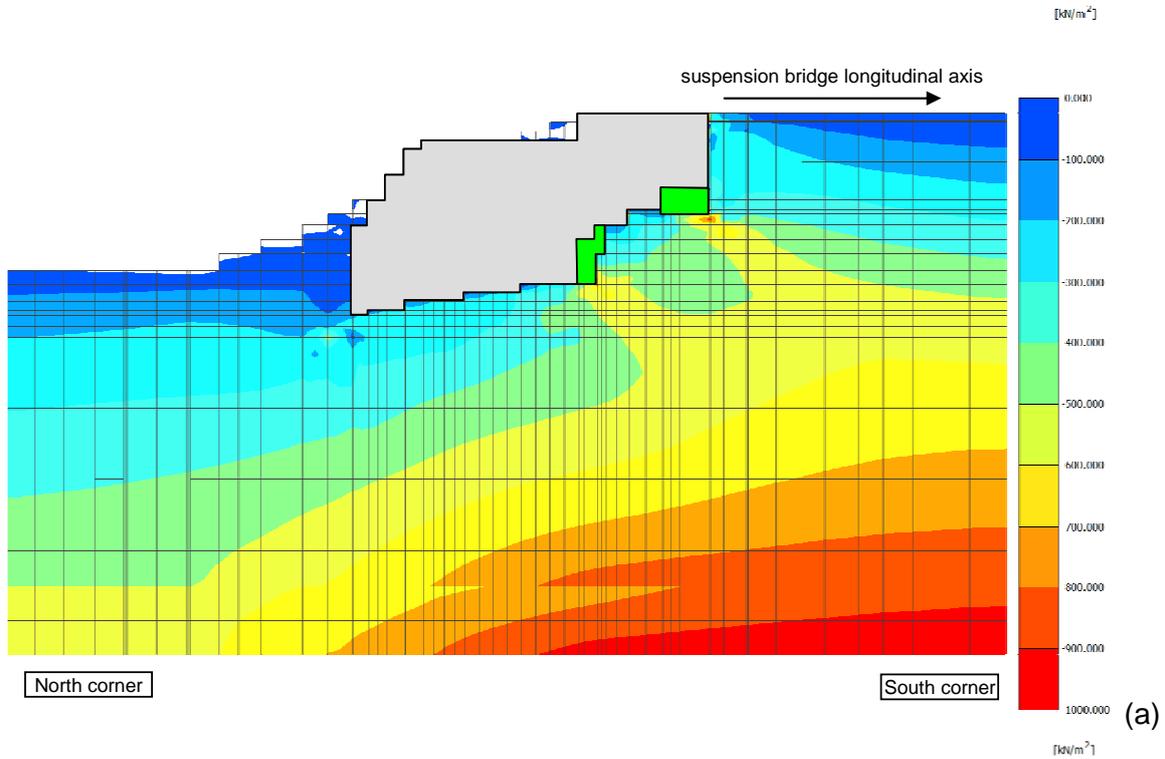


(b)

Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale

**Figura 49. Condizione di carico ULS: contorni di (a) sollecitazione verticale effettiva  $\sigma_{YY}$  e (b) sollecitazione orizzontale effettiva  $\sigma_{XX}$  su un piano orizzontale a  $Y = 42.5$  m s.l.m**

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	

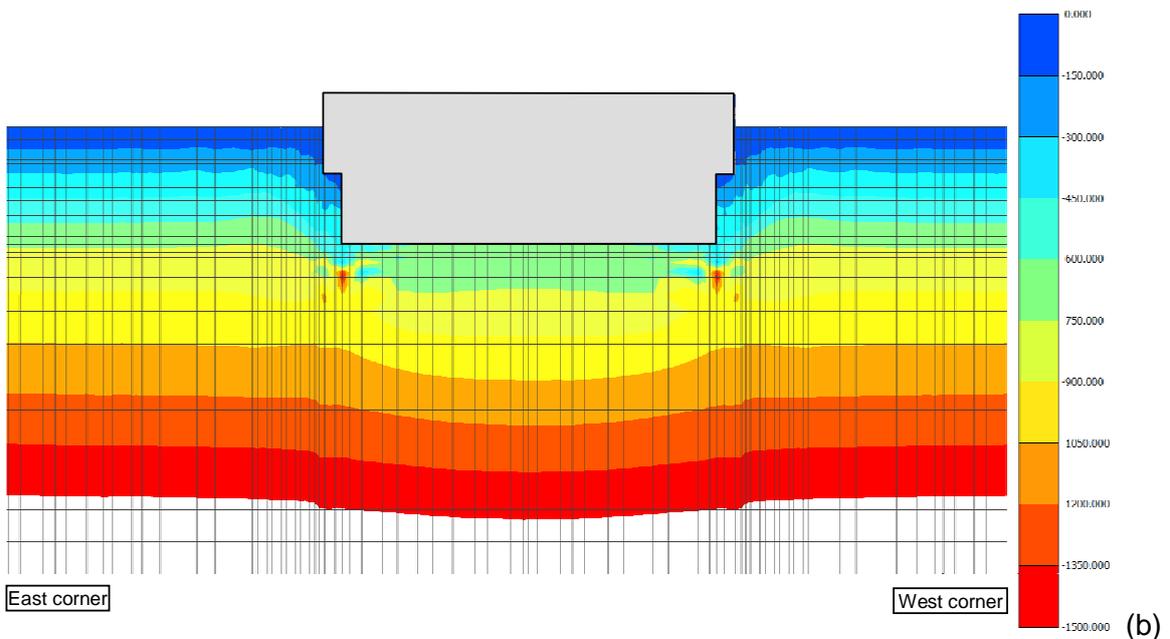
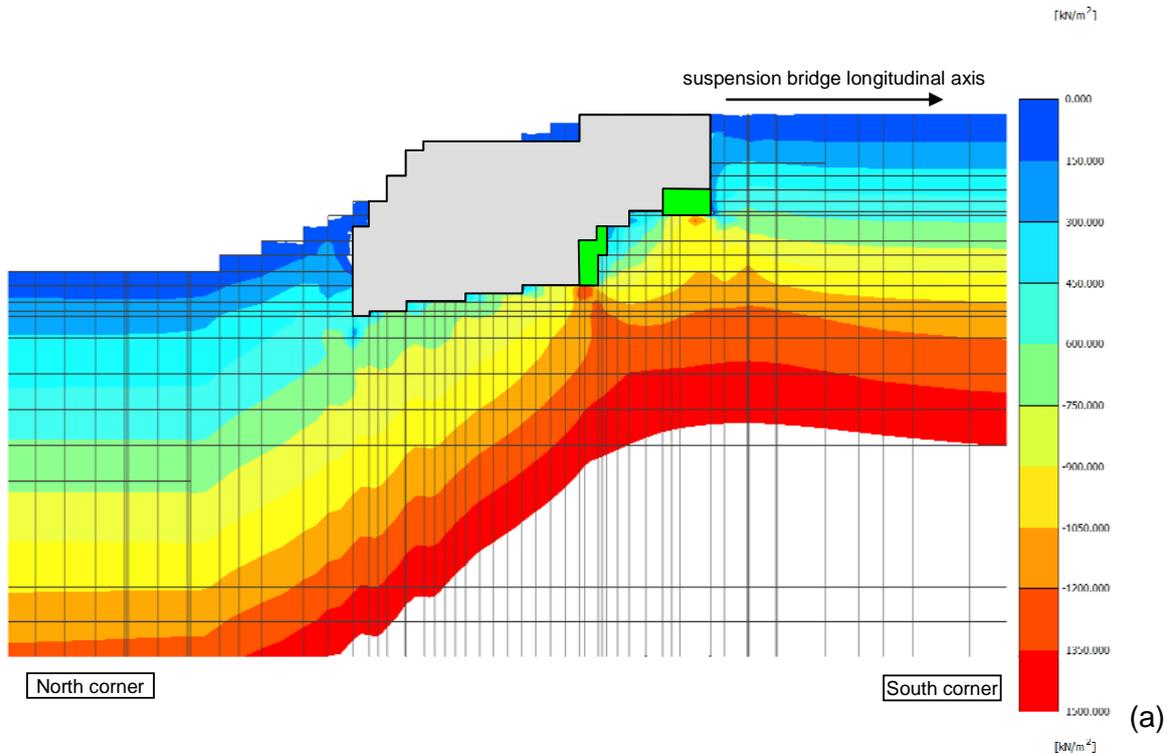


Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale

North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest

**Figura 50. Condizione di carico ULS: contorni della sollecitazione orizzontale effettiva (a)  $\sigma_{xx}$  in una sezione longitudinale  $Z = 225$  m e (b)  $\sigma_{zz}$  in una sezione trasversale  $X = 172$  m**

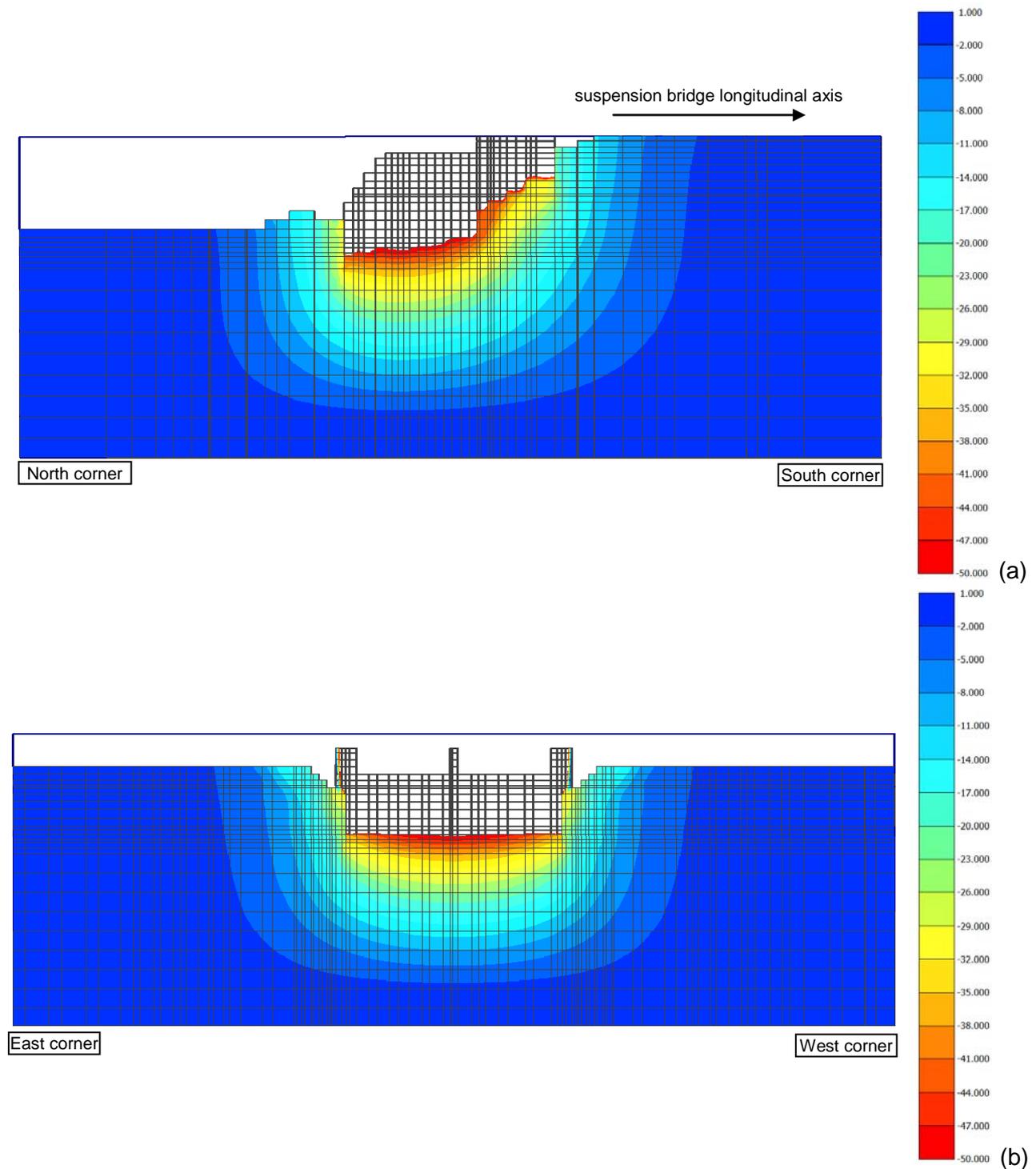
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>	



Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale  
 North corner = angolo Nord;    South corner = angolo Sud;    East corner = angolo Est;    West corner = angolo Ovest

**Figura 51.** Condizione di carico ULS: contorni della sollecitazione verticale effettiva  $\sigma_{YY}$  (a) in una sezione longitudinale  $Z = 225$  m e (b) in una sezione trasversale  $X = 172$  m

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

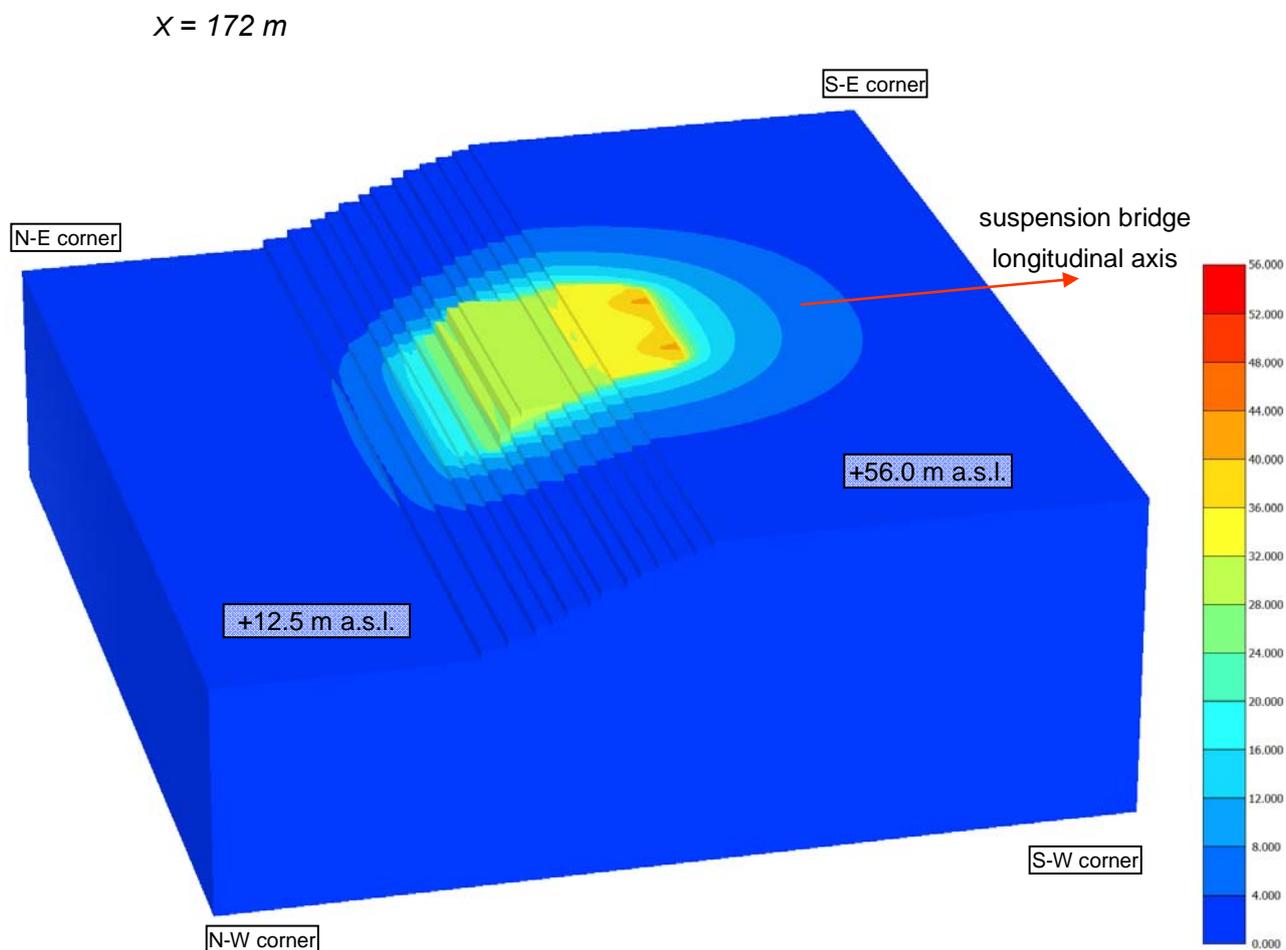


Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale

North corner = angolo Nord;    South corner = angolo Sud;    East corner = angolo Est;    West corner = angolo Ovest

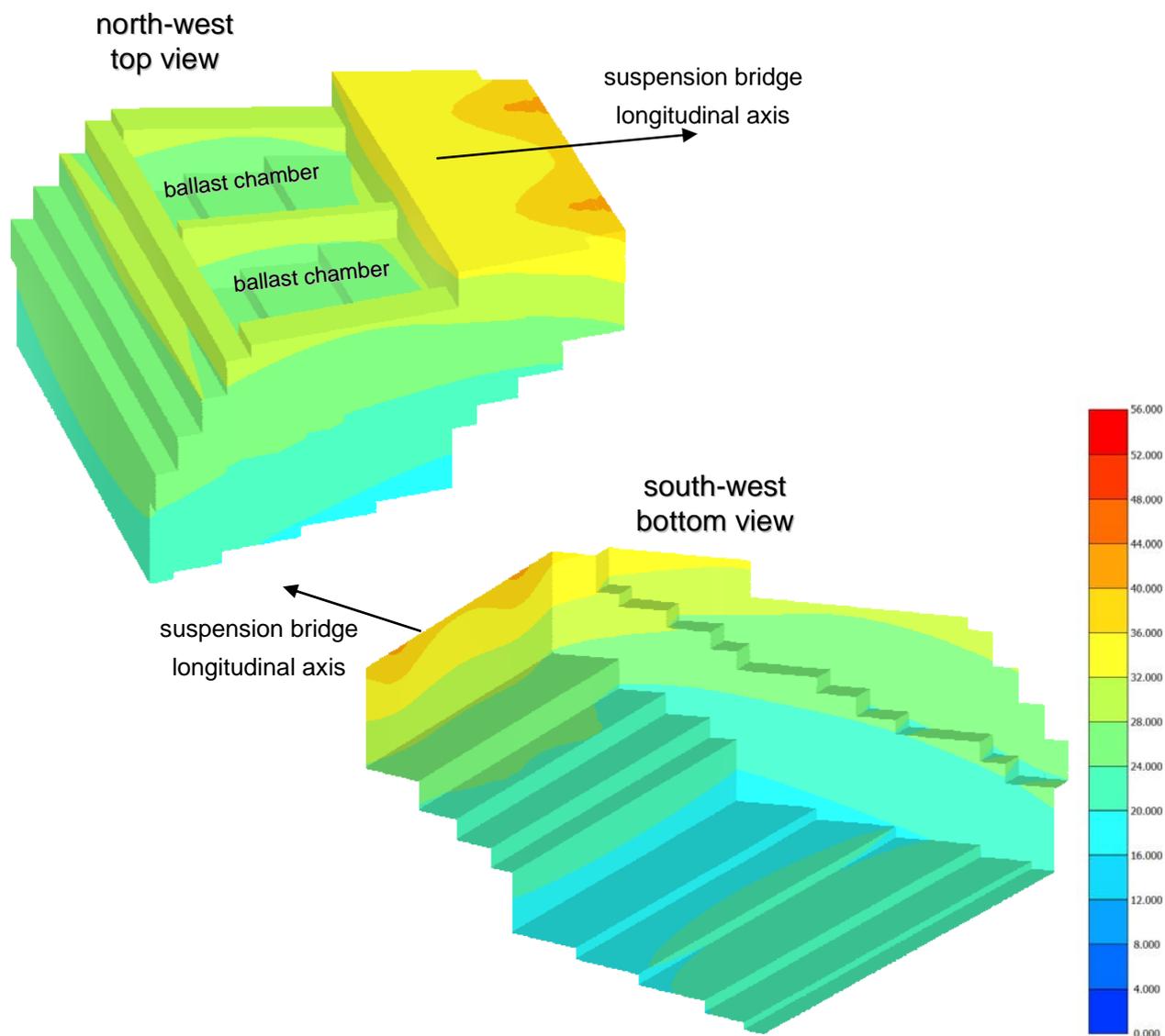
**Figura 52.** Fine della costruzione del blocco: contorni di spostamento verticale, (direzione Y; in mm) (a) in una sezione longitudinale Z = 225 m e (b) in una sezione trasversale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20-06-2011</i>	



**Figura 53. Condizione di carico SILS: contorni di spostamento totale (in mm) in una vista prospettica del modello FE 3D**

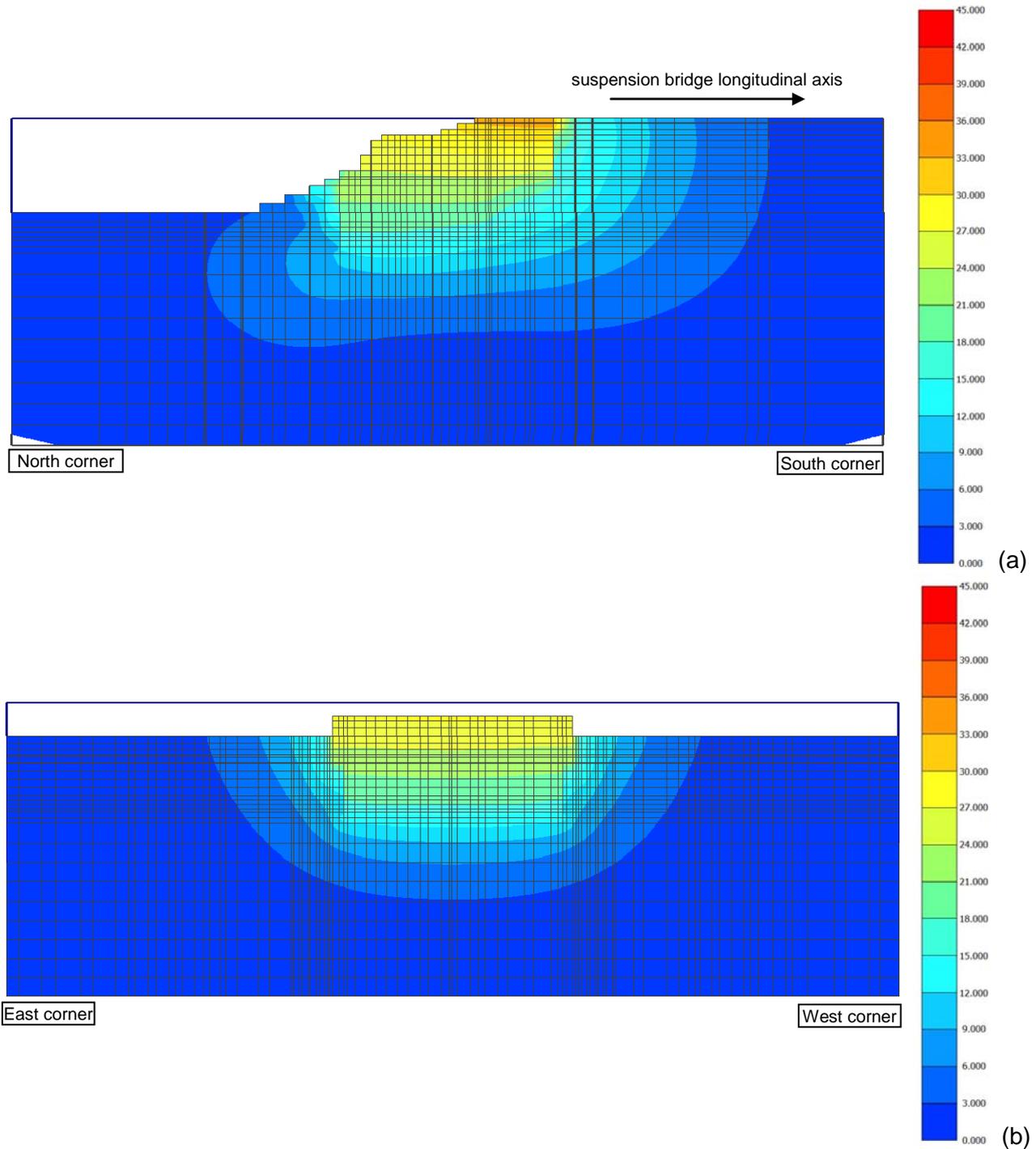
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	



suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale; *north-west top view* = nord-ovest vista dall'alto; *south-west bottom view* = sud-ovest vista dal basso; *ballast chamber* = camera zavorrata

*Figura 54. Condizione di carico SILS: contorni di spostamento totale in una vista prospettica del blocco di ancoraggio Sicilia*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	



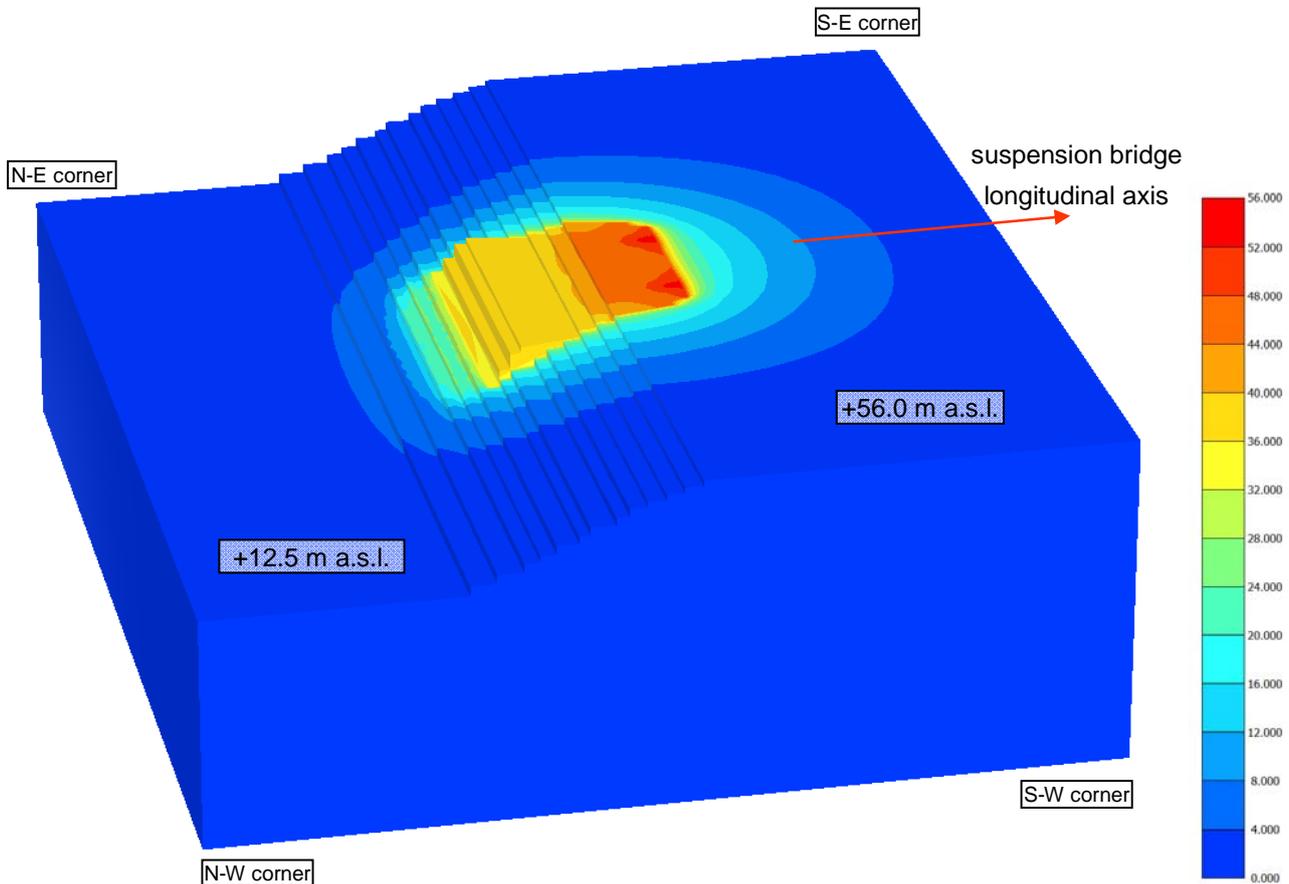
Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale

North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest

**Figura 55. Condizione di carico SILS: contorni di spostamento orizzontale longitudinale (direzione X; in mm) (a) in una sezione longitudinale Z = 225 m e (b) in una sezione trasversale X = 172 m**



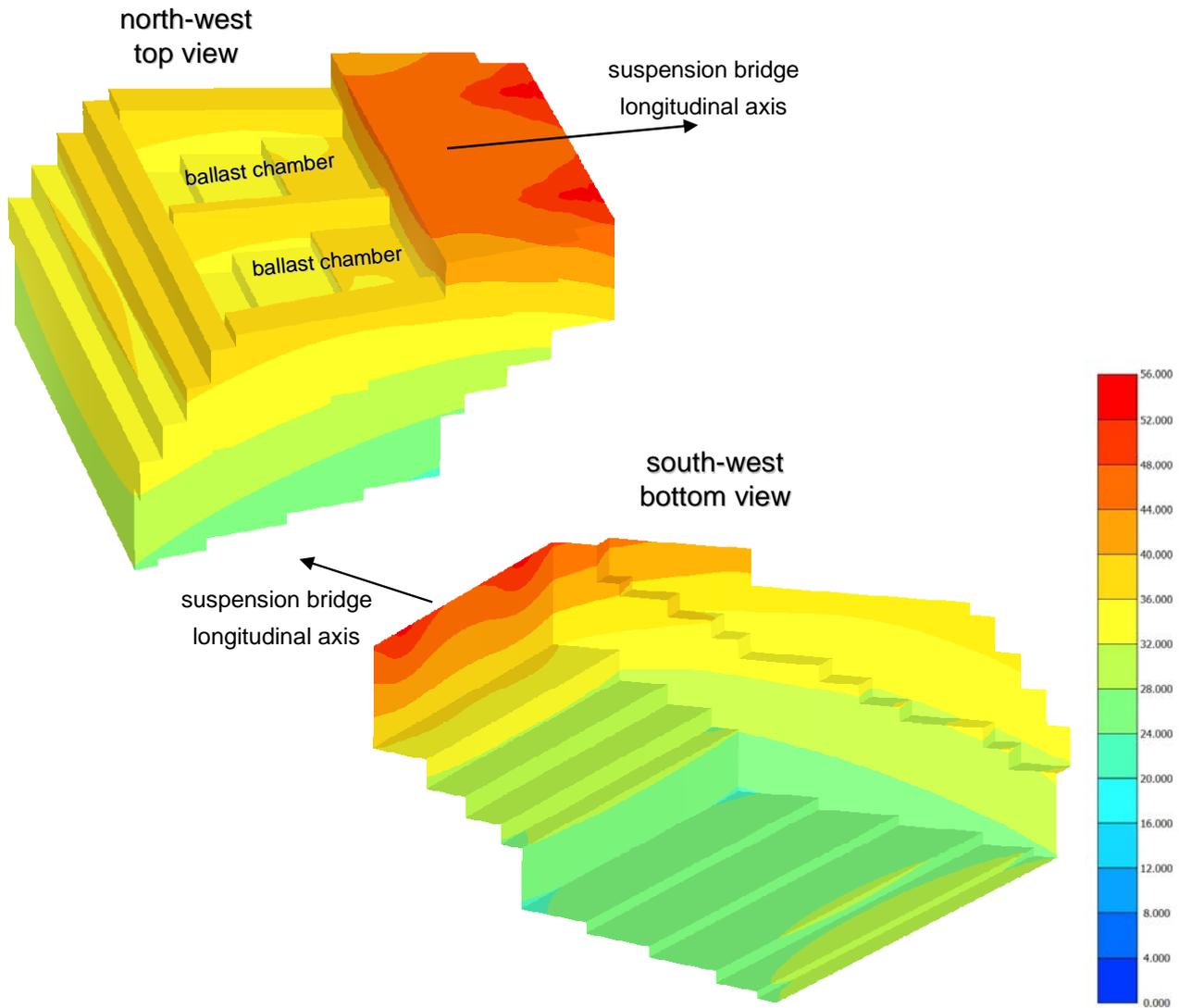
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20-06-2011	



Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale  
 N-E corner = angolo N-E;    S-E corner = angolo S-E;    N-W corner = angolo N-O;    S-W corner = angolo S-O

*Figura 57. Condizione di carico ULS: contorni di spostamento totale (in mm) in una vista prospettica del modello FE 3D*

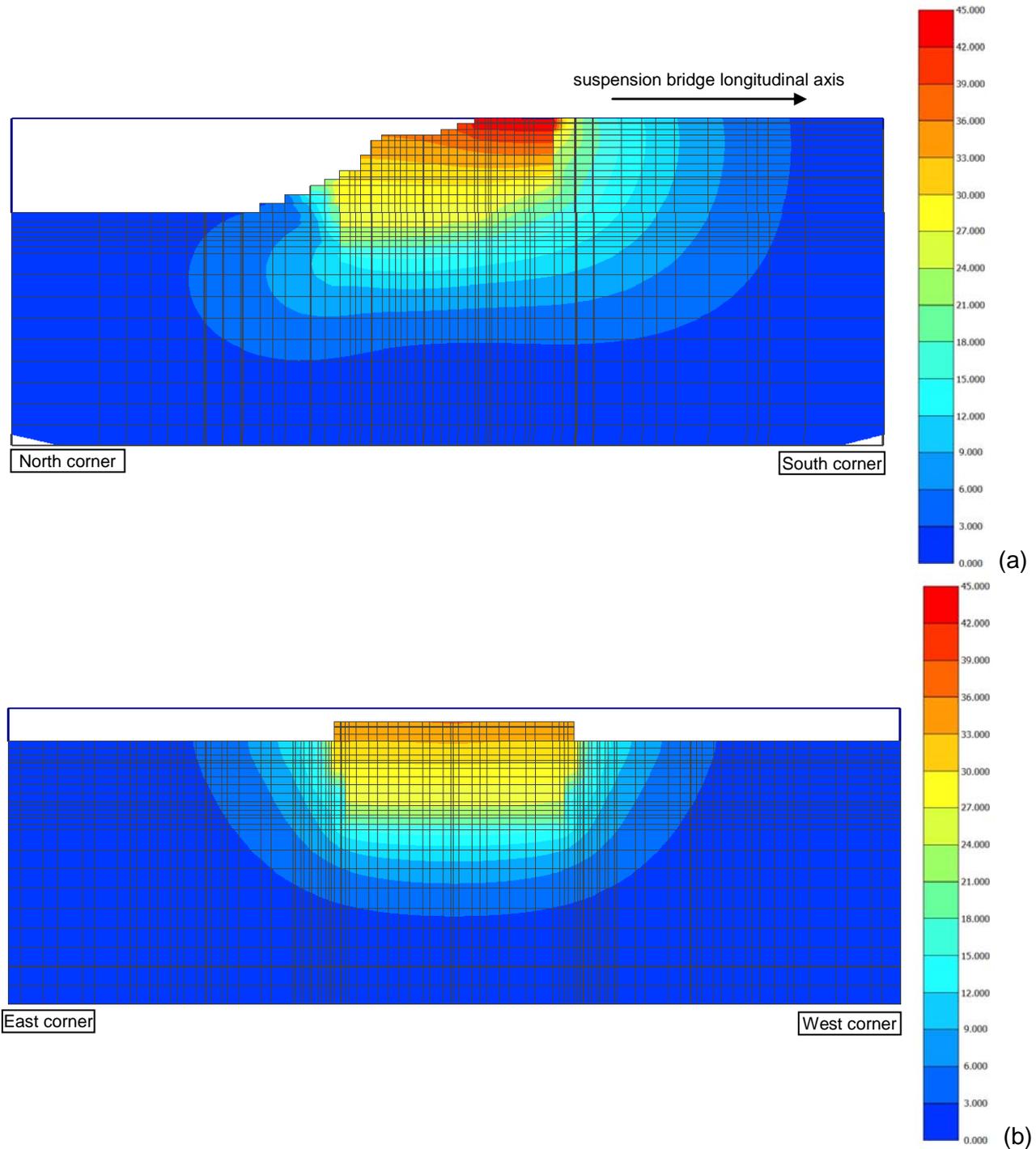
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento PF0065_0_ITA.doc	Rev 0	Data 13-04-2011	



suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso asse longitudinale; north-west top view = nord-ovest vista dall'alto;  
 south-west bottom view= sud-ovest vista dal basso; ballast chamber = camera zavorrata

**Figura 58. Condizione di carico ULS: contorni di spostamento totale in una vista prospettica del blocco di ancoraggio Sicilia**

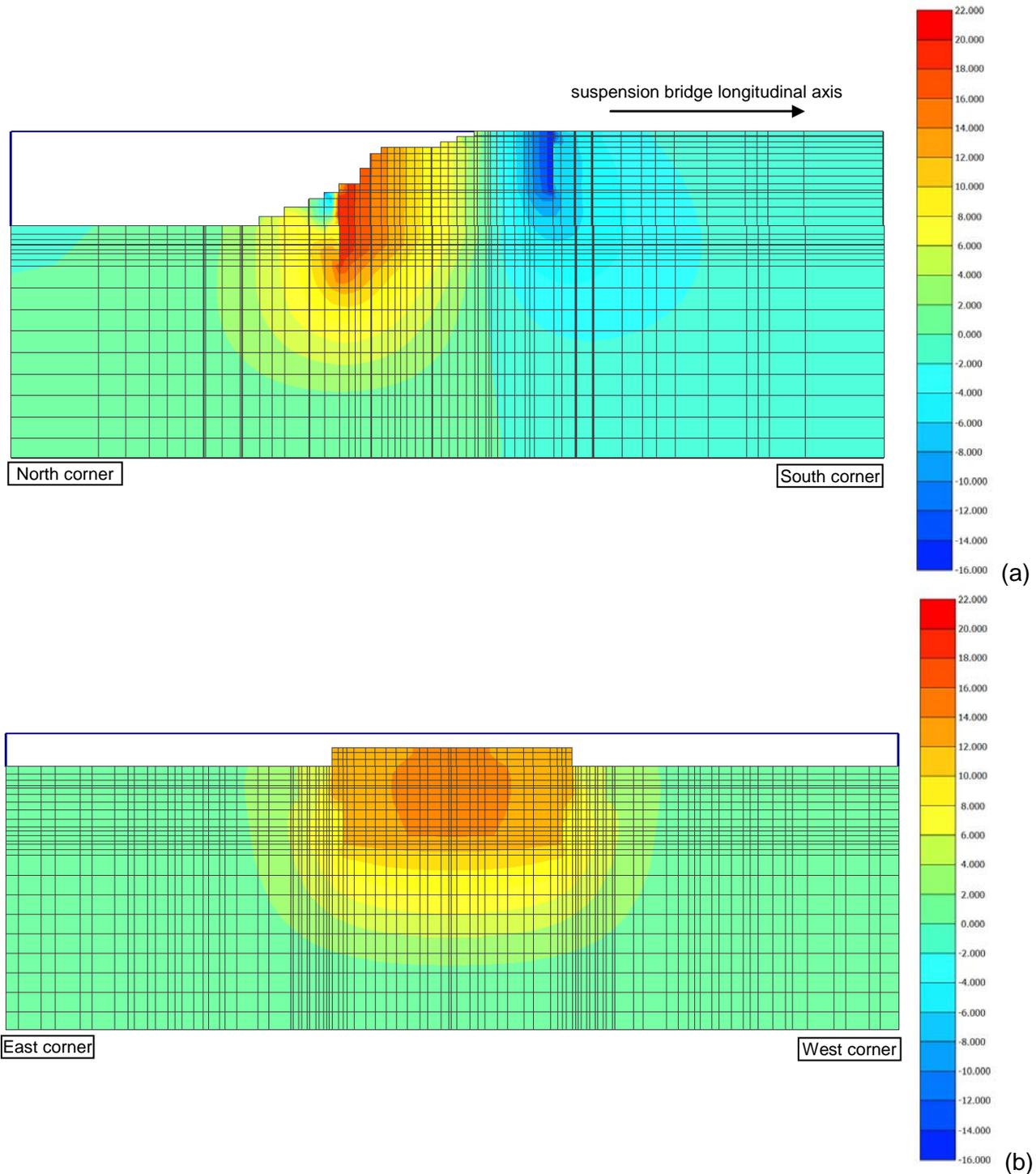
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	



Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale

North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest

**Figura 59. Condizione di carico ULS: contorni di spostamento orizzontale longitudinale (direzione X; in mm) (a) in una sezione longitudinale Z = 225 m e (b) in una sezione trasversale X = 172 m**



Suspension bridge longitudinal axis = ponte sospeso      asse longitudinale

North corner = angolo Nord; South corner = angolo Sud; East corner = angolo Est; West corner = angolo Ovest

**Figura 60. Condizione di carico ULS: contorni di spostamento verticale (direzione Y; in mm) (a) in una sezione longitudinale Z = 225 m e (b) in una sezione trasversale X = 172 m**

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>	

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

Le forze trasmesse dai cavi principali al Blocco di Ancoraggio Sicilia 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 1.06 e 0.90 (Tabella A.3); il rapporto più alto si riferisce alla combinazione di carico ULS, mentre quello più basso si riferisce alla combinazione di carico 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 5.8% più alte rispetto ai corrispondenti valori IBDAS, con il risultato di una stima prudentiale del comportamento del Blocco di Ancoraggio Sicilia. 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> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

Tabella A.1 – Condizioni di Carico Statico – modello IBDAS 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	2184	605	2266
max u <sub>vert</sub>		<b>3575</b>	<b>1081</b>	<b>3735</b>
min u <sub>hor</sub>		2184	605	2266
max u <sub>hor</sub>		3575	1081	3735
min R <sub>transv</sub>		2184	605	2266
max R <sub>transv</sub>		3575	1081	3735
min u <sub>vert</sub>	SILS	2479	710	2578
max u <sub>vert</sub>		3245	945	3380
min u <sub>hor</sub>		2479	710	2578
max u <sub>hor</sub>		3245	945	3380
min R <sub>transv</sub>		2479	710	2578
max R <sub>transv</sub>		3245	945	3380
min u <sub>vert</sub>	SLS2	2188	607	2271
max u <sub>vert</sub>		3215	958	3355
min u <sub>hor</sub>		2188	607	2271
max u <sub>hor</sub>		3215	958	3355
min R <sub>transv</sub>		2188	607	2271
max R <sub>transv</sub>		3215	958	3355

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali		<i>Codice documento</i> <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>

Tabella A.2 – Condizioni di Carico Sismico – modello IBDAS globale aggiornato model 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	2071	553	2143
max u <sub>vert</sub>		3488	1064	3647
min u <sub>hor</sub>		2199	629	2287
max u <sub>hor</sub>		3360	988	3502
min R <sub>transv</sub>		2173	623	2260
max R <sub>transv</sub>		3386	994	3529
min u <sub>vert</sub>	SILS	2357	653	2446
max u <sub>vert</sub>		<b>3341</b>	<b>992</b>	<b>3485</b>
min u <sub>hor</sub>		2498	737	2605
max u <sub>hor</sub>		3199	909	3326
min R <sub>transv</sub>		2469	730	2575
max R <sub>transv</sub>		3228	916	3355
min u <sub>vert</sub>	SLS2	2143	585	2221
max u <sub>vert</sub>		<b>3244</b>	<b>974</b>	<b>3387</b>
min u <sub>hor</sub>		2201	620	2287
max u <sub>hor</sub>		3185	939	3321
min R <sub>transv</sub>		2189	617	2275
max R <sub>transv</sub>		3197	942	3333

Tabella A.3: Forze dei cavi nel Blocco di Ancoraggio Sicilia: valore del progetto d'offerta e IBDAS (modello versione 3.3b)

Situazione di carico	Progetto d'Offerta	IBDAS statico	IBDAS sismico	F <sub>TD</sub> /F <sub>IBDAS</sub>
	F (MN)	F (MN)	F (MN)	
ULS	3964	3735	3647	1.06
SILS	3146	3380	3485	0.90
SLS2	3250	3355	3387	0.96

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> PF0065_0_ITA.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 13-04-2011	

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

Le forze trasmesse dai cavi principali al Blocco di Ancoraggio Sicilia 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 1.08 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 carico 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 dell'8% più alte rispetto ai corrispondenti valori IBDAS, con il risultato di una stima prudentiale del comportamento del Blocco di Ancoraggio Sicilia. 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> <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>	

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	596	2256
max u <sub>vert</sub>		<b>3525</b>	<b>1057</b>	<b>3680</b>
min u <sub>hor</sub>		2176	597	2256
max u <sub>hor</sub>		3525	1057	3680
min R <sub>transv</sub>		2176	597	2256
max R <sub>transv</sub>		3525	1057	3680
min u <sub>vert</sub>	SILS	2439	690	2535
max u <sub>vert</sub>		3205	924	3336
min u <sub>hor</sub>		2439	690	2535
max u <sub>hor</sub>		3205	924	3336
min R <sub>transv</sub>		2439	691	2535
max R <sub>transv</sub>		3205	924	3336
min u <sub>vert</sub>	SLS2	2181	598	2261
max u <sub>vert</sub>		3175	937	3311
min u <sub>hor</sub>		2181	598	2261
max u <sub>hor</sub>		3175	937	3311
min R <sub>transv</sub>		2181	598	2261
max R <sub>transv</sub>		3175	937	3311

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	<i>Codice documento</i> <i>PF0065_0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>0</i>	<i>Data</i> <i>13-04-2011</i>	

Tabella B.2 – Condizioni di Carico Sismico – 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	2105	554	2177
max u <sub>vert</sub>		3397	1030	3550
min u <sub>hor</sub>		2138	587	2217
max u <sub>hor</sub>		3364	997	3509
min R <sub>transv</sub>		2250	638	2339
max R <sub>transv</sub>		3252	946	3387
min u <sub>vert</sub>	SILS	2363	645	2449
max u <sub>vert</sub>		<b>3255</b>	<b>960</b>	<b>3394</b>
min u <sub>hor</sub>		2399	681	2494
max u <sub>hor</sub>		3218	924	3348
min R <sub>transv</sub>		2523	737	2629
max R <sub>transv</sub>		3094	868	3214
min u <sub>vert</sub>	SLS2	2154	581	2231
max u <sub>vert</sub>		<b>3185</b>	<b>949</b>	<b>3323</b>
min u <sub>hor</sub>		2169	596	2250
max u <sub>hor</sub>		3170	934	3304
min R <sub>transv</sub>		2220	619	2305
max R <sub>transv</sub>		3117	910	3249

Tabella B.3: Forze dei cavi nel Blocco di Ancoraggio Sicilia: valori del progetto d'offerta e IBIDAS (modello versione 3.3f)

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	3964	3680	3550	1.08
SILS	3146	3336	3394	0.93
SLS2	3250	3311	3323	0.98

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi numeriche in condizioni tridimensionali	Codice documento <i>PF0065_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20-06-2011	

## RIFERIMENTI

- Bustamante M., Doix B. (1985). *Une méthode pour le calcul des tirants et des micropiux injectés*. Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées, 140, pp 75-95.
- Mansur C. I., Kauffman R. I.(1962). *Dewatering*, Cap.3 in Foundation Engineering. McGraw Hill, N.Y.
- Mesri. (1989) *Personal communication*.
- 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.
- 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.