



PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



PROGETTO DEFINITIVO

EUROLINK S.C.p.A.

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

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

<p><i>Unità Funzionale</i></p> <p><i>Tipo di sistema</i></p> <p><i>Raggruppamento di opere/attività</i></p> <p><i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i></p> <p><i>Titolo del documento</i></p>	<p>OPERA DI ATTRAVERSAMENTO</p> <p>SOTTOSTRUTTURE</p> <p>FONDAZIONI TORRI</p> <p>Torri</p> <p>Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza</p>	<p>PF0004_F0</p>
---	---	------------------

CODICE	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>G</td><td>C</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>P</td><td>C</td><td>L</td><td>D</td><td>P</td><td>S</td><td>T</td><td>F</td><td>3</td><td>T</td><td>S</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>F0</td> </tr> </table>	G	C	1	0	0	0	P	C	L	D	P	S	T	F	3	T	S	0	0	0	0	0	0	0	1	F0
G	C	1	0	0	0	P	C	L	D	P	S	T	F	3	T	S	0	0	0	0	0	0	0	1	F0		

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	20-06-2011	EMISSIONE FINALE	DL	GR	CV

NOME DEL FILE: PF0004_F0_ITA

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

INDICE

INDICE	3
RELAZIONE DI SINTESI	4
1 Introduzione	6
2 La fondazione della torre sulla sponda siciliana	7
3 Profilo del suolo e caratterizzazione geotecnica	10
3.1 Stato tensionale in situ	11
3.2 Parametri di resistenza a taglio	12
3.3 Rigidezza	12
4 Modello FEM 3D	15
4.1 Profilo del suolo	16
4.2 Griglia di elementi finiti	16
4.3 Modello costitutivo del suolo e parametri del suolo	17
4.4 Elementi strutturali	21
4.4.1 Basamenti	21
4.4.2 Pareti diaframma	22
4.5 Sequenza di calcolo	25
4.6 Condizioni di carico ULS	27
4.6.1 ULS – STRU (approccio 1 combinazione 1- A1+M1+R1)	28
4.6.2 ULS - GEO (approccio 1 combinazione 2 – A2+M2+R2)	29
4.6.3 Risultati delle analisi ULS	31
4.7 Condizione di carico SILS	34
4.7.1 Risultati dell'analisi SILS	35
4.8 Condizione di carico SLS2	36
4.8.1 Risultati dell'analisi SLS2	37
5 Capacità portante per via di calcolo manuale	38
5.1 Caso A1M1	41
5.2 Caso A2M2	42
6 Aggiornamento dei carichi dal nuovo modello IBDAS	43
7 Appendice A – Confronto fra i carichi del modello IBDAS globale 3.3.b e 3.3.f	100

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

RELAZIONE DI SINTESI

Capitolo §1 – Introduzione: vengono presentati gli obiettivi principali della relazione sulle analisi numeriche: 1) verificare che non venga superato lo stato limite ultimo, consistente in una rottura del terreno al di sotto della fondazione della torre; 2) fornire al progettista strutturista le curve di spostamento del carico essenziali per valutare la sicurezza dello stato limite ultimo conseguente all'eccessiva deformazione del terreno. Gli argomenti suddetti sono trattati facendo riferimento alle condizioni di carico di stato limite ultimo definite dalle NTC 2008 (ULS-STRU e ULS-GEO) ed alle condizioni di carico di stato limite di integrità strutturale definite dai documenti della gara di appalto (SILS). Inoltre, per quanto riguarda gli stati limite di servizio, viene analizzato il comportamento delle fondazioni e vengono valutati gli spostamenti in riferimento alla condizione di carico SLS2.

Capitolo § 2 – La fondazione della Torre sulla sponda siciliana: sono descritte le principali caratteristiche geometriche della fondazione della torre e sono presentate le condizioni di carico considerate.

Capitolo §3 – Profilo del suolo e caratterizzazione geotecnica: viene presentata un breve compendio delle caratteristiche geotecniche del sottosuolo. Per maggiori dettagli sulle indagini geotecniche recenti e sulla caratterizzazione, vedere la relazione geotecnica CG1003-P-RG-D-P-SB-G3-00-00-00-00_01_A_Upd_Geot_Char_ANX.

Capitolo §4 – Modello FEM 3D: viene descritto il modello numerico della fondazione della torre. Sono discussi in particolare i seguenti aspetti: il profilo del suolo, la griglia dell'elemento finito, il modello costitutivo del suolo ed i parametri del suolo adottati; la modellazione degli elementi strutturali (basamenti, trave di collegamento e pareti diaframma); la sequenza di calcolo. Le differenti condizioni di carico ed i risultati corrispondenti sono presentati in un apposito sottocapitolo che tratta quanto segue: Condizioni di carico ULS (ULS – STRU e ULS – GEO); Condizioni di carico SILS; Condizioni di carico SLS2.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

I principali risultati ottenuti mediante i calcoli FEM sono esposti nella tabella seguente:

Stato limite	Carico/carico di progetto	Spostamento verticale (m)				
		A	B	C	D	E
ULS:						
A1+M1+R1	1.00	-0.060	-0.091	-0.123		
valore max. raggiunto	7.29	-1.40	-3.12	-4.87		
A2+M2+R2	1.00	-0.049	-0.085	-0.121		
valore max. raggiunto	7.58	-0.92	-3.90	-6.96		
SILS	1.00	-0.075	-0.105	-0.136	-0.102	-0.110
SLS2	1.00	-0.072	-0.085	-0.098	-0.082	-0.089

Nella tabella il fattore di amplificazione del carico di progetto è riportato nella seconda colonna, nelle colonne da 3 a 8 sono richiamati gli assestamenti dei cinque punti selezionati su due diametri ortogonali. I punti si riferiscono ad una sola gamba della fondazione perché il modello 3D adottato è simmetrico attorno ad un asse ortogonale alla costa. I fattori di amplificazione permettono di apprezzare l'entità della distanza da qualsiasi forma di collasso individuabile mediante i calcoli FEM: in altre parole, il modello FEM non ha mostrato alcun chiaro collasso del suolo fino a che i carichi di progetto erano moltiplicati per un numero fra 7 e 8. Gli assestamenti dei cinque punti selezionati con la combinazione SLS2 vanno da 72 a 98 mm, mostrando una rotazione significativa soltanto verso la costa.

Capitolo §5 – Capacità portante per via di calcolo manuale: sono presentati i calcoli manuali della capacità portante della fondazione riferiti alle condizioni di carico ULS. Vengono dedotti ampi fattori di sicurezza globale mediante la formula convenzionale di Brinch-Hansen per la capacità portante di fondazioni superficiali.

Capitolo §6 – Aggiornamento del carico dal nuovo modello IBDAS: In questo capitolo sono analizzate le caratteristiche principali delle nuove combinazioni di carichi sulle fondazioni della torre fornite dal nuovo modello IBDAS. Le combinazioni di carichi sono suddivise in ULS, SLS2, SILS e SLS1. Inoltre sono suddivise in combinazioni statiche e sismiche, queste ultime essendo derivate dall'analisi spettrale del ponte. Le combinazioni statiche

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

ULS sono state fornite secondo le NTC 2008 come ULS-GEO per la verifica della capacità portante. I calcoli manuali descritti al capitolo 5 sono stati utilizzati per selezionare le combinazioni peggiori. I risultati dei calcoli manuali insieme alle curve di spostamento del carico ottenute mediante le analisi FEM 3D per le combinazioni peggiori selezionate sono riportati in questo capitolo finale della relazione.

1 Introduzione

La presente relazione descrive le analisi 3D di elementi finiti eseguite per le fondazioni della torre sulla sponda siciliana del ponte sospeso sullo Stretto di Messina. I calcoli presentati in questo documento si basano principalmente sui disegni ed i dati geotecnici forniti nel progetto dell'appalto. Qualsiasi modifica nella geometria o qualsiasi ipotesi di semplificazione saranno chiaramente evidenziati.

Sono già disponibili nuovi dati geotecnici a seguito di indagini sul sito e test di laboratorio, e presto saranno disponibili ulteriori dati. Naturalmente sono presi in considerazione soltanto dati disponibili alla data di revisione del documento. Per maggiori dettagli su questo argomento, vedere la relazione geotecnica CG1003-P-RG-D-P-SB-G3-00-00-00-01_A_Upd_Geot_Char_ANX.

Nel *Progetto Preliminare* si era dovuto fare un certo numero di ipotesi, dato che alcune informazioni necessarie sulle caratteristiche del suolo non erano disponibili. Tali ipotesi si basavano su dati di pubblicazioni ed erano sempre prudenziali. I parametri di input ed i risultati delle analisi sono adesso aggiornati, tenendo in considerazione i dati risultanti dalla indagine geotecnica programmata per il Progetto Definitivo. Nel frattempo è stata approvata la nuova normativa tecnica italiana NTC 2008 e questa relazione è aggiornata anche sotto questo profilo.

Le analisi numeriche presentate in questa relazione interessano anzitutto gli stati limite ultimi in cui la forza del suolo è significativa nel conferire resistenza: i principali obiettivi delle analisi sono:

1. verificare che non venga superato lo stato limite ultimo, consistente in una rottura del terreno al di sotto delle fondazioni della torre
2. fornire al progettista strutturista le curve di spostamento del carico essenziali per valutare la sicurezza dello stato limite ultimo conseguente all'eccessiva deformazione del terreno.

Gli argomenti suddetti sono trattati facendo riferimento alle condizioni di carico di stato limite ultimo (ULS-STRU e ULS-GEO) e alle condizioni di carico di stato limite di integrità strutturale (SILS).

Inoltre, per quanto riguarda gli stati limite di servizio, viene analizzato il comportamento delle

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

fondazioni e vengono valutati gli spostamenti in riferimento alla condizione di carico SLS2.

2 La fondazione della torre sulla sponda siciliana

La fondazione della torre in Sicilia consiste in due massicci basamenti circolari in calcestruzzo con diametro $D = 55$ metri, con un interasse $i = 77,5$ m. I due basamenti sono collegati da un trave di cemento armato precompresso a sezione scatolare ($H = 15.50$ m; $L = 18.00$ m) gettato sul posto da -11 metri a $+4,5$ metri s.l.m.

Il livello del terreno nella zona della fondazione è di ca. $5-6$ m. s.l.m. L'area presenta una leggera pendenza verso la costa, che si trova a ca. $60-50$ metri dal centro della fondazione. Davanti alla torre il fondo del mare ha una pendenza di ca. 13 gradi.

Lo scavo richiesto per raggiungere la profondità di fondazione, a -15 m. s.l.m. è sostenuto da pareti diaframma circolari, che raggiungono -45 m. s.l.m. Il diaframma consiste in un pannello di cemento armato con spessore 1.00 e larghezza 3.00 m, gettato sul posto da $+2.50$ m s.l.m. a -5.00 m s.l.m.

Il suolo al di sotto della fondazione della torre (ossia al di sotto dei due basamenti e del trave di collegamento) deve essere trattato con colonne secanti realizzate mediante iniezione ad alta pressione fino ad una profondità di 41.5 m (da -15 m s.l.m. a -38.5 m s.l.m.). Nella documentazione della gara le colonne messe in opera per iniezione ad alta pressione erano un poco più lunghe: una colonna delle tre era prolungata in basso fino a -45 m s.l.m. L'ipotesi di cui sopra è stata concordata come potenziale fonte di risparmi e semplificazione tecnica, che non comporta un peggioramento delle prestazioni della fondazione.

Inoltre le caratteristiche meccaniche del suolo attorno ai due basamenti devono essere migliorate mediante qualche tipo di iniezione, principalmente allo scopo di ridurre il suo potenziale di liquefazione.

Gli effetti dei carichi applicati sui basamenti del ponte sono stati dedotti dalla Tabella 2.1 a pagina 7 della *Relazione specialistica sottostrutture* (PG 2R B0-001 N07 p2). Questi effetti (carico da applicare sulla fondazione) sono stati confermati dagli ingegneri strutturisti come combinazioni di carichi da utilizzare anche in questa fase delle progettazione.

Tali effetti sono esposti sinteticamente nella Tabella 1, Tabella 2 e Tabella 3 come forze verticali,

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

forze orizzontali e momenti flettenti. Va notato che gli effetti sul progetto dell'ULS nella tabella 1 non corrispondono alla somma degli effetti dei carichi mobili e permanenti previsti dagli ingegneri strutturisti, in quanto non corrispondono alle stesse combinazioni di carichi. Gli effetti nella Tabella 1, Tabella 2 e Tabella 3 derivano dall'analisi delle strutture del ponte soggette a carichi di progetto, ottenute moltiplicando i carichi caratteristici per i fattori di amplificazione prescritti dai documenti della gara di appalto. Le caratteristiche principali delle azioni sismiche, considerate mediante un approccio pseudo-statico nelle analisi strutturali, che inducono gli effetti riportati nelle tabelle succitate, sono riportati nella Tabella 4.

Una questione piuttosto complessa è quella che riguarda la valutazione dei valori ammessi per gli spostamenti e le rotazioni. In un progetto così imponente, questa valutazione non può naturalmente limitarsi a criteri empirici. In questa relazione i valori calcolati per gli spostamenti costituiscono semplicemente delle relazioni. Con il solo scopo di ricordare e fissare alcuni riferimenti generali, la documentazione della gara ha considerato, come requisito principale da soddisfare in termini di stati limite di servizio, che la rotazione della torre non dovrà superare il valore ammesso, fissato all'1%.

Infine va notato che l'analisi della fondazione soggetta al valore di progetto di forze e momento indicati nelle Tabelle 1, 2 e 3, non esauriscono l'analisi delle prestazioni della fondazione. Di norma, il comportamento della fondazione dovrà essere analizzato in presenza delle azioni derivanti da ciascuna delle combinazioni di carichi imposte dalla normativa sulla progettazione; tuttavia nella presente relazioni fino al capitolo 5 sono stati considerati solo gli effetti "più severi" individuati dal progettista strutturista.

Al capitolo 6 sono completamente analizzate tutte le nuove combinazioni di carichi previste dal modello IBIDAS globale. Su tutte le combinazioni di carichi fornite sono stati eseguiti calcoli manuali, al fine di selezionare le peggiori. Solo queste ultime sono state utilizzate per le analisi FEM 3D, allo scopo di calcolare ed illustrare il comportamento di spostamento del carico.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Tabella 1 Forze sulla fondazione (quota +18 metri s.l.m.) risultante dai carichi applicati sulle strutture del ponte: ULS

	Forza verticale (MN)	Forza orizzontale (MN)	Momento (MNm)
Permanente	2422	1	47
Mobile	289	328	20235
di progetto	2577	370	21946

Tabella 2 Forze sulla fondazione (quota +18 metri s.l.m.) risultante dai carichi applicati sulle strutture del ponte: SILS

Forza verticale (MN)	Forza orizzontale (MN)	Momento (MNm)
3289	376	23876

Tabella 3 Forze sulla fondazione (quota +18 metri s.l.m.) risultante dai carichi applicati sulle strutture del ponte: SLS2

Forza verticale (MN)	Forza orizzontale (MN)	Momento (MNm)
3042	159	11239

Tabella 4 Caratteristiche principali delle azioni sismiche

Stato limite	Accelerazione di picco del terreno	Periodo di ritorno (anni)
SLS2	2.6	200
ULS	5.7	2000
SILS	6.3	

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

3 Profilo del suolo e caratterizzazione geotecnica

Le indagini geotecniche del sito effettuate fra il 1988 ed il 1992, insieme alle indagini geologiche e geofisiche eseguite per lo studio del progetto preliminare, hanno permesso di definire il profilo generale del suolo nell'area dello Stretto di Messina all'epoca del Progetto Preliminare. La seguente sintesi delle condizioni del suolo e della caratterizzazione geotecnica è praticamente la stessa della relazione geotecnica ed è qui riprodotta a titolo di riferimento. Tuttavia, essendo ancora in corso le indagini sul sito ed essendo continuamente aggiornata la relazione geotecnica, se si dovessero presentare alcune differenze di piccola entità, deve essere considerata come relazione di riferimento la relazione geotecnica CG1003-P-RG-D-P-SB-G3-00-00-00-00_01_A_Upd_Geot_Char_ANX. Le nuove indagini in situ eseguite per il Progetto Definitivo hanno reso possibile confermare la validità generale della caratterizzazione del sito disponibile, permettendo di affinare la definizione di alcuni parametri del suolo.

La Figura 1 Profilo del suolo sulla sponda siciliana dello Stretto di Messina

mostra il profilo del suolo sulla sponda siciliana dello Stretto. L'attuale livello del terreno nel sito della Torre siciliana è ca. 4-5 metri s.l.m.; il terreno presenta un leggero pendio verso la costa, che si trova ad una distanza da 60 a 70 metri dal centro della fondazione della torre. La pendenza del fondo del mare in questa zona è di ca. 13 gradi.

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

Partendo dal livello del suolo e scendendo al di sotto, si riscontrano le seguenti unità:

- 1 *Depositi Costieri* - Sabbia e ghiaia con assai poco o nullo contenuto fine; occasionalmente nella parte inferiore della formazione compaiono strati torbosi limosi. Lo spessore di questa formazione è difficile da valutare, in quanto poggia sulla formazione molto simile delle *Ghiaie di Messina*; in questo punto lo spessore di questa formazione è ca. 85 m.
- 2 *Ghiaie di Messina* - Ghiaia e sabbia, strati limosi molto occasionali. Lo spessore di questa formazione può raggiungere più di 170 metri; in questo sito il valore stimato dello spessore di questa formazione è ca. 130 metri.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

- 3 *Depositi Continentali / Calcarenite di Vinco* - Deposito sabbioso-argilloso, consistente in strati di limo o limo e sabbia con contenuto significativo di ghiaia/bio-calcarenite e calcarenite fossilifera con sottili strati limosi.
- 4 *Conglomerato di Pezzo* - Roccia cedevole, formata da clasti di dimensioni diverse in una matrice limosa-sabbiosa e arenaria. Lo spessore di questa formazione è maggiore di 200 metri.
- 5 *Cristallino* - Granito tettonizzato

3.1 Stato tensionale in situ

I valori di K_0 per i Depositi Costieri possono essere stimati dalla densità relativa D_R servendosi della correlazione proposta da Baldi *et al.* (1987) per sabbie silicee normalmente consolidate, ved. Relazione PP-2R-A24, Fig. 4.3.3. Questa produce valori di $K_0 = 0.43 \div 0.47$ con i valori più bassi associati a profondità più ridotte ($z < 30 \div 35$ m sotto il livello del terreno)

Le ghiaie di Messina sono geologicamente sovraconsolidate per erosione, con uno spessore stimato di almeno 100 m, e nell'area della fondazione della Torre Siciliana attualmente ricoperte da ca. 80 metri di *Depositi Costieri*. Gli effetti del sovraconsolidamento meccanico su K_0 si possono stimare come:

$$\frac{K_0}{K_0(\text{NC})} = \left(\frac{\sigma'_{v\max}}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.45}$$

In cui σ'_{v0} è la tensione in situ efficace e $\sigma'_{v\max} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v$, in cui $\Delta\sigma'_v$ è la tensione verticale, trasmessa dallo spessore eroso, meno il carico attualmente trasmesso dai Depositi Costieri, stimato in ca. $10 \times (100 - 80) = 200$ kPa. Ad una profondità di 100 m, il sovraconsolidamento geologico può rappresentare un aumento dei valori di K_0 di circa il 9%; l'effetto del sovraconsolidamento diminuisce con la profondità.

L'ordine di grandezza degli effetti dell'invecchiamento si può stimare con la seguente correlazione (Mesri, 1993):

$$\frac{K_0}{K_0(\text{NC})} = \left(\frac{t}{t_p} \right)^{C_{ae}/C_c}$$

in cui t è il tempo trascorso dalla deposizione delle Ghiaie di Messina, fra 4×10^5 e 6×10^5 anni, t_p è

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

la fine del tempo di consolidamento primario, circa 1 anno, $C_{\alpha e}$ è il coefficiente di compressione secondaria e C_c è l'indice di compressione. Per i suoli granulari, i valori tipici del rapporto $C_{\alpha e}/C_c$ sono circa 0.02 (Mesri, 1989) e pertanto l'aumento massimo stimato di K_0 dovuto agli effetti dell'invecchiamento è dell'ordine del 30%.

Ne consegue:

$$K_0 = 1.09 \times 1.3 \times K_0(\text{NC}) = 1.42 \times (1 - \sin \phi'_p) = 0.47$$

in cui $\phi'_p = 42^\circ$ (ved. capitolo seguente).

3.2 Parametri di resistenza a taglio

L'angolo di attrito è stato stimato basandosi sulla densità relativa ottenuta dai risultato del STP applicando la correlazione di Schmertmann (1978).

$$\text{per } z < 30 \div 35 \text{ m} \quad D_R = 0.80 \quad \phi'_p = 44^\circ$$

$$\text{per } z < 30 \div 35 \text{ m} \quad D_R = 0,55 \quad \phi'_p = 42^\circ$$

Questi valore dell'angolo di attrito possono essere considerati rappresentativi della resistenza a taglio di picco, corrispondente ad una tensione efficace sul piano di rottura di 272 kPa.

Per quando riguarda l'angolo di attrito a volume costante, secondo Bolton (1986):

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

con $\sigma'_v = 272$ kPa, oppure $p' = 180$ kPa, ne consegue che:

$$\text{per } z < 30 \div 35 \text{ m} \quad D_R = 0.80 \quad \phi'_{cv} = 35^\circ$$

$$\text{per } z < 30 \div 35 \text{ m} \quad D_R = 0,55 \quad \phi'_{cv} = 37^\circ$$

Questi valori sono solo leggermente superiori a quelli indicati da Negussey *et al.* (1986) per materiali silicei (quarzo e feldspati), indipendentemente da granulometria e forma, densità relativa e stato di tensione efficace, $\phi'_{cv} = 33^\circ \div 35^\circ$.

3.3 Rigidezza

Le caratteristiche di rigidezza dei depositi sono state ottenute da un'unica prova cross-hole eseguita vicino alle fondazioni della Torre siciliana (FS-BH1), con tre perforazioni che hanno raggiunto la profondità massima di 100 m sotto il livello del terreno, ad una distanza di 5 metri l'una dall'altra. I risultati della prova cross-hole in termini di velocità delle onde di taglio, V_s , in rapporto

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

alla profondità sono illustrati nella Figura 4.3.59 della Relazione PP-2R-A24. Nella Figura 2 gli stessi risultati sono mostrati come profili del modulo di taglio a piccole deformazioni, G_0 . Questo è stato ricavato dalle velocità delle onde di taglio come:

$$G_0 = \rho V_s^2$$

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

I dati mostrano che nei Depositi Costieri G_0 varia da ca. 50 MPa in superficie a ca. 200 MPa ad una profondità di 68 m sotto il livello del terreno; da questa profondità a 84 m sotto il livello del terreno c'è uno strato di transizione in cui G_0 assume valori di ca. 350 MPa. Nonostante il fatto che i Depositi Costieri e le Ghiaie di Messina abbiano altrimenti caratteristiche molto simili, il contatto fra le due formazioni è facilmente identificato ad una profondità di 84 m sotto il livello del terreno da un brusco aumento dei valori del modulo di taglio, fino a valori di ca. 2.5 GPa.

Il confronto fra valori del modulo di taglio a piccole deformazioni misurati nella prova cross-hole e quelli ottenuti per correlazione con i risultati delle tre prove CPT eseguite in quest'area (Baldi et al., 1986) è piuttosto buono, indicando che almeno nei primi 50 metri sotto il livello del terreno in cui ci sono dati CPT, c'è una modesta variabilità orizzontale della rigidità di questi depositi (ved. Relazione Geotecnica PP-2R-A24, Fig. 4.3.69).

La Tabella 5 sintetizza i principali parametri meccanici ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Tabella 5 Sintesi dei principali parametri meccanici ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica

	profondità (metri sotto il livello del terreno)	Dr *	K ₀ *	φ' _p (°)	φ' _{cv} (°)	K _h (m/s)	G ₀ (MPa)
Depositi costieri	0÷68	80÷55	0.43÷0.47	44	(33÷35)÷(35÷37)	5×10⁻³	50÷200
Strato di transizione	68÷84	55	0.47	42	35÷37	5×10⁻³	350
Ghiaie di Messina	84÷210	55	0.47	42	35÷37	5×10⁻³	2500

* il primo valore del campo si riferisce a profondità più ridotte z≤30÷35 m sotto il livello del terreno.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

4 Modello FEM 3D

Le analisi sono state effettuate utilizzando il codice commerciale Plaxis^{3D} Foundation versione 2.2. La versione adottata è la release più recente dello stesso codice applicato nel *Progetto Preliminare*.

Secondo la normativa italiana attuale (*Norme Tecniche per le Costruzioni - Testo Unico - DM 14.01.2008*) un basamento a poca profondità è conforme allo stato limite ultimo che concerne la forza del suolo se l'azione di progetto non supera la resistenza di progetto. Se l'azione di progetto è inferiore o pari alla resistenza di progetto, le prestazioni del basamento sono soddisfacenti in termini del suo stato limite ultimo. Pertanto il principale problema da risolvere è valutare la resistenza di progetto (ossia la capacità portante delle fondazioni). L'analisi FEM descritta qui in seguito consiste prioritariamente nel risolvere il problema statico delle fondazioni della torre caricate dall'azione di progetto. Quando l'algoritmo numerico è in grado di trovare una soluzione, ne consegue evidentemente che la resistenza di progetto è maggiore dell'azione di progetto; di fatto in questo caso le azioni di progetto adottate rappresentano un contorno inferiore per le azioni di progetto massime ammesse, che, secondo la normativa potrebbero essere uguali alla resistenza di progetto.

Per maggiori approfondimenti della nuova versione della normativa sono necessari alcuni ulteriori commenti.

La nuova versione della normativa (*Norme Tecniche per le Costruzioni - Testo Unico - DM 14.01.2008*) introduce due approcci, mentre la versione più vecchia del 2005 consentiva un unico approccio. Secondo l'approccio 1 dell'ultima ed attuale versione della normativa, devono essere eseguiti due tipi di calcoli. Nel primo caso, detto approccio 1 comb. 1 (A1+M1+R1) tutti i carichi applicati sono amplificati, mentre i parametri di forza del suolo di fondazione sono fissati ai loro valori caratteristici; nel secondo caso (A2+M2+R2) sono amplificati solo i carichi mobili, mentre i valori caratteristici dei parametri di forza dei suoli di fondazione sono ridotti. Nel primo caso i carichi permanenti sono moltiplicati per 1.3, mentre i carichi mobili sono moltiplicati per 1.5. Nel secondo caso soltanto i carichi mobili sono moltiplicati per 1.3 ed in termini di tensione efficace la coesione c' e $\tan\phi'$ sono divisi per 1.25. Il secondo caso dovrebbe essere il più appropriato per l'ULS riferito alla capacità portante geotecnica, ma comunque in questa relazione sono verificate entrambe le combinazioni dell'approccio 1. La nuova versione della normativa (2008) a confronto con la vecchia versione (2005) ha anche introdotto i coefficienti γ_R che, nella breve esposizione della combinazione sopra riportata, sono inclusi nel termine R1 o R2. Secondo l'attuale versione

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

della normativa, nell'approccio 1 comb. 1, il coefficiente γ_R è uguale a 1, mentre nell'approccio 1 comb. 2 il coefficiente γ_R è uguale a 1,8 per l'ULS noto come capacità portante, e 1,1 per l'ULS noto come puro scorrimento. I coefficienti γ_R , di fatto rappresentano l'ulteriore riduzione della resistenza di progetto calcolata, oppure, che è la stessa cosa, ulteriori amplificazioni delle azioni di progetto.

Tuttavia uno stato limite ultimo nella struttura potrebbe anche risultare da una eccessiva deformazione del terreno. Pertanto per valutare le curve di spostamento del carico dovrà essere adottata una procedura di carico incrementale. Le curve di spostamento del carico indicate in questa relazione dovranno essere utilizzate dagli ingegneri strutturisti per controllare il verificarsi di tale stato limite ultimo.

4.1 Profilo del suolo

La Figura 1, che era stata già citata in precedenza, mostra l'entità della griglia che era stata adottata per le analisi 3D di elementi finiti delle fondazioni della Torre siciliana. Il fondo della griglia – ved. capitolo successiva – è a ca. 210 m sotto il livello del terreno, ossia più in basso che il contatto fra le ghiaie di Messina ed i depositi continentali. Ne consegue che, in questo contesto, le unità geologiche di rilevanza sono solo quelle dei depositi costieri e delle ghiaie di Messina.

4.2 Griglia di elementi finiti

La Figura 7 e la figura 8 mostrano la griglia 3D di elementi finiti utilizzata nelle analisi, che si estende per 550 metri parallela al mare, per 300 metri ortogonale al mare e per 210 metri al di sotto del livello del terreno. La parte orizzontale del terreno è ad un livello di +2,5 metri s.l.m., il terreno è in pendio verso il mare con un angolazione media di 13 gradi. Il contatto fra le ghiaie di Messine ed i depositi costieri è sostanzialmente orizzontale. La distribuzione iniziale della pressione dell'acqua interstiziale è idrostatica, con una altezza totale di 0.0 metri s.l.m.

La griglia adottata è fatta di 46596 elementi cuneiformi a 15 nodi (122254 nodi e 279576 punti di sollecitazione in totale). Le condizioni al contorno consistono in spostamenti totalmente contenuti sul contorno inferiore, spostamenti contenuti nella direzione normale sui lati, contorni anteriori e posteriori. Si assume una condizione di spostamento libero sul contorno superiore, comunque carichi distribuiti variabili in modo lineare sono applicati su quella parte del pendio del terreno situata al di sotto del livello del mare, per simulare la pressione dell'acqua di mare, e sulla parte

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

posteriore della superficie per modellare il pendio del terreno.

4.3 Modello costitutivo del suolo e parametri del suolo

Il comportamento della fondazione della torre è stato analizzato mediante analisi degli elementi finiti eseguite con il codice *Plaxis 3D Foundation*. Il comportamento meccanico del suolo è stato descritto con il modello costitutivo *Hardening Soil* disponibile nella libreria di modelli del codice. Il modello è in grado di riprodurre la non-linearità del suolo dovuta all'esistenza di tensioni plastiche dall'inizio del processo di carico; questo implica che, per condizioni non drenate, un aumento del deviatore delle tensioni q produce un eccesso di pressione dell'acqua interstiziale. La relazione tensioni-deformazioni non lineare calcolata ha il modulo tangente iniziale uguale a E'_i ; allo scarico, il modello assume il comportamento elastico con il modulo di Young $E'_{ur} \geq E'_i$, quindi è in grado di riprodurre un cambiamento significativo nella rigidità. Nel modello la rigidità del suolo dipende dallo stato di tensione efficace.

Lo stesso modello costitutivo è stato usato nelle analisi dinamiche delle tensioni efficaci accoppiate, eseguite in condizioni di deformazioni planari per studiare l'interazione della struttura del suolo del modello di ponte 2D semplificato. In condizioni di carico da sisma, il modello prevede le deformazioni plastiche e le pressioni dell'eccesso di acqua interstiziale fino a che viene raggiunta l'accelerazione di picco nella posizione dell'elemento, dato che valori delle accelerazioni in aumento producono un allargamento progressivo delle superfici di snervamento. Si assume un comportamento elastico entro il dominio elastico, per cui il modello non è in grado di riprodurre l'accumulo di deformazioni e l'accumulo di pressione interstiziale per i cicli di carico contenuti entro il dominio di snervamento.

La calibrazione del modello costitutivo è stata effettuata servendosi dei risultati della prova cross-hole eseguita sul sito e dei risultati presenti in letteratura sulle prove di compressione triassiale condotte su campioni indisturbati congelati di suoli ghiaiosi (Tanaka et al., 1987). La prova cross-hole è servita per valutare il modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 ed a descrivere la sua variazione con la tensione efficace. I restanti parametri del suolo sono stati selezionati per ottenere una descrizione soddisfacente della non linearità del suolo osservata nelle prove triassiali. Il modello *Hardening Soil Model* è un modello elasto-plastico indipendente con incrudimento isotropo. Il comportamento elastico è definito dalla elasticità isotropa mediante un modulo di Young in funzione della tensione:

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

$$E'_{ur} = E'_{ur}{}^{ref} \left(\frac{c' \cdot \cot \phi' + \sigma_3'}{c' \cdot \cot \phi' + p^{ref}} \right)^m \quad (1)$$

in cui σ_3' è la tensione efficace principale minima, c' è la coesione, ϕ' è l'angolo di resistenza a taglio, $p^{ref} = 100$ kPa è una pressione di riferimento; $E'_{ur}{}^{ref}$ e m sono parametri del modello.

Il modello ha due superfici di snervamento f_s e f_v con incrudimento isotropo indipendente, in funzione della deformazione distorsionale $\gamma^p = (2 \cdot \varepsilon^p_1 - \varepsilon^p_v)$ e delle deformazioni plastiche volumetriche ε^p_v , rispettivamente; le due superfici hanno le seguenti equazioni:

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

$$f_v = \frac{\tilde{q}^2}{\alpha^2} + p'^2 - p_c'^2 = 0 \quad (3)$$

Nella eq. 2, E'_{50} è dato da una espressione simile alla eq. 1, ma, diversamente da E'_{ur} , non è usato nell'ambito di un concetto di elasticità. L'incrudimento della superficie f_s è isotropo e dipende dalla deformazione plastica distorsionale $\gamma^p = (2 \cdot \varepsilon^p_1 - \varepsilon^p_v)$.

Nella eq. 3, p' è la tensione efficace media; \tilde{q} è una tensione deviatorica generalizzata, che rappresenta la dipendenza della forza dalla tensione efficace principale intermedia σ'_2 ; α regola la forma della superficie f_v nel piano $\tilde{q} - p'$ e può essere correlata al coefficiente di spinta a riposo K_0 per stati normalmente consolidati. Il parametro di incrudimento p'_c è la dimensione della superficie f_v attuale ed è correlato alle deformazioni plastiche volumetriche ε^p_v con la legge di incrudimento, scritta nella forma incrementale come:

$$d\varepsilon^p_v = \frac{\beta}{p^{ref}} \left(\frac{p'_c}{p^{ref}} \right)^m \cdot dp'_c \quad (4)$$

in cui β è il parametro che regola la variazione di p'_c con le deformazioni plastiche volumetriche. Nella formula del modello implementata in *Plaxis*, deve essere specificato il parametro E'_{oed} , che è correlato a β . Questo è il modulo confinato per il carico plastico unidimensionale e dipende dalla tensione efficace principale massima σ'_1 mediante la correlazione:

$$E'_{oed} = E'_{oed}{}^{ref} \cdot \left(\frac{c' \cdot \cot \phi' + \sigma_1'}{c' \cdot \cot \phi' + p^{ref}} \right)^m \quad (5)$$

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

in cui σ'_1 è la tensione efficace principale massima.

Il valore iniziale del parametro di incrudimento ρ'_c è correlato alla tensione di snervamento verticale unidimensionale e può pertanto essere specificato assegnando un valore per il rapporto di sovraconsolidamento OCR. Va detto che OCR deve essere considerato come un rapporto di tensione di snervamento definito nell'ambito della plasticità con incrudimento per deformazione, per cui i valori $OCR > 1$ si possono specificare anche per depositi di suolo normalmente consolidati che presentino una tensione di snervamento maggiore della tensione in situ.

La legge di scorrimento è di tipo associato per stati riscontrati sulla superficie f_v , mentre una legge di scorrimento non associata viene usata per gli stati sulla superficie f_s . Quest'ultima è derivata dalla teoria della dilatanza della tensione di Rowe (1962): l'angolo di dilatanza mobilizzato ψ_m dipende dallo stato di tensione corrente attraverso l'angolo di attrito mobilizzato ϕ'_m e l'angolo di attrito a volume costante ϕ'_{cv} :

$$\sin \psi_m = \frac{\sin \phi'_m - \sin \phi'_{cv}}{1 - \sin \phi'_m \sin \phi'_{cv}} \quad (6)$$

A sua volta, ϕ'_{cv} può essere ricavato dall'angolo di resistenza a taglio ϕ' e dall'angolo di dilatanza ψ alla rottura:

$$\sin \phi'_{cv} = \frac{\sin \phi' - \sin \psi}{1 - \sin \phi' \sin \psi} \quad (7)$$

La Figura 3 mostra la forma delle superfici di snervamento f_v e f_s indica schematicamente la loro evoluzione.

Per il carico plastico dagli stati di tensione isotropa, il modello prevede una relazione tensione-deformazione non lineare con modulo tangente iniziale pari a

$$E'_i = \frac{2E'_{50}}{2 - 0.9} \approx 1.82E'_{50}$$

Tuttavia, per scarico e ricarico (cioè carico inizialmente elastico), il valore di E'_i coincide con E'_{ur} ed è relativo al modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 ottenuto dalla prova cross-hole eseguita sul sito.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Figura 4 Profilo G0 per analisi Plaxis

mostra il profilo di G_0 in funzione della quota sul livello del mare. La linea continua nella figura rappresenta la previsione di G_0 ottenuta con l'eq. (1) con i valori di c' , ϕ' , E_{ur}^{ref} e m riportati nella Tabella 6. Nello specifico, il valore di σ'_3 è stato ottenuto con i valori di K_0 indicati nella Tabella 5. I valori di E_{ur}^{ref} e m erano stato ottenuti con il miglior adattamento dei risultati della prova cross-hole ed assumendo $\nu' = 0.2$.

I restanti parametri del modello E'_{50}^{ref} e E'_{oed}^{ref} sono stati calibrati sui risultati delle prove di compressione triassiale eseguite su campioni ricostituiti a grande diametro di suoli ghiaiosi (Tanaka et al., 1987).

La Figura 5 mostra il confronto fra le simulazioni del modello ed i risultati della prova. E' stato rilevato che un buon accordo del decadimento della rigidezza con la deformazione da taglio è stato ottenuto con rapporto di $E_{ur}^{ref} / E'_{50}^{ref} = 7$ e $E'_{50}^{ref} / E'_{oed}^{ref} = 1.0$ ed un valore per l'angolo di dilatanza alla rottura $\psi = 0$. E' stata assunta una rigidezza a taglio costante per lo strato di ghiaie di Messina con un decadimento della rigidezza ($E_{ur}^{ref} / E'_{50}^{ref} = 3$ e $E'_{50}^{ref} / E'_{oed}^{ref} = 1.0$) inferiore a quella assunta per gli strati sovrapposti.

Tabella 6 Parametri Hardening soil per il suolo di fondazione

Suolo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	K_0	OCR	E_{ur}^{ref} (kPa)	m	E'_{50}^{ref} (kPa)	E'_{oed}^{ref} (kPa)
Deposito costiero	20.0	4.2	40	0.47	2.0	$2.28 \cdot 10^5$	0.2	$3.26 \cdot 10^4$	$3.26 \cdot 10^4$
Suolo di transizione	20.0	13.5	42	0.47	2.0	$6.24 \cdot 10^5$	0.2	$8.91 \cdot 10^4$	$8.91 \cdot 10^4$
Ghiaie di Messina	20.0	20.0	42	0.47	2.0	$6.00 \cdot 10^6$	0.0	$2.00 \cdot 10^6$	$2.00 \cdot 10^6$

E' stata valutata la permeabilità del suolo da misurazioni in situ: nelle analisi è stato adottato un valore costante di $k = 10^{-3}$ m/s.

Il suolo sottostante la fondazione della torre deve essere trattato con colonne secanti realizzate mediante iniezioni ad alta pressione fino ad una profondità di 41.5 m (da -15 m s.l.m. a -38.5 m s.l.m.); le colonne saranno confinate da pareti diaframma. Le caratteristiche meccaniche delle colonne messe in opera con iniezioni ad alta pressione sono state prescelte sulla base di risultati pubblicati (Croce et al., 2004). Tabella 7 Parametri Hardening soil per suolo trattato con iniezioni

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

ad alta pressione riporta le quantità adottate, in particolare per le colonne si è assunta una resistenza non confinata $\sigma_c = 6$ MPa con un rapporto $E'/\sigma_c = 500$ ed un basso decadimento della rigidezza, $E^{ref}/E_{50}^{ref} = 2$ e $E_{50}^{ref}/E_{oed}^{ref} = 1$.

Tabella 7 Parametri Hardening soil per suolo trattato con iniezioni ad alta pressione

Suolo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ'_{cv} (°)	E^{ref} (kPa)	m	E_{50}^{ref} (kPa)	E_{oed}^{ref} (kPa)
Iniezione a pressione	22.0	1560	35	$3 \cdot 10^6$	0.2	$1.5 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^6$

Nelle analisi è stato assunto un valore costante per il coefficiente di permeabilità $k = 10^{-7}$ m/s. A titolo prudenziale, il miglioramento del suolo nella zona esterna alle fondazioni non viene considerato nei calcoli presentati in questa relazione.

4.4 Elementi strutturali

4.4.1 Basamenti

La parte superiore della fondazione della Torre Siciliana, al di sopra di -2,0 s.l.m. ha forma conica e raggiunge un'altezza di +18,0 m s.l.m. Nel modello numerico, la parte superiore della fondazione è stata simulata in forma cilindrica, con lo stesso diametro della parte alla base ($D = 56$ m) e con altezza di 7,0 m (fra -2,0 m s.l.m. e +5,0 m s.l.m.). Pertanto è stato computato un peso unitario equivalente per la parte superiore della fondazione con l'equazione peso proprio della fondazione reale = peso proprio della fondazione equivalente:

$$\gamma_{eq} = \gamma \cdot \frac{D_{real}^2 \cdot h_{real}}{D_{model}^2 \cdot h_{model}} = 18,4 \frac{kN}{m^3}$$

Il peso totale di ciascuno dei due basamenti sulla sponda siciliana è:

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{footing}} &= Q_{\text{upper footing}} + Q_{\text{lower footing}} = \gamma_{\text{upp}} \cdot V_{\text{upp}} + \gamma_{\text{low}} \cdot V_{\text{low}} = \gamma_{\text{upp}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h_{\text{upp}}}{4} + \gamma_{\text{low}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h_{\text{low}}}{4} = \\
 &= \left(18,4 \cdot \frac{\pi \cdot 56^2 \cdot 7}{4} + 24,0 \cdot \frac{\pi \cdot 56^2 \cdot 13}{4} \right) \text{kN} = 1086 \text{ MN}
 \end{aligned}$$

Il calcestruzzo è stato modellato come materiale elastico. Il peso per volume unitario γ è stato assunto pari a 24 kN/m³. Il modulo E di Young è stato assunto pari a 30 GPa; il rapporto di Poisson $\nu = 0,15$.

Il trave che collega i due basamenti separati è stato succintamente descritto al Capitolo 2. Questo trave dovrebbe naturalmente influire sul comportamento delle fondazioni, limitato lo spostamento relativo e le rotazioni. Tuttavia nelle analisi numeriche eseguite in questa relazione, le condizioni di carico considerate ed il sottosuolo sono simmetrici rispetto al piano verticale normale al trave di collegamento. Ne consegue che il trave di collegamento dovrebbe agire solo in conseguenza delle rotazioni di ciascun basamento in un piano parallelo alla costa. Anche se tali rotazioni sono previste in conseguenza dell'interazione fra i due basamenti (ad esempio assestamenti indotti sotto un basamento dal carico applicato sull'altro basamento) nei calcoli presentati in questa relazione, il trave di collegamento non è considerato. Di conseguenza le rotazioni suddette possono essere sovrastimate.

4.4.2 Pareti diaframma

Le pareti diaframma circolari hanno un diametro esterno $D_e = 57$ m ed uno spessore $t = 1$ m. Hanno lunghezza totale $L = 47.5$ m e si estendono da 2.5 m s.l.m. a -45 m s.l.m.. Tre travi anulari a profondità di -6.5 m s.l.m., -11.0 m s.l.m. e -15 m s.l.m. servono a coadiuvare la parete diaframma per sostenere lo scavo. La sezione dei travi è di 1.0 m x 1.5 m. I travi saranno collegati alla parete diaframma con barre di taglio e saranno rimossi prima della costruzione della fondazione, per impedire il trasferimento del carico verticale dal basamento alle pareti diaframma. Tuttavia, per problemi di calcolo, non sono state attivate interfacce fra la parete diaframma e le fondazioni, né fra la parete diaframma ed i suoli in situ.

Le pareti diaframma sono state modellate come elementi PARETE di Plaxis. Si tratta di elementi di struttura (ved. Figura 6) con spessore $d = t = 1$ m e peso w . Il codice richiede 6 valori di rigidezza, e precisamente E_1 , E_2 , E_3 , G_{12} , G_{13} , G_{23} , per definire completamente il loro comportamento. I valori richiesti dei moduli di rigidezza sono stati ottenuti con la procedura descritta qui in seguito.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

La rigidezza lungo la direzione 1 è stata ottenuta come:

$$E_1 = \frac{12 \cdot E_c \cdot I_1}{d^3} = E_{\text{cls}} = 30 \text{ GPa} = 3 \cdot 10^7 \text{ kPa}$$

in cui:

$$I_1 = \frac{1 \times s^3}{12} \frac{\text{m}^4}{\text{m}} \text{ (inerzia per unità di lunghezza)}$$

La rigidezza lungo la direzione 2 è stata ottenuta come:

$$E_2 = \frac{12 \cdot E_c \cdot I_2}{d^3}$$

in cui I_2 è il momento di inerzia lungo la direzione 2, determinato principalmente dalla presenza di 3 travi anulari, la cui sezione è rettangolare e misura 1.0 m x 1.5 m. Il momento di inerzia del singolo trave è:

$$I_{\text{beam}} = \frac{a \cdot b^3}{12} = 0,28 \text{ m}^4 \Rightarrow 3 \cdot I_{\text{beam}} = 0,84 \text{ m}^4 .$$

La rigidezza flessionale dei 3 travi è stata distribuita sull'intera profondità di scavo della parete diaframma (17,5 m):

$$I_2 = I_{\text{eq}} = \frac{3 \cdot I_{\text{beam}}}{h_{\text{excavation}}} = \frac{3 \cdot 0,84}{17,5} = 0,144 \frac{\text{m}^4}{\text{m}}$$

e quindi:

$$E_2 = \frac{12 \cdot E_c \cdot I_2}{d^3} = \frac{12 \cdot 30 \cdot 0,144}{1^3} = 518,4 \text{ GPa} = 5,184 \cdot 10^7 \text{ kPa}$$

Seguendo lo stesso criterio, la rigidezza a taglio G_{12} e G_{13} sono state calcolate in base alle

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

dimensioni delle pareti diaframma, mentre la rigidezza a taglio G_{23} è stata calcolata in base alle dimensioni dei travi anulari:

$$G_{12} = G_{13} = \frac{E_{cls}}{2 \cdot (1 + \nu)} = 1,30 \cdot 10^7 \text{ kPa.}$$

$$G_{23} = \frac{E_{cls} \cdot A_{23}}{2 \cdot (1 + \nu) \cdot d}$$

L'area A_{23} dei travi è uguale a:

$$A_{23beam} = a \cdot b = 1,5 \text{ m}^2 \Rightarrow 3 \cdot A_{23beam} = 4,5 \text{ m}^2.$$

Distribuendo l'area dei 3 travi su tutta la lunghezza di scavo della parete diaframma:

$$A_{23} = \frac{3 \cdot A_{23beam}}{h} = \frac{4,5}{17,5} = 0,26 \frac{\text{m}^2}{\text{m}}$$

Si ottiene il seguente valore per G_{23} :

$$G_{23} = \frac{E_c \cdot A_{23}}{2 \cdot (1 + \nu) \cdot d} = 3,35 \cdot 10^6 \text{ KPa}$$

Di fatto i valori della rigidezza a taglio G_{ij} non presentano un'influenza significativa sui calcoli.

La lunghezza della parete diaframma sotto la profondità di scavo è stata caratterizzata utilizzando gli stessi valori di E_1 , G_{12} e G_{13} e valori inferiori di E_2 e G_{23} , per tenere conto che non ci sono travi anulari.

I primi calcoli hanno mostrato un trasferimento significativo del carico verticale dal basamento alla parete diaframma, dovuto all'impossibilità di attivare l'interfaccia a bassa resistenza. Per prevenire tale trasferimento di carico, il valore di E_1 è stato ridotto dappertutto nella parete diaframma, dando luogo quindi ad una sostanziale riduzione della sua rigidezza assiale. I calcoli finali sono stati eseguiti secondo questo assunto dopo la fase di scavo.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

La Tabella 8 espone sinteticamente le proprietà geometriche e meccaniche delle pareti diaframma.

Tabella 8 Proprietà delle pareti diaframma

Pareti diaframma	γ (kN/m ³)	d (m)	E ₁ (kPa)	E ₂ (kPa)	G ₁₂ (kPa)	G ₂₃ (kPa)	G ₂₃ (kPa)	v	E _{cls} (kPa)
Parte superiore con travi	24.0	1.0	3.00×10 ⁷	1.74×10 ⁷	1.30×10 ⁷	1.30×10 ⁷	3.35×10 ⁶	0.15	3.00×10 ⁷
Parte inferiore	24.0	1.0	3.00×10 ⁷	3.00×10 ⁵	1.30×10 ⁷	1.30×10 ⁷	1.30×10 ⁵	0.15	3.00×10 ⁷
Riduzione rigidezza	24.0	1.0	3.00×10 ³	3.00×10 ³	1.30×10 ³	1.30×10 ³	1.30×10 ³	0.15	3.00×10 ⁷

4.5 Sequenza di calcolo

L'obiettivo principale dei calcoli riportati in questo documento è già stato chiarito nei capitoli precedenti. L'interesse della relazione si incentra sulla correlazione carico-spostamento dei basamenti del ponte. Tuttavia la completa sequenza di costruzione dei basamenti, compresa la fase di scavo, è stato ritenuta significativa ai fini della relazione. Per questo sono stati selezionati ed analizzati gli step principali della sequenza di costruzione. Sono stati omessi soltanto dettagli di poca importanza delle fasi preliminari della costruzione.

Per chiarire tale punto, qui in seguito è sinteticamente esposta la sequenza di costruzione completa, modellata nelle analisi 3D degli elementi finiti della fondazione della Torre siciliana.

- costruzione delle pareti diaframma come “wished in place”;
- realizzazione di colonne mediante iniezione ad alta pressione sotto la base delle fondazioni, modificando le proprietà del suolo nel cluster interessato dal trattamento del suolo.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

- scavo del suolo per raggiungere la base delle fondazioni, realizzato asportando i cluster di suolo
- gettata in opera dei basamenti in calcestruzzo
- applicazione dei carichi verticali e orizzontali e dei momenti di carico.

Va detto che tutti gli step preliminari (ossia gli step prima delle applicazioni del carico strutturale generato dalle torri) sono stati inclusi nella analisi per la loro influenza sullo stato tensionale nel suolo al di sotto della fondazione; tuttavia lo spostamento che sarà presentato nella relazione si riferisce solo agli step in cui sono applicati i carichi esterni.

Le fasi di calcolo introdotte nel codice Plaxis sono riportate nella Tabella 9.

Tabella 9 Fasi di calcolo

<i>step</i>	<i>descrizione</i>
0	Carico a gravità con peso unitario doppio di tutti i suoli e rigidità aumentata (×10)
1	Peso unitario riportato a valori reali; mantenere rigidità aumentata
2	Diminuire rigidità fino a valori reali
3	Ripristino spostamento e attivazione di pareti diaframma e iniezione ad alta pressione
4	Scavo fino a -15 m s.l.m.
5	Ripristino spostamento, attivazione delle fondazioni della torre
6	Ripristino spostamento ed applicazione di carichi verticali
7	Applicazione di carichi orizzontali e momenti

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

I tre step iniziali (step 0-2) servono a generare il corretto stato tensionale iniziale nella massa del suolo. Nello step di calcolo 0, il peso specifico apparente γ di tutti gli strati di suolo è stato raddoppiato per simulare uno stato sovraconsolidato; contemporaneamente i valori di E_{ur} , E_{50} e E_{oed} sono stati moltiplicati per 10. Nello step di calcolo 1 a γ sono stati attribuiti i valori reali, mentre sono stati mantenuti i valori aumentati dei parametri di rigidità del modello Hardening soil. Infine nello step di calcolo 2, agli strati di suolo sono stati attribuiti i valori reali di E_{ur} , E_{50} e E_{oed} . In questo modo è stato possibile ricavare un rapporto di sovraconsolidamento $OCR = 2$ evitando l'incrudimento della superficie di snervamento al taglio, tale che, nei successivi processi di carico, il suolo svilupperebbe deformazioni plastiche per incrementi delle tensioni di taglio anche molto piccole.

Dopo aver generato lo stato tensionale iniziale, le pareti diaframma e l'iniezione ad alta pressione sono attivati con una tecnica "wished in place", ossia modificando le proprietà dei cluster di suolo corrispondenti.

La Figura 11 (a) e (b) presenta due sezioni ortogonali della griglia FE 3D, che mostrano la posizione del basamento e l'estensione del suolo trattato con iniezioni a pressione al di sotto delle fondazioni della torre.

In tutte le analisi, i carichi verticali sono applicati per primi, mentre i carichi orizzontali ed i momenti sono applicati simultaneamente in uno step successivo. I carichi verticali sono simulati con 4 forze su ciascun basamento. I carichi applicati ed i momenti sono stati calcolati partendo dai valori forniti dalle analisi strutturali del ponte e tenendo conto della differenza fra l'altezza del modello FEM del basamento e l'altezza reale. I carichi orizzontali ed i momenti sono stati applicati nella direzione della costa (pendio sottomarino).

Come già anticipato al capitolo 1, le analisi sono state effettuate per le condizioni di carico ULS, SILS e SLS2

4.6 Condizioni di carico ULS

I carichi da applicare ai basamenti del ponte sono stati desunti dalla Tabella 2.1 a pagina 7 della *Relazione specialistica sottostrutture* (PG 2R B0-001 N07 p2). La Tabella 10 specifica le diverse componenti dei carichi applicati alle fondazioni. Va notato che i carichi di progetto non corrispondono alla somma dei carichi mobili e permanenti, in quanto risultano da diverse

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

combinazioni di carichi indicate dai progettisti strutturalisti

Tabella 10 Forze sulla fondazione (quota +18 metri s.l.m.) risultante dai carichi applicati sulle strutture del ponte: ULS

	Forza verticale (MN)	Forza orizzontale (MN)	Momento (MNm)
Permanente	2422	1	47
Mobile	289	328	20235
di progetto	2577	370	21946

4.6.1 ULS – STRU (approccio 1 combinazione 1- A1+M1+R1)

In questa analisi, che nella relazione per il Progetto Preliminare era denominata Analisi Standard, i carichi applicati a +18 m s.l.m. sono i carichi di progetto riportati nella Tabella 10. Nel modello FEM i basamenti sono interrotti alla quota di +5,0 m, per cui il momento applicato deve essere incrementato.

$$M_{tot} = M + \Delta M = M + H \times \Delta h_{footing} = (21946 + 370 \times 13) \text{ MN m} = 26756 \text{ MN m}.$$

I carichi adottati nell'analisi standard sono esposti nella Tabella 11.

Tabella 11 Carichi applicati a +5,00 m. ULS- STRU (APPROCCIO 1 COMBINAZIONE 1- A1+M1+R1)

Q (MN)	H (MN)	M (MNm)
2577	370	26756

I carichi sono stati applicati a ciascun basamento mediante un carico su quattro punti (cioè con

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

forze concentrate). I quattro nodi sono stati selezionati sul bordo della parte superiore del basamento. In ciascun nodo sono state calcolate le forze verticali per simulare anche la presenza di momenti flettenti.

Nella prima fase a ciascuna forza puntiforme sui basamenti è applicato un carico verticale Q_{node} .

$$Q_{node} = \frac{Q}{8} = 322 \text{ MN}.$$

Nella fase di carico seguente sono aggiunti i carichi orizzontali ed i momenti, entrambi applicati in direzione della costa.

I momenti sono prodotti applicando forze verticali nei nodi, con la stessa grandezza e di segno opposto, che generano nel centro dei basamenti un momento risultante uguale al valore di progetto. La distanza fra i punti di carico in direzione z (ortogonale alla costa) è di 28 metri. Per ottenere un momento flettente risultante di 26.756 MNm è stata applicata una forza verticale di 239 MN diretta verso il basso per i nodi più vicini al costa e verso l'alto per gli altri (il verso positivo degli assi y è diretto verso l'alto). Ne risulta:

$$M_{tot} = 8 \times \left(F \times \frac{\Delta z}{2} \right) = 8 \times (239 \times 14) \text{ MN m} = 26756 \text{ MN m}$$

Infine i carichi verticali applicati verso il basso sugli 8 nodi sono:

$$Q^+_{node} = Q_{node} + F = (322 + 239) \text{ MN} = 561 \text{ MN} \quad (\text{nodi vicini al costa})$$

$$Q^-_{node} = Q_{node} - F = (322 - 239) \text{ MN} = 83 \text{ MN} \quad (\text{nodi lontani dal costa})$$

Inoltre in ciascuno degli 8 nodi è applicato un carico orizzontale H_{node} :

$$H_{node} = \frac{H}{8} = 46 \text{ MN}.$$

4.6.2 ULS - GEO (approccio 1 combinazione 2 – A2+M2+R2)

In questa analisi, che nel Progetto Preliminare era denominata DeltPHI, le proprietà meccaniche dei suoli delle fondazioni sono state ridotte secondo l'attuale normativa italiana (*Norme Tecniche*

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

per le Costruzioni - Testo Unico - DM 14.01.2008). In questo caso devono essere amplificati soltanto i carichi permanenti. Per quanto riguarda la resistenza, la normativa italiana richiede che la coesione efficace e la tangente dell'angolo di attrito del suolo siano ridotte del 20%.

$$c' = \frac{c}{1,25}$$

$$(\tan \phi)' = \frac{\tan \phi}{1,25}$$

I valori risultanti dei parametri di resistenza ridotti per gli strati del suolo sono riportati qui in seguito:

a) Depositi della piana costiera

$$c' = \frac{c}{1,25} = \frac{4,2}{1,25} \text{ kPa} = 3,4 \text{ kPa}$$

$$(\tan \phi)' = \frac{\tan \phi}{1,25} = \frac{\tan 40^\circ}{1,25} = 0,67 \Rightarrow \phi' = 34^\circ$$

b) Strato di transizione

$$c' = \frac{c}{1,25} = \frac{13,5}{1,25} \text{ kPa} = 10,8 \text{ kPa}$$

$$(\tan \phi)' = \frac{\tan \phi}{1,25} = \frac{\tan 42^\circ}{1,25} = 0,72 \Rightarrow \phi' = 36^\circ$$

c) Ghiaie di Messina

$$c' = \frac{c}{1,25} = \frac{20,0}{1,25} \text{ kPa} = 16,0 \text{ kPa}$$

$$(\tan \phi)' = \frac{\tan \phi}{1,25} = \frac{\tan 42^\circ}{1,25} = 0,72 \Rightarrow \phi' = 36^\circ$$

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

4) Iniezione ad alta pressione

$$c' = \frac{c}{1,25} = \frac{1560}{1,25} \text{ kPa} = 1248 \text{ kPa}$$

$$(\tan \phi)' = \frac{\tan \phi}{1,25} = \frac{\tan 35^\circ}{1,25} = 0,51 \Rightarrow \phi' = 29^\circ$$

I carichi mobili devono essere amplificati con un fattore pari a 1,3, mentre i carichi permanenti dovranno avere il loro valore caratteristico.

Come già detto, in tale caso gli autori non hanno ricevuto la combinazione di carichi A2 che dovrebbe comprendere i fattori di carico suddetti: è stata fornita soltanto la combinazione di carichi A1 riportata alla Tabella 10. In via prudenziale gli autori hanno deciso di procedere con le analisi utilizzando la combinazione A1 al posto della A2.

Il carico applicato ai basamenti è quindi lo stesso applicato nella combinazione denominata approccio 1 comb. 1 (A1+M1+R1). La sola differenza sta nel peso della fondazione, che è un carico permanente, ed in quanto tale in questa analisi non è stato amplificato.

4.6.3 Risultati delle analisi ULS

Le analisi ULS avevano l'obiettivo di studiare l'ULS della capacità portante e l'ULS che potrebbe derivare da eccessivi spostamenti, o meglio, dalle loro conseguenze sulla sovrastruttura del ponte sospeso. In base a questi obiettivi, le analisi svolte sono due. La prima si riferisce alla combinazione di carichi denominate A1+ M1 nel Testo Unico D.M. 14.01.2008, mentre l'altra si riferisce alla condizione di carico denominata A2+M2 nella stessa normativa. In entrambi i casi, dopo l'applicazione della suddetta condizioni di carico, le analisi sono state ulteriormente affinate, aumentando il carico applicato, pur mantenendo costanti i rapporti fra le varie componenti del vettore di carico (ossia carico verticale, carico orizzontale, momento flettente). Ciò significa che dopo gli step riportati alla Tabella 9, sono stati aggiunti ulteriori step incrementali, per indagare sul comportamento delle fondazione via via che il carico aumenta. Le analisi sono state eseguite fino a che il programma Plaxis ha smesso di eseguire i calcoli, avendo raggiunto un "collasso della porzione di suolo"

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Una prima breve visione dei risultati ottenuti è disponibile alla Figura 13. In questa figura lo spostamento verticale dei tre punti selezionati A, B, C (riportati alla Figura 12) è riportato su grafico in funzione del carico applicato. Il carico applicato è rappresentato con il rapporto fra il carico applicato e l'azione di progetto secondo la sola combinazione disponibile A1. Quando questo rapporto è uguale a 1 sono applicate tutte le azioni di progetto (carico verticale e orizzontale, momenti flettenti) fino a valori corrispondenti alla combinazione A1). Nella parte superiore della figura sono rappresentate le relazioni di assestamento a carico completo. Il massimo valore raggiunto del rapporto di carico va da 7 a 8. I valori di assestamento raggiunti sono chiaramente molto alti, fra -1.38 e -4.76 m per il caso A1+M1 e fra -0.92 and -6.96 m f per il caso A2 +M2. La forma della risposta all'assestamento del carico non sta ancora presentando un punto distinto di collasso. Nel grafico inferiore è disponibile un ingrandimento per l'assestamento calcolato fino ad un rapporto di carico uguale a 2.

In questo ingrandimento sono riportati esplicitamente i valori dell'assestamento dei tre punti selezionati ad un rapporto di carico pari a 1.8. E' stata fatta questa scelta perché nella normativa italiana l'applicazione della combinazione di carichi A2+M2 (approccio 1 combinazione 2) richiede che sia garantito un ulteriore fattore di sicurezza γ_R , che è pari a 1.8 per rotture per insufficiente capacità portante.

A questo valore del rapporto di carico, l'assestamento dei tre punti selezionati si colloca all'incirca fra -0.13 m e -0.50 m. I valori dell'assestamento sono realmente piuttosto alti, ma chiaramente non è ancora attivato un vero e proprio meccanismo di collasso nella fondazione.

Va chiarito che lo snervamento apparente ad un rapporto di carico pari a 1 è dovuto soltanto al fatto che viene tirata una linea retta fra l'origine ed il punto rappresentativo dell'assestamento in presenza di un rapporto di carico pari a 1. Di fatto, questo assestamento è stato ottenuto applicando prima l'azione verticale e successivamente il carico orizzontale ed il momento flettente. Questo percorso carico-assestamento non può ovviamente essere rappresentato in tale grafico.

Nella Figura 14 è riportato su grafico lo spostamento orizzontale dei tre punti selezionati rispetto al carico applicato. Lo spostamento orizzontale è praticamente coincidente per tutti i punti, per cui sul grafico si trova una curva unica. Il carico applicato è rappresentato con lo stesso rapporto di carico precedentemente spiegato. Nella parte superiore della figura sono rappresentate le relazioni di assestamento a carico completo. Il valore massimo raggiunto del rapporto di carico è fra 7 e 8. I valori raggiunti dello spostamento orizzontale sono chiaramente molto grandi e vanno da 1.25 a 2.2 m per i due casi A1+M1 e A2 +M2.

La forma della risposta di assestamento del carico non sta ancora presentando un punto distinto di

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

collasso. Nel grafico inferiore è disponibile un ingrandimento per lo spostamento orizzontale calcolato fino ad un rapporto di carico uguale a 2.

In questo ingrandimento sono riportati esplicitamente i valori dello spostamento orizzontale dei tre punti selezionati ad un rapporto di carico pari a 1.8. E' stata fatta questa scelta perché nella normativa italiana l'applicazione della combinazione di carichi A2+M2 (approccio 1 combinazione 2) richiede che sia garantito un ulteriore fattore di sicurezza γ_R , che è pari a 1.8 per rotture per insufficiente capacità portante.

A questo valore del rapporto di carico, lo spostamento orizzontale dei tre punti selezionati è pari a 0.135 m per la combinazione A2+M2. Il valore dello spostamento è piuttosto grande, ma chiaramente non è ancora attivato un reale meccanismo di collasso per scivolamento della fondazione.

Nella Figura 12 sono graficate le rotazioni verso la costa della fondazione rigida in funzione del carico applicato.

Il carico applicato è rappresentato con lo stesso rapporto di carico precedentemente spiegato. Nella parte superiore della figura è rappresentata la correlazione della rotazione a carico completo. Il valore massimo raggiunto del rapporto di carico è fra 7 e 8. I valori raggiunti della rotazione sono ovviamente molto grandi, fra i 6% ed il 10% per i due casi A1+M1 and A2 +M2.

La forma della risposta alla rotazione del carico non sta ancora presentando un punto distinto di collasso. Nel grafico inferiore è disponibile un ingrandimento per la rotazione calcolata fino ad un rapporto di carico uguale a 1,8.

A questo valore del rapporto di carico (1.8) la rotazione del basamento va dal 5‰ al 6‰ per le due combinazioni di carico, mentre per un rapporto di carico pari a 1 la rotazione calcolata del basamento è ca. 1.1‰. I valori suddetti delle rotazioni sono veramente troppo grandi, ma non è ancora chiaramente attivato un reale meccanismo di collasso per la rotazione della fondazione, anche ai livelli di carico massimi esaminati.

Nelle Figure 16 e 17 è rappresentato graficamente, con mappe a colori di diverse gradazioni, lo spostamento verticale ed orizzontale del livello del terreno (+2.5 m s.l.m.) ad un rapporto di carico pari a 1 (ossia combinazione di carichi A1+M1).

Nelle Figure 18 e 19 è rappresentato su grafico lo stesso spostamento riferito al piano posto a -15 m s.l.m., corrispondente ai fondi dei basamenti della torre.

Nelle Figure 20 e 21 è rappresentato su grafico lo stesso spostamento riferito ad una sezione verticale passante attraverso il centro di un basamento.

Nelle Figure 22, 23, 24, 25, 26 e 27 è rappresentato su grafico lo stesso spostamento sopracitato

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

riferito all'ultimo step della fase di carico incrementale.

Tutte queste figure hanno solo lo scopo di mostrare che anche con uno spostamento molto grande (le figure mostrano proprio tali spostamenti a diversi livelli o in sezioni diverse) la normativa è in grado di trovare una soluzione al problema delle fondazione della torre caricata per 7-8 volte le azioni di progetto, come stabilito dalla normativa italiana (NTC 2008). Inoltre un ULS nella struttura, causato da elevato spostamento a livello della fondazione potrebbe essere valutato partendo dalla relazione carico-assestamento riportata.

4.7 Condizione di carico SILS

In questa analisi i carichi applicati a +18 m s.l.m. sono i carichi di progetto riportati nella Tabella 2. Il momento applicato a +5.0 m s.l.m. è:

$$M_{tot} = M + \Delta M = M + H \times \Delta h_{footing} = (23876 + 376 \times 13) \text{ MN m} = 28764 \text{ MN m}.$$

I carichi adottati sono esposti nella Tabella 12.

Tabella 12 Carichi applicati a +5.0 m SILS

Q (MN)	H (MN)	M (MNm)
3289	376	28764

Dopo tutti gli step usati per simulare la sequenza di costruzione nella prima fase di carico, a ciascuna forza puntiforme sui basamenti viene applicato un carico verticale Q_{node} :

$$Q_{node} = \frac{Q}{8} = 411 \text{ MN}.$$

Nella fase di carico seguente sono aggiunti i carichi orizzontali ed i momenti, entrambi applicati in direzione della costa.

I momenti sono prodotti applicando forze verticali nei nodi, con la stessa grandezza e di segno opposto, che generano nel centro dei basamenti un momento risultante uguale al valore di

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

progetto. La distanza fra i punti di carico in direzione z (ortogonale alla costa) è di 28 metri. Per ottenere un momento flettente risultante di 28.764 MNm è stata applicata una forza verticale di 257 MN diretta verso il basso per i nodi più vicini al costa e verso l'alto per gli altri (il verso positivo degli assi y è diretto verso l'alto). Ne risulta:

$$M_{tot} = 8 \times \left(F \times \frac{\Delta z}{2} \right) = 8 \times (257 \times 14) \text{ MN m} = 28764 \text{ MN m}$$

Infine i carichi verticali applicati verso il basso sugli 8 nodi sono:

$$Q_{node}^+ = Q_{node} + F = (411 + 257) \text{ MN} = 668 \text{ MN} \quad (\text{nodi vicini al costa})$$

$$Q_{node}^- = Q_{node} + F = (411 - 257) \text{ MN} = 154 \text{ MN} \quad (\text{nodi lontani dal costa})$$

Inoltre in ciascuno degli 8 nodi è applicato un carico orizzontale H_{node} :

$$H_{node} = \frac{H}{8} = 47 \text{ MN} .$$

4.7.1 Risultati dell'analisi SILS

L'analisi SILS aveva lo scopo di valutare lo spostamento della fondazione in una condizione di carico che poteva incidere totalmente sulla efficacia funzionale del ponte, come affermato nella definizione di tale stato limite; tuttavia, come affermato nei documenti della gara d'appalto, in tale condizione di progetto deve essere assicurata la sopravvivenza di diverse elementi strutturali principali. La verifica di tale stato limite è quindi una questione strutturale, che può trarre profitto dalla risposta allo spostamento di carico calcolato riportato in questa relazione

Una prima breve visione dei risultati ottenuti è disponibile alla Figura 28. In questa figura lo spostamento verticale dei cinque punti selezionati A, B, C, D ed E (riportati alla Figura 12) è graficato in funzione del carico applicato. Il carico applicato è rappresentato con il rapporto fra il carico applicato e l'azione di progetto. Quando questo rapporto si colloca tra 0 e 1, i carichi verticali sono applicati in modo lineare; quindi, quando varia da 1 a 2, ai carichi verticali vengono progressivamente aggiunti il carico orizzontale ed i momenti flettenti, fino a raggiungere i valori di progetto. Va chiarito che lo snervamento apparente ad un rapporto di carico pari a 1 è dovuto

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

soltanto al fatto che questa curva di assestamento è stata ottenuta applicando dapprima l'azione verticale e successivamente il carico orizzontale ed il momento flettente. I valori raggiunti dell'assestamento vanno da -0,136 m a -0,075 m, indicando che torre ruota verso la costa. Nella Figura 29 è riportato su grafico lo spostamento orizzontale dei cinque punti selezionati rispetto al carico applicato. Lo spostamento orizzontale è praticamente coincidente per tutti i punti (max. 0.0231 m, min. 0.0213 m). Il carico applicato è rappresentato con lo stesso rapporto di carico precedentemente spiegato.

Nella Figura 30 sono graficate le rotazioni verso la costa della fondazione piuttosto rigida in funzione del carico applicato. Il carico applicato è rappresentato con lo stesso rapporto di carico precedentemente spiegato. Il valore raggiunto della rotazione è 1.1‰.

Nella Figura 31 e nella Figura 32 sono rappresentati graficamente, con mappe a diverse gradazioni di colore, gli spostamenti verticale o orizzontale del livello del terreno (+2.5 m s.l.m.).

Nelle Figure 33 e 34 sono riportati su grafico gli stessi spostamenti riferiti al piano posto a -15 m s.l.m., corrispondente al fondo del basamento della torre.

Nelle Figure 35 e 36 sono riportati su grafico gli stessi spostamenti riferiti ad una sezione verticale passante attraverso il centro di un basamento.

4.8 Condizione di carico SLS2

In questa analisi i carichi applicati a +18 m s.l.m. sono i carichi di progetto riportati nella Tabella 2. Il momento applicato a +5.0 m s.l.m. è: (correggere 11239)

$$M_{tot} = M + \Delta M = M + H \times \Delta h_{footing} = (1123 + 159 \times 13) \text{ MN m} = 13306 \text{ MN m} .$$

I carichi adottati sono esposti nella Tabella 13.

Tabella 13 Carichi applicati a +5.0 m SILS

Q (MN)	H (MN)	M (MNm)
3042	159	13306

Nella prima fase a ciascuna forza puntiforme sui basamenti è applicato un carico verticale Q_{node} .

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

$$Q_{node} = \frac{Q}{8} = 380 \text{ MN}.$$

Nella fase di carico seguente sono aggiunti i carichi orizzontali ed i momenti, entrambi applicati in direzione della costa. I momenti sono prodotti applicando forze verticali nei nodi, con la stessa grandezza e di segno opposto, che generano nel centro dei basamenti un momento risultante uguale al valore di progetto. La distanza fra i punti di carico in direzione z (ortogonale alla costa) è di 28 metri. Per ottenere un momento flettente risultante di 13.306 MNm è stata applicata una forza verticale di 119 MN diretta verso il basso per i nodi più vicini al costa e verso l'alto per gli altri (il verso positivo degli assi y è diretto verso l'alto). Ne risulta:

$$M_{tot} = 8 \cdot \left(F \cdot \frac{\Delta z}{2} \right) = 8 \cdot (119 \cdot 14) \text{ MN m} = 13306 \text{ MN m}$$

Infine i carichi verticali applicati verso il basso sugli 8 nodi sono:

$$Q_{node}^+ = Q_{node} + F = (380 + 119) \text{ MN} = 499 \text{ MN} \quad (\text{nodi vicini al costa})$$

$$Q_{node}^- = Q_{node} - F = (380 - 119) \text{ MN} = 261 \text{ MN} \quad (\text{nodi lontani dal costa})$$

Inoltre in ciascuno degli 8 nodi è applicato un carico orizzontale H_{node} :

$$H_{node} = \frac{H}{8} = 20 \text{ MN}.$$

4.8.1 Risultati dell'analisi SLS2

L'analisi SILS2 aveva lo scopo di valutare gli spostamenti della fondazione in condizione di carico che potrebbe precludere il transito sul ponte agli autoveicoli, ma senza influire sulla funzionalità della ferrovia.

Una prima breve visione dei risultati ottenuti è disponibile alla Figura 37.

In questa figura lo spostamento verticale dei cinque punti selezionati A, B, C, D ed E (riportati alla Figura 12) è graficato in funzione del carico applicato. Il carico applicato è rappresentato con il rapporto fra il carico applicato e l'azione di progetto. Quando questo rapporto è tra 0 e 1, i carichi verticali sono applicati in modo lineare; quindi, quando varia da 1 a 2, ai carichi verticali vengono

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

progressivamente aggiunti il carico orizzontale ed i momenti flettenti, fino a raggiungere i valori di progetto. Va chiarito che lo snervamento apparente ad un rapporto di carico pari a 1 è dovuto soltanto al fatto che questa curva di assestamento è stata ottenuta applicando dapprima l'azione verticale e successivamente il carico orizzontale ed il momento flettente. I valori raggiunti dell'assestamento vanno da -0,098 m a -0,072 m, indicando che torre ruota verso la costa.

Nella Figura 38 è riportato su grafico lo spostamento orizzontale dei cinque punti selezionati in funzione del carico applicato. Lo spostamento orizzontale è praticamente coincidente per tutti i punti (max. 0,010 m, min. 0,009 m). Il carico applicato è rappresentato con lo stesso rapporto di carico precedentemente spiegato.

Nella Figura 39 sono rappresentate su grafico le rotazioni verso la costa della fondazione piuttosto rigida in funzione del carico applicato. Il carico applicato è rappresentato con lo stesso rapporto di carico precedentemente spiegato. Il valore della rotazione raggiunto è di ~0.5‰, molto più basso del valore ammesso stabilito nella documentazione di progetto della gara d'appalto. Le rotazioni prodotte dall'interazione fra i due basamenti sono ancora inferiori, pari a circa ~0.1‰. Questo risultato, almeno entro i limiti delle combinazioni di carico analizzate, va a sostegno della scelta di non considerare la presenza del trave che collega i due basamenti.

Nella Figura 40 e nella Figura 41 sono rappresentati graficamente, con mappe a colori di diverse gradazioni, gli spostamenti verticale o orizzontale del livello del terreno (+2.5 m s.l.m.).

Nelle Figure 34 e 43 sono riportati su grafico gli stessi spostamenti riferiti al piano posto a -15 m s.l.m., corrispondente al fondo del basamento della torre.

Nelle Figure 44 e 45 sono riportati su grafico gli stessi spostamenti riferiti ad una sezione verticale passante attraverso il centro di un basamento.

5 Capacità portante per via di calcolo manuale

In generale, la progettazione di grandi basamenti su suoli granulari non è regolata dalla capacità portante. Qui in seguito sono eseguiti semplici calcoli manuali a sostegno di questa affermazione nel caso delle fondazioni della torre.

Secondo la normativa italiana vigente (Norme Tecniche per le Costruzioni - Testo Unico - DM 14.01.2008), che introduce fattori di sicurezza parziali per la progettazione degli stati limite, il progettista di un basamento a poca profondità dovrà valutare e confrontare le azioni di progetto e

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

le resistenze di progetto. Se le azioni di progetto sono inferiori o uguali alle resistenze di progetto, le prestazioni dei basamenti sono soddisfacenti in termini di ULS.

La nuova versione della normativa introduce due approcci, mentre la vecchia versione del 2005 permetteva un unico approccio. Secondo l'approccio 1 dell'ultima ed attuale versione della normativa, devono essere eseguiti due tipi di calcoli. Nel primo caso, detto approccio 1 comb. 1 (A1+M1+R1) tutti i carichi applicati sono amplificati, mentre i parametri di forza del suolo di fondazione sono fissati ai loro valori caratteristici; nel secondo caso (A2+M2+R2) sono amplificati solo i carichi mobili, mentre i valori caratteristici dei parametri di forza dei suoli di fondazione sono ridotti. Nel primo caso, i carichi permanenti sono moltiplicati per 1,3, mentre i carichi mobili sono moltiplicati per 1,5. Nel secondo caso, soltanto i carichi mobili sono moltiplicati per 1,3, e in termini di tensione efficace la coesione c' e $\tan\phi'$ sono divisi per 1,25. Il secondo caso dovrebbe essere il più adatto per l'ULS riferito alla capacità portante geotecnica ma comunque in questa relazione vengono verificate entrambe le combinazioni dell'approccio 1. La nuova versione della normativa (2008) a confronto con la vecchia versione (2005) ha anche introdotto i coefficienti γ_R che, nella breve esposizione della combinazione sopra riportata, sono inclusi nel termine R1 o R2. Secondo l'attuale versione della normativa, nell'approccio 1 comb. 1, il coefficiente γ_R è uguale a 1, mentre nell'approccio 1 comb. 2 il coefficiente γ_R è uguale a 1,8 per l'ULS noto come capacità portante, e 1,1 per l'ULS noto come puro scorrimento. I coefficienti γ_R , di fatto rappresentano l'ulteriore riduzione della resistenza di progetto calcolata, oppure, che è la stessa cosa, ulteriori amplificazioni delle azioni di progetto.

Le fondazioni delle torri del ponte hanno forma circolare in piano e sono soggette ad una combinazione di carico verticale e orizzontale ed al momento flettente. Inoltre il livello del terreno è inclinato verso la costa ed al di sotto del livello del mare. Tutti questi fattori devono essere presi in debita considerazione nei calcoli manuali, per verificare la sicurezza rispetto all'ULS.

I carichi da considerare per l'ULS sono quelli già indicati alla Tabella 7. Come riportato nella relazione sul progetto delle strutture del ponte, questi carichi già comprendono dei fattori di carico. Essi corrispondono quindi alla combinazione A1 della normativa italiana, mentre la combinazione A2 non era disponibile. A titolo prudenziale, entrambe le combinazioni verranno verificate assumendo $A2=A1$.

Il sottosuolo al di sotto della base del basamento (quota -15 m s.l.m.) sarà prudenzialmente

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

caratterizzato da un angolo di attrito $\varphi' = 36^\circ$ e da una coesione $c' = 0$. Il peso unitario del suolo al di sotto della superficie della falda freatica (che si assume a livello del mare) è $\gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3$; il peso unitario sommerso è $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$. La superficie del terreno è ad una quota di +4.0 m s.l.m. ed il peso unitario al di sopra della superficie della falda freatica è $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$. A titolo prudenziale è stato ignorato il miglioramento del suolo mediante iniezioni ad alta pressione al di sotto della fondazione.

I calcoli della capacità portante saranno eseguiti considerando il carico che agisce alla base del basamento (quota -15 m s.l.m.) e caratterizzando le iniezioni ad alta pressione al di sotto della fondazione e di tutti gli strati del suolo come materiale omogeneo, senza coesione e con un valore caratteristico dell'angolo di attrito φ piuttosto basso a confronto con i valori dedotti dalla indagini sul sito. Inoltre è stato ignorato anche il contributo positivo delle pareti diaframma sul perimetro del basamento. A giudizio degli autori, tale schema semplificato è palesemente prudenziale e rende possibile l'adozione della teoria della capacità portante di Terzaghi.

Per ottenere i carichi che agiscono su un solo basamento, il peso di un solo basamento (1086 MN) deve essere aggiunto ai carichi ottenuti dividendo per due i carichi riportati alla Tabella 7, che rappresentano i carichi totali che agiscono sulla fondazione della torre.

I carichi che agiscono a livello della base della fondazione per il caso A1M1 sono esposti alla Tabella 14. Il momento era stato ottenuto trasportando il carico orizzontale a livello della base della fondazione.

Tabella 14 Carichi convenzionali alla base di ciascun basamento (-15 m s.l.m.)

Caso	Verticale Q (MN)	Orizzontale H (MN)	Momento flettente M (MN m)	Eccentricità e (m)
A1M1	2713	185	17078	6,29
A2M2	2441,5	185	17078	6,99

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

La capacità portante della fondazione viene calcolata con l'espressione di Terzaghi nella tensione efficace, con adeguati fattori di correzione per tenere conto dell'inclinazione del carico applicato, della forma della fondazione e della superficie del terreno in pendenza. Per giustificare l'eccentricità del carico, viene calcolata la capacità portante per fondazioni equivalenti rettangolari, la cui larghezza B' e lunghezza L' sono tali che il carico risulti centrato, come illustrato alla Figura 46.

$$q_{ult} = N_q \cdot [\gamma z_w + \gamma'(z - z_w)] \cdot \zeta_q \cdot \xi_q \cdot \beta_q + N_\gamma \cdot \gamma' \cdot \frac{B'}{2} \cdot \zeta_\gamma \cdot \xi_\gamma \cdot \beta_\gamma + \gamma_w(z - z_w)$$

in cui $z_w = 4$ m and $z = 19$ m sono le profondità della superficie della falda freatica e della base delle fondazioni al di sotto del livello del terreno.

5.1 Caso A1M1

Da semplici calcoli si ricava $B' = 36.58$ m e $L' = 46.18$ m.

Per $\varphi' = 36^\circ$ i coefficienti di capacità portante hanno di seguenti valori :

$$N_q = 37.75$$

$$N_\gamma = 43,76$$

i fattori di correzione per l'inclinazione del carico sono:

$$\zeta_q = (1 - H/Q)^m = 0.896 \quad m = (2 + B'/L')/(1 + B'/L')$$

$$\zeta_\gamma = (1 - H/Q)^{m+1} = 0.835$$

i fattori di correzione per la forma delle fondazioni sono:

$$\xi_q = 1 + (B'/L') \times \tan \varphi' = 1.570$$

$$\xi_\gamma = 1 - 0.4 \times (B'/L') = 0.683$$

i fattori di correzione per la superficie del terreno in pendenza (pendenza media $\omega = 12^\circ$) sono:

$$\beta_q = (1 - \tan \omega)^2 = 0.62 \quad \beta_\gamma = \beta_q = 0.620$$

sostituendo nella formula di Terzaghi:

$$q_{ult} = 7334 + 2831 + 150 = 10315 \text{ kPa}$$

Secondo la normativa vigente in Italia, la capacità portante di progetto q_{ult} non deve essere inferiore alle azioni di progetto applicate q_{app} ottenute dividendo il carico verticale per l'area di una fondazione equivalente, $A = B' \times L' = 1689.48 \text{ m}^2$

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

$$q_{app} = Q/A = 1606 \text{ kPa.}$$

E' evidente che sono ampiamente soddisfatti i requisiti dell'approccio di progetto A1M1.

5.2 Caso A2M2

Da semplici calcoli si ricava $B' = 35.28 \text{ m}$ e $L' = 45.76 \text{ m}$.

Per $\varphi'_{des} = \tan^{-1}[(\tan\varphi')/1.25] = 30.2^\circ$, i coefficienti di capacità portante hanno i seguenti valori:

$$N_q = 19,00$$

$$N_\gamma = 16,57$$

i fattori di correzione per l'inclinazione del carico sono:

$$\zeta_q = (1 - H/Q)^m = 0,884 \qquad m = (2 + B'/L')/(1 + B'/L')$$

$$\zeta_\gamma = (1 - H/Q)^{m+1} = 0,817$$

i fattori di correzione per la forma delle fondazioni sono:

$$\xi_q = 1 + (B'/L') \times \tan\varphi' = 1.448$$

$$\xi_\gamma = 1 - 0.4 \times (B'/L') = 0,692$$

i fattori di correzione per la superficie del terreno in pendenza (pendenza media $\omega = 12^\circ$) sono:

$$\beta_q = (1 - \tan\omega)^2 = 0.62 \quad \beta_\gamma = \beta_q / \cos\omega = 0.620$$

sostituendo nella formula di Terzaghi:

$$q_{ult} = 3350 + 1024 + 150 = 4524 \text{ kPa}$$

Secondo la normativa vigente in Italia, la capacità portante di progetto q_{ult} non deve essere inferiore a 1,8 volte le azioni di progetto applicate q_{app} ottenute dividendo il carico verticale per l'area della fondazione equivalente, $A = B' \times L' = 1614.78 \text{ m}^2$

$$q_{app} = Q/A = 1511,98 \text{ kPa.}$$

Il rapporto fra la capacità portante di progetto e l'azione di progetto applicata è 2.99, che è maggiore di 1.8.

E' evidente che sono ampiamente soddisfatti anche i requisiti dell'approccio di progetto A2M2.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

6 Aggiornamento dei carichi dal nuovo modello IBIDAS

Sono state fornite di recente nuove combinazioni di carichi sulle fondazioni della torre corrispondenti al gruppo A2 (per l'ULS), come definito dalle NTC 2008. Inoltre sono state fornite anche nuove combinazioni di carichi riferite a SILS, SLS2 e SLS1, tutte tratte dal nuovo modello IBIDAS.

Le combinazioni di carichi sono state estratte da fogli dati, in cui i vettori di carico composti da tre componenti (3 forze e 3 momenti) erano dati alla quota di -15 m s.l.m. (corrispondente al basamento delle fondazioni) e separatamente per le due gambe della torre ($y=+39.225$ m and $y=-39.225$ m). Va anche detto che dal modello global IBIDAS erano previste combinazioni di carichi separate per condizioni statiche e sismiche, essendo quelle sismiche il risultato di una analisi spettrale.

Va ricordato che ciascun stadio precedente del progetto delle fondazioni del ponte sopra la stretto di Messina fino ad oggi è sempre stato caratterizzato da una combinazione di carichi unica, ottenuta dalla semplice sommatoria delle combinazioni di carico sulle due gambe separate delle torri. Le forze risultanti a +18 m s.l.m. riportate nelle tabelle da 1 a 3 mostrano tali combinazioni, che erano sempre esattamente condivise fra le due gambe della torre in ciascuna analisi precedentemente mostrata.

Gli autori hanno dovuto affrontare i nuovi complessi problemi seguendo questi step:

- i) Tutte le combinazioni previste per ciascuna singola gamba delle torri sono state applicate alle fondazioni e per via di calcolo manuale sono stati calcolati i valori del coefficiente γ_R (definito come rapporto fra l'azione di progetto e la resistenza di progetto);
- ii) Tale step per le combinazioni di ULS è stato utilizzato per stimare i margini di sicurezza rispetto alla rottura per insufficiente capacità portante (essendo ora disponibile A2, è stata considerata solo la combinazione geotecnica A2+M2+R2 dell'approccio 1 delle NTC 2008);
- iii) Questi calcoli manuali sono stati utilizzati per selezionare, fra tutte le combinazioni di carichi SLS e SILS fornite, soltanto quelle peggiori; tali combinazioni sono state usate nel modello FEM 3D per calcolare la risposta allo spostamento del carico di ciascuna gamba dei basamenti.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Più precisamente, per ciascun stato limite sono state considerate entrambe le combinazioni risultanti sia con il γ_R più basso che con il valore massimo della forza verticale. Nel sottogruppo costituito solo da combinazioni statiche, i due criteri selezionano le stesse combinazioni di carichi, mentre per il sottogruppo sismico i due criteri forniscono due combinazioni di carichi differenti. In tale caso va prestata attenzione ad entrambi i criteri ed i calcoli mediante il modello 3D FEM sono stati eseguiti su tutte queste combinazioni selezionate.

Per quanto riguarda lo step ii), tutti i calcoli sono stati eseguiti secondo la procedura descritta al capitolo 5, con $\varphi' = 40^\circ$ e $c' = 0$.

I calcoli manuali sull'ULS statico peggiore davano un valore minimo di γ_R sul singolo basamento pari a 6.2. Questo valore è ampiamente compatibile con il valore di 1.8 richiesto dalle NTC 2008. Gli stessi calcoli applicati alle combinazioni peggiori dell'ULS sismico hanno dato un valore minimo di γ_R sul singolo basamento di ca. 1.4. Questo valore è inferiore al valore di 1.8 richiesto dalle NTC 2008. Su questo numero sono opportuni due commenti generali. Anzitutto, se prendiamo in considerazione che secondo la nuova normativa italiana $\tan \varphi$ è stato diviso per 1.25, occorre sottolineare che in questo caso il fattore di sicurezza complessivo è ca. 3.3, maggiore di 3, che era il fattore di sicurezza complessivo minimo richiesto dalla vecchia normativa geotecnica italiana. Inoltre sui calcoli manuali della capacità portante influiscono diverse assunti prudenziali:

- a) ad esempio, i calcoli sono stati effettuati nell'ipotesi che il piano con la massima pendenza della superficie del terreno sia lo stesso del piano che contiene il taglio massimo ed i momenti flettenti massimi: questo non è vero, ed è anche ampiamente prudenziale, ma i calcoli manuali non si possono fare con ipotesi differenti;
- b) non è stato tenuto conto del fattore profondità;
- c) fra i molti suggerimenti autorevoli presentati in letteratura, è stata recepita una delle proposte più prudenziali per il valore del coefficiente N_γ

Per tutte queste ragioni, e senza voler portare oltre i propri limiti l'uso della semplice formula della capacità portante, sono state anche analizzate le peggiori combinazioni dell'ULS mediante un modello FEM 3D, che ha raggiunto un valore massimo dei carichi applicati pari ad almeno di 2 volte l'azione di progetto, senza mostrare alcun collasso distinto. In altri termini, i calcoli FEM hanno permesso di stimare un valore di γ_R non inferiore a 2, quindi compatibile con i valori minimi richiesti dalle NTC 2008. Alcuni dettagli di questi calcoli sono brevemente esposti qui in seguito.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Nella Figura 47 è rappresentata su grafico la risposta all'assestamento dei carichi per le combinazioni di ULS statico e dinamico peggiori dedotte mediante il modello FEM 3D. Nella Figura 48 è rappresentata su grafico la risposta allo spostamento del carico in direzione orizzontale (verso la costa) per le combinazioni di ULS statico e sismico peggiori dedotte mediante il modello FEM 3D. Il valore massimo dell'assestamento verticale e dello spostamento orizzontale in conseguenza di azioni che rappresentano il doppio delle azioni di progetto è riportato nella Tabella 15 per dieci punti delle due fondazioni (ved. Figura 12). Nella Tabella 16 sono riportate per completezza le combinazioni di carico peggiori di ULS selezionate dai risultati del modello IBDAS globale. Occorre notare che le etichette degli assi di riferimento nel modello IBDAS sono diverse dalle etichette adottate nel modello FEM 3D delle fondazioni.

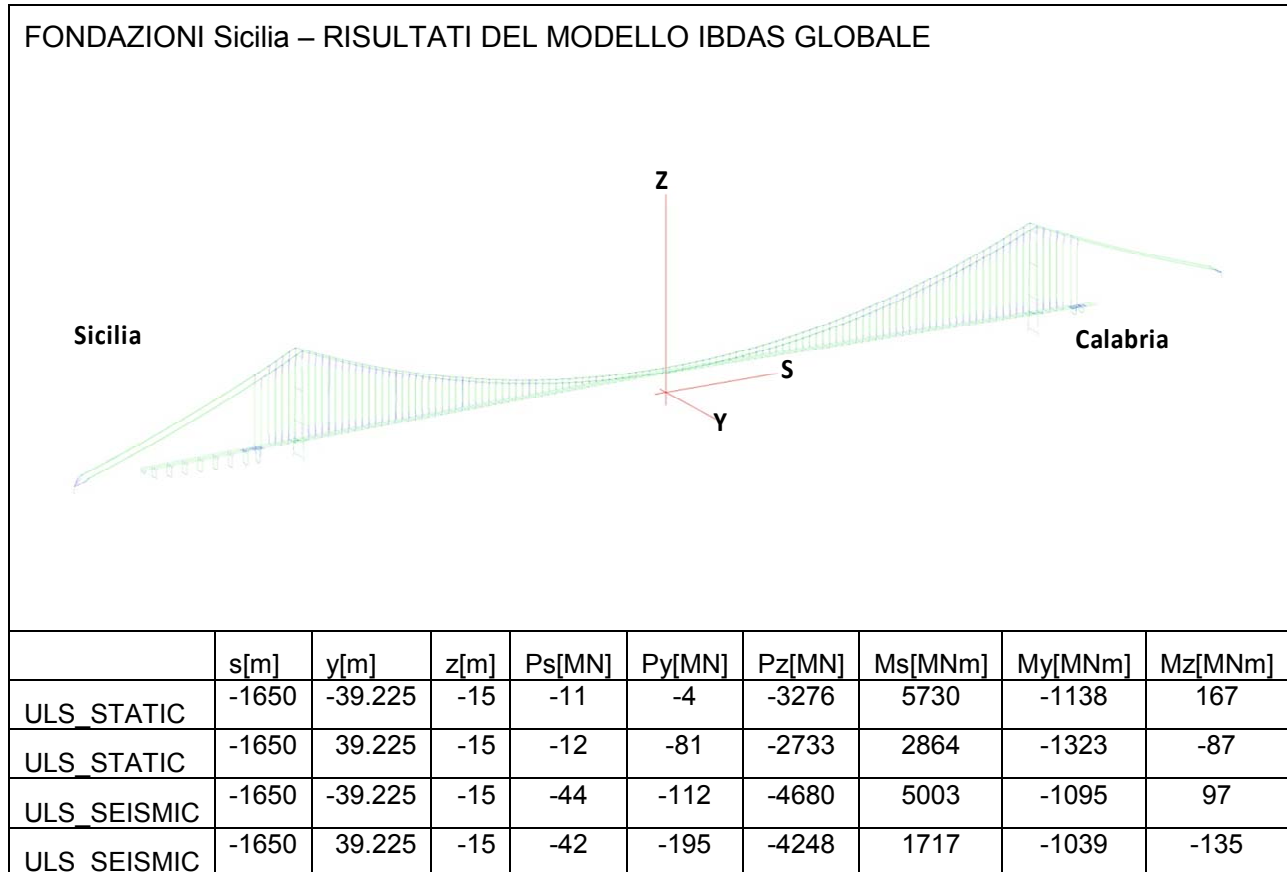
Sia l'assestamento che lo spostamento orizzontale verso la costa riportati nella tabella 15, calcolati in condizioni di carico che secondo le NTC 2008 dovrebbero essere considerati carichi di rottura, mostrano che, anche in questo scenario estremo, il comportamento delle fondazioni è piuttosto soddisfacente e l'assestamento differenziale, piuttosto modesto, insorge fra le due gambe della torre siciliana.

Tabella 15 Valori dell'assestamento e dello spostamento orizzontale in condizioni pari a due volte le azioni di progetto (ULS, STATICO E SISMICO)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]
ULS_STATIC	-0.432	-0.453	-0.469	-0.489	-0.427	-0.639	-0.658	-0.667	-0.743	-0.581
ULS_SEISMIC	-1.058	-1.079	-1.090	-1.118	-1.057	-1.237	-1.256	-1.261	-1.335	-1.192
	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]
ULS_STATIC	0.008	0.009	0.011	0.009	0.009	0.006	0.008	0.010	0.008	0.007
ULS_SEISMIC	0.002	0.004	0.007	0.003	0.005	-0.002	0.001	0.005	0.001	0.001

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		Codice documento PF0004_F0_ITA	Rev F0	Data 20-06-2011

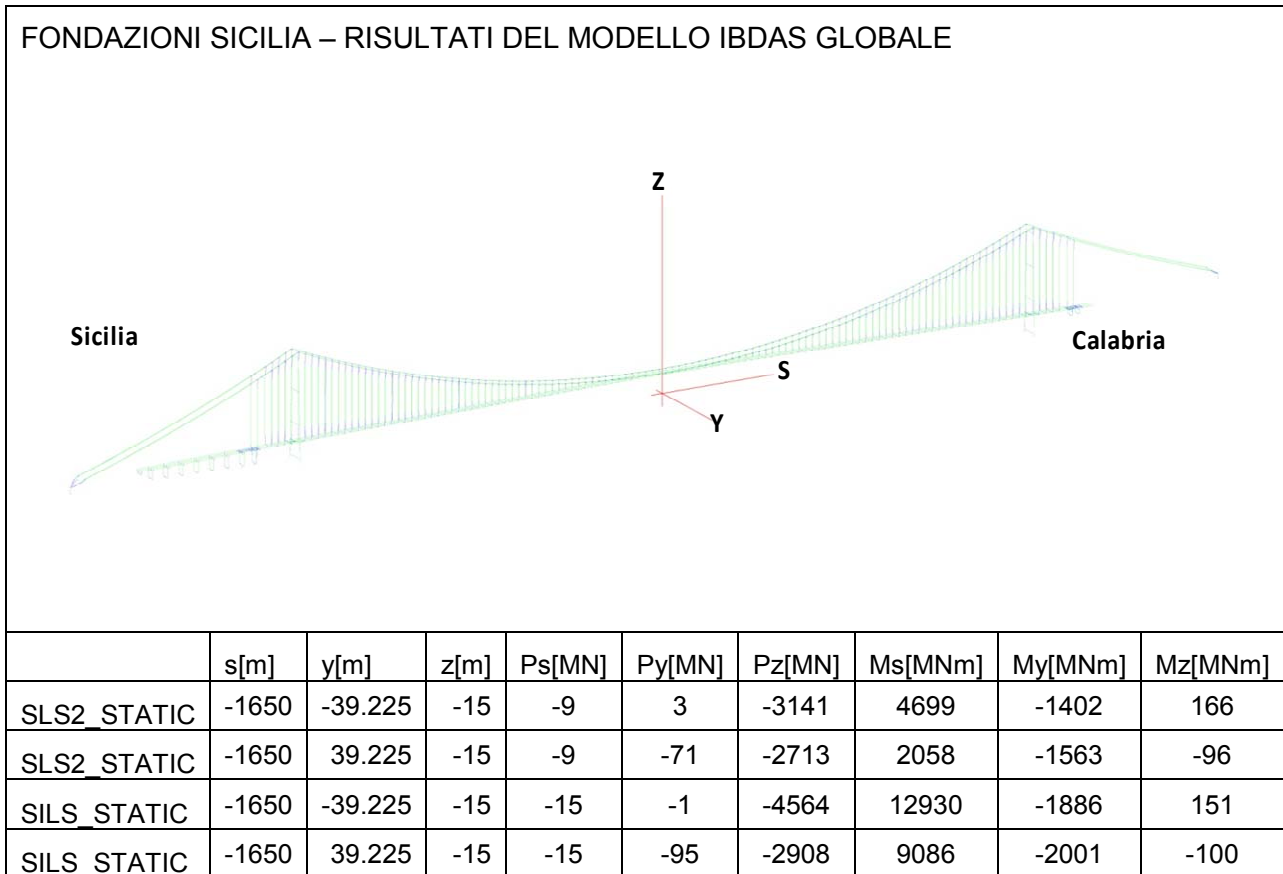
Tabella 16 Combinazioni di ULS peggiore selezionate in condizioni statiche e sismiche



Lo step iii) è relativo allo spostamento delle fondazioni in stato limite diverso. Qui sono considerate le condizioni statiche SL2 e SILS. Come detto in precedenza, le combinazioni peggiori sono state selezionate sulla base del fattore di sicurezza minimo. Per le condizioni statiche, questo criterio ha portato alla selezione della combinazione di carichi con il carico verticale applicato massimo. Nella Tabella 17 sono riportate le combinazioni di carichi ottenute dai risultati del modello IBIDAS globale.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		Codice documento PF0004_F0_ITA	Rev F0	Data 20-06-2011

Tabella 17 Combinazioni di carichi SL2 e SILS peggiori estratte dal RISULTATO DEL MODELLO IBIDAS GLOBALE



Le due combinazioni sono state usate nel modello FEM 3D allo scopo di calcolare il comportamento allo spostamento del carico delle due gambe della torre siciliana.

Nella Figura 49 le curve di assestamento del carico e le curve degli spostamenti orizzontali del carico verso la costa sono graficate per i cinque punti selezionati per ciascuna gamba della torre siciliana.

Nella Figura 50 sono graficate le curve degli spostamenti orizzontali del carico paralleli alla costa per gli stessi 10 punti complessivi, e le rotazioni verso la costa per le due gambe.

Le prestazioni delle fondazioni in questa condizione di carico sono piuttosto soddisfacenti: i valori massimi dei movimenti graficati sono esposti alla Tabella 18. Nella stessa tabella sono riportati anche i valori massimi calcolati per le stesse componenti dei movimenti delle fondazioni nella condizione di carico statico SILS peggiore. Per quest'ultima condizione, i movimenti sono in

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		Codice documento PF0004_F0_ITA	Rev F0	Data 20-06-2011

genere maggiori di quelli ottenuti nella condizione di carico SLS2, ma possono anche essere considerati piuttosto piccoli ed accettabili.

Tabella 18 Spostamenti di dieci punti selezionati sulle due gambe delle fondazioni della Torre Siciliana nelle condizioni statiche SLS 2 SILS peggiori

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
SLS2_Static	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]
	-0.069	-0.071	-0.073	-0.068	-0.075	-0.099	-0.101	-0.102	-0.108	-0.094
	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]
	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]
	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
SILS_Static	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]	uy [m]
	-0.089	-0.092	-0.095	-0.091	-0.093	-0.241	-0.244	-0.246	-0.262	-0.227
	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]	ux [m]
	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007
	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]	uz [m]
	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003

Nella Tabella 10 sono espone tutte le combinazioni di carico selezionate dai dati di uscita del modello IBDAS globale. Sono sia statiche che sismiche e si riferiscono a stati limite diversi: ULS, SLS2 e SILS. Come affermato in precedenza, nel sottogruppo sismico, i due criteri adottati per selezionare le combinazioni peggiori hanno fornito due combinazioni di carichi diverse, mentre nel sottogruppo statico i due criteri hanno fornito le stesse combinazioni di carichi. Questo spiega perché nella Tabella 19 sono riportate un totale di 9 combinazioni di carichi. Per ciascuna combinazione di carichi sono riportati i due vettori separati del carico sulle due gambe della torre. Nella Tabella 20 lo spostamento medio calcolato per le due gambe separate della fondazione della torre siciliana e la rotazione rigida della base sono riportati per tutte le condizioni di carico riportate nella Tabella 19. I risultati più significativi sono già stati descritti e discussi nelle precedenti righe di questo paragrafo. Qui in seguito verranno esposti alcuni commenti generali:

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

- L'assestamento massimo calcolato è di ca. 45 cm e si riferisce ad una combinazione di carichi SILS, mentre la rotazione massima verso la costa è ca. 0.17 (%) e deriva dalla combinazione sismica ULS; in combinazioni di carichi statici, questi valori sono significativamente più bassi, essendo l'assestamento massimo ca. 24 cm e la rotazione massima verso la costa ca. 0.01 (%). A giudizio degli autori, i movimenti calcolati con un approccio statico che tiene in considerazione le forze sismiche, dovrebbero essere considerati estremamente esagerati e pressoché ignorati se, come in questo caso, sono state eseguite e riportate altrove, opportune analisi dinamiche dell'interazione suolo-struttura.
- La rotazione massima delle due gambe una verso l'altra (rotazione parallela alla costa) è ca. 0.06 (%) e questo valore risulta con una combinazione di carichi SILS; in condizioni di carico SLS2, la rotazione massima è significativamente più bassa, raggiungendo il valore di ca. 0.025 (%);
- Lo spostamento orizzontale massimo verso la costa è ca. 3.1 cm e si riferisce alla combinazione sismica SILS, lo spostamento orizzontale massimo riferito alla sola combinazione statica è meno di 1 cm.

Tabella 19 Combinazioni di carico peggiori selezionate dai dati di uscita del modello IBIDAS

FONDAZIONI SICILIA – RISULTATI IBIDAS										
		s[m]	y[m]	z[m]	Ps[MN]	Py[MN]	Pz[MN]	Ms[MNm]	My[MNm]	Mz[MNm]
sismico	SILS	-1650	-39.225	-15	-51	-115	-6077	11530	-1835	71
	SILS	-1650	39.225	-15	-48	-215	-4617	7256	-1679	-155
	SILS	-1650	-39.225	-15	-1226	-38	-2513	431	-31223	-970
	SILS	-1650	39.225	-15	-1186	-98	-2627	-1224	-30253	-74
	ULS	-1650	-39.225	-15	-44	-112	-4680	5003	-1095	97
	ULS	-1650	39.225	-15	-42	-195	-4248	1717	-1039	-135
	ULS	-1650	-39.225	-15	-1111	-28	-2674	1412	-29515	-940
	ULS	-1650	39.225	-15	-1077	-90	-2621	-334	-28145	-162
	SLS 2	-1650	-39.225	-15	-24	-33	-3692	2976	-1405	131
	SLS 2	-1650	39.225	-15	-23	-108	-3485	220	-1442	-122

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		Codice documento PF0004_F0_ITA	Rev F0	Data 20-06-2011

	SLS 2	-1650	-39.225	-15	-658	2	-2835	1209	-11698	-404
	SLS 2	-1650	39.225	-15	-641	-66	-2836	-1027	-11256	-62
statico	SILS	-1650	-39.225	-15	-15	-1	-4564	12930	-1886	151
	SILS	-1650	39.225	-15	-15	-95	-2908	9086	-2001	-100
	ULS	-1650	-39.225	-15	-11	-4	-3276	5730	-1138	167
	ULS	-1650	39.225	-15	-12	-81	-2733	2864	-1323	-87
	SLS 2	-1650	-39.225	-15	-9	3	-3141	4699	-1402	166
	SLS 2	-1650	39.225	-15	-9	-71	-2713	2058	-1563	-96

Tabella 20 Spostamenti calcolati e rotazioni calcolate delle due gambe della fondazione della torre siciliana

		Posizion e gamba	Spostament o orizzontale parallelo alla costa	Spostamento verticale	Spostamento orizzontale verso la costa	Rotazion e verso la costa	Rotazion e parallela alla costa
			uy [m]	uz [m]	us [m]	Ry (%)	Rs (%)
Sismico	SILS_maxPz	(y+)	0.006	-0.257	0.002	-0.0084	0.0179
		(y-)	-0.003	-0.450	0.003	-0.0023	0.0490
	SILS_mingr	(y+)	0.006	-0.092	-0.027	-0.1161	0.0202
		(y-)	0.001	-0.085	-0.028	-0.1162	0.0111
	ULS_maxPz	(y+)	0.007	-0.254	0.002	-0.0070	0.0203
		(y-)	0.005	-0.331	-0.001	0.0090	0.0141
	ULS_mingr	(y+)	0.006	-0.102	-0.030	-0.1660	0.0156
		(y-)	0.000	-0.108	-0.031	-0.1769	0.0159
	SLS2_maxPz	(y+)	0.004	-0.129	0.002	-0.0076	0.0224
		(y-)	0.000	-0.147	0.002	-0.0045	0.0235
	SLS2_mingr	(y+)	0.003	-0.085	-0.014	-0.0263	0.0200
		(y-)	-0.001	-0.085	-0.014	-0.0260	0.0171
Statico	SILS	(y+)	-0.002	-0.092	0.002	-0.0105	0.0030
		(y-)	-0.007	-0.244	0.003	-0.0076	0.0630

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

	ULS	(y+)	0.001	-0.080	0.002	-0.0084	0.0067
		(y-)	-0.003	-0.127	0.002	-0.0066	0.0378
	SLS2	(y+)	0.002	-0.071	0.002	-0.0070	0.0139
		(y-)	-0.002	-0.101	0.002	-0.0048	0.0252

Nella figura 51 è riportato su grafico un prospetto parziale delle nuove combinazioni di carichi ULS fornite dal modello IBDAS aggiornato. Sono riportati il carico verticale P_v ed il carico di taglio Ph (ottenuto combinando P_s e P_y). Sul lato destro in cui sono riportate solo le combinazioni sismiche, i segni quadrati rappresentano le vecchie combinazioni di carichi ULS. Nella figura 52 è riportato su grafico un altro prospetto parziale delle nuove combinazioni di carichi ULS fornite dal modello IBDAS aggiornato. La figura si riferisce ai momenti flettenti nei due piani verticali ortogonali. Anche qui i segni quadrati rappresentano le vecchie combinazioni di carico ULS.

Per fare il confronto, le vecchie condizioni di carico ULS sono state trasposte in basso, alla quota di -15 m s.l.m. e divise per i due basamenti.

Dalle due figure si può apprezzare che in entrambi i casi i nuovi carichi sono talvolta maggiori di quelli vecchi.

Nella Figura 53 i valori di γ_R ottenuti mediante calcoli manuali della capacità portante sono graficati in funzione dei principali insiemi di carico (P_v , Ph , My). Nella stessa figura i quadrati rappresentano i risultati ottenuti nel capitolo 5 della relazione con le vecchie combinazioni di carichi ULS. Dalla figura si può apprezzare che la situazione dopo i carichi aggiornati è un poco cambiata. Tuttavia, come detto in precedenza, i calcoli della capacità portante sono ancora pienamente soddisfacenti. I casi ULS analizzati con il modello 3D FEM sono tutti segni circolari pieni racchiusi in un segno circolare vuoto.

Nella Figura 54 sono graficati l'assestamento (u_z), lo spostamento totale orizzontale (u_n), gli spostamenti orizzontali separati (u_s and u_y) e la rotazione (r_y and r_s) ricavati dai calcoli FEM 3D per le condizioni di carico SILS e SLS2 peggiori. Per raffronto, nello stesso grafico i segni in grassetto sono usati per rappresentare i risultati ottenuti con le vecchie condizioni di carico SILS e SLS2. La figura riporta separatamente le combinazioni di carichi statiche e quelle sismiche.

Si può apprezzare che con alcune nuove combinazioni di carichi sismiche si verifica uno spostamento un po' più grande. Come già detto in precedenza, gli autori ritengono che i principali obiettivi di questa relazione e dei calcoli inclusi era la verifica della fondazione della torre lato Sicilia sotto carico ULS. Lo spostamento della fondazione sotto carichi statici SILS e SLS2 è ancora da ritenersi un risultato affidabile della relazione, mentre per le combinazioni di carichi

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

sismici le analisi esposte in questa relazione possono portare ad una sovrastima significativa dello spostamento. Analisi interamente dinamiche, più affidabili, dell'interazione suolo – struttura sono state eseguite in questa fase di progettazione del ponte sopra lo Stretto di Messina ed i loro risultati sono riportati altrove.

Come nota conclusiva, è opportuno riportare che dei valori di rotazione della torre leggermente maggiori del valore di soglia ammesso dello 0.1% sono stati ottenuti per tre condizioni di carico sismiche correlate agli Stati Limite di Integrità Strutturale (SILS) (Figura 54). Questi risultati sono riportati a scopo di completezza, ma va ricordato che la valutazione di spostamenti e rotazioni servendosi di combinazioni di carico pseudo-statiche può risultare non realistica ed eccessivamente prudentiale. Per gli Stati Limite di Servizio (SLS), nessuna combinazione di carico induce la rotazione eccedente il valore di soglia specificato.

Per la valutazione della rotazione massima indotta nella torre da condizioni di carico sismico, si può fare riferimento alle analisi di interazione dinamica che sono state effettuate nel dominio temporale, applicando gli andamenti temporali reali dell'accelerazione ad un dominio analitico in cui erano inclusi la fondazione della torre, le strutture terminali ed il blocco di ancoraggio. Queste analisi, presentate nelle relazione CG1000-P-CL-D-P-SB-A2-00-00-00-00-A_01_Seism_An_ANX, indicavano, per la torre siciliana, valori massimi di rotazione inferiori allo 0.035 %.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

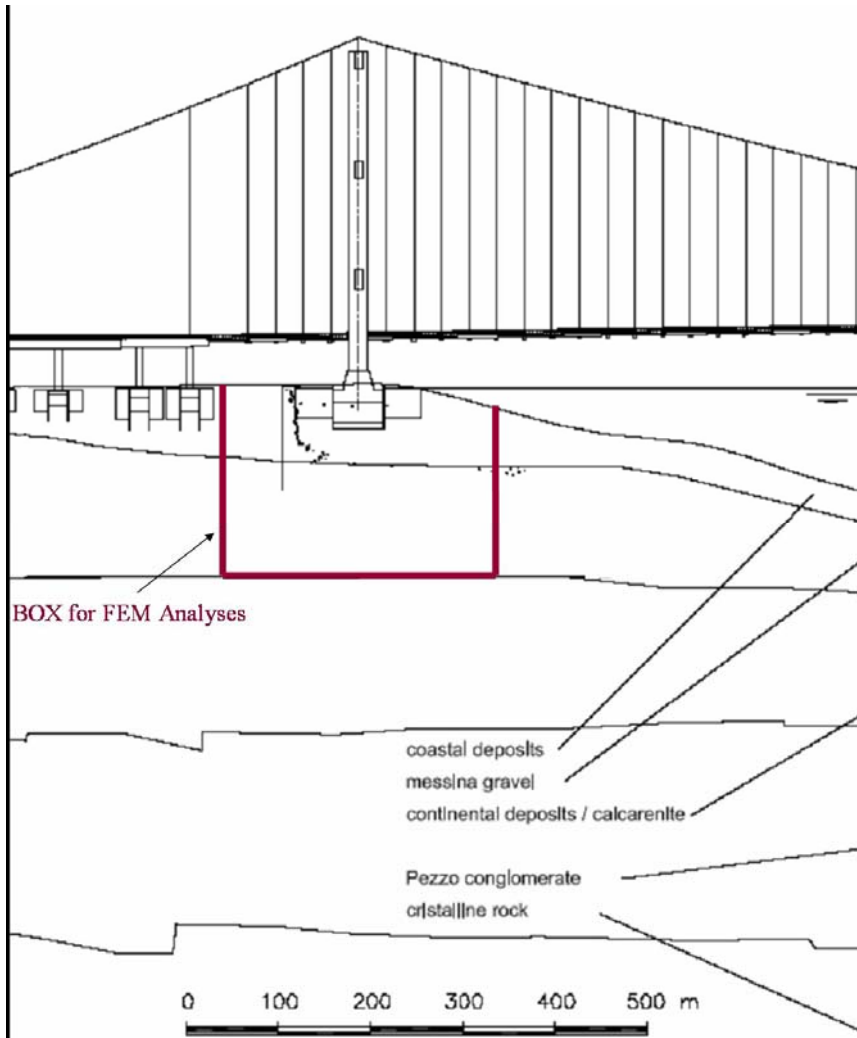


Figura 1 Profilo del suolo sulla sponda siciliana dello Stretto di Messina

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		Codice documento PF0004_F0_ITA	Rev F0	Data 20-06-2011

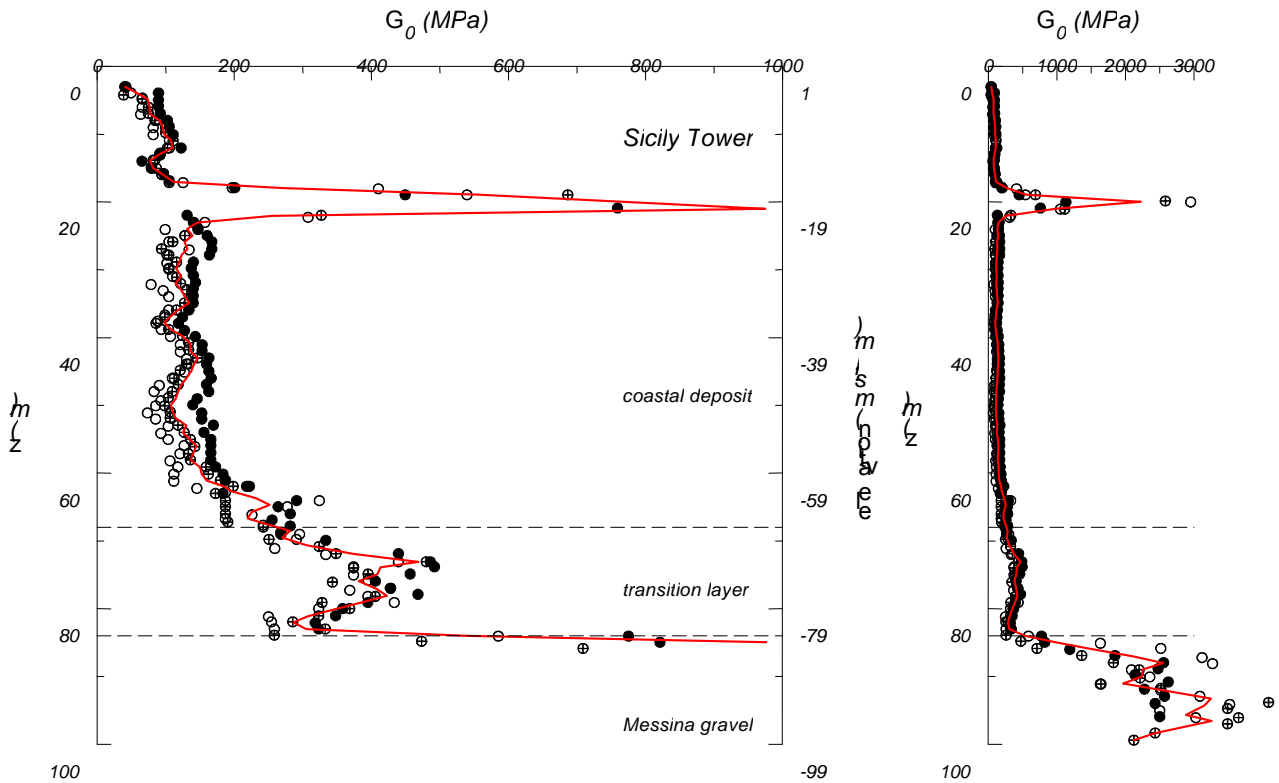


Figura 2 Profilo G_0 dalla prova cross-hole

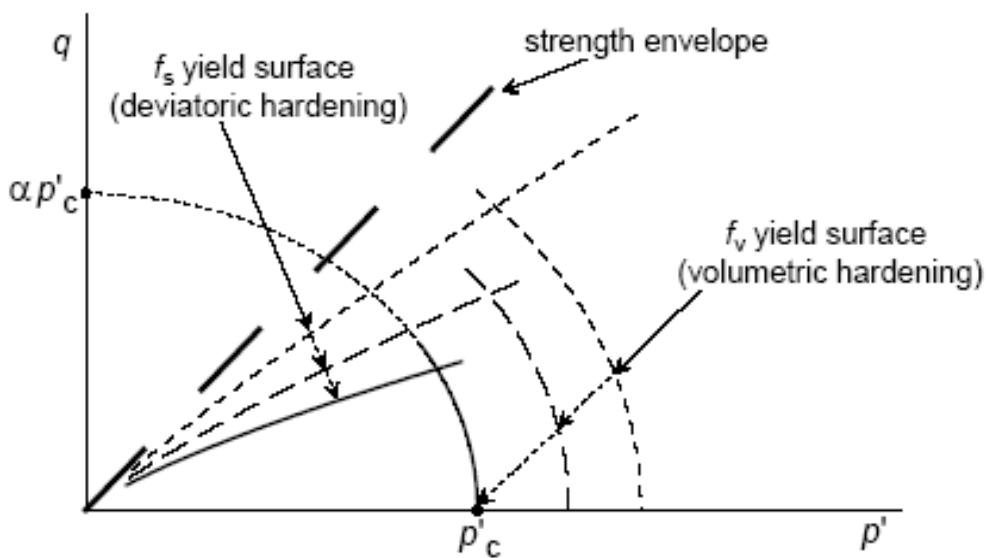


Figura 3 Superfici di snervamento del modello Hardening Soil e loro evoluzione

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		Codice documento PF0004_F0_ITA	Rev F0 Data 20-06-2011

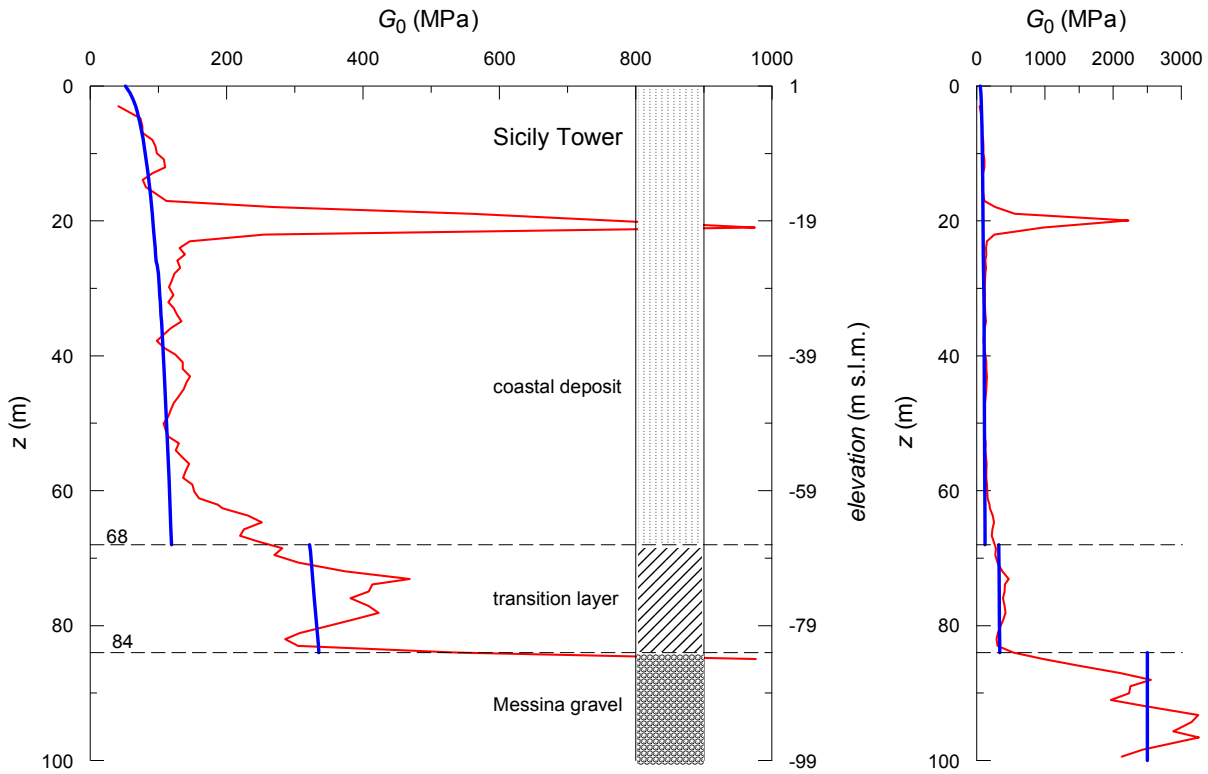


Figura 4 Profilo G_0 per analisi Plaxis

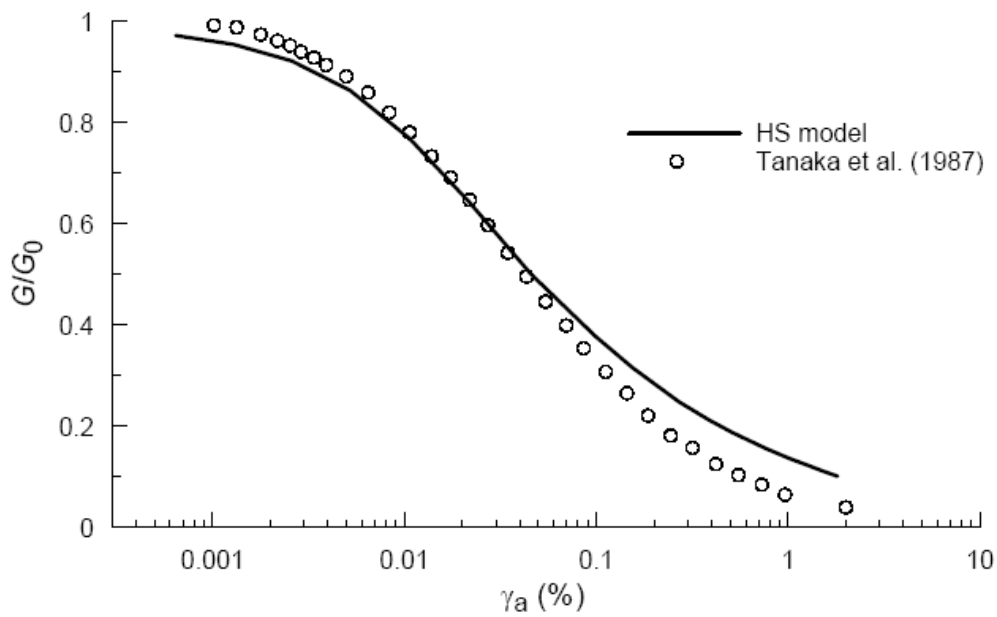


Figura 5 Confronto fra la curva di decadimento del modulo prevista dal modello HS e quella ottenuta da Tanaka et al. (1987)

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

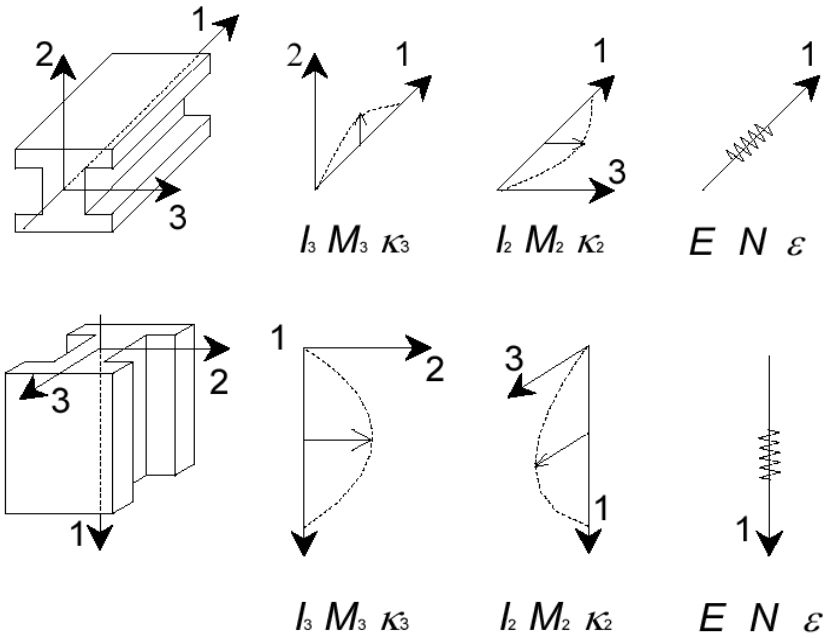


Figura 6 Elementi PARETE in PLAXIS

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

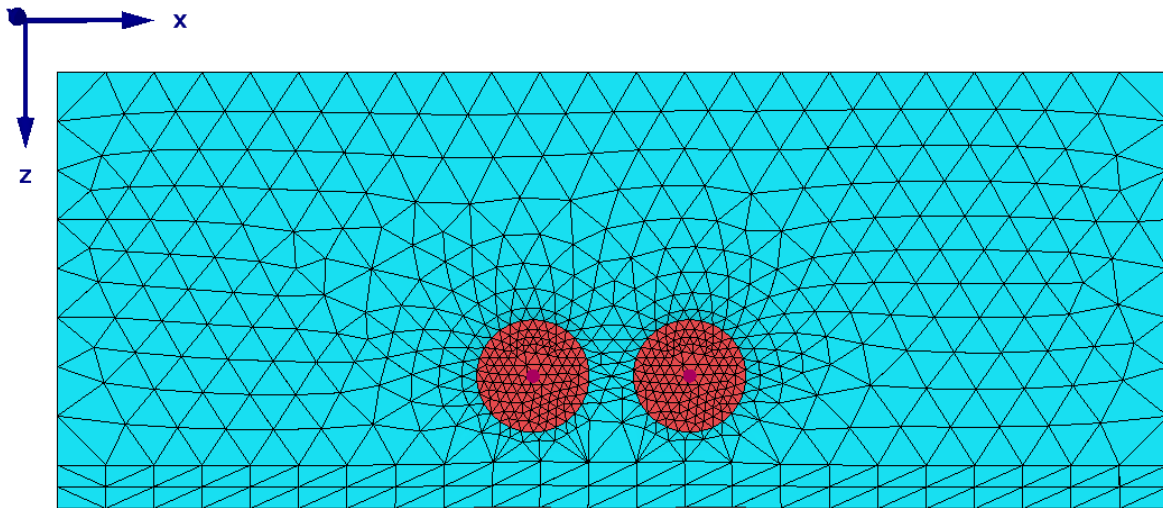


Figura 7 Vista in pianta della griglia del modello

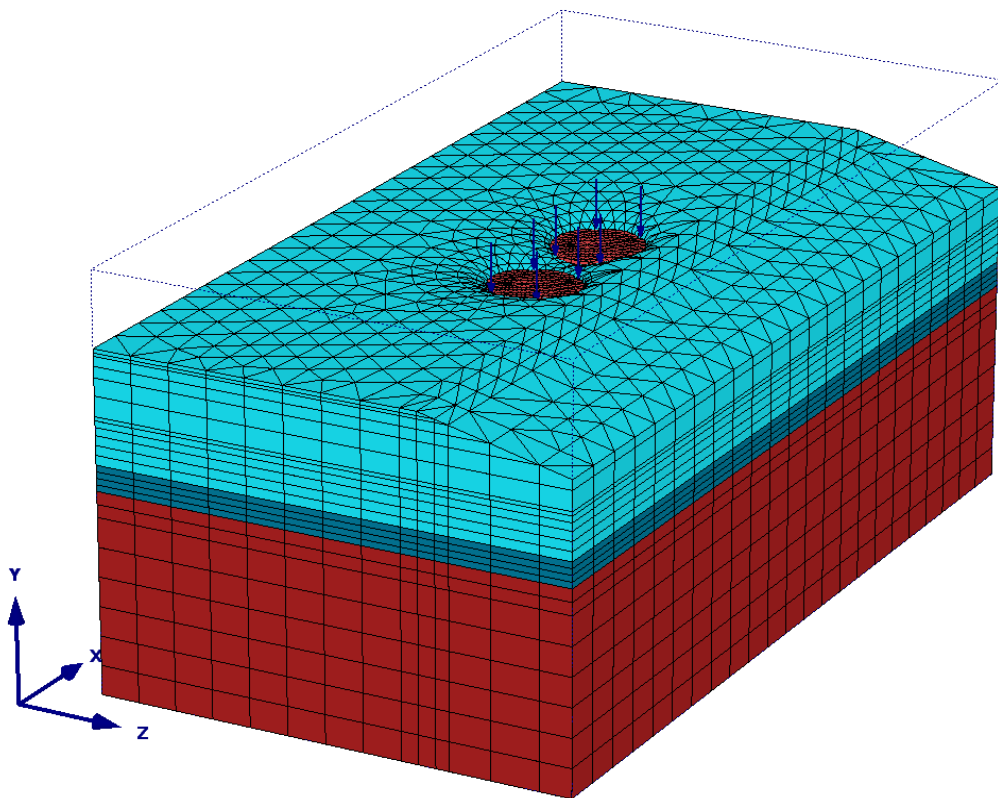


Figura 8 Griglia del modello FEM 3D

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

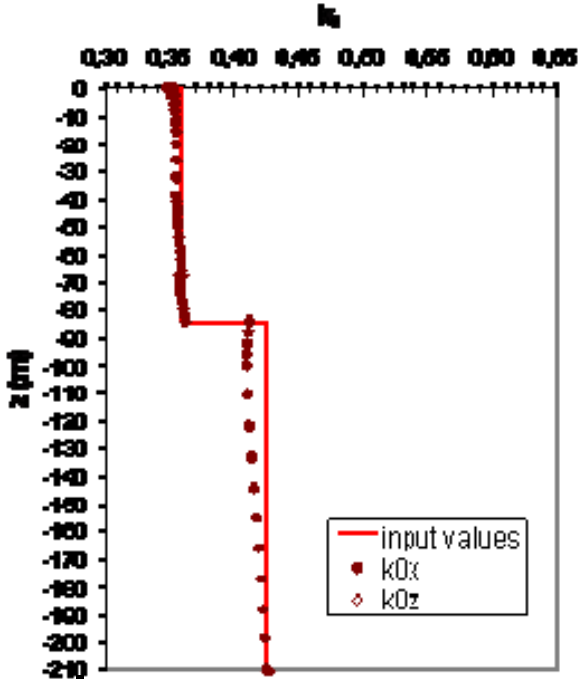


Figura 9 Profilo k_0 dopo lo step di calcolo 1

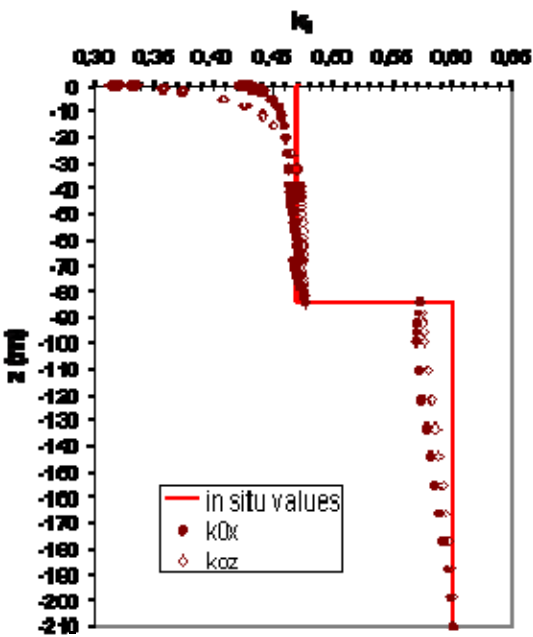


Figura 10 Profilo k_0 dopo lo step di calcolo 2

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

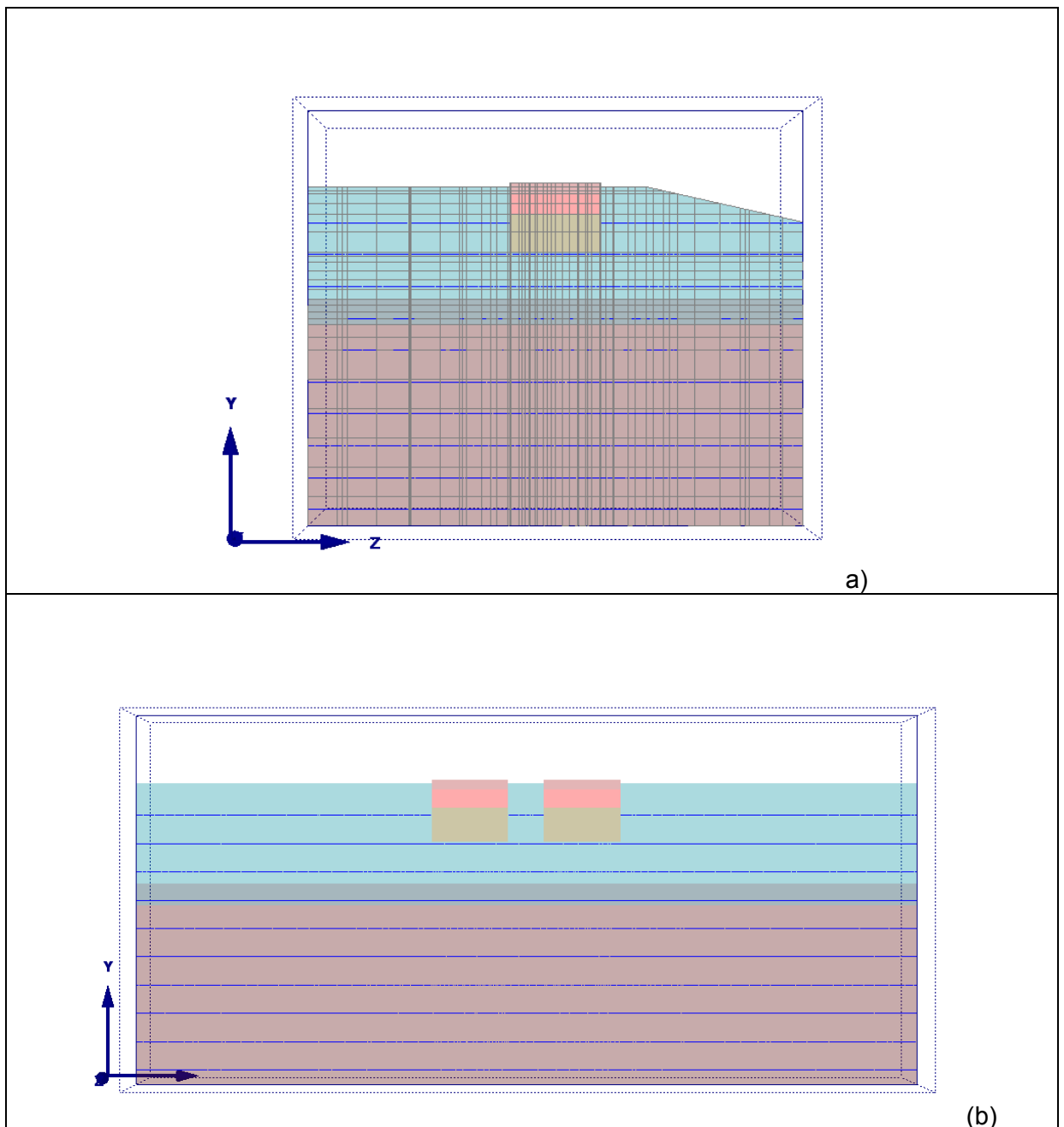


Figura 11 Sezioni della griglia (iniezione ad alta pressione in grigio) (a) ortogonale e (b) parallela al mare

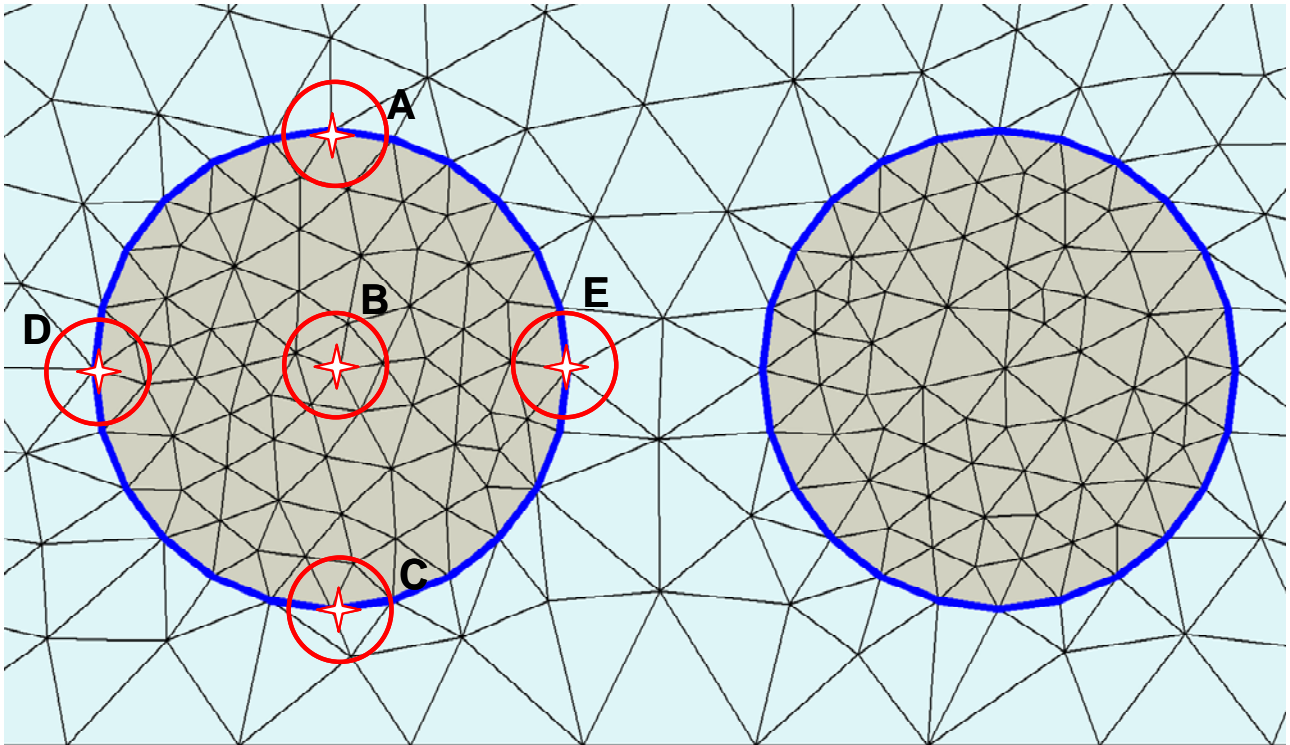


Figura 12 Posizione dei punti alla quota di -15,0 , (il punto C è il più vicino alla costa)

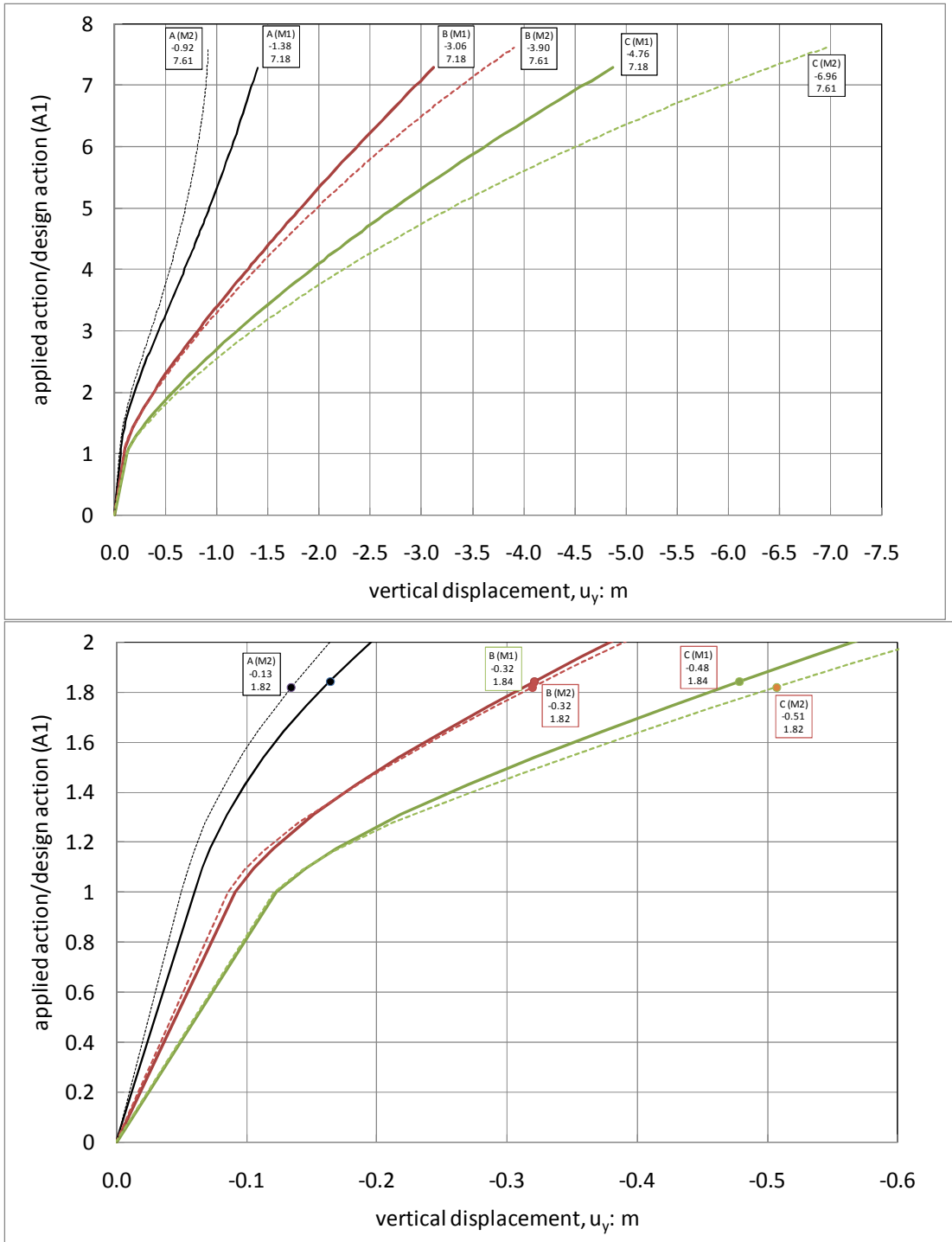


Figura 13 ULS: Curve di assestamento del carico per tre punti a quota -15,0 m

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

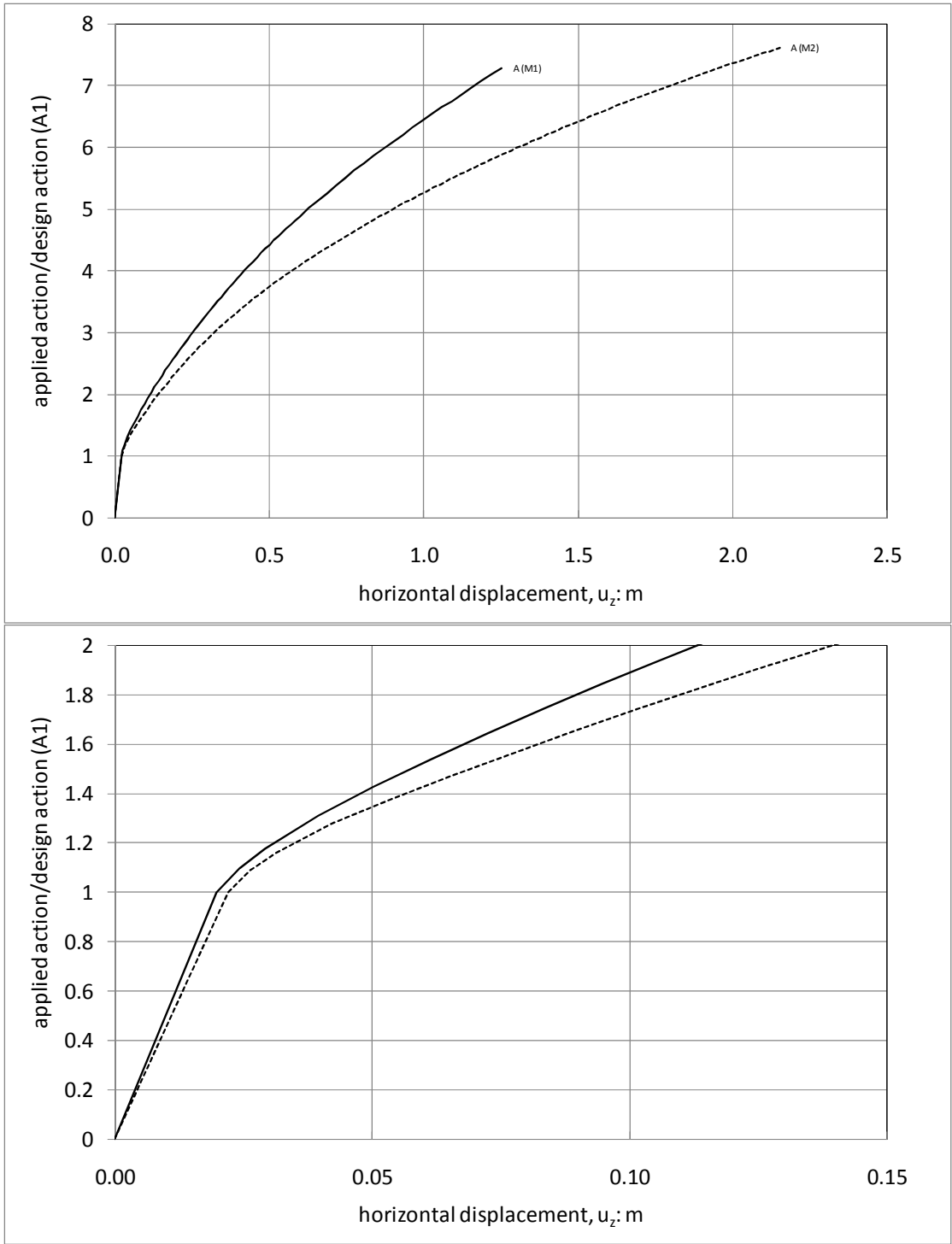


Figura 14 ULS: Curve di spostamento orizzontale del carico per tre punti a quota -15,0

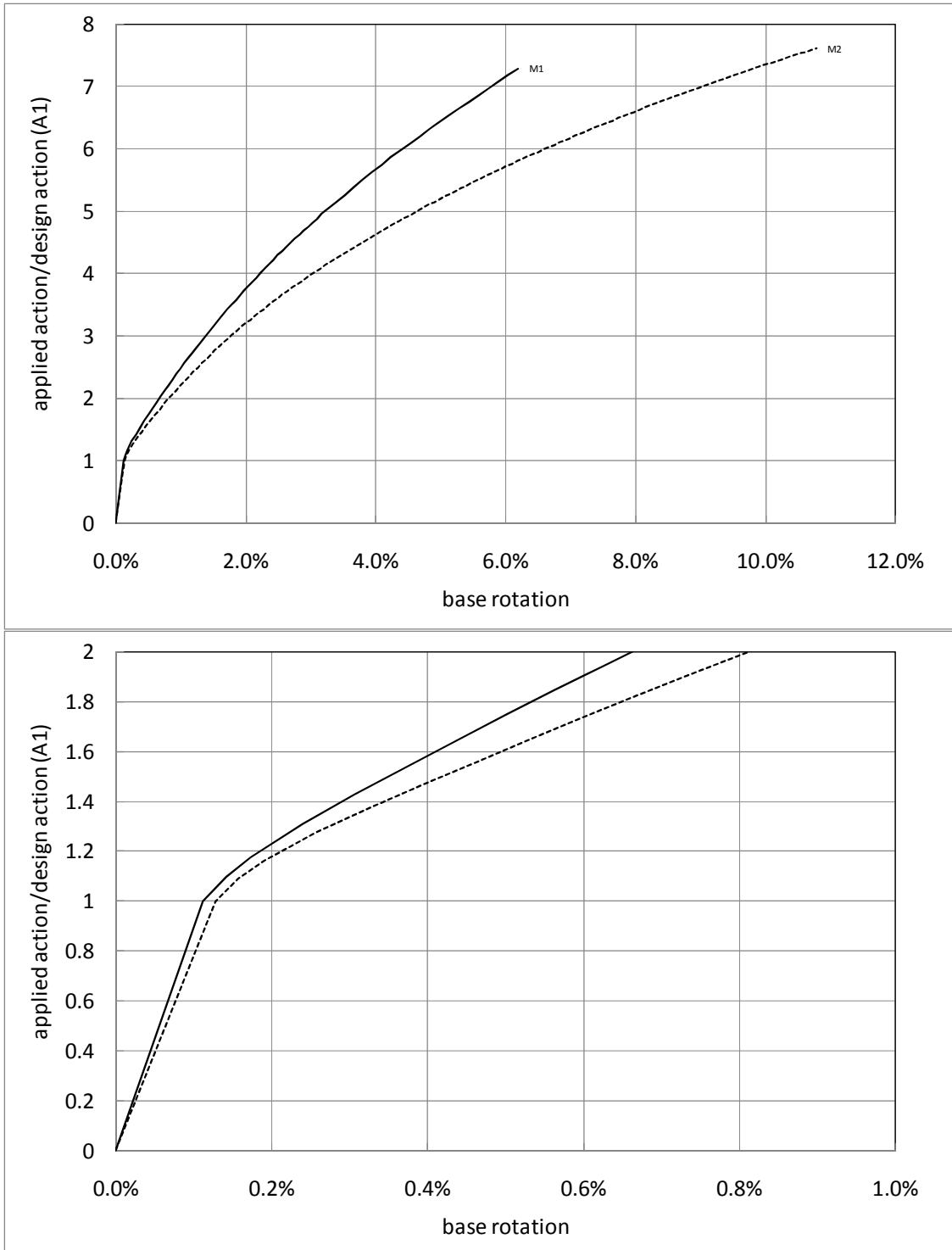


Figura 15 ULS: Rotazioni verso la costa per analisi diverse

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

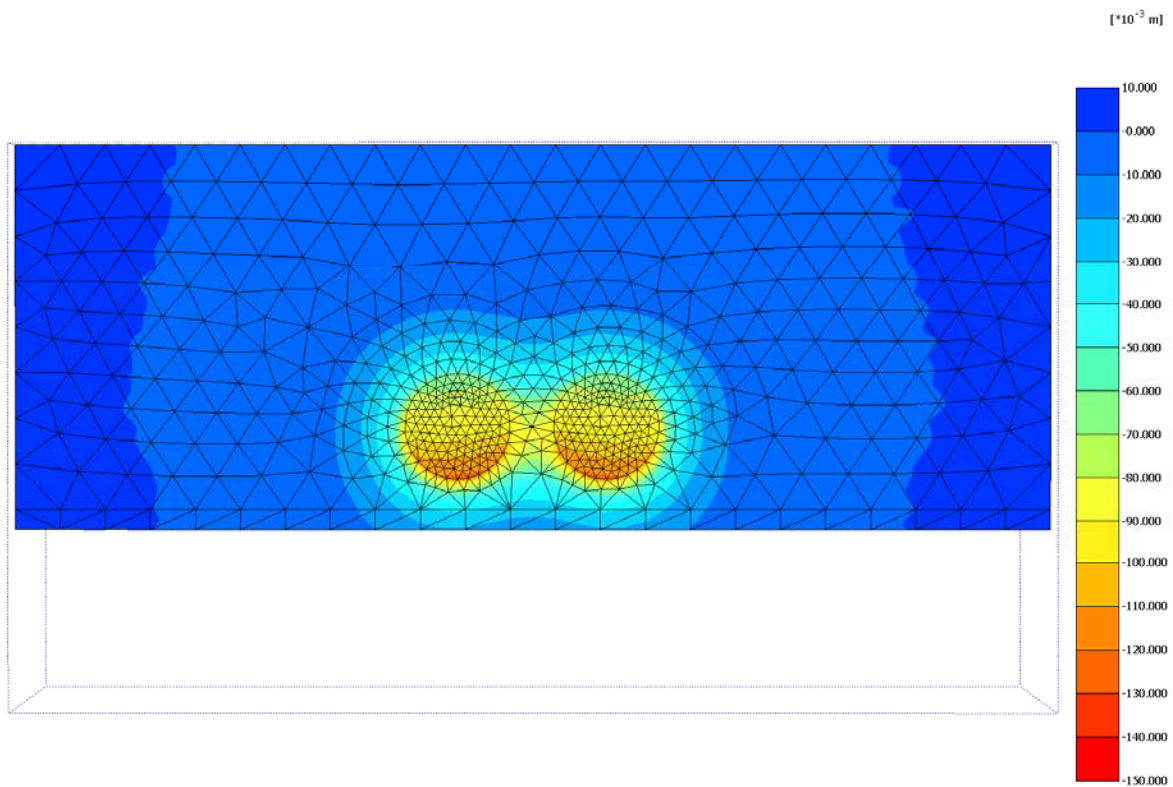
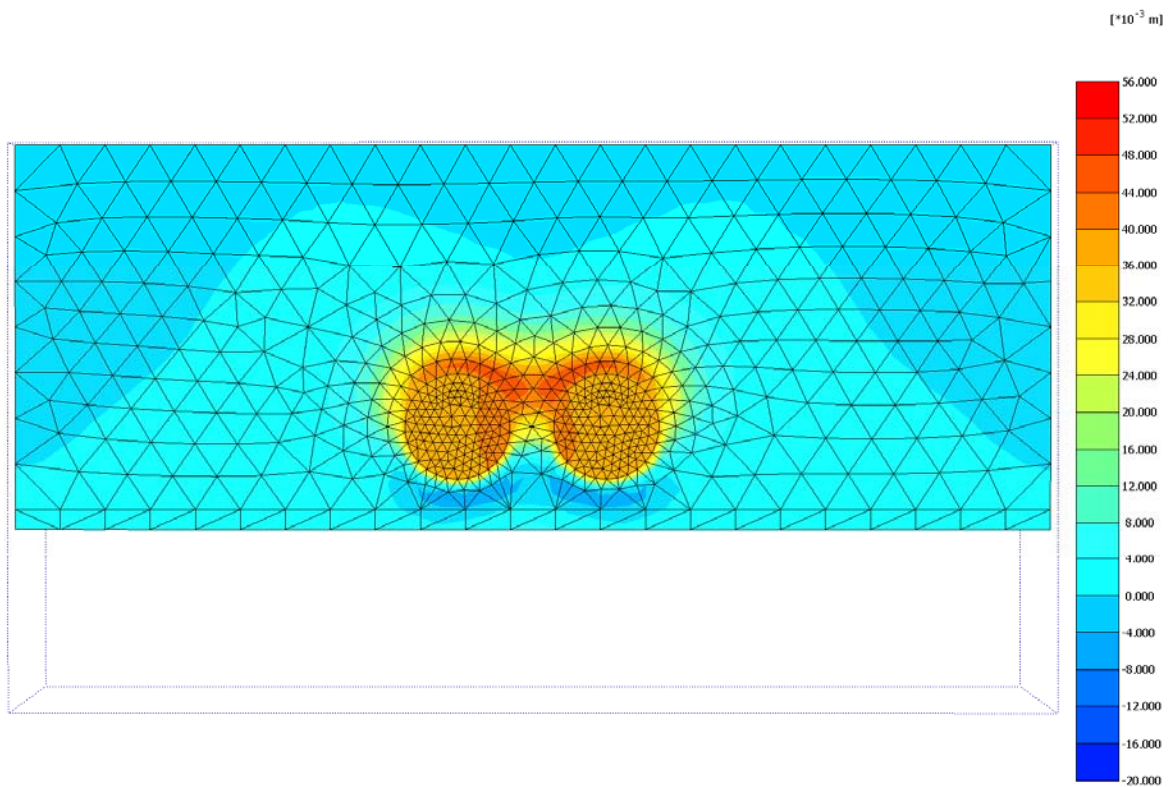


Figura 16. ULS: Spostamenti verticali a livello del terreno (+2.5 m s.l.m.) Caso A1+M1

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	



*Figura 17. ULS: Spostamenti orizzontali (positivi verso la costa) a livello del terreno(+2.5 m s.l.m.)
 Caso A1+M1*

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

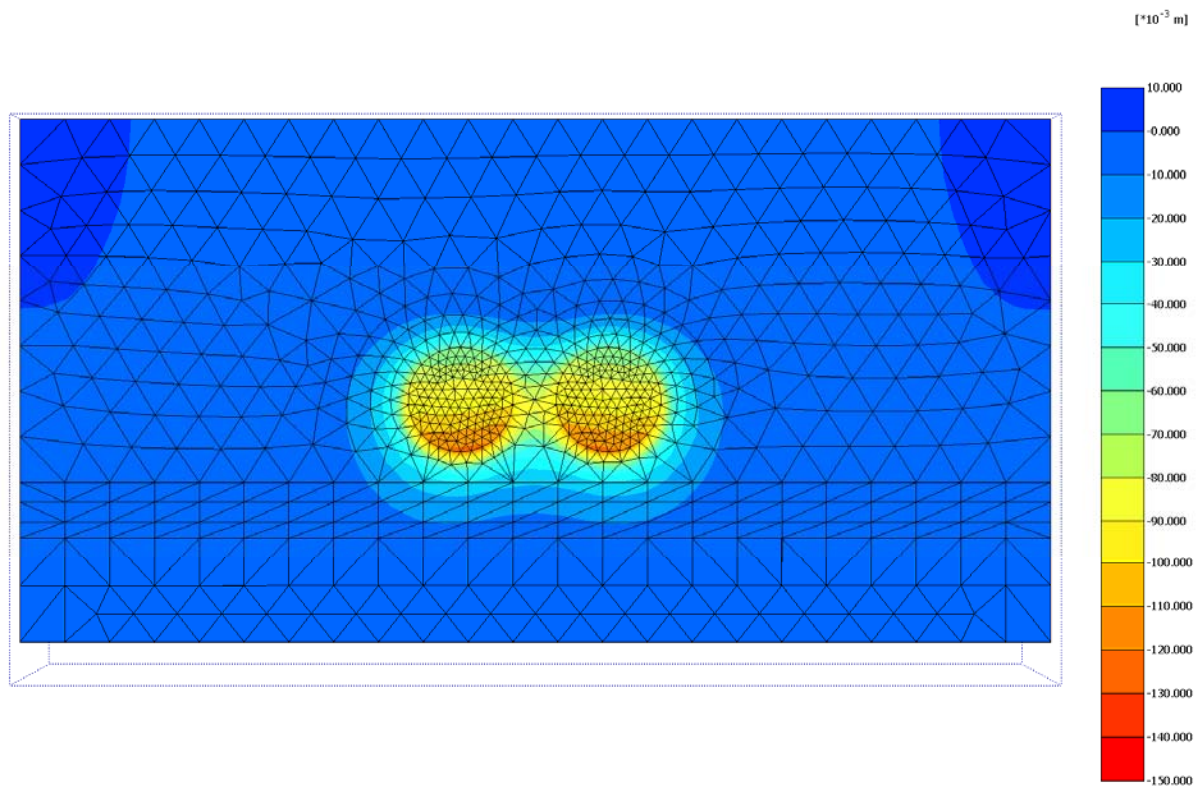


Figura 18. ULS: Spostamenti verticali a livello del basamento (-15 m s.l.m.) Caso A1+M1

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

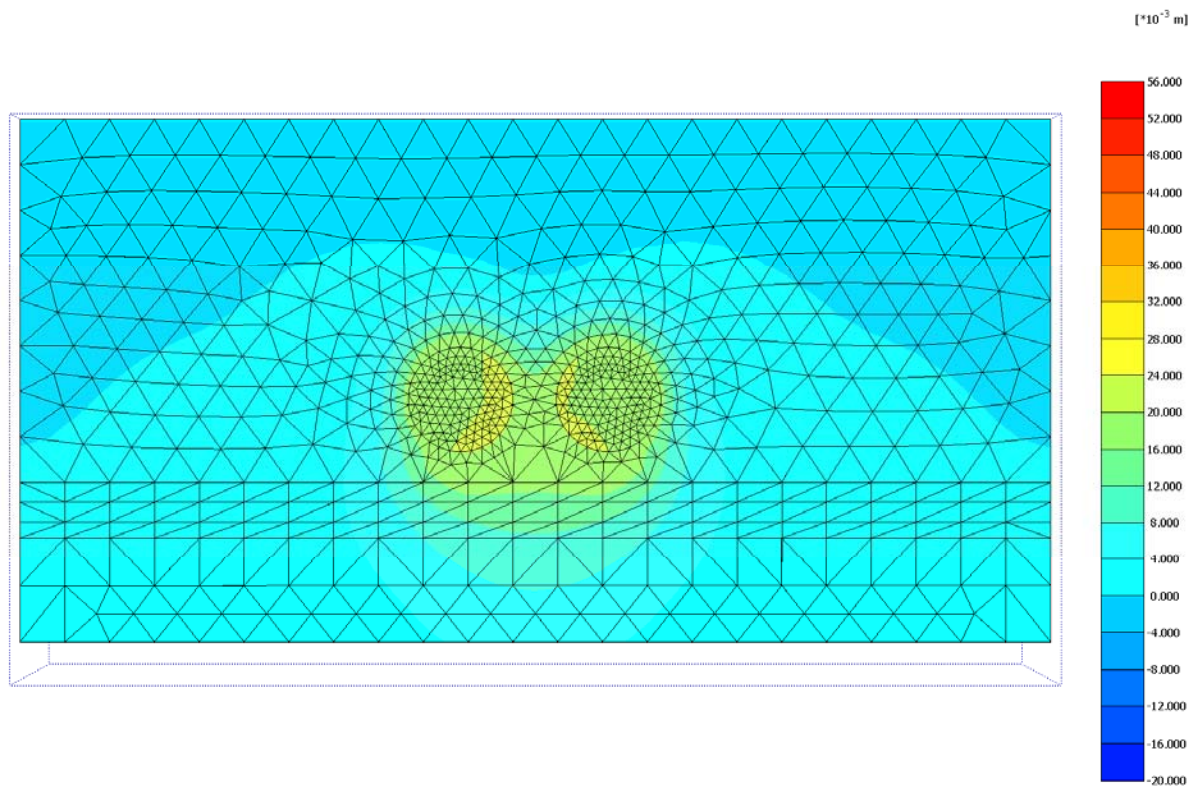


Figura 19. ULS: Spostamenti orizzontali (positivi verso la costa) a livello del basamento(-15 m s.l.m.) Caso A1+M1

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

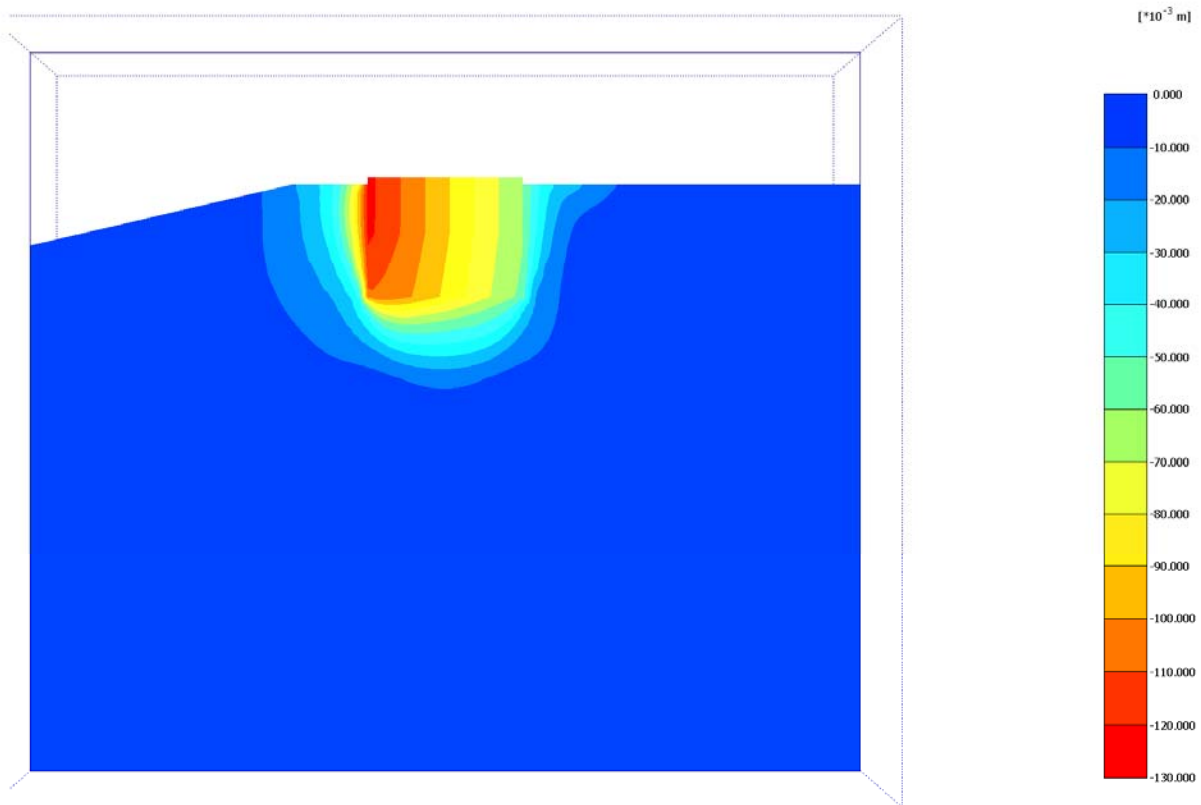


Figura 20. ULS: Spostamenti verticali nella sezione lungo il piano del diametro della torre perpendicolari alla costa. Caso A1+M1

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

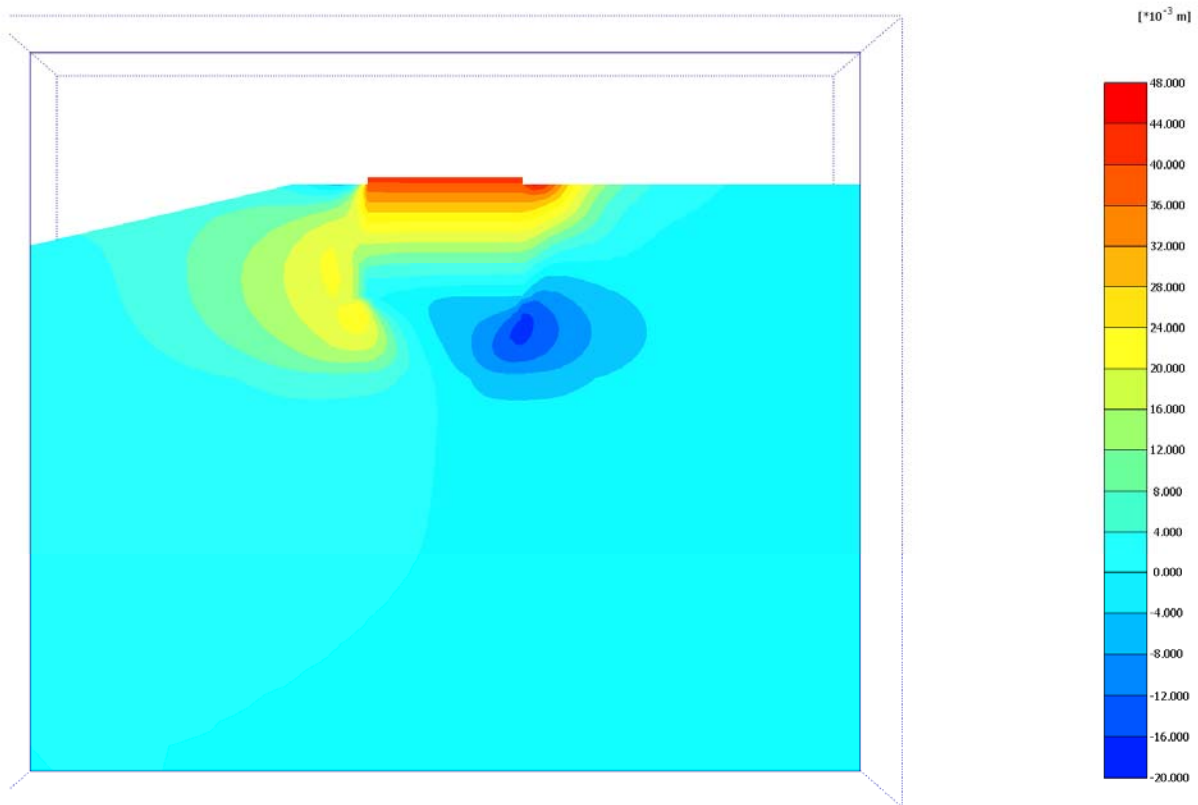


Figura 21. ULS: Spostamenti orizzontali nella sezione lungo il piano del diametro della torre perpendicolari alla costa (positivi verso la costa). Caso A1+M1

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

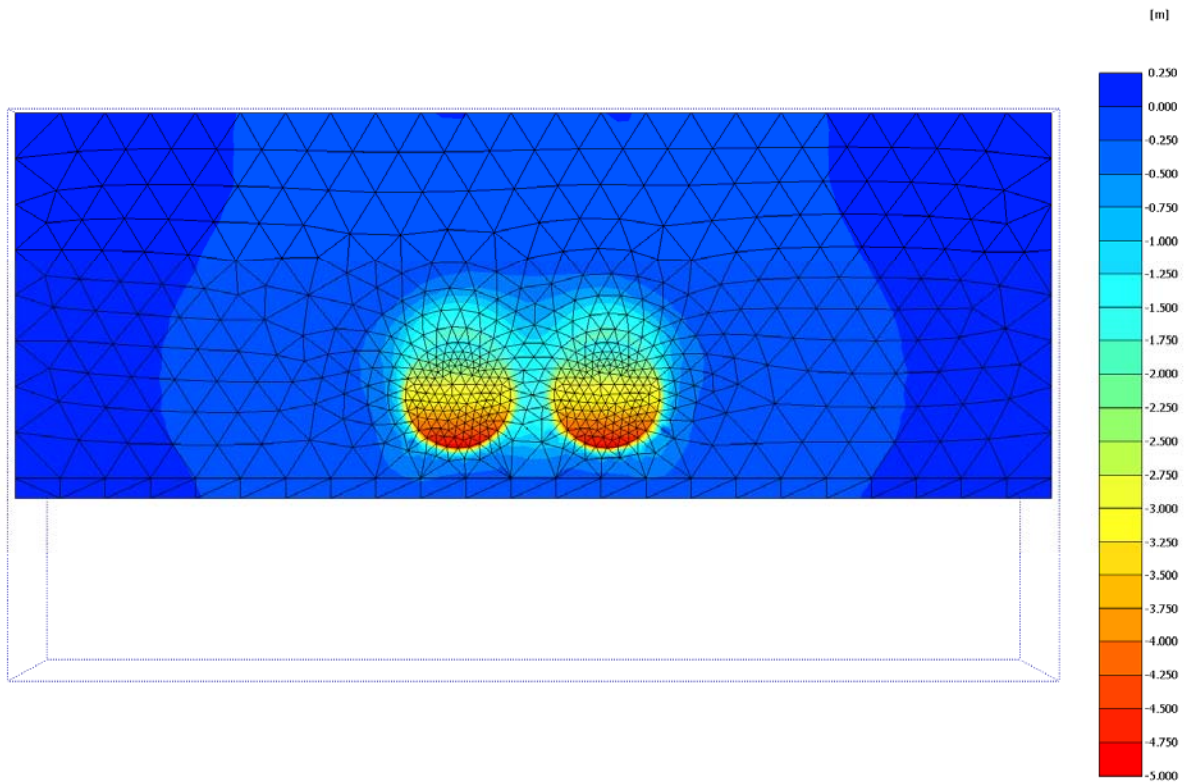


Figura 22. ULS: Spostamenti verticali a livello del terreno (+2.5 m s.l.m.) al termine del carico incrementale. Caso A1+M1

 Stretto di Messina		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

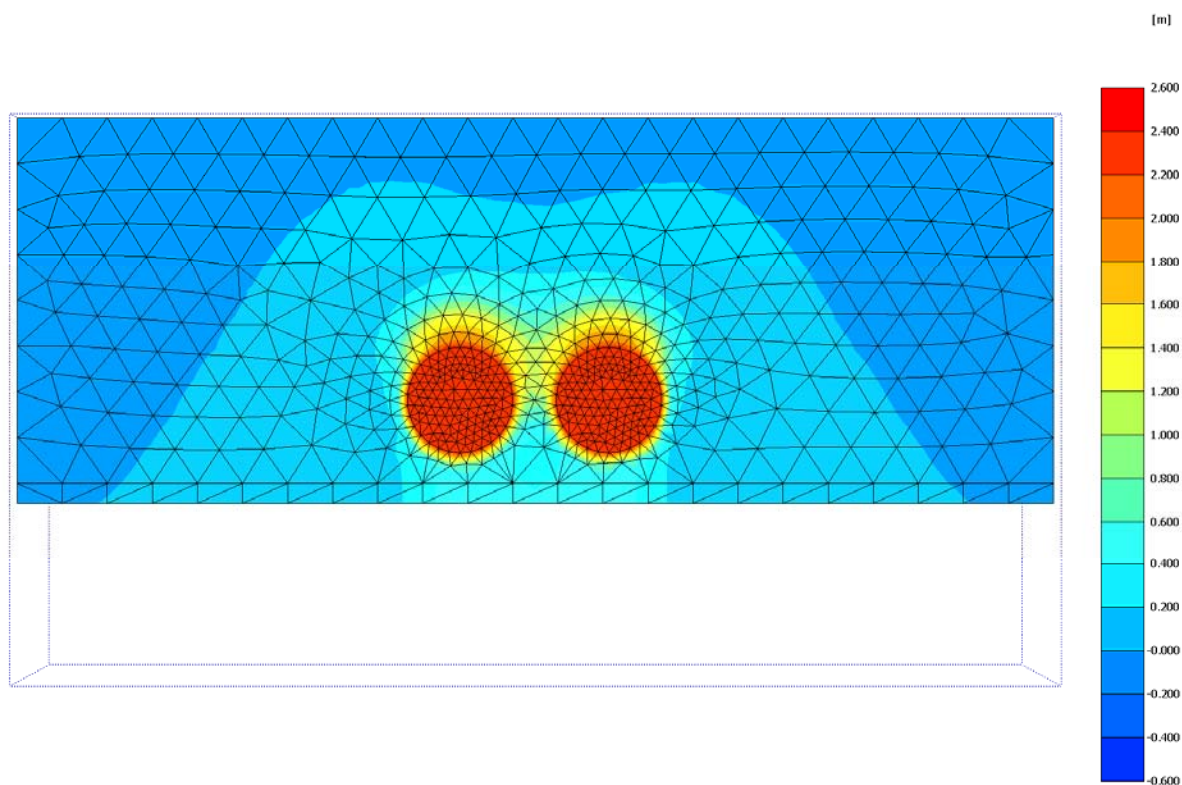


Figura 23. ULS: Spostamenti orizzontali (positivi verso la costa) a livello del terreno (+2.5 m s.l.m.) al termine del carico incrementale. Caso A1+M1

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

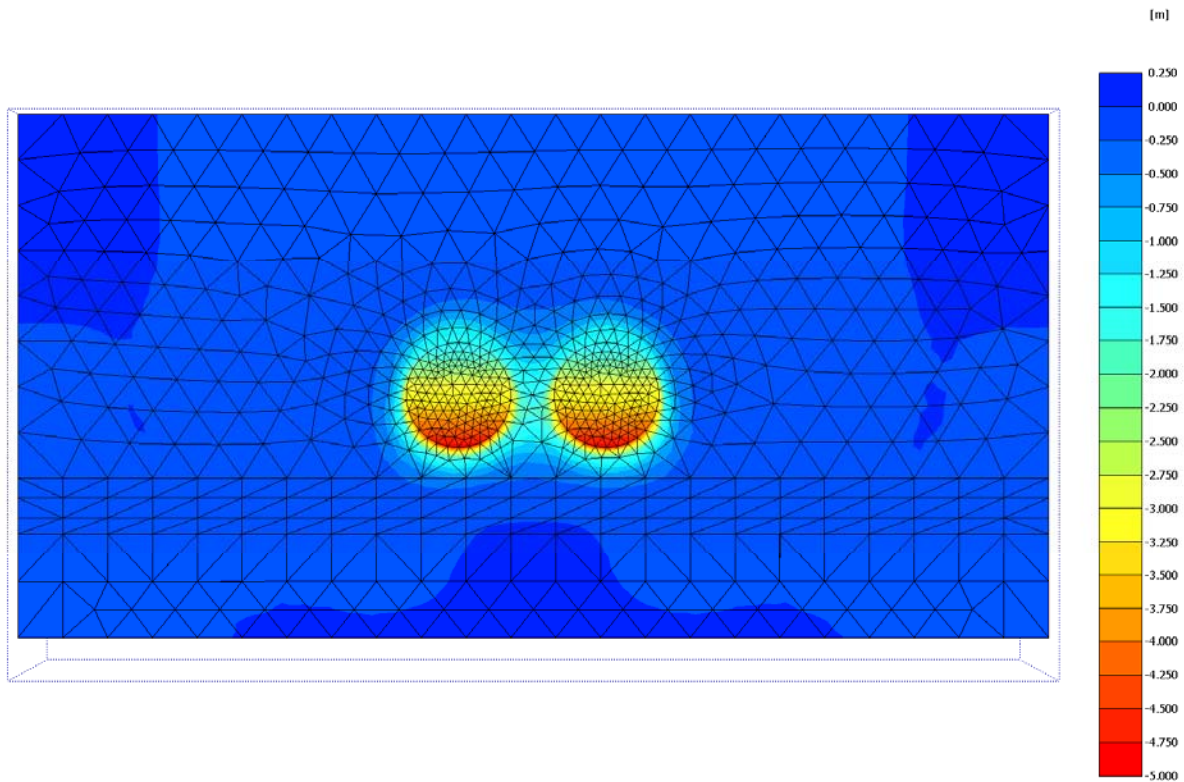


Figura 24. ULS: Spostamenti verticali a livello del basamento (-15 m s.l.m.) al termine del carico incrementale. Caso A1+M1

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

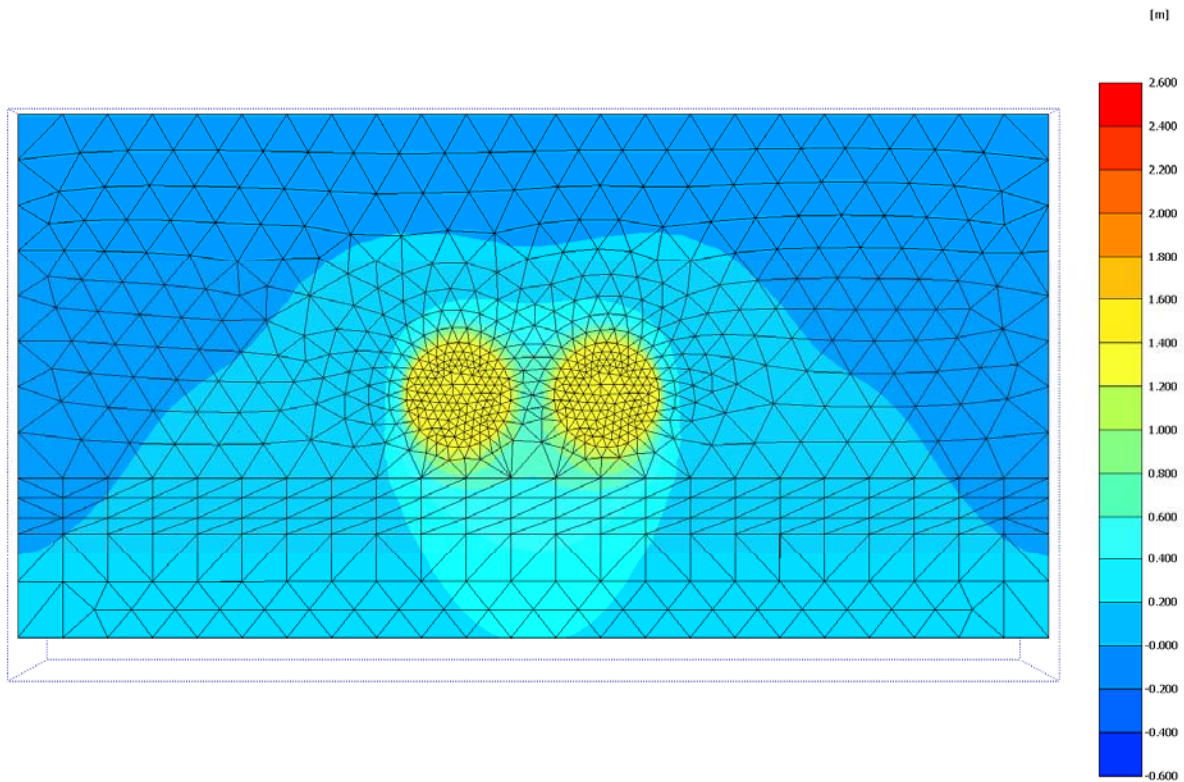


Figura 25. ULS: Spostamenti orizzontali (positivi verso la costa) a livello del basamento (-15 m s.l.m.) al termine del carico incrementale. Caso A1+M1

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

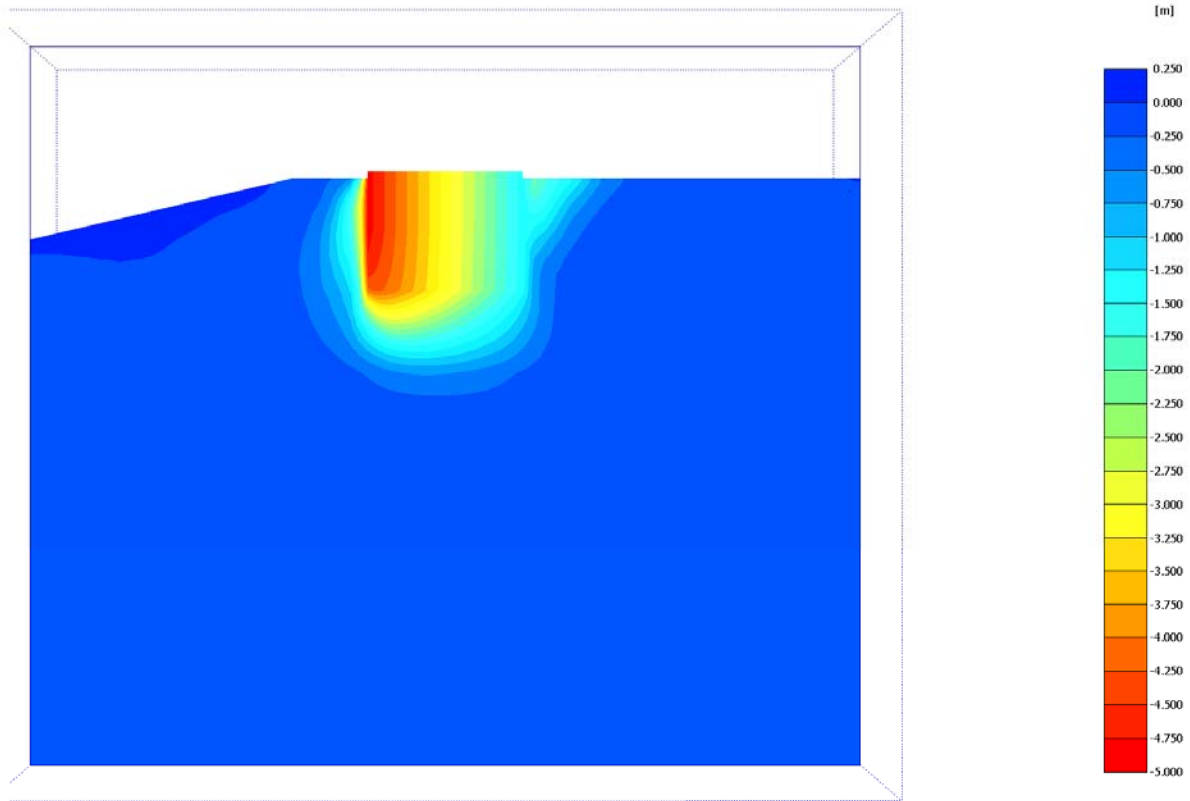


Figura 26 ULS: Spostamenti verticali nella sezione lungo il piano del diametro della torre perpendicolari alla costa al termine del carico incrementale. Caso A1+M1

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		Codice documento PF0004_F0_ITA	Rev F0	Data 20-06-2011

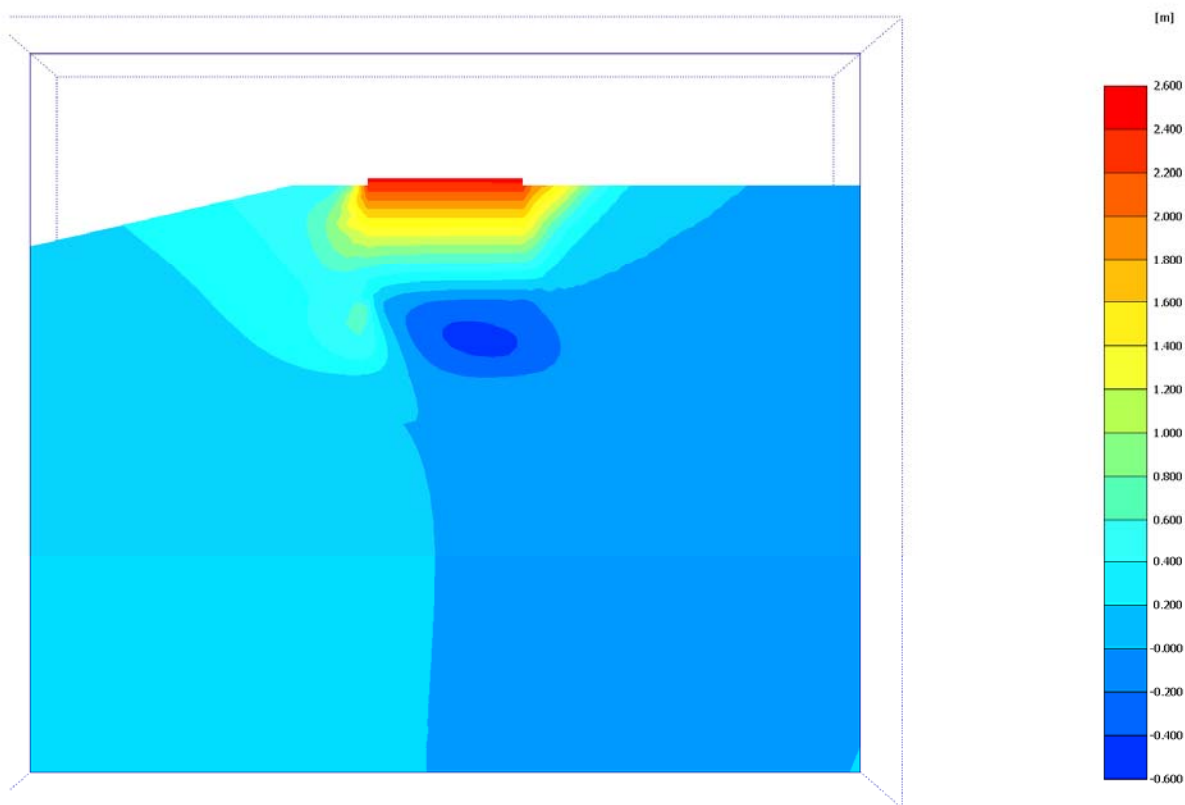


Figura 27 ULS: Spostamenti verticali nella sezione lungo il piano del diametro della torre perpendicolari alla costa al termine del carico incrementale. Caso A1+M1

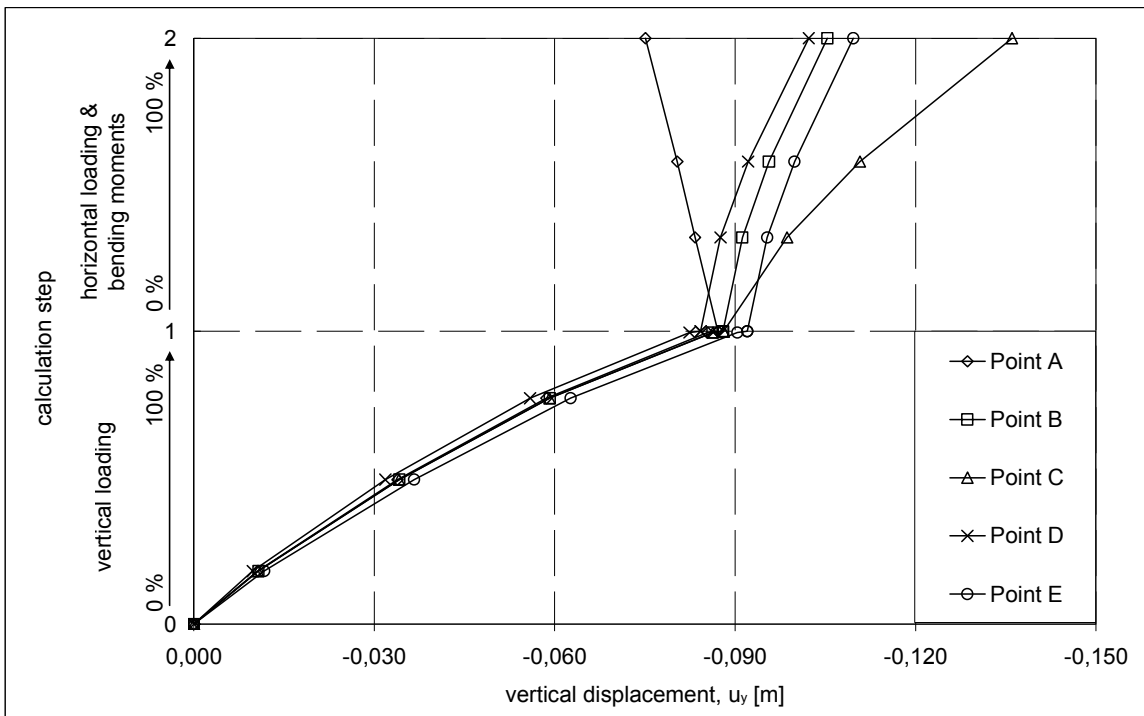


Figura 28 SILS: Curve di assestamento del carico per cinque punti a quota -15,0 m

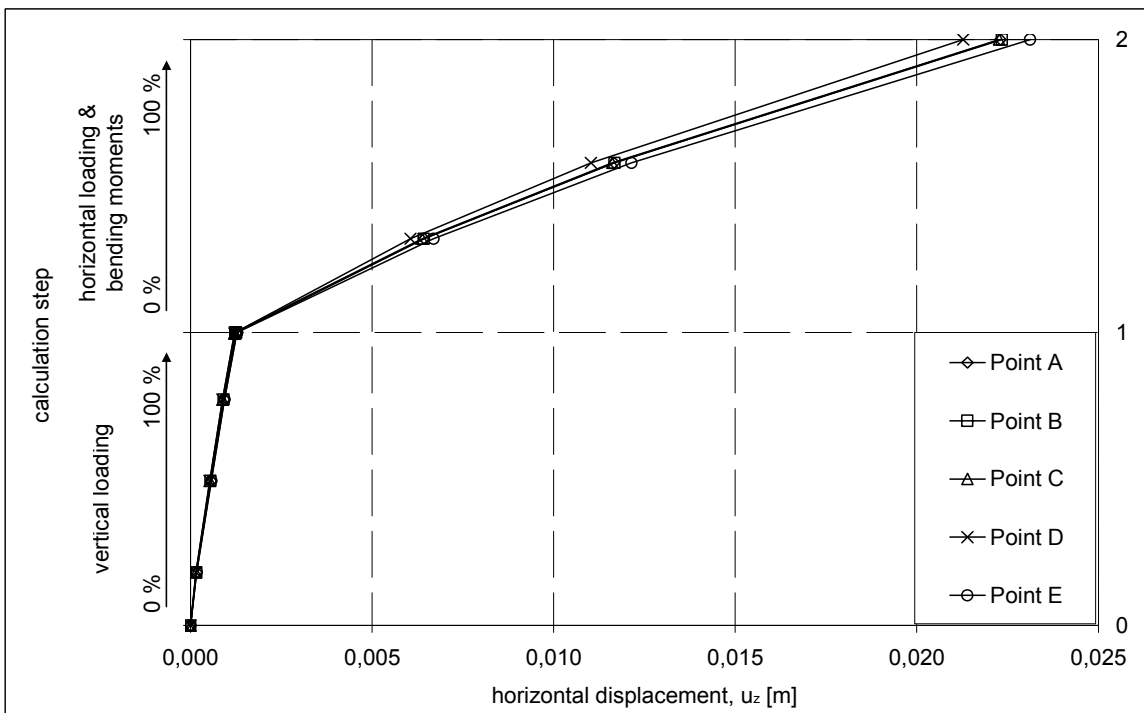


Figura 29 SILS: Curve di spostamento orizzontale del carico per tre punti a quota -15,0

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20-06-2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20-06-2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20-06-2011						

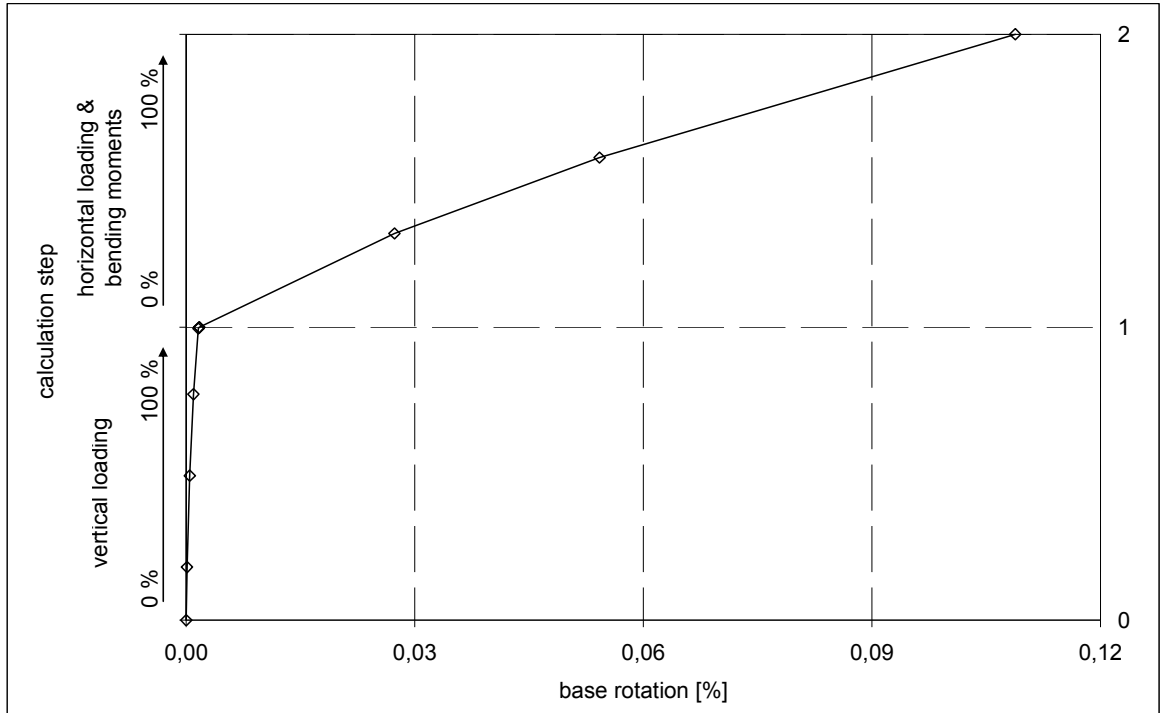


Figura 30 SILS: Rotazioni verso la costa

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

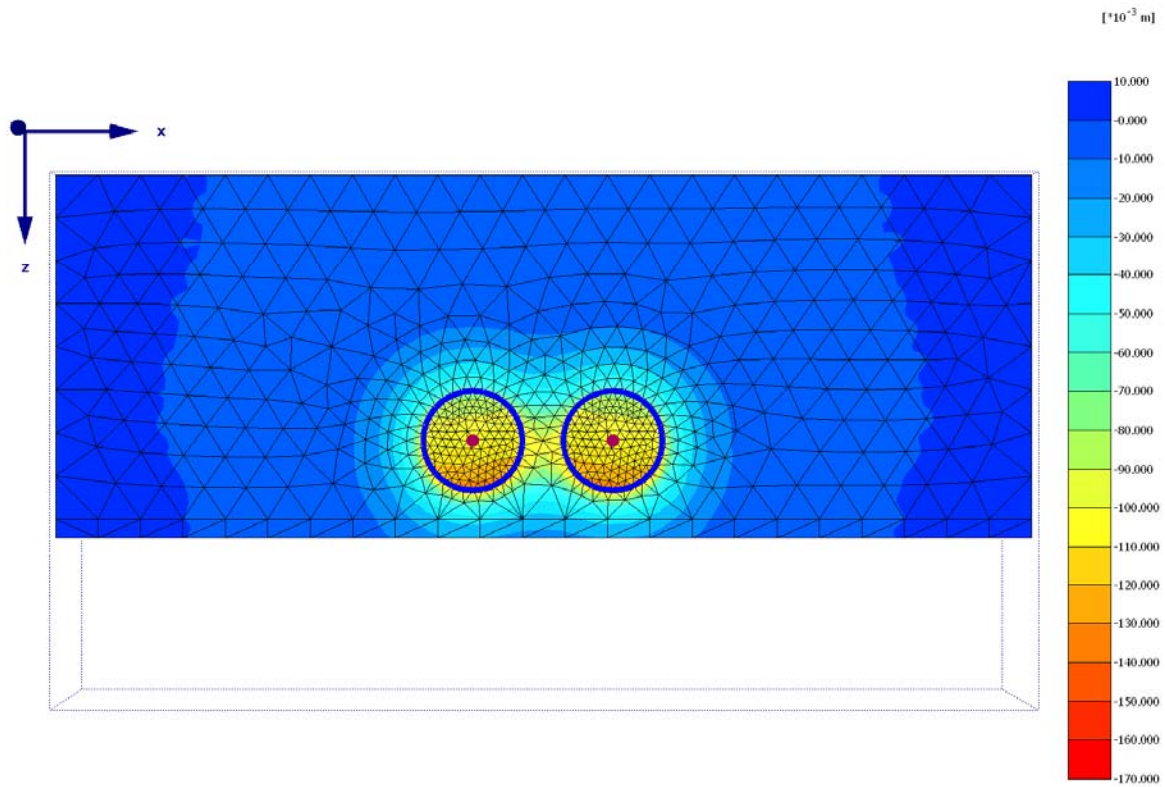


Figura 31. SILS: Spostamenti verticali a livello del terreno (+2.5 m s.l.m.)

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

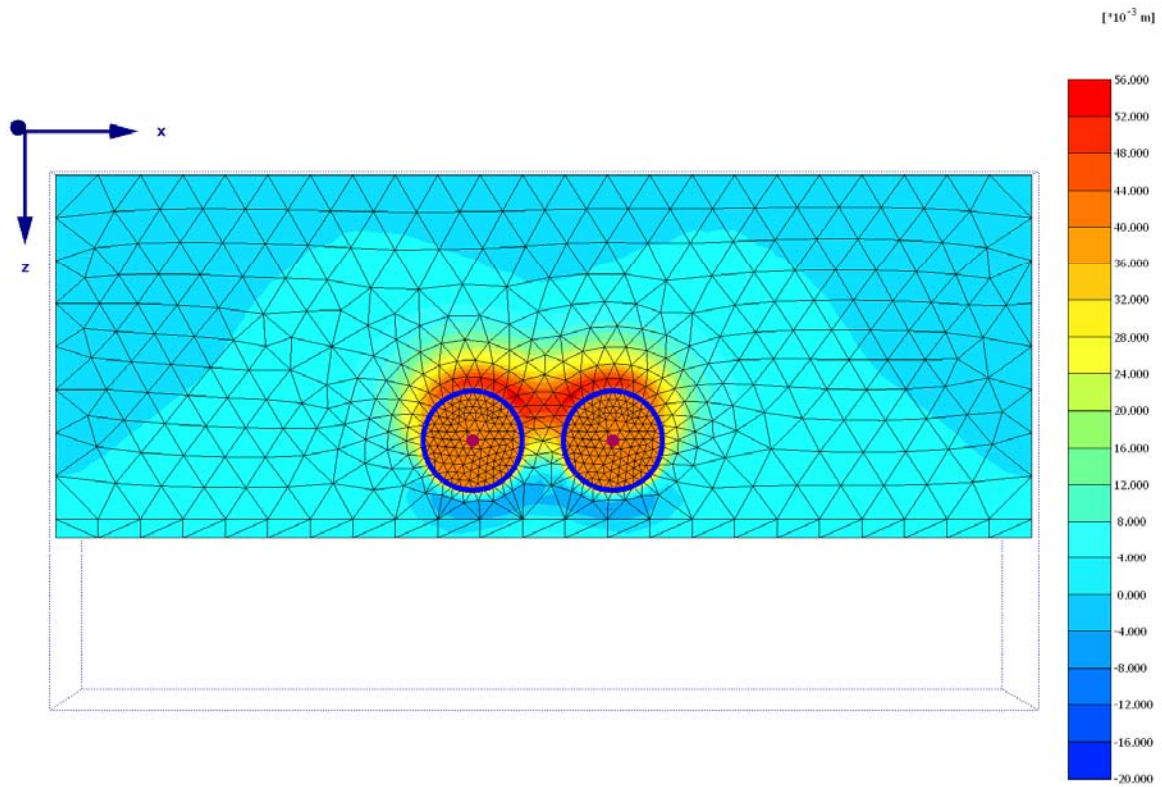


Figura 32. SILS: Spostamenti orizzontali (positivi verso la costa) a livello del terreno (+2.5 m s.l.m.)

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		Codice documento PF0004_F0_ITA	Rev F0	Data 20-06-2011

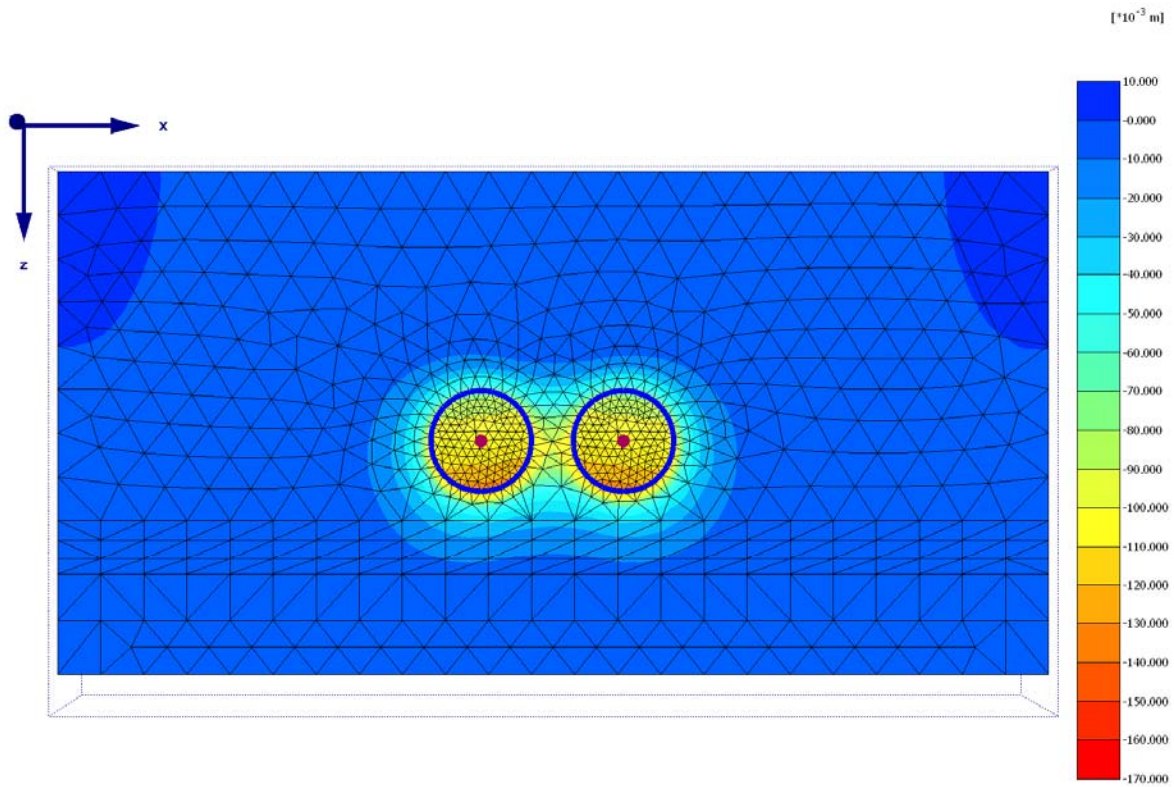


Figura 33. SILS: Spostamenti verticali a livello del basamento (-15 m s.l.m.)

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20-06-2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20-06-2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20-06-2011						

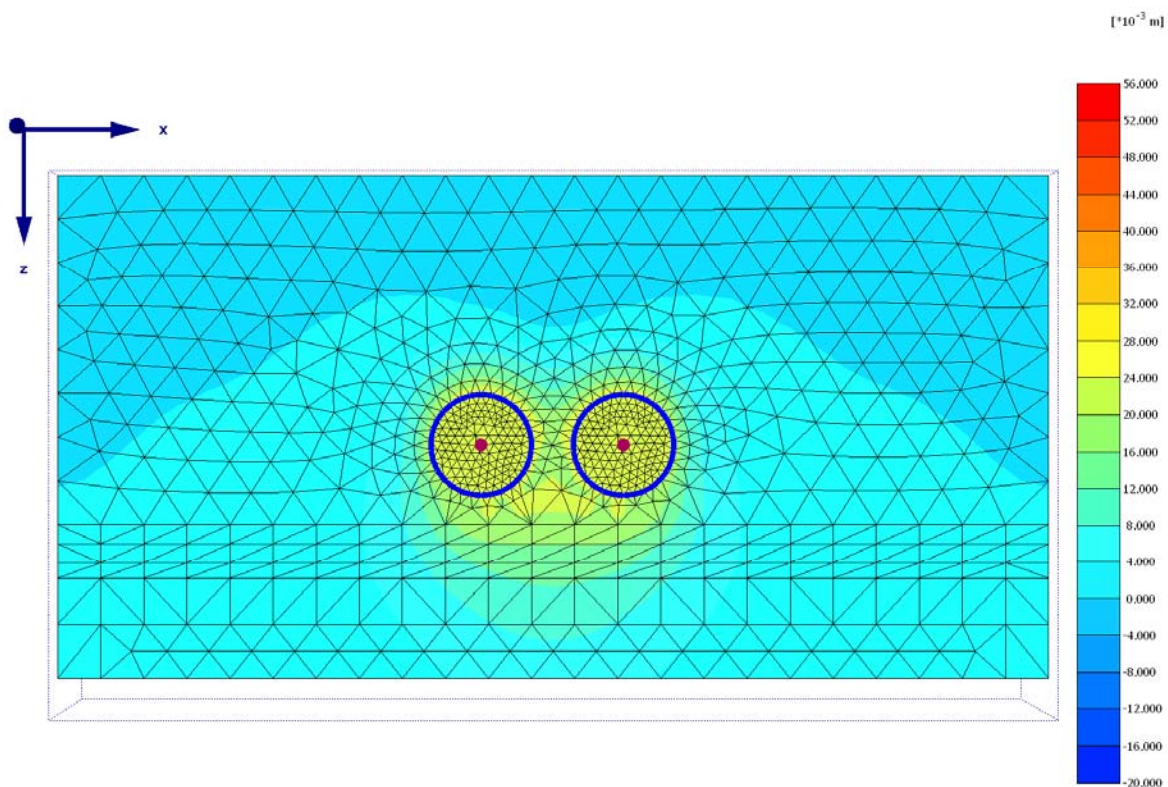


Figura 34. SILS: Spostamenti orizzontali (positivi verso la costa) a livello del basamento (-15 m s.l.m.)

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

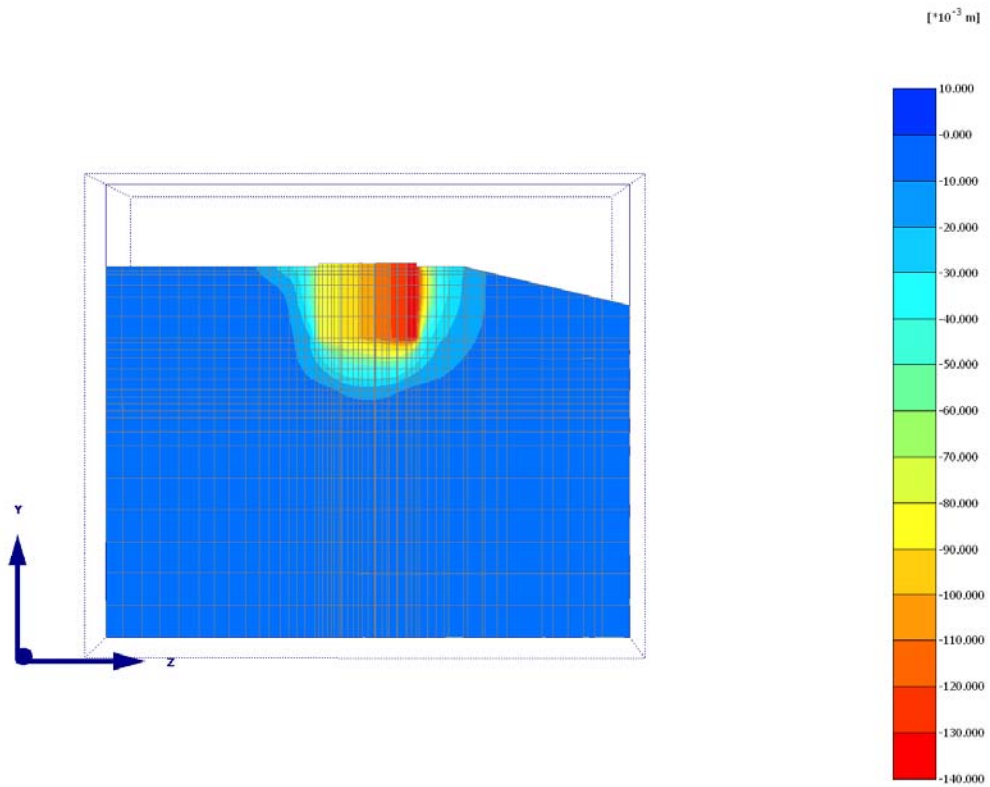


Figura 35. SILS: Spostamenti verticali nella sezione lungo il piano del diametro della torre perpendicolari alla costa.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		Codice documento PF0004_F0_ITA	Rev F0	Data 20-06-2011

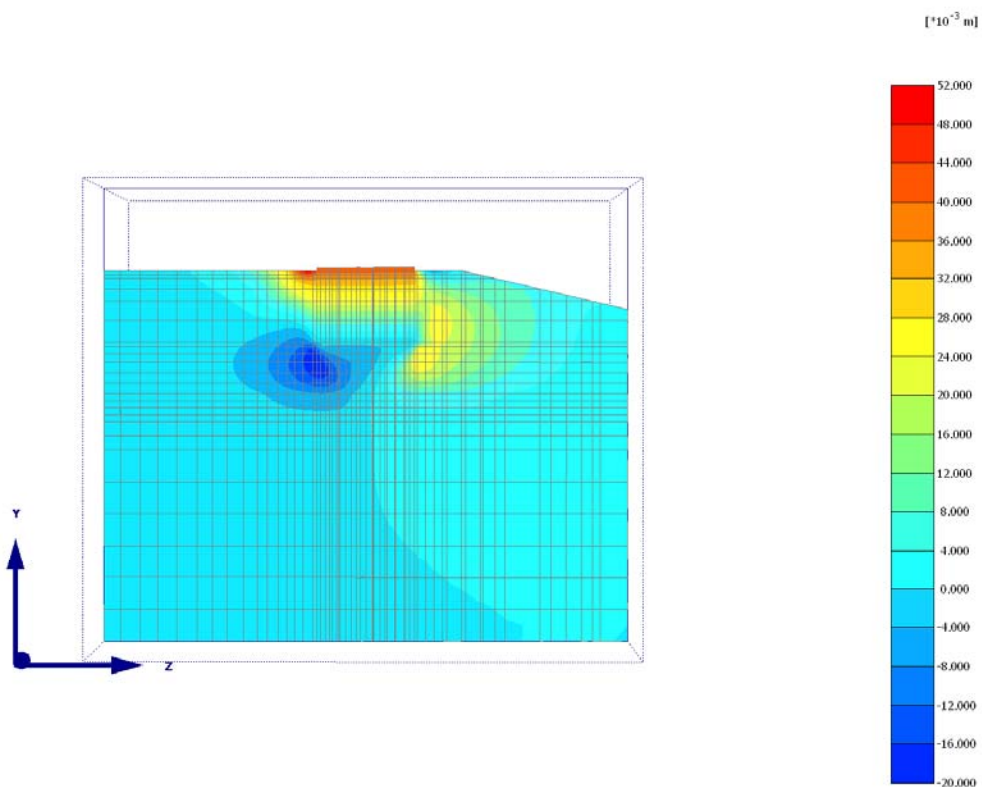


Figura 36. SILS: Spostamenti orizzontali nella sezione lungo il piano del diametro della torre perpendicolari alla costa (positivi verso la costa).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		Codice documento PF0004_F0_ITA	Rev F0 Data 20-06-2011

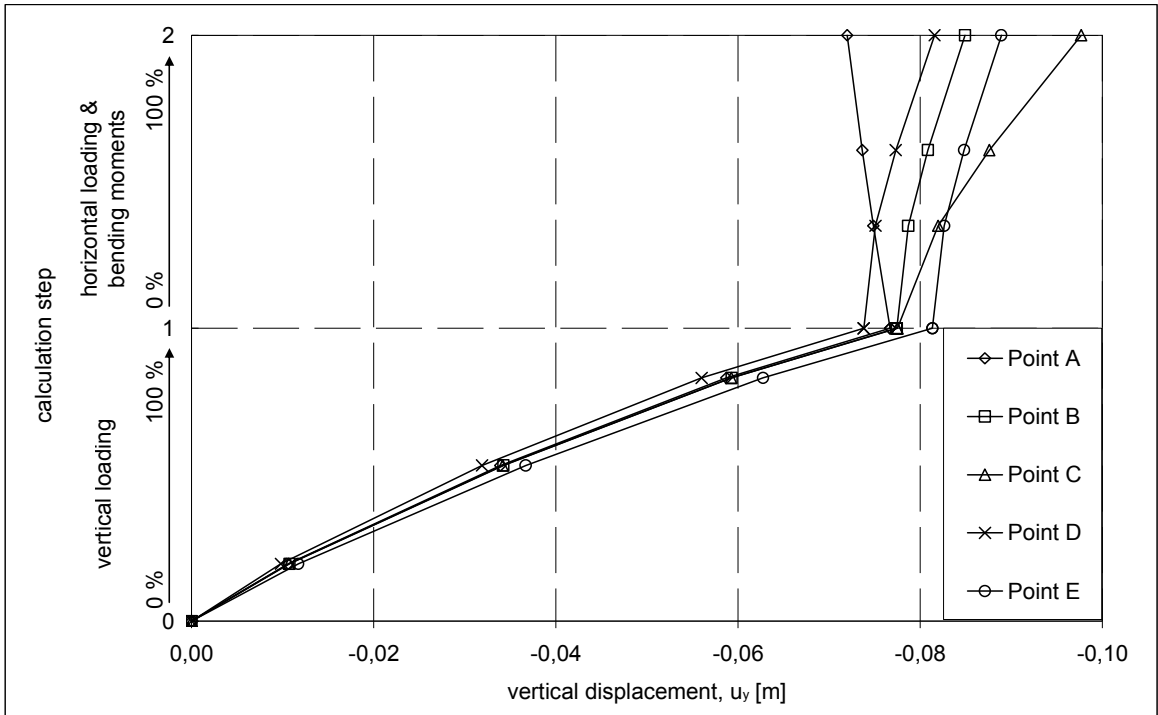


Figura 37 SLS2: Curve di assestamento del carico per cinque punti a quota -15,0 m

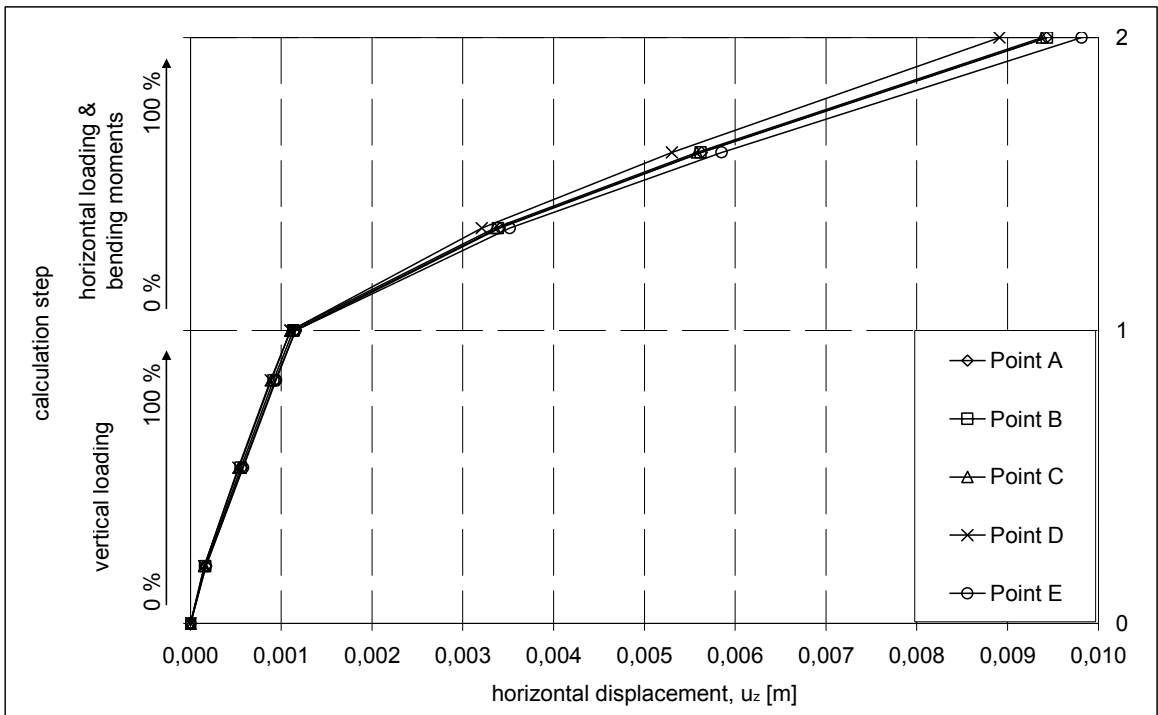


Figura 38 SLS2: Curve di spostamento orizzontale del carico per tre punti a quota -15,0

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20-06-2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20-06-2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20-06-2011						

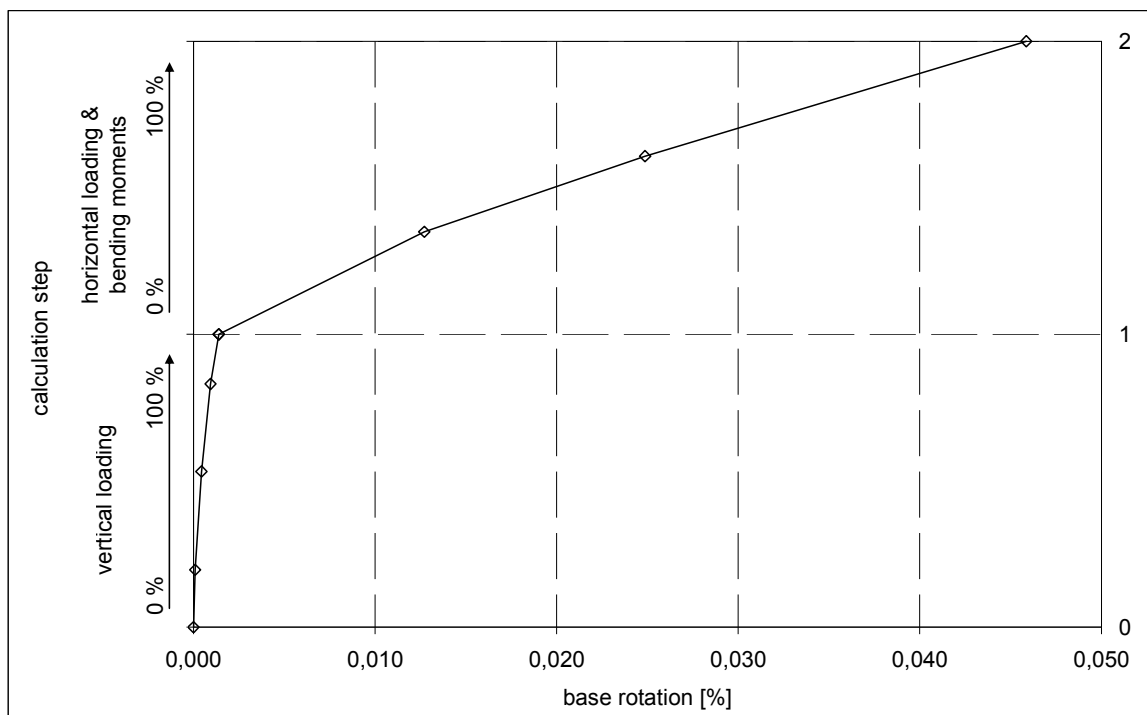


Figura 39 SLS2: Rotazioni verso la costa

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		Codice documento PF0004_F0_ITA	Rev F0	Data 20-06-2011

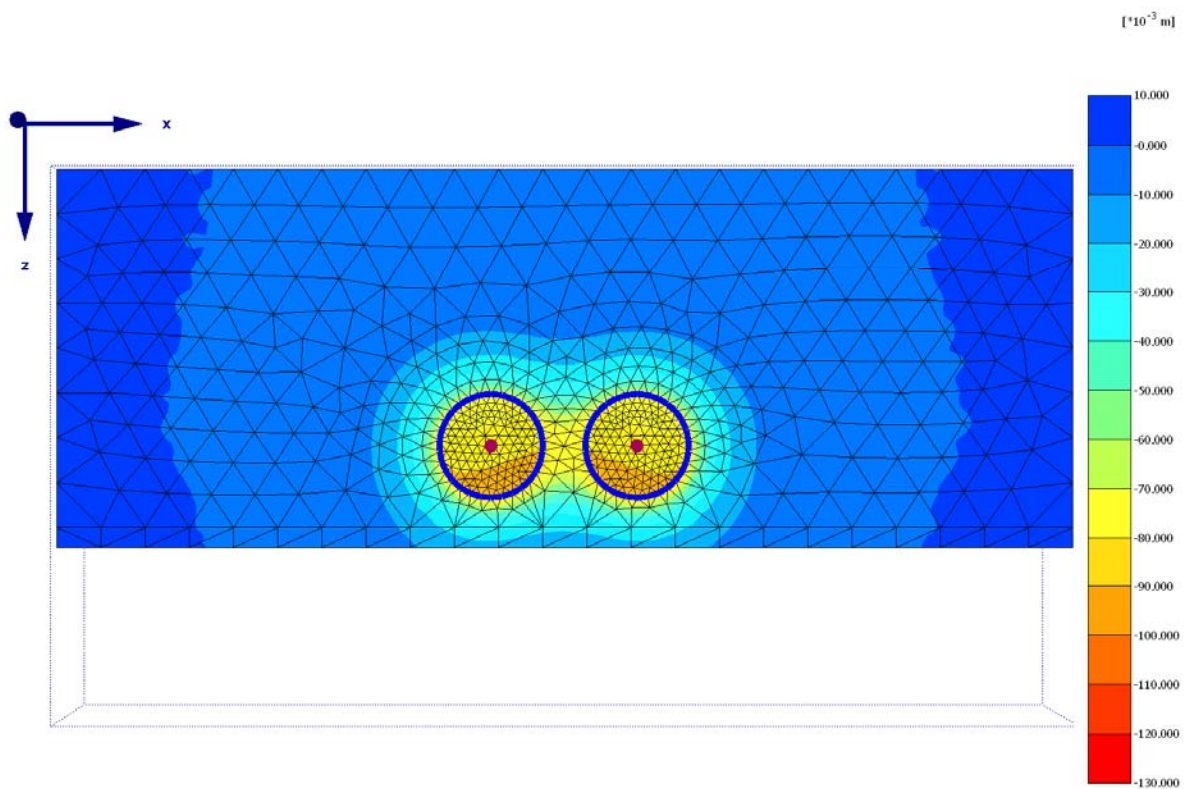


Figura 40. SLS2: Spostamenti verticali a livello del terreno (+2.5 m s.l.m.)

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

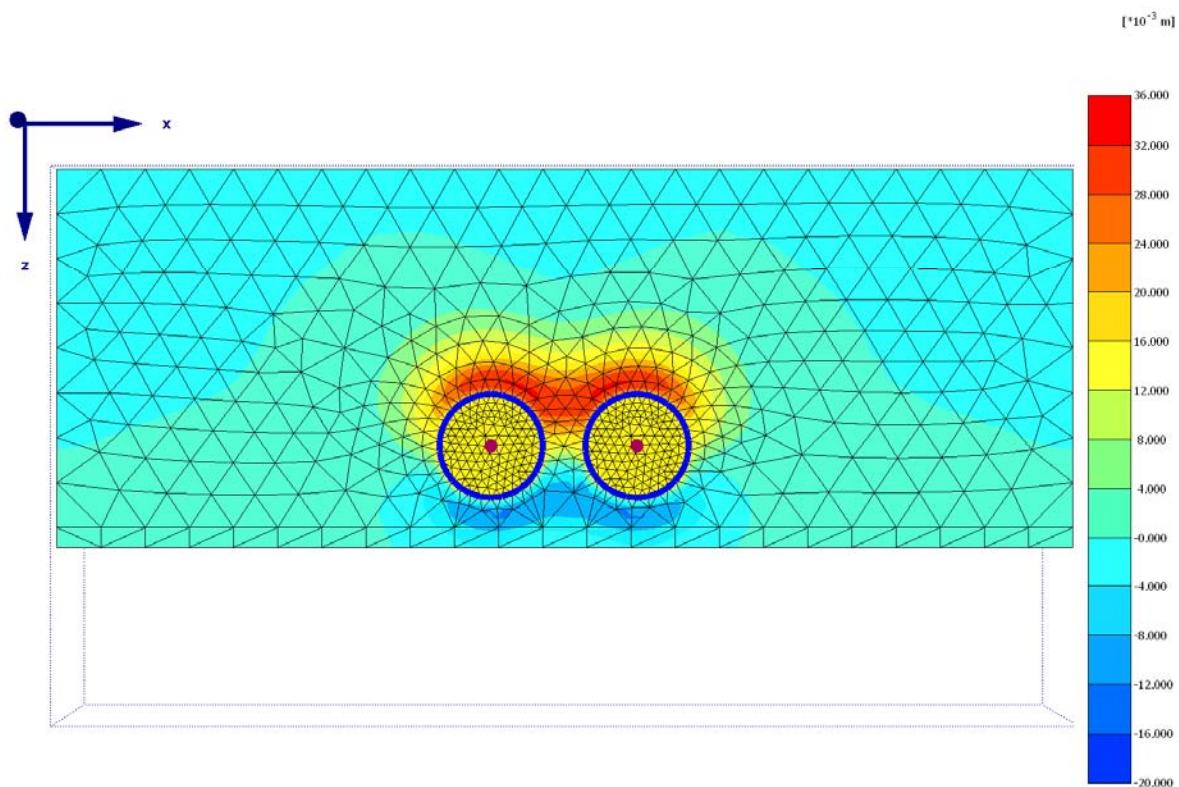


Figura 41. SLS2: Spostamenti orizzontali (positivi verso la costa) a livello del terreno (+2.5 m s.l.m.)

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

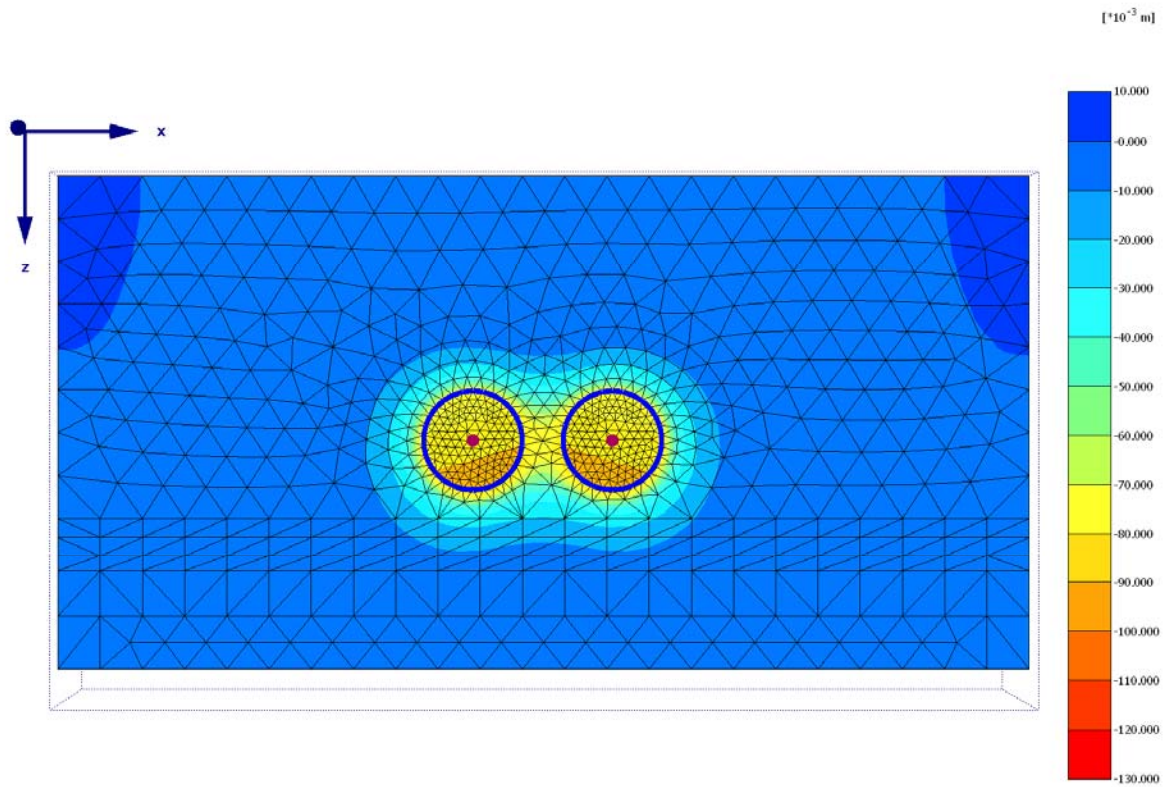


Figura 42. SLS2: Spostamenti verticali a livello del basamento (-15 m s.l.m.)

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

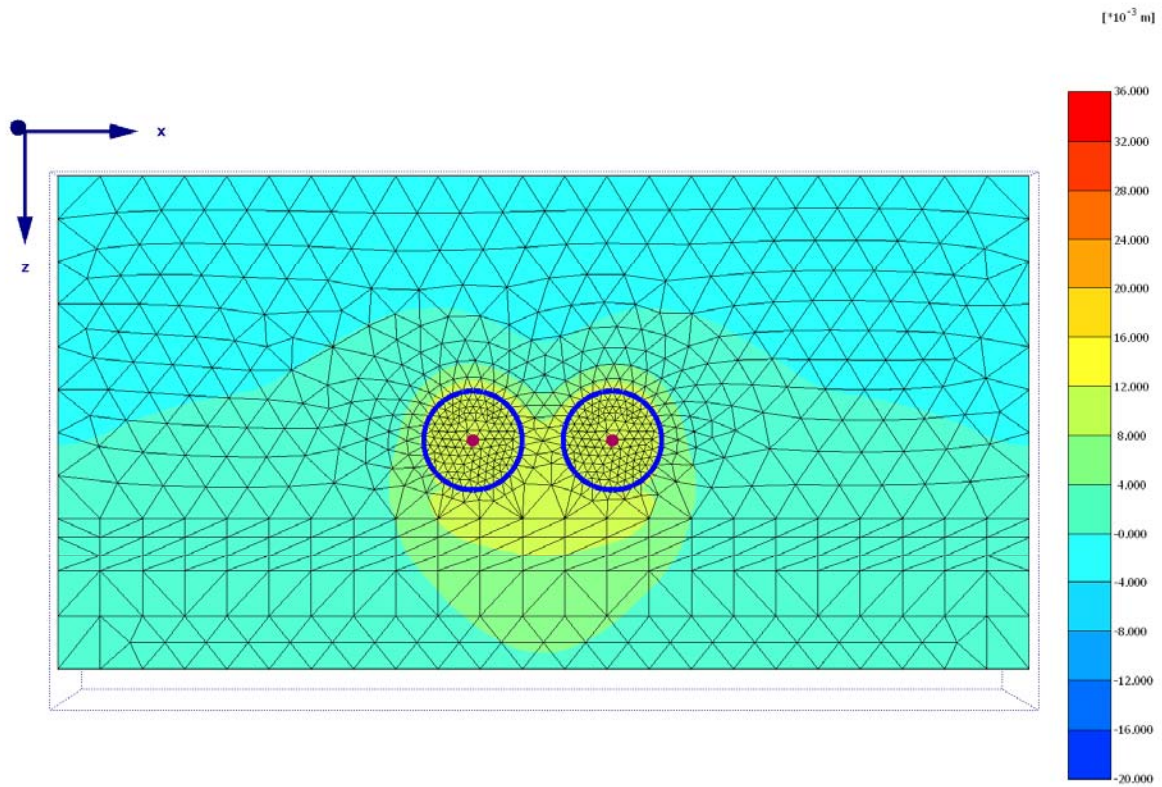


Figura 43. SLS2: Spostamenti orizzontali (positivi verso la costa) a livello del basamento(-15 m s.l.m.)

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza	<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

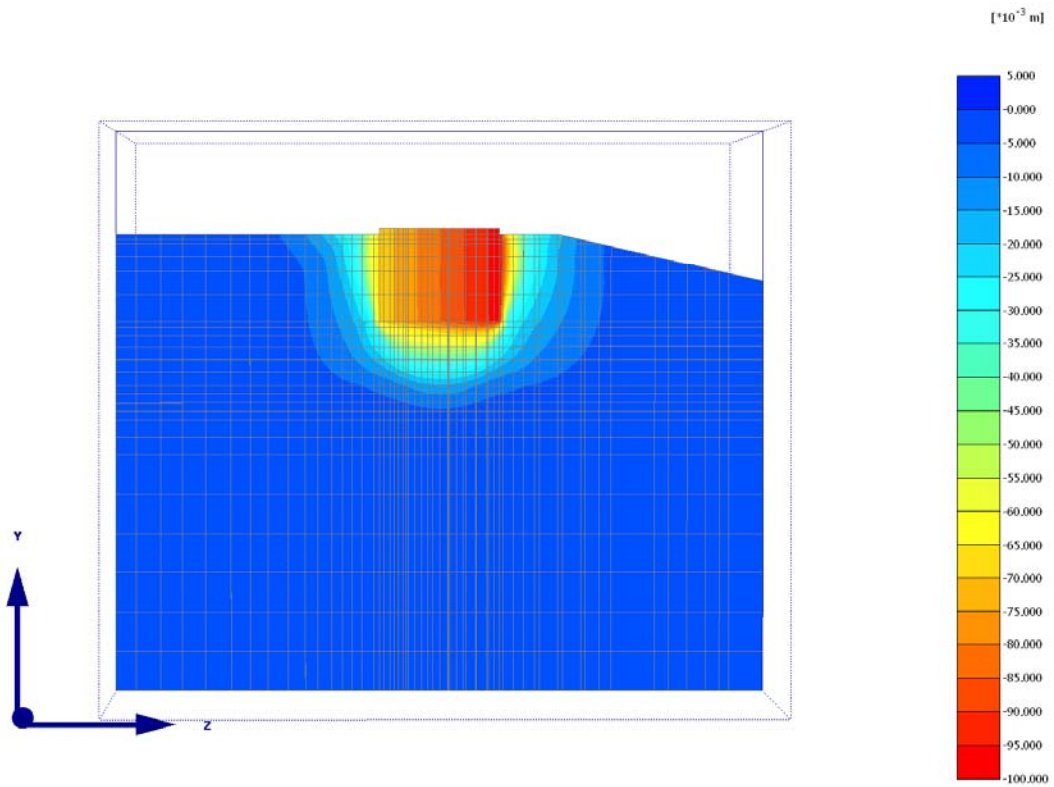


Figura 44. SLS2: Spostamenti verticali nella sezione lungo il piano del diametro della torre perpendicolari alla costa.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

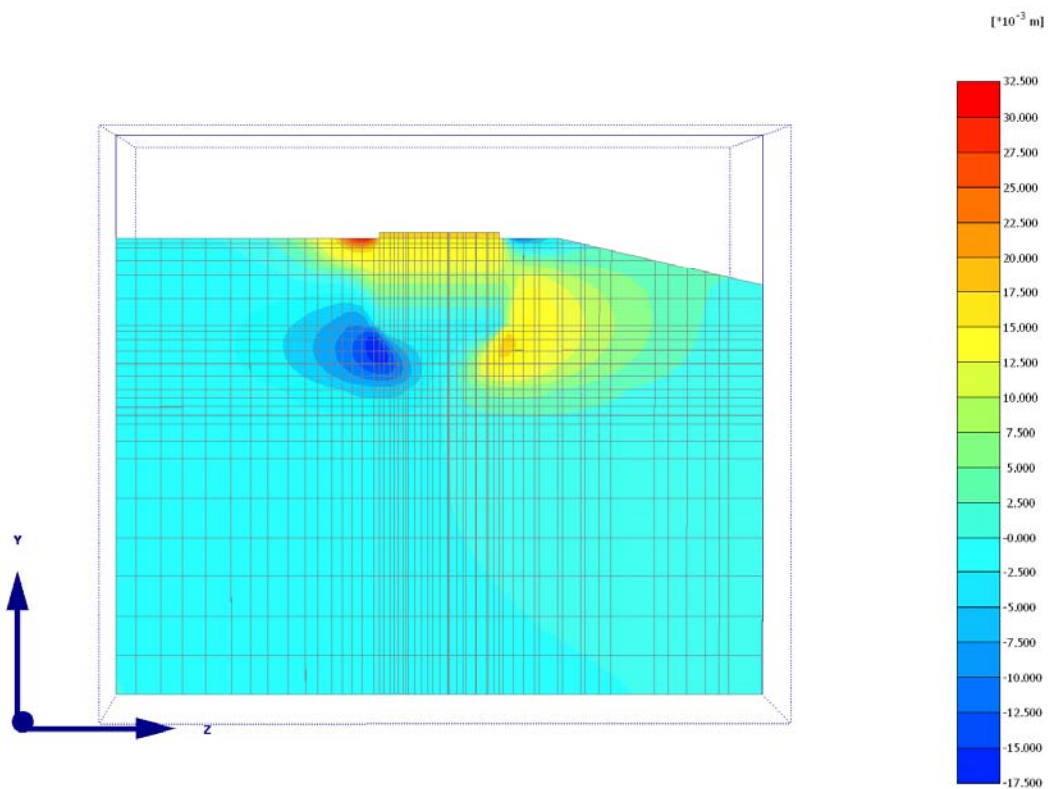


Figura 45. SILS: Spostamenti orizzontali nella sezione lungo il piano del diametro della torre perpendicolari alla costa (positivi verso la costa).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20-06-2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20-06-2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20-06-2011						

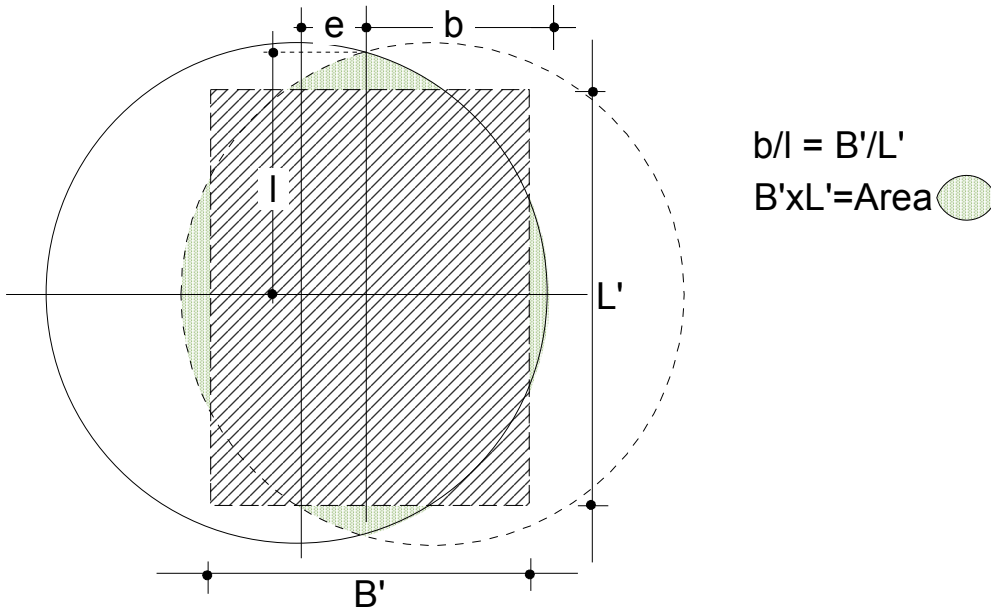
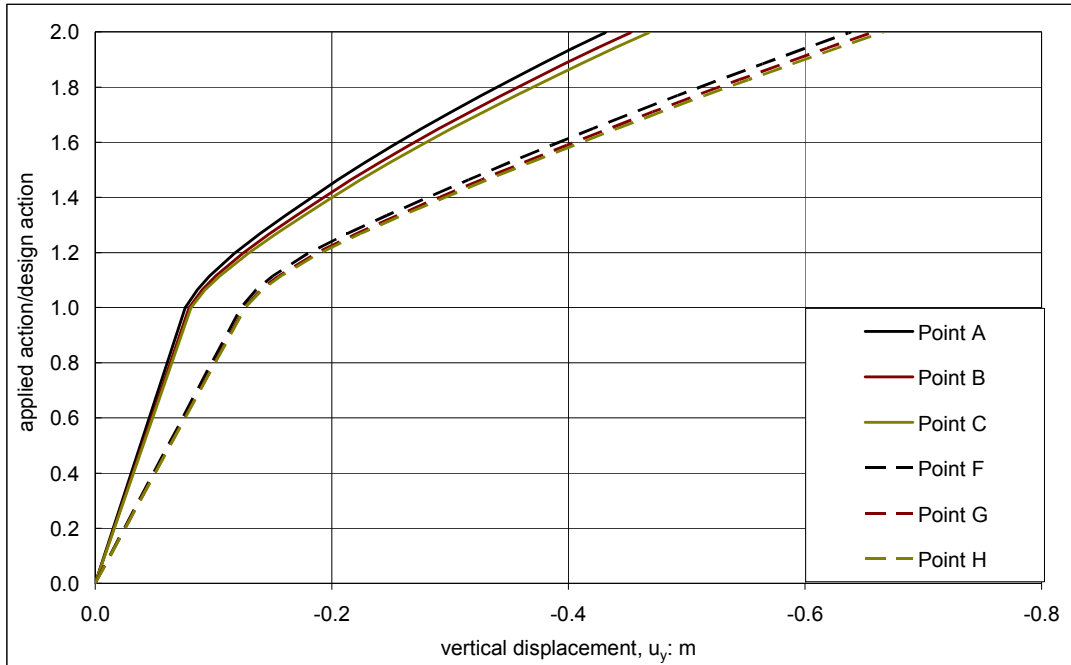
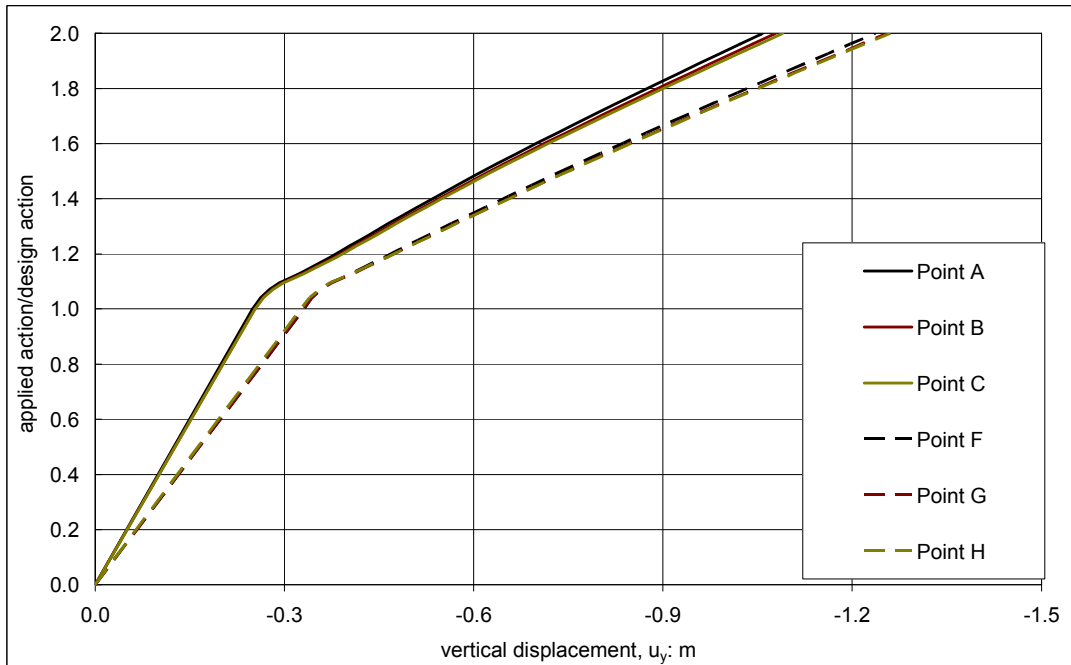


Figura 46 Fondazione equivalente per il calcolo della capacità portante

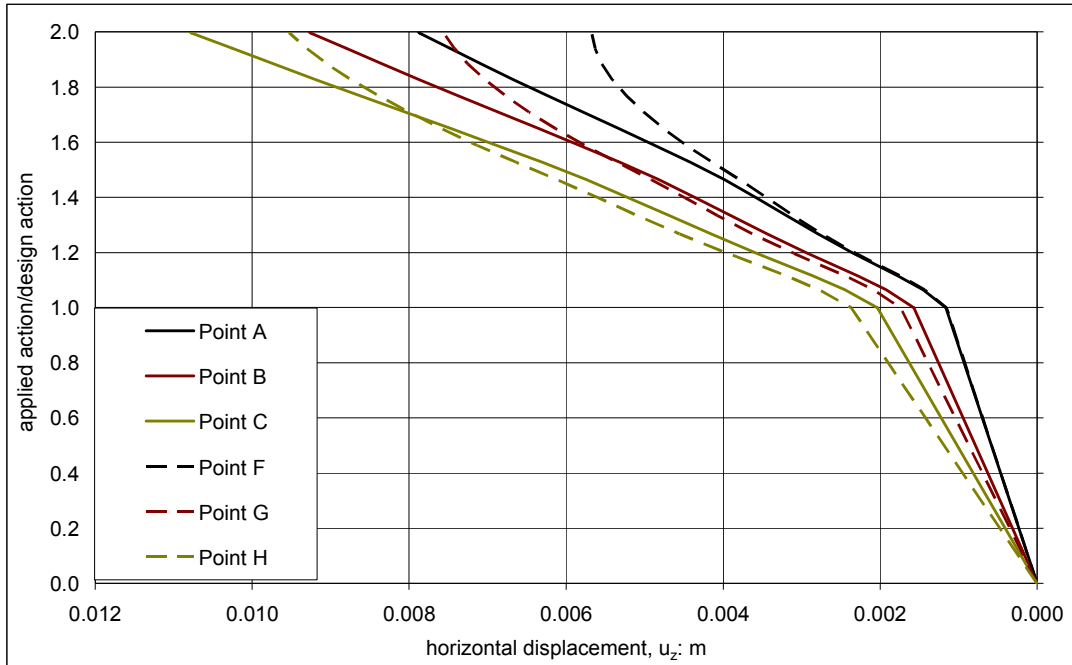


a)

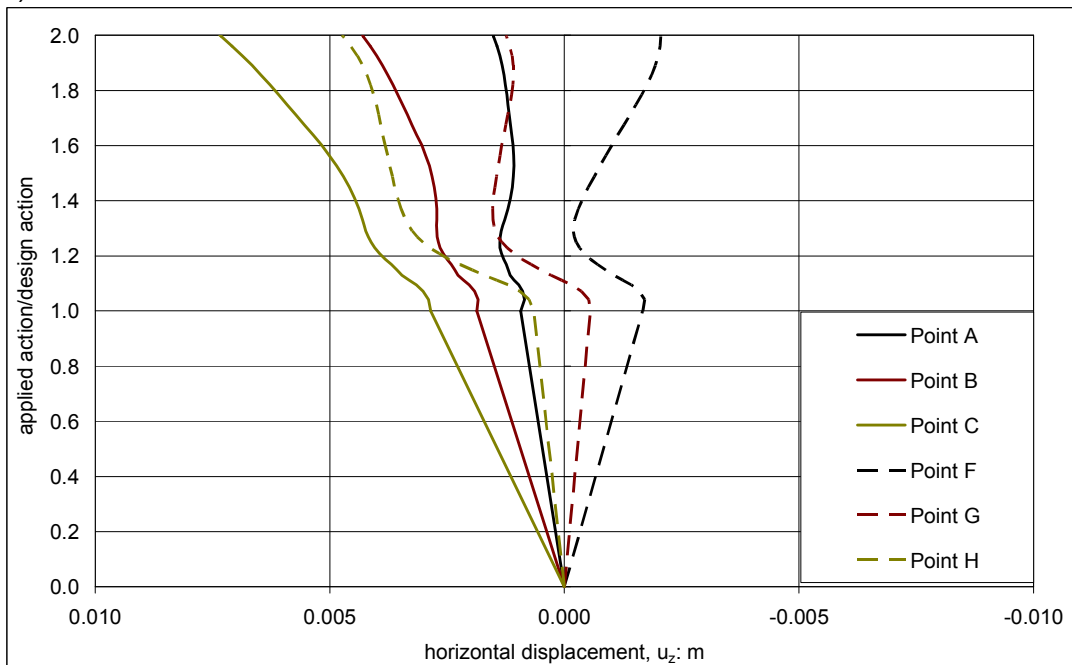


b)

Figura 47 Curve di assestamento del carico per le due fondazioni delle torri lato Sicilia a) peggiore combinazione statica; b) peggiore combinazione sismica



a)



b)

Figura 48 Spostamento orizzontale del carico (u_z verso la costa) per le due fondazioni delle torri lato Sicilia ULS a) peggiore combinazione statica; b) peggiore combinazione sismica

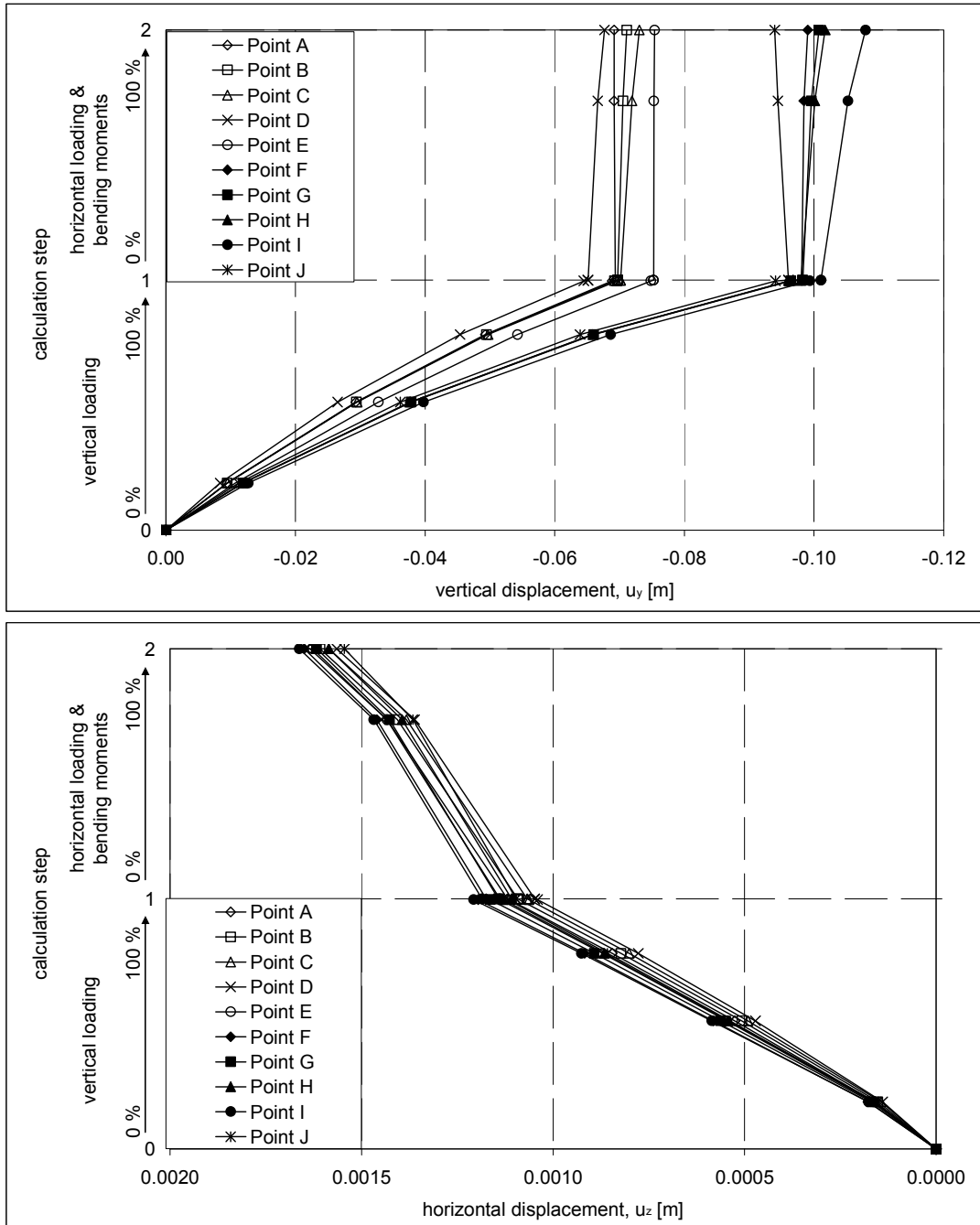


Figura 49 Assestamento verticale e spostamento orizzontale verso la costa per le due gambe delle torri lato Sicilia nella condizione statica SLS2 peggiore

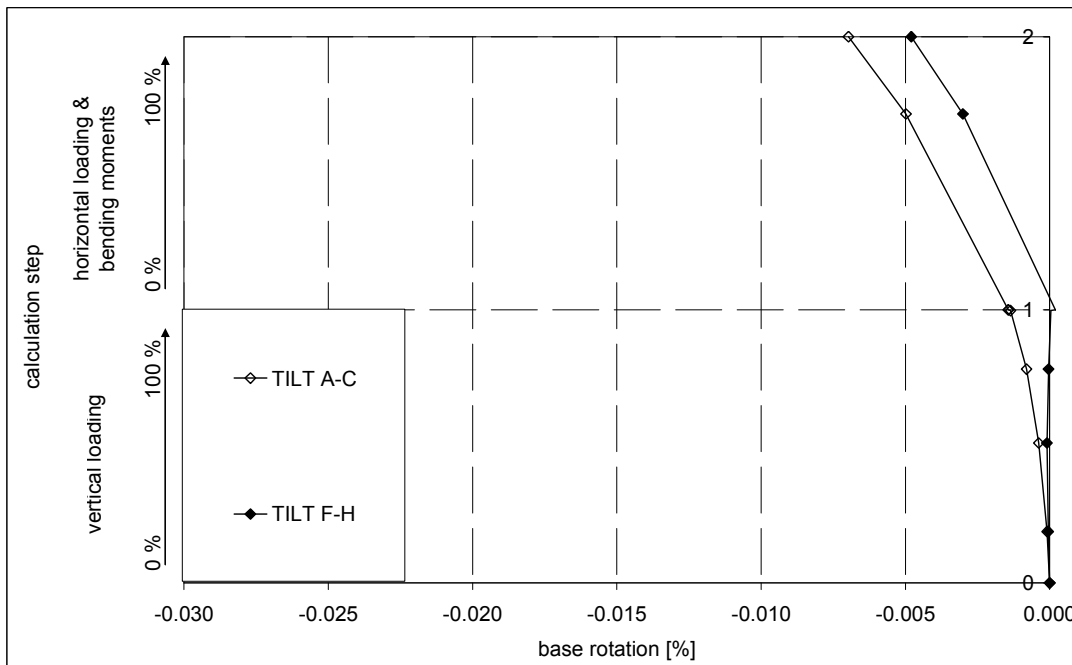
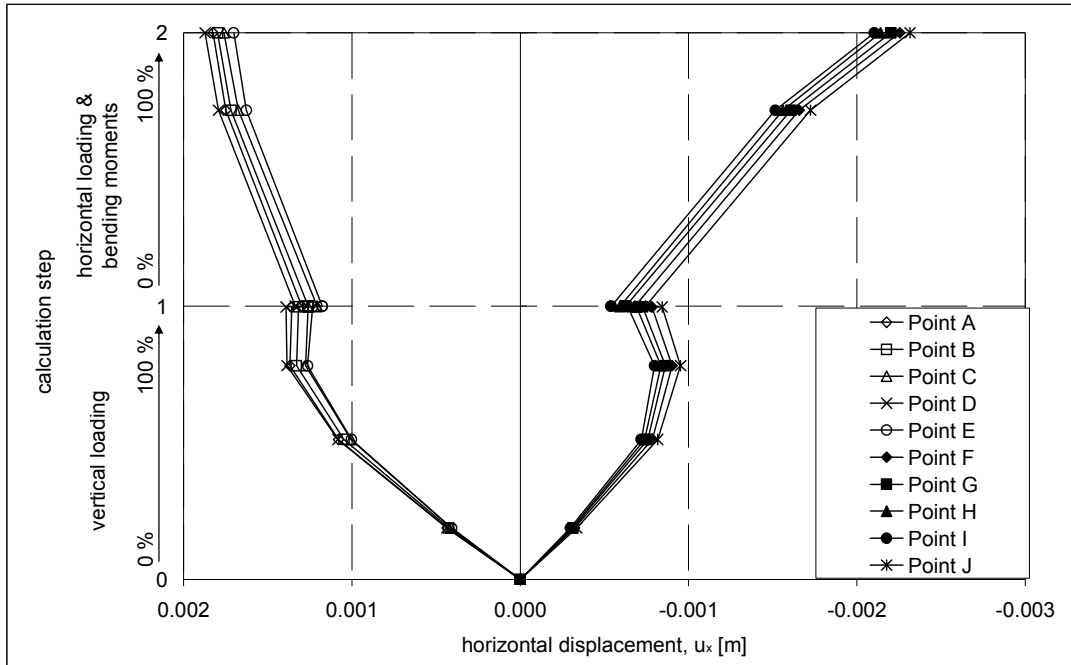


Figura 50 Spostamento orizzontale parallelo alla costa e rotazione verso il costa per le due gambe della torre lato Sicilia nella condizione statica SLS2 peggiore

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		Codice documento PF0004_F0_ITA	Rev F0 Data 20-06-2011

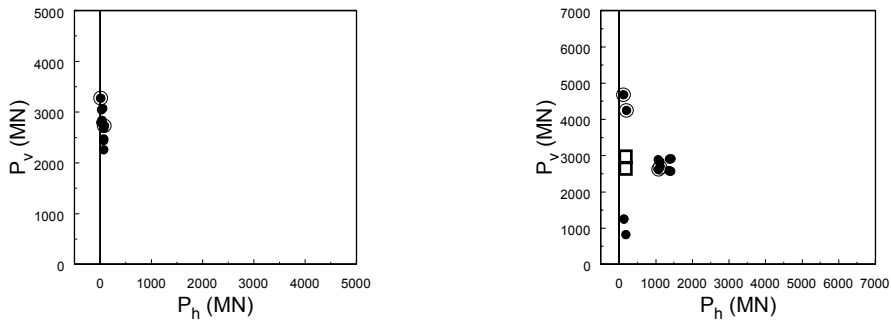


Figure 51 Nuove condizioni ULS statico (a sinistra) e sismico (a destra) dall'IBDAS (Pv=carico verticale, Ph=carico orizzontale a quota -15 s.l.m.)

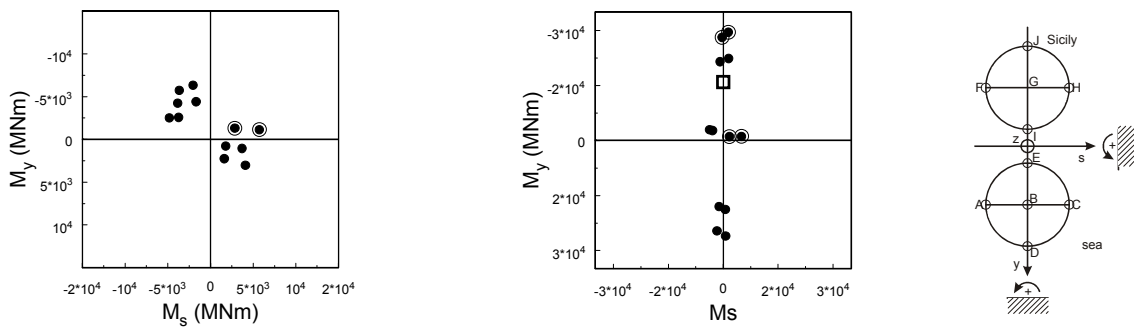


Figure 52 Nuove condizioni di carico ULS statico (sn.) e sismico (ds.) del IBDAS (My=moment nel piano ortogonale alla costa, Ms=momenti nel piano verticale parallelo alla costa a quota -15 s.l.m.)

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20-06-2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20-06-2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20-06-2011						

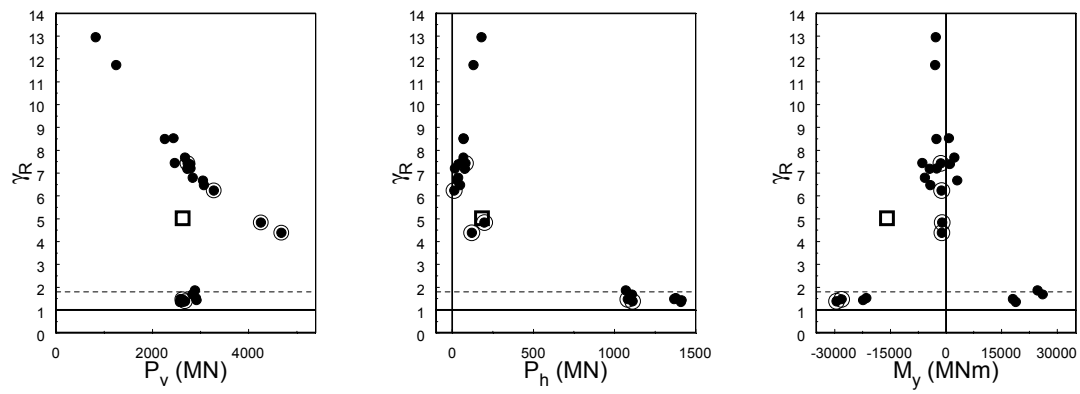
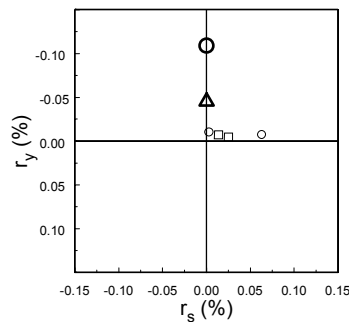
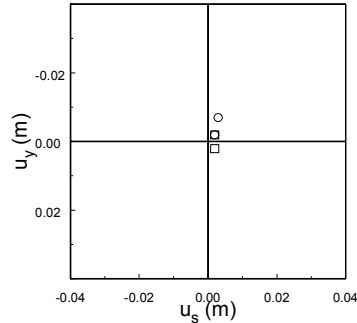
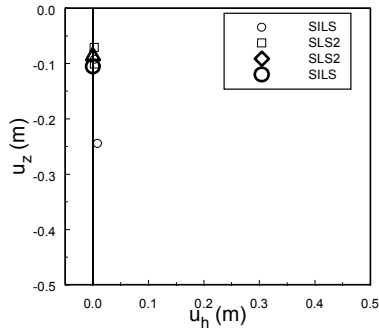
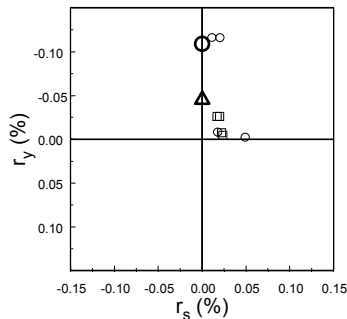
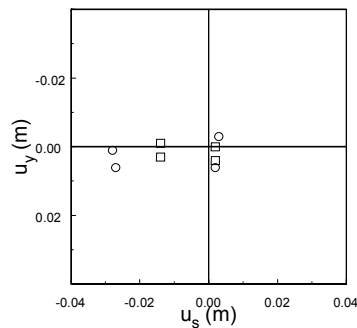
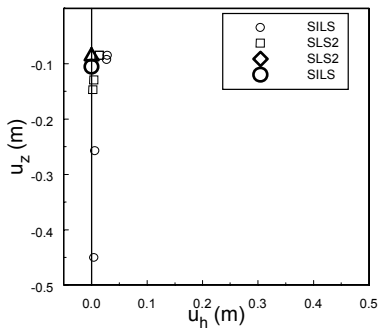


Figura 53 Valori di γ_R ottenuti da calcoli manuali per le condizioni di carico ULS del modello IBDAS aggiornato



a) *Static combinations*



b) *Seismic combinations*

Figura 54 Spostamento e rotazione mediante il modello FEM 3D per nuove condizioni di carico SILS e SLS2 con il γR peggiore (u_z =verticale, u_h =orizzontale, r_y =rotazione in un piano verticale ortogonale alla costa, r_s rotazione in un piano verticale parallelo alla costa): a) statico ; b) sismico

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione geotecnica – Fondazione Torre Sicilia: analisi numeriche tridimensionali e verifiche geotecniche di sicurezza		<i>Codice documento</i> PF0004_F0_ITA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

7 Appendice A – Confronto fra i carichi del modello IBDAS globale 3.3.b e 3.3.f

I calcoli precedenti, riportati al capitolo 6 del documento, erano basati su calcoli forniti dal modello globale IBDAS 3.3.b. Nuovi carichi sono stati forniti agli autori dal modello globale IBDAS 3.3.f. E' stato eseguito un raffronto, basato sulle verifiche dell'ULS mediante calcoli manuali sui fattori di sicurezza ed anche confrontando direttamente i carichi sulle due gambe delle fondazioni delle torri siciliane. Le conclusioni generali sono sintetizzate nei punti seguenti:

- a) In termini generali, i fattori di sicurezza parziali aumentano con gli ultimi carichi (IBDAS 3.3f): La combinazione di carichi ULS peggiore è caratterizzata adesso da un valore $\gamma_R = 1.82$, che è significativamente più elevato dei valori riportati al capitolo 6 ed inoltre soddisfa pienamente la nuova normativa italiana (NTC 2008); questo è dovuto principalmente ad una riduzione (15-20%) delle forze di taglio con le combinazioni sismiche alla base delle gambe;
- b) Tutte le altre modifiche dei carichi sono generalmente entro $\pm 5\%$ dei precedenti, consentendoci di affermare che le relazioni di spostamento del carico fornite al capitolo 6 sono ancora valide.