

# 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 Direttore Generale e RUP Validazione (Ing. G. Fiammenghi)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA 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>CONCEZIONE / DIMENSIONAMENTO GENERALE E DISEGNI D'ASSIEME</p> <p>ANALISI GLOBALI</p> <p>Generale</p> <p>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</p>	<p><b>PB0032_F0</b></p>
---	---	-------------------------

CODICE	C G 1 0 0 0	P	C L	D	P	S B	A 2	0 0	0 0	0 0	0 0	0 1	F0
--------	-------------	---	-----	---	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	20/06/2011	EMISSIONE FINALE	RC	GV	LC/ABI

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## INDICE

1	Relazione di sintesi .....	3
2	Scopo del lavoro e metodologia .....	4
3	Profilo del suolo e caratterizzazione geotecnica .....	6
3.1	Costa siciliana .....	6
3.1.1	Blocco Ancoraggio Sicilia .....	7
3.1.2	Torre Sicilia e Struttura terminale .....	8
3.2	Costa calabrese .....	11
3.2.1	Torre Calabria e struttura terminale .....	12
3.2.2	Blocco di ancoraggio Calabria .....	16
4	Analisi dinamiche numeriche a due dimensioni .....	19
4.1	Modello del suolo .....	19
4.1.1	Modello geometrico del suolo .....	19
4.1.2	Modello costitutivo del suolo .....	20
4.1.3	Parametri del suolo .....	23
4.2	Elementi strutturali .....	25
4.2.1	Dimensioni equivalenti .....	25
4.2.2	Torri .....	27
4.2.3	Blocchi di ancoraggio .....	30
4.2.4	Strutture terminali .....	31
4.3	Procedura di analisi .....	31
4.4	Input sismico .....	32
4.5	Risultati delle analisi .....	35
5	RIFERIMENTI .....	42
6	FIGURE .....	44

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>

## 1 Relazione di sintesi

La presente relazione illustra la metodologia e i risultati delle analisi di interazione sismiche suolo-struttura eseguite nella fase di verifica del processo di progetto. Tali analisi hanno duplice scopo: da un lato, servono a valutare la prestazione sismica della fondazione del ponte (più precisamente, delle fondazioni della torre e delle strutture terminali, e dei blocchi di ancoraggio); d'altro canto, le analisi forniscono storici completi degli spostamenti e delle rotazioni sui punti di contatto suolo/struttura, che possono essere impiegati in analisi strutturali temporali della sovrastruttura del ponte.

Le analisi dell'interazione suolo-struttura sono state effettuate nel dominio del tempo utilizzando un modello isteretico del suolo implementato nel codice a differenze finite FLAC. L'input sismico è formato da due particolari registrazioni sismiche, selezionate dal prof. Braga come sufficientemente rappresentative del massimo terremoto credibile nello stretto di Messina. Ogni registrazione sismica include tre storici temporali di componenti di accelerazione ortogonale sinergiche.

Le analisi sono state effettuate in due condizioni di deformazione piane bidimensionali, e le risposte sismiche sulle coste siciliane e calabresi sono state studiate separatamente. Ciò implica l'uso di otto diverse griglie di calcolo, cioè di due griglie longitudinali (Sicilia e Calabria), e di sei griglie trasversali, una per ogni punto di contatto suolo-struttura (blocchi, strutture terminali e fondazioni).

Le registrazioni di input sismico sono stati deconvolute alla base delle griglie di calcolo e sono state applicate come storici di accelerazioni orizzontali e verticali. E' stato necessario considerare quattro diverse combinazioni per ogni registrazione sismica, ognuno considerando un segno diverso dell'accelerazione orizzontale e un diverso orientamento del ponte rispetto alle due direzioni di riferimento orizzontali della registrazione.

Tutte le analisi sismiche sono state precedute da uno stato statico, che simulava lo stato di sollecitazione pre-terremoto. Siccome la rigidità e la forza del suolo dipendono dalle sollecitazioni effettive, tali fasi statiche sono state necessarie a descrivere le distribuzioni della pressione interstiziale e delle sollecitazioni litostatiche, e hanno dovuto comprendere uno stadio costruttivo nel quale gli elementi della fondazione sono stati caricati con le azioni statiche trasmesse dalla sovrastruttura del ponte. E' stato fatto un calcolo tale per cui lo spostamento prodotto dai carichi

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

statici ben concordava con quello valutato con analisi statiche tridimensionali ad elementi finiti.

Per le fondazioni sulla torre del ponte, è stato avvertito che la risposta dinamica della sovrastruttura avrebbe potuto influenzare in modo significativo il fenomeno di interazione suolo-struttura. Quindi, sono stati esplicitamente inclusi nelle griglie di calcolo longitudinali e trasversali i modelli strutturali semplificati delle torri del ponte, le proprietà dei quali sono state scelte in modo tale da riprodurre i modi di prima vibrazione delle strutture della torre. Ciò è stato controllato mediante l'esecuzione di ulteriori analisi dinamiche indipendenti degli elementi strutturali semplificati, utilizzando lo stesso codice computer e la stessa metodologia adottata nelle analisi complete di interazione suolo-struttura.

I risultati sono stati analizzati in termini di spostamenti permanenti e di rotazioni degli elementi della fondazione, e in termini di amplificazione delle onde sismiche. Come risultato generale, gli spostamenti permanenti delle strutture principali della fondazione non superano 20-30mm e la rotazione massima, che avviene per la torre Calabria, è inferiore a 0,015 gradi.

Storici completi degli spostamenti e delle rotazioni sono stati estrapolati dai risultati delle analisi; questi storici sono stati applicati alla base di un modello strutturale del ponte, in modo da eseguire analisi sismiche strutturali temporali.

## 2 Scopo del lavoro e metodologia

Questa relazione descrive la quantità di analisi interazione suolo-struttura eseguite per la simulazione del comportamento sismico del ponte di Messina sotto il carico di un grave terremoto.

In linea di principio, sarebbe consigliabile analizzare l'interazione suolo-struttura utilizzando una simulazione numerica completa, tridimensionale e interamente combinata dell'intero volume del ponte e della struttura che influenzano la propagazione delle onde sismiche. Tuttavia, la soluzione di ogni problema ingegneristico trae vantaggio da un qualche livello di dissociazione, che non solo rende il calcolo più breve e facile da controllare, ma consente anche all'analista di ottenere una qualche comprensione più profonda del comportamento fisico del sistema studiato, e quindi di analizzare in modo critico i risultati ottenuti.

Per le presenti analisi, è stata concepita una strategia dissociativa, la quale consiste essenzialmente della metodologia seguente:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	<i>Codice documento</i> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

-gli effetti delle onde sismiche che si propagano nel suolo vengono analizzati separatamente rispetto agli effetti sulla struttura del ponte;

- L'aumento di sollecitazioni indotto nel suolo dai carichi statici trasmessi dalla struttura del ponte alle fondazioni produce cambiamenti nella forza e nella rigidità del suolo, e quindi è sempre preso in considerazione:

- Ove si presume che la rigidità dei componenti strutturali del ponte influenzi la risposta dinamica del sistema suolo-fondazione (cioè per la struttura della torre), questa rigidità è esplicitamente inclusa nell'analisi, utilizzando schemi strutturali semplificati che riproducono le più importanti caratteristiche dinamiche della struttura attuale.

- Il comportamento delle fondazioni del ponte della riva calabrese e di quella siciliana è analizzato separatamente:

- Ognuna delle analisi di interazione suolo-struttura è eseguita in condizioni bidimensionali, di deformazioni piane; ciò implica la strategia del convertire l'attuale geometria tridimensionale in uno schema semplice ed equivalente di deformazione.

- L'input sismico viene applicato al contorno inferiore di ogni modello di calcolo sottoforma di due storici di accelerazione (nelle direzioni orizzontale e verticale), i quali sono derivati dall'input sismico originale mediante una appropriata tecnica di deconvoluzione.

-La liquefazione è stata analizzata separatamente, utilizzando analisi bidimensionali a campo libero per la riva calabrese, e analisi monodimensionali a campo libero per la riva siciliana; tali analisi numeriche descrivono il comportamento del suolo utilizzando un modello costitutivo basato sulla plasticità dell'indurimento, particolarmente adatto per l'analisi di liquefazione (vedi relazione CG1000-P-CL-D-P-ST-F3-TO-00-00-00-01\_A\_Torri\_Liq\_pot\_ANX);

- I risultati delle analisi sono espressi per ogni punto di contatto suolo-struttura in termini di storici di spostamenti e rotazioni; a loro volta, tali storici costituiscono l'input sismico di un complesso di analisi strutturali temporali separate. Gli storici degli spostamenti e delle rotazioni calcolate nelle presenti analisi di interazione suolo-struttura prendono implicitamente in considerazione la rigidità del suolo e le proprietà di ammortizzazione. Quindi, le analisi strutturali corrispondenti non necessitano di modellizzare il comportamento del suolo mediante molle ed ammortizzatori equivalenti: tali analisi strutturali debbono essere eseguite semplicemente applicando gli storici calcolati ai punti di contatto suolo-struttura.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 3 Profilo del suolo e caratterizzazione geotecnica

#### 3.1 Costa siciliana

Le ricerche geotecniche del sito eseguite fra il 1988 e il 1992, congiuntamente alle ricerche geologiche e geofisiche eseguite per lo studio del progetto preliminare, rendono possibile definire il profilo generale del suolo nell'area dello stretto di Messina.

La **Figura 1** Mostra il profilo del suolo sulla costa siciliana. A partire dal livello del suolo e procedendo verso il basso, si incontrano i seguenti materiali:

1. *Depositi Costieri* (Coastal Deposits). Sabbia e ghiaia con pochissimo o assente contenuto di fini; occasionalmente, nella parte inferiore della formazione compaiono strati fangosi e torbosi. Lo spessore di questa formazione è difficile da valutare, siccome appoggia sulla formazione molto simile delle *Ghiaie di Messina*.
2. *Ghiaie di Messina* (Messina Gravel)/*Sedimenti dei terrazzi* (Terrace Deposits). Ghiaia e sabbia, con strati fangosi molto rari. Lo spessore di questa formazione può raggiungere più di 170 m.
3. *Depositi Continentali* (Continental Deposits)/*Calcarenite di Vinco* (Vinco Calcarenite). Depositi sabbiosi-argillosi, che consistono di strati di fango e sabbia, con contenuto significativo di ghiaia/bio calcarenite e calcarenite fossilifera, con sottili strati fangosi.
4. *Conglomerato di Pezzo* (Pezzo Conglomerate). Roccia tenera, formata da elementi clastici di varie dimensioni in una matrice fangosa-sabbiosa ed arenaria. Lo spessore di tale formazione è superiore a 200 m.
5. *Cristallino* (Crystalline bedrock). Granito tettonizzato

Il presente livello del suolo nella posizione del blocco ancoraggio Sicilia è compreso fra +22 m s.l.m e +59 s.l.m; la riva del mare si trova ad una distanza di circa 1000 m dal blocco di ancoraggio.

Il livello del suolo nella posizione della struttura terminale Sicilia e nella posizione della torre Sicilia è di circa 4 m s.l.m; la riva del mare si trova ad una distanza di circa 270 m dal centro della struttura terminale, e a circa 70 m dal centro della fondazione della torre.

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

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

La sequenza degli strati del suolo incontrata sulla posizione della torre Sicilia e della struttura terminale, e quella incontrata nella posizione del blocco ancoraggio Sicilia sono parzialmente diverse, in quanto le due posizioni sono distanti più di 900 m.

In seguito, viene riportata una breve caratterizzazione geotecnica dei siti in due capitoli diversi. Una caratterizzazione dettagliata del profilo del suolo sulla riva siciliana è riportata nella relazione *Caratterizzazione geotecnica aggiornata basata sulle ricerche sul sito del 2010 e sulle ricerche di laboratorio (CG1003-P-RG-D-P-SB-G3-00-00-00-00\_01\_A\_Upd\_Geot\_Char\_ANX)*.

La Figura 2 Mostra una sezione geotecnica globale della riva siciliana. Tre viste allargate e più dettagliate della sezione longitudinale, che si riferiscono rispettivamente al Blocco Ancoraggio Sicilia, al sito della Torre e al sito della Struttura Terminale, sono riportate nelle figure dalla Figura 3 alla Figura 5.

### 3.1.1 Blocco Ancoraggio Sicilia

La Figura 6 Mostra una vista in pianta della posizione del Blocco Ancoraggio Sicilia, assieme alle ricerche sul sito disponibili. La sezione longitudinale indicata alla Figura 6 è tracciata alla Figura 3

Le unità di Ghiaie di Messina/Sedimenti dei terrazzi si estendono dal livello del suolo per uno spessore di circa 200 m; a circa -70 m s.l.m., però, si osserva un aumento di rigidità per circa 15 m.

Siccome non è stata effettuata nessuna valutazione di permeabilità sul sito sulla posizione del Blocco Ancoraggio Sicilia, si può far riferimento ai dati ottenuti dai test *sul sito* eseguiti sulla posizione della torre Sicilia. La permeabilità orizzontale dei depositi valutati mediante test di pompaggio è  $k_h = 5 \times 10^{-3}$  m/s. I valori della permeabilità verticale  $k_v$  ottenuti dai test di permeabilità Lefranc, supponendo  $k_h/k_v = 10$ , che vanno da  $2 \times 10^{-3}$  a  $5 \times 10^{-2}$  (m/s); per  $k_h/k_v = 1$ ,  $k_v$  non è sostanzialmente differente da quella ottenuta dal test di pompaggio nel pozzo, compresa in un range da  $2,6 \times 10^{-4}$  a  $5,8 \times 10^{-3}$  (m/s).

Nella zona del Blocco Ancoraggio Sicilia, il fenomeno di erosione delle Ghiaie di Messina è meno importante rispetto al sito della Torre Sicilia; la deviazione di  $K_0$  dal suo valore normalmente consolidato è quindi dovuta principalmente a effetti di invecchiamento. Il massimo aumento stimato del  $K_0$  dovuto agli effetti dell'invecchiamento è nell'ordine del 42%. Ne consegue che:

$$K_0 = 1,42 \times K_0(\text{NC}) = 1,42 \times (1 - \sin \phi'_p) = 0,47 \quad (1)$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

nel quale  $\varphi'_p = 42^\circ$  come descritto di seguito.

La densità relativa delle Ghiaie di Messina è stata valutata a partire dai risultati del SPT e LPT utilizzando la procedura proposta da Cubrinovski and Ishihara (1999): Sono stati ottenuti valori da  $D_R = 40\%$  a  $60\%$  come mostrato alla Figura 7. E' stato quindi valutato l'angolo di attrito interno di cresta  $\varphi'_p = 41^\circ - 44^\circ$  (Figura 8) mediante la relazione proposta da Schmertmann (1975).

Il profilo di rigidità delle ghiaie di Messina è stato ottenuto da tre test a foro trasversale eseguiti in prossimità del blocco di ancoraggio Sicilia, fino ad una profondità di 100m sotto il livello del terreno. I risultati dei test a foro trasversale in termini di velocità dell'onda di taglio,  $V_s$ , nei confronti della profondità sono indicati alla Figura 9 (a). Gli stessi risultati sono indicati alla Figura 9 (b) come profili del modulo di rigidità a bassa deformazione,  $G_0$ .

$G_0$  aumenta da circa 100 MPa al livello del suolo fino a 550 MPa ad una profondità di 80m al disotto del livello del suolo; al disotto di questa profondità, i dati sono più dispersi, con un valore medio di 800 MPa.

La Tabella 1: Blocco di ancoraggio sicilia- sommario dei principali parametri meccanici Riassume i principali parametri meccanici ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica di cui sopra.

Tabella 1: Blocco di ancoraggio sicilia- sommario dei principali parametri meccanici

Formazione geologica	Profondità (m sotto il livello del suolo)	$D_r$ (%)	$K_0$	$\varphi'_p$ (°)	$K_h$ (m/s)	$G_0$ (MPa)
Ghiaie di Messina	0÷20	40÷60	0.43	44	$5 \times 10^{-3}$	50÷150
Ghiaie di Messina	20÷80	40÷60	0.47	42	$5 \times 10^{-3}$	150÷550
Ghiaie di Messina	77÷93	40÷60*	0.47*	42*	$5 \times 10^{-3}$	800

\* Tali valori non hanno potuto essere calcolati come test di rottura non in situ (SPT, LPT, CPT), raggiunta la profondità di questa formazione; sono stati stimati basandosi sulle informazioni ottenute dagli altri siti sulla sponda della Sicilia.

### 3.1.2 Torre Sicilia e Struttura terminale

La Figura 10 Mostra una vista in pianta della posizione del Blocco Ancoraggio Sicilia e della Struttura terminale, assieme alle ricerche sul sito disponibili. Le sezioni longitudinali mostrate alla Figura 10 sono indicate alla Figura 4 e alla Figura 5.

Le unità dei depositi costieri si estendono dal livello del suolo fino ad uno spessore di circa 80 m al disotto delle fondazioni della torre e di circa 50 m al disotto della struttura terminale.

Al disotto di questo strato, si incontrano le ghiaie di Messina; a circa -70 m sopra il livello del mare

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

si osserva un aumento della rigidità per circa 15 m.

La permeabilità dei depositi è stata valutata mediante test di pompaggio eseguiti in un pozzo sito nella zona della torre Sicilia, che si estende 40 m al disotto del livello del suolo, e mediante i test di permeabilità di Lefranc eseguiti in un foro di sondaggio ad una profondità da 10 m sotto il livello del suolo a 38 m sotto il livello del suolo.

A causa della breve distanza della linea di origine (il mare) dal pozzo, dell'alta permeabilità e della ridotta compressibilità dei depositi, i test di pompaggio sono stati interpretati presumendo condizioni di carico statico (Mansur e Kauffman, 1962). Il valore risultante dalla permeabilità orizzontale è di  $k_h = 5 \times 10^{-3}$  m/s.

I test di permeabilità di Lefranc hanno un carattere maggiormente locale rispetto ai test di pompaggio nel pozzo, e sono influenzati dal disturbo causato durante la formazione del foro di sondaggio; inoltre, la loro interpretazione dipende dal rapporto presunto  $k_h/k_v$ . I loro risultati debbono quindi essere considerati affidabili entro un'ordine di grandezza. I valori di  $k_v$ , presumendo che  $k_h/k_v = 10$  siano compresi in un range da  $2 \times 10^{-3}$  a  $5 \times 10^{-2}$  (m/s); per  $k_h/k_v = 1$ ,  $k_v$  non è sostanzialmente diverso da quello ottenuto dal test di pompaggio nel pozzo, che è compreso in un range da  $2,6 \times 10^{-4}$  a  $5,8 \times 10^{-3}$  (m/s).

La densità relativa è stata valutata a partire dai risultati del SPT e LPT utilizzando la procedura proposta da Cubrinovski and Ishihara (1999): Valori che vanno da 40% a 70% nella parte superiore del deposito (verso il basso fino a 25÷30 m sotto il livello del suolo), e da circa 30%÷50% nella parte bassa, sono stati ottenuti come indicato alla Figura 11 e alla Figura 12.

Per i depositi costieri, i quali, da un punto di vista geologico, possono essere considerati normalmente consolidati, si possono stimare valori di  $K_0$  a partire dai valori della densità relativa  $D_R$  (risultati SPT e LPT) utilizzando la relazione proposta da Bellotti e *al.* (1985):

$$z < 25 \div 30 \quad 40\% < D_R < 70\% \quad 0.49 > K_0 > 0.43$$

$$z > 25 \div 30 \quad 30\% < D_R < 50\% \quad 0.54 > K_0 > 0.46$$

Le ghiaie di Messina sono geologicamente sovraconsolidate mediante l'erosione di uno spessore stimato di circa 100 m, e, nella zona della fondazione della Torre Sicilia, sono oggi ricoperte da circa 80 m di depositi costieri. Ad una profondità di 100 m, il sovra consolidamento geologico può contare su un aumento dei valori di  $K_0$  di circa 9%; l'effetto del sovra consolidamento geologico diminuisce con la profondità.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

L'ordine di grandezza degli effetti dell'invecchiamento può essere stimato utilizzando la relazione di Mesri, 1993: L'aumento massimo stimato del  $K_0$  dovuto agli effetti dell'invecchiamento è nell'ordine del 30%.

Ne consegue che:

$$K_0 = 1.09 \times 1,3 \times K_0(\text{NC}) = 1,42 \times (1 - \sin \varphi'_p) = 0,47 \quad (2)$$

nel quale  $\varphi'_p = 42^\circ$  come descritto di seguito.

E' stato quindi valutato l'angolo di attrito interno  $\varphi'_p = 42 \div 44^\circ$  (Figura 13 e Figura 14) mediante la relazione proposta da Schmertmann (1975).

$$\begin{aligned} \text{per } z < 25 \div 30 \text{ m} & \quad D_R = 0.70 & \quad \varphi'_p = 44^\circ \\ \text{per } z > 25 \div 30 \text{ m} & \quad D_R = 0,50 & \quad \varphi'_p = 42^\circ \end{aligned}$$

Il profilo di rigidità dei depositi è stato ottenuto da tre test a foro trasversale eseguiti in prossimità della fondazione torre Sicilia e da un test eseguito in prossimità della struttura terminale Sicilia, verso il basso, fino ad una profondità di 100m sotto il livello del terreno. I risultati dei test a foro trasversale in termini di velocità dell'onda di taglio,  $V_s$ , nei confronti della quota sono indicati alla Figura 15 (a) e alla Figura 16 (a). Gli stessi risultati sono indicati alla Figura 15 (b) e nella Figura 16 (b) come profili del modulo di rigidità a bassa deformazione,  $G_0$ .

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (3)$$

Nei depositi costieri, la variazione di  $G_0$  non cambia molto con la profondità, e oscilla attorno ad un valore di 100 MPa, non ostante siano osservati aumenti locali e bruschi di  $G_0$  fra -20 e -50 m sul livello del mare. Al disotto dei -70 m sul livello del mare si osserva un aumento della rigidità, che identifica i depositi delle Ghiaie di Messina.

La Table 2. Sicilia Tower and Terminal Structure - summary of main mechanical parameters Riassume i principali parametri meccanici ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica di cui sopra.

Table 2. Sicilia Tower and Terminal Structure - summary of main mechanical parameters

Formazione geologica	Quota (s.l.m)	Dr (%)	$K_0$	$\varphi'_p$ (°)	$K_n$ (m/s)	$G_0$ (MPa)
Depositi costieri	+5÷-30	70	0.43÷0.49	44	$5 \times 10^{-3}$	100
Depositi costieri	<-30	50	0.46÷0.54	42	$5 \times 10^{-3}$	100
Ghiaie di Messina	-70÷-85	50*	0.46÷0.54*	42*	$5 \times 10^{-3}$	450÷600

\* Tali valori non hanno potuto essere calcolati come test di rottura non in situ (SPT, LPT, CPT), raggiunta la profondità di questa formazione, e sono stati stimati basandosi sulle informazioni ottenute dagli altri siti sulla sponda della Calabria.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 3.2 Costa calabrese

Le ricerche geotecniche del sito eseguite fra il 1988 e il 1992, congiuntamente alle più recenti ricerche geologiche e geofisiche eseguite nella campagna del 2010 rendono possibile definire il profilo generale del suolo nell'area dello stretto di Messina.

La Figura 17 Mostra il profilo globale del suolo sulla costa calabrese. A partire dal livello del suolo e procedendo verso il basso, si incontrano i seguenti materiali:

1. *Depositi Costieri* (Coastal Deposits). Sabbia e ghiaia con pochissimo o assente contenuto di fini; di uno spessore variabile da un minimo di 5 m verso l'entroterra ed un massimo di 45 m in direzione della riva del mare. In questa posizione, tali depositi sono generalmente più grossolani nei primi 15-20 m sotto il livello del suolo e diventano più sabbiosi con la profondità; verso l'entroterra, invece, questi depositi sono generalmente più sabbiosi. Occasionalmente, nella parte inferiore della formazione compaiono strati fangosi e torbosi
2. *Ghiaie di Messina* (Messina Gravel). Ghiaia e sabbia, con strati fangosi molto occasionali; è difficile distinguerli dai depositi costieri e di piccolo spessore, talvolta totalmente assenti, cosicché i depositi costieri sono posati direttamente sui depositi continentali/ sulla calcarenite di Vinco sottostanti.
3. *Depositi Continentali* (Continental Deposits)/*Calcarenite di Vinco* (Vinco Calcarenite). Depositi sabbiosi-argillosi, che consistono di strati di fango e sabbia, con contenuto significativo di ghiaia/bio calcarenite e calcarenite fossilifera, con sottili strati fangosi. Lo spessore di questo strato varia lungo la superficie di appoggio della fondazione della torre fra un minimo di 2 m verso l'entroterra ed un massimo di circa 7m verso la riva del mare.
4. *Conglomerato di Pezzo* (Pezzo Conglomerate). Roccia tenera, formata da elementi clastici di varie dimensioni in una matrice fangosa-sabbiosa ed arenaria. Lo spessore di tale formazione è superiore a 200 m.
5. *Cristallino* (Crystalline bedrock). Granito tettonizzato

Il presente strato del terreno nella posizione della torre Calabria è di circa 25 m s.l.m.; la riva del mare è situata ad una distanza di 50-60 m dal centro della fondazione della torre. L'inclinazione del fondo del mare in quest'area è di circa 26°. La struttura terminale Calabria si trova a circa 200 m dalla Torre Calabria e il livello del suolo è a 40 m s.l.m.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Il profilo geotecnico nella zona della torre Calabria è caratterizzato da variazioni significative del livello degli strati nella direzione ortogonale alla linea della costa e ad una estensione minore nella direzione parallela alla costa.

Il blocco ancoraggio Calabria si trova ad una distanza di circa 850 m dalla torre Calabria, vale a dire ad una distanza di circa 900 m dalla riva del mare. Il presente livello del terreno nella zona del blocco ancoraggio Calabria è fra +114 m e +127 m s.l.m. il profilo del suolo nell'area del blocco ancoraggio Calabria è caratterizzato da variazioni significative degli strati del suolo nella direzione parallela alla costa e da una minore estensione nella direzione ortogonale alla costa.

Il livello della falda acquifera varia fra +95 m s.l. m sull'angolo nord-ovest del blocco di ancoraggio e i +107 m s.l.m nell'angolo opposto, in posizione sud-est.

Il livello della falda acquifera risulta da una percolazione statica fra un livello piezometrico di circa 100 m s.l.m. sul blocco ancoraggio e nella zona circostante, fino ad un livello piezometrico di 0 m s.l., sul mare, nella posizione della fondazione della torre.

Gli spessori e le proprietà meccaniche degli strati del suolo incontrati sulla posizione della torre Calabria e della struttura terminale, e quelle incontrate nella posizione del blocco ancoraggio Calabria sono parzialmente diverse, in quanto le due posizioni sono distanti più di 800 m. In seguito, viene riportata una breve caratterizzazione geotecnica dei siti in due capitoli diversi. Una caratterizzazione dettagliata del profilo del suolo sulla riva calabrese è riportata nella relazione *Caratterizzazione geotecnica aggiornata basata sulle ricerche sul sito del 2010 e sulle ricerche di laboratorio (CG1003-P-RG-D-P-SB-G3-00-00-00-00\_01\_A\_Upd\_Geot\_Char\_ANX)*.

La Figura 18 Mostra una sezione geotecnica globale della riva calabrese. Due viste allargate e più dettagliate della sezione longitudinale, che si riferiscono rispettivamente al sito della Torre Calabria e della struttura terminale e il sito del Blocco Ancoraggio, sono riportate dalla Figura 19 alla Figura 20.

### 3.2.1 Torre Calabria e struttura terminale

Il profilo geotecnico nella zona della Torre Calabria e della struttura terminale Calabria è caratterizzato da variazioni significative del livello degli strati nella direzione ortogonale alla costa, e per una minore estensione nella direzione parallela alla costa. La Figura 19 mostra una vista allargata della sezione trasversale su questo sito. Viste in pianta della torre Calabria e del sito della

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

struttura terminale Calabria sono rispettivamente mostrate alla Figura 21 e alla Figura 22, assieme alla posizione delle ricerche sul sito.

Il presente livello del terreno nella posizione della torre Calabria è di circa 25 m s.l.m.; la riva del mare è situata ad una distanza di 50-60 m dal centro della fondazione della torre. L'inclinazione del fondo del mare in quest'area è di circa 26°. La struttura terminale Calabria è distante circa 200 m dalla torre Calabria e il livello del suolo si trova a 40m s.l.m. Il livello della falda acquifera risulta da una percolazione statica fra un livello piezometrico di circa 32 m s.l.m. ad una distanza di 320 m dal centro della torre, fino ad un livello piezometrico di 0 m s.l., sul mare, nella posizione della fondazione della torre.

A partire dal livello del suolo e procedendo verso il basso, si incontrano i seguenti materiali: a) Depositi costieri, seguiti da Ghiaie di Messina; il singolo spessore di queste formazioni è difficile da valutare, in quanto sono molto simili, lo spessore globale dei suoli superiori senza coesione è di circa 60-70 m sul sito della fondazione della torre, con una riduzione progressiva verso l'entroterra; b) lo strato sottile dei depositi continentali (Calcarenite di Vinco) si incontra sul sito della fondazione della torre, con uno spessore massimo di 7 m; scompare invece verso l'entroterra; c) la formazione del Conglomerato di Pezzo, corrosa dagli agenti atmosferici nei suoi 20 - 25 m superiori, ricopre il bedrock.

La permeabilità dei depositi costieri è stata valutata da test di pompaggio eseguiti da un pozzo sito nella zona della torre Calabria, che si estende a 33m sotto il livello del suolo, mediante test di permeabilità di Lefranc eseguiti in due fori di sondaggio a circa 5 m sotto il livello del suolo e a 45 m sotto il livello del suolo. Il valore della permeabilità orizzontale che risulta dal più affidabile test di pompaggio nel pozzo è  $k_h = 2,6 \cdot 10^{-3}$  m/s; il valore misurato del rapporto fra i range di permeabilità verticali e orizzontali è fra  $k_v/k_h = 0,10$  e  $k_v/k_h = 0,17$ . La permeabilità del Conglomerato di Pezzo è stata valutata mediante test di Lugeon eseguiti in uno dei fori di sondaggio utilizzati per i test di Lefranc, a pressioni di 1, 2, e 3 atm, a profondità che vanno da 48 a 58 m sotto il livello del suolo. I risultati mostrano i valori della permeabilità eventualmente decrescente con la profondità, con un valore medio di  $2,3 \cdot 10^{-2}$  m/s.

La densità relativa dei Depositi Costieri è stata valutata a partire dai risultati del SPT e LPT utilizzando la procedura proposta da Cubrinovski and Ishihara (1999): Nella posizione della torre Calabria e della struttura terminale, lo spessore della formazione superiore dei depositi costieri aumenta se ci si sposta verso la costa (Figura 19). Per questa formazione, in questo sito vi è una

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

differenza in  $N_{SPT}$  chiaramente connessa alla posizione dei test in situ. Sul lato Nord (Figura 23), più vicino alla riva del mare, si può individuare un'unica tendenza: La densità relativa è più alta a profondità basse e diminuisce fino ad una profondità di 20 m, mantenendo un valore relativamente costante al disotto di tale profondità. Spostandosi verso l'entroterra (Lato Sud, Figura 24), i depositi più bassi e più densi tendono a scomparire, e si osserva una più ampia dispersione con nessuna tendenza chiara dei risultati dei test. Si possono identificare i seguenti range:  $D_R = 40 - 80\%$  per  $z < 20$  m e  $D_R = 20 - 60\%$  per  $20 \text{ m} < z < 60$  m sul lato Nord, e  $D_R = 10 - 60\%$  sul lato sud.

Il Conglomerato di Pezzo è un materiale prevalentemente cementato, e quindi per la valutazione della densità relativa non sono stati usati i risultati del SPT.

Valori di  $K_0$  per i depositi costieri possono essere stimati per la densità relativa  $D_R$  utilizzando la relazione proposta da Bellotti e *al.* (1985) per sabbie silicee normalmente consolidate. Questi valori di elasticità convenzionale di  $K_0 = 0,42 - 0,49$  per i 20 m superiori e di  $K_0 = 0,44 - 0,65$  per profondità maggiori nel lato nord;  $K_0 = 0,44 - 0,87$  nel lato sud.

Il conglomerato di Pezzo è prevalentemente cementato e relativamente antico geologicamente (Miocene); è probabile che la storia geologica della formazione includa un sovraconsolidamento meccanico. Una stima dei valori del coefficiente della pressione della terra a riposo è di  $K_0 = 0.6-0.9$ .

L'angolo di attrito interno è stato stimato sulla base dei risultati del SPT, Schmertmann (1975). I valori di  $\varphi'_p$  sono indicati alla Figura 25 (lato nord) e alla Figura 26 (lato sud). Sul lato nord, dal livello del suolo ad una profondità di 20 m, l'angolo di attrito interno diminuisce con valori compresi nel range  $38^\circ < \varphi'_p < 44^\circ$ , mentre al disotto dei 20 m è  $36^\circ < \varphi'_p < 40^\circ$ ; sul lato sud, i valori non mostrano una chiara tendenza, e sono sparsi nel range  $36^\circ < \varphi'_p < 40^\circ$ . I risultati dei test triassiali eseguiti su provini ricostituiti presi da quattro campioni diversi sono coerenti con i risultati dei test in situ.

Per il Conglomerato di Pezzo, i parametri dello sforzo di taglio sono stati ottenuti dai risultati di test di carico di piastre di diametro più ampio (865 mm) eseguiti nella zona del blocco ancoraggio Calabria (vedi § 0 e Figura 33). I valori della dell'intersezione di coesione  $c'$  sono stati ottenuti a profondità fra i 5 e i 16 m sotto il livello del suolo, supponendo che l'angolo di attrito sia compreso nel range di  $\varphi' = 38^\circ-42^\circ$ ; tali valori dell'aumento di  $c'$  con la profondità fino a valori di 70 kPa raggiunti alla profondità di 16m; a profondità maggiori è conservativo presumere che  $c'$  non

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno- fondazione	<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

aumenti più. *Tale profilo di c' è coerente con la presenza, sulla sommità dell'unità di Conglomerato di Pezzo, di uno strato di conglomerato alterato.* L'interpretazione di alcuni test triassiali eseguiti su provini recuperati da un foro di sondaggio nella posizione del blocco ancoraggio Calabria (vedi § 0 e Figura 34) conferma che l'interpretazione dei test di carico della piastra è conservativa.

Nella posizione della struttura terminale, è stato eseguito un test con dilatometro della roccia (Figura 27). L'angolo di attrito ha valori compresi fra 36° e 40°, mentre la coesione ha valori attorno a 400 kPa, maggiori di quelli ottenuti dall'analisi a ritroso del test di carico della piastra precedentemente descritto. Si sono ottenuti valori di  $K_0 = 0,7$ .

Le caratteristiche di rigidità dei depositi sono state ottenute da tre test a foro trasversale. Due di questi sono stati eseguiti nella zona della torre Calabria, mentre il terzo test è stato eseguito nella zona della struttura terminale. I risultati dei test a foro trasversale in termini velocità delle onde di taglio  $V_s$  nei confronti della profondità sono dati alla Figura 28, mentre il profilo della rigidità a bassa deformazione  $G_0 (= \rho V_s^2)$  è indicato alla Figura 29. I risultati confermano la presenza di uno strato corroso dalle intemperie nella parte superiore della formazione geologica del Conglomerato di Pezzo.

Nei depositi costieri,  $G_0$  varia da circa 50 MPa a circa 150 MPa. Nel conglomerato di pezzo corroso dalle intemperie, indipendentemente dalla profondità assoluta,  $G_0$  varia da 200 MPa ad un massimo di circa 800 MPa. Per la formazione inferiore del Conglomerato di Pezzo, i dati provenienti da FC FD1 e OTC CH1 505 mostrano una maggiore impennata di  $G_0$  rispetto a quelli provenienti da FC CH1 508, la posizione del quale è vicina al mare; per il Conglomerato di Pezzo si può considerare un range di  $G_0 = 800 - 2000$  Mpa; i valori inferiori si riferiscono alla località più vicina alla superficie di appoggio della fondazione della torre.

La **Errore. L'autoriferimento non è valido per un segnalibro.** Riassume i principali parametri meccanici ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica di cui sopra.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</b>		<i>Codice documento</i> <b>PB0032_F0_ITA.doc</b>	<i>Rev</i> <b>F0</b>	<i>Data</i> <b>20/06/2011</b>

Tabella 3: Torre Calabria e struttura terminale- riassunto dei principali parametri meccanici

strato	Profondità* (m sotto il livello del suolo)	$D_r$ (%)	$K_0$	$\varphi'_p$ (°)	$c'$ (kPa)	$K_h$ (m/s)	$G_0$ (MPa)
Depositi costieri (sito a nord)	0÷20	40÷80	0.42÷0.49	38÷44	---	$2.6 \times 10^{-3}$	50÷200
Depositi costieri (sito a nord)	20÷60	20÷60	0.44÷0.65	36÷40	---	$2.6 \times 10^{-3}$	50÷200
Depositi costieri (sito a sud)	0÷30	10÷60	0.44÷0.87	36÷40	---	$2.6 \times 10^{-3}$	50÷250
Conglomerato corroso dalle intemperie	30÷80	---	0.6÷0.9	38÷42	0÷70	$2.3 \times 10^{-2}$	200÷800
Conglomerato di Pezzo	>50	---	0.6÷0.9	38÷42	$\geq 70$	$2.3 \times 10^{-2}$	800÷2000

*\*le profondità sono indicative, poiché gli strati del suolo non sono orizzontali*

### 3.2.2 Blocco di ancoraggio Calabria

Il profilo del suolo nella zona del blocco di ancoraggio Calabria è caratterizzato da variazioni significative del livello degli strati del suolo nella direzione parallela alla costa, e, per una minore estensione, nella direzione ortogonale alla costa. La Figura 20 mostra una vista allargata della sezione trasversale su questo sito. Alla Figura 30 è illustrata una vista in pianta del sito del blocco ancoraggio Calabria con la posizione dei siti di ricerca.

Il livello del suolo nella posizione del blocco ancoraggio Calabria è compreso fra +114 m s.l.m e +127 s.l.m; la riva del mare si trova ad una distanza di circa 900m dal blocco di ancoraggio. Il livello della falda acquifera varia fra +95 m s.l. m sull'angolo nord-ovest del blocco di ancoraggio e +107 m s.l.m nell'angolo opposto, in posizione sud-est.

Nella posizione del blocco di ancoraggio, i depositi costieri e le ghiaie di Messina, difficili da distinguere l'uno dall'altro e in seguito considerati quindi come un solo strato, hanno uno spessore variabile tra un minimo di 7 m in direzione dell'angolo nord-est ed un massimo di 18 m verso l'angolo sud-est della zona del blocco di ancoraggio. Questi sono sovrapposti al Conglomerato di Pezzo, corroso dalle intemperie nei suoi 20m superiori. Il Conglomerato di Pezzo si estende per uno spessore di circa 130 m. Ne consegue che, per il blocco ancoraggio Calabria, l'unità geologica rilevante è il Conglomerato di Pezzo, con un leggero strato corroso dalle intemperie, ( $20 \text{ m} < z < 40 \text{ m}$ ), al quale è sovrapposto un sottile strato di depositi di terrazzo.

Le permeabilità dei depositi costieri e del Conglomerato di Pezzo sono state valutate da test di pompaggio nel pozzo e da test di Lugeon eseguiti nella zona della torre Calabria (§ 2.2.1). Il valore

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

della permeabilità orizzontale risultante dai test di pompaggio nel pozzo nei depositi costieri è di  $k_h = 2,6 \cdot 10^{-3}$  m/s, con un valore misurato del rapporto fra la permeabilità verticale ed orizzontale compreso fra  $k_v/k_h = 0,10$  e  $k_v/k_h = 0,17$ . La permeabilità del Conglomerato di Pezzo valutata mediante i test di Lugeon diminuisce eventualmente con la profondità, con un valore medio di  $2,3 \cdot 10^{-2}$  m/s.

Test standard e test a grande penetrazione hanno fornito valori di  $N_{SPT}$  e  $N_{LPT}$  nei depositi costieri, tuttavia è stata osservata una grande dispersione (Figura 31); una stima del coefficiente della pressione della terra a riposo è  $K_0 = 0,43 - 0,47$ . Il conglomerato di Pezzo è cementato e relativamente antico geologicamente (Miocene); è probabile che la storia geologica della formazione includa un sovraconsolidamento meccanico. Una stima dei valori del coefficiente della pressione della terra a riposo è di  $K_0 = 0,6 \div 0,9$ .

La densità relativa dei Depositi Costieri e delle ghiaie di Messina è stata valutata a partire dai risultati del SPT e LPT utilizzando la procedura proposta da Cubrinovski and Ishihara (1999): Sono stati ottenuti valori da  $D_R = 40\%$  a  $70\%$  come mostrato alla Figura 32. E' stato quindi valutato l'angolo di attrito interno di cresta  $\varphi'_P = 41^\circ - 44^\circ$  (Figura 32) mediante la relazione proposta da Schmertmann (1975).

Per il Conglomerato di Pezzo, i parametri della forza di taglio sono stati ottenuti dai risultati di test di carico di piastre di diametro più ampio (865 mm) eseguiti nella zona del blocco ancoraggio Calabria **Errore. Non è stato specificato un nome segnalibro.** Tali test sono stati eseguiti a tre diverse profondità, di 5; 11,85 e 16 m sotto il livello del suolo entro un pozzetto di 2,5 m di diametro.

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

$$q_u = C_k c' + B_k \gamma D + A_k \gamma \frac{B}{2} \quad (4)$$

dove  $\gamma = 20$  kN/m<sup>3</sup> è la massa unitaria del suolo,  $c'$  rappresenta la coesione del suolo,  $B = 0,865$  m è il diametro della piastra,  $D = 0$  è la profondità della piastra e  $A_k$ ,  $B_k$  e  $C_k$  sono fattori di capacità che dipendono dall'angolo di attrito  $\varphi'$ . I valori di  $q_u$  sono stati ottenuti direttamente per il test eseguito a 5 m sotto il livello del suolo che è stato preso per la rottura, ed estrapolato con una legge iperbolica per gli altri due test. In tal modo, per ogni valore dato di  $\varphi'$  è possibile calcolare il valore corrispondente di  $c'$ . La Figura 33 illustra i valori di  $c'$  ottenuti a profondità comprese fra 5 e 16 m sotto il livello del suolo, supponendo che l'angolo di attrito sia compreso nel range di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$\varphi' = 38^\circ \div 42^\circ$ . Per profondità maggiori di 16 m sotto il livello del suolo è conservativo supporre che  $c'$  sia costante ed eguale al proprio valore a 16 m sotto il livello del suolo; tale supposizione è coerente con l'esistenza, sulla sommità dell'unità di Conglomerato di Pezzo, di uno strato di conglomerato corroso dalle intemperie, anche indicato dai profili di velocità dell'onda di taglio al capitolo seguente. In tal tipo di materiali, un'aumento della coesione con la profondità non influenza l'angolo di attrito (Jamiolkowski *et al.*, 1991). L'interpretazione di alcuni test triassiali eseguiti su provini recuperati da un foro di sondaggio nella posizione del blocco ancoraggio Calabria (vedi § Figura 34 **Errore. Non è stato specificato un nome segnalibro.**) conferma che l'interpretazione del test di carico della piastra è conservativa.

Le caratteristiche di rigidità dei depositi sono state ottenute da un test a foro parallelo eseguito in prossimità del blocco ancoraggio Calabria (AC-BH1), utilizzando tre fori di sondaggio che raggiungono una profondità massima di 100 m sotto il livello del suolo, ad una distanza di 5 m uno dall'altro. I risultati dei test a foro parallelo in termini di velocità dell'onda di taglio  $v_s$  nei confronti della profondità sono dati alla Figura 35. Gli stessi risultati sono indicati alla Figura 36 come profili del modulo di rigidità a bassa deformazione,  $G_0$ . Ciò è stato ottenuto dalla velocità dell'onda di taglio come  $G_0 = \rho V_s^2$ .

I tre set di dati si riferiscono ai valori ottenuti in ognuno dei tre fori di sondaggio, mentre la linea continua è la media dei tre dati ad ognuna delle profondità.

Il profilo  $G_0$  assieme alla profondità indica tre diverse tendenze: per  $0 \text{ m} < z < 20 \text{ m}$   $G_0$  aumenta rapidamente da 190 MPa a 1200 MPa; per  $20 \text{ m} < z < 40 \text{ m}$   $G_0$  varia da circa 1200 MPa a circa 1400 MPa; al di sotto di  $z = 40 \text{ m}$  i dati sono maggiormente dispersi, con un valore medio di 2000 MPa.

La Tabella 4: Blocco di ancoraggio Calabria Riassunto dei principali parametri meccanici Riassume i principali parametri meccanici ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica discussa sopra.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Tabella 4: Blocco di ancoraggio Calabria Riassunto dei principali parametri meccanici

strato	Profondità* (m sotto il livello del suolo)	$D_r$ (%)	$K_0$	$\varphi'_p$ (°)	$c'$ (kPa)	$K_h$ (m/s)	$G_0$ (MPa)
Depositi costieri	0÷20	40÷70	0.43÷0.47	41÷44	---	$2.6 \times 10^{-3}$	190÷1200
Conglomerato corroso dalle intemperie	20÷40	---	0.6÷0.9	38÷42	0÷70	$2.3 \times 10^{-2}$	1200÷1400
Conglomerato di Pezzo	>40	---	0.6÷0.9	38÷42	$\geq 70$	$2.3 \times 10^{-2}$	2000

*\*le profondità sono indicative, poiché gli strati del suolo non sono orizzontali*

## 4 Analisi dinamiche numeriche a due dimensioni

### 4.1 Modello del suolo

#### 4.1.1 Modello geometrico del suolo

Le figure da 37 a 44 mostrano la maglia a differenze finite in 2D utilizzata nelle analisi. Per ogni riva, sono state considerate quattro diverse sezioni: una sezione longitudinale, parallela al ponte, inclusa la torre, le strutture terminali e il blocco di ancoraggio, e tre sezioni trasversali, ortogonali rispetto al ponte, una per ogni struttura principale (torre, strutture terminali, e blocco di ancoraggio). Le maglie si estendono verticalmente verso il basso fino alla sommità dello strato dei depositi continentali sulla riva siciliana, e verso il basso fino alla sommità dello strato cristallino sulla riva calabrese. Le larghezze delle maglie delle sezioni longitudinali sono rispettivamente 1680 m per la riva siciliana e 1530 m per quella calabrese, mentre la larghezza delle maglie delle sezioni trasversali è di circa 700m.

Nella parte longitudinale della riva siciliana (Figura 37), il livello del suolo si trova a +4 m s.l.m. nella posizione della fondazione della torre e della struttura terminale, e a +56 m s.l.m. nella posizione del blocco di ancoraggio; il terreno è digradante verso il mare con un angolo di 13°. Lo strato delle ghiaie di Messina è stato ulteriormente suddiviso in tre diverse zone, a seconda dei valori della rigidità di taglio del deposito, come di seguito descritto nel dettaglio. La distribuzione iniziale delle pressioni dell'acqua interstiziale è idrostatica, con una prevalenza totale di 0,0 m s.l.m.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Gli strati del suolo inclusi nelle tre sezioni trasversali della riva siciliana (Figura 38, Figura 39 e Figura 40) sono le stesse di quelle utilizzate nelle sezioni longitudinali a 2 dimensioni sulle posizioni della torre, della struttura terminale e del blocco di ancoraggio. Gli strati sono orizzontali, e quindi le maglie sono simmetriche in direzione orizzontale.

Nella sezione longitudinale della riva calabrese (Figura 41), il livello del suolo si trova a +4.5 m s.l.m nella posizione della fondazione della torre, a +40 m s.l.m nella posizione della struttura terminale, e a +118 m s.l.m nella posizione del blocco di ancoraggio. Il terreno digrada verso il mare con un angolo di 25°. La distribuzione iniziale delle pressioni dell'acqua interstiziale è idrostatica sia nella posizione della fondazione della torre, con una prevalenza totale di 0,0 m s.l.m., sia in quella del blocco di ancoraggio, con una prevalenza totale di 100 m s.l.m., mentre il livello della falda acquifera nella zona fra le due strutture risulta da una analisi della percolazione statica.

Gli strati del suolo inclusi nelle tre sezioni trasversali della riva calabrese (Figura 42, Figura 43 e Figura 44) sono le stesse di quelle utilizzate nelle analisi delle sezioni longitudinali a 2 dimensioni sulle posizioni della torre, della struttura terminale e del blocco di ancoraggio. Tali strati sono orizzontali nelle sezioni trasversali della torre e della struttura terminale, mentre sono inclinati sull'orizzontale nella sezione trasversale del blocco di ancoraggio. La distribuzione iniziale della pressione delle acque interstiziali è idrostatica e il livello di falda acquifera si trova a 18 m sotto il livello del suolo nelle sezioni trasversali della struttura terminale.

La dimensione delle zone nella maglia a differenze finite è definita per avere compatibilità con la lunghezza d'onda dei terremoti applicata allo stadio dinamico.

#### 4.1.2 Modello costitutivo del suolo

Nelle analisi dinamiche, il comportamento ciclico del suolo è stato descritto mediante un modello isteretico costitutivo disponibile nella libreria del codice delle differenze finite FLAC. In linea di principio, il modello consiste in una estensione alle condizioni generali di deformazione dei modelli monodimensionali non lineari che utilizzano le regole di Masing (1926) per produrre cicli di isteresi. Condizioni di deformazioni sotto il piano, le relazioni fra la sollecitazione di taglio  $\tau$  e la deformazione di taglio corrispondente  $\gamma$  possono essere espresse come:

$$\frac{\tau}{G_0} = \frac{G_s(\gamma)}{G_0} \cdot \gamma = M_s(\gamma) \cdot \gamma \quad (5)$$

dove  $G_s(\gamma)$  rappresenta il modulo di taglio secante, funzione di  $\gamma$ ,  $G_0$  è il modulo di bassa

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011	

deformazione e  $M_s$  il modulo secante di taglio normalizzato. Se la relazione fra  $M_s$  e  $\gamma$  è conosciuta da un'apposita curva del modulo di decadimento, allora il modulo di taglio tangente  $M_t$  può essere valutato differenziando la precedente equazione rispetto a  $\gamma$ .

L'inversione della deformazione viene individuata mediante cambio di segno del prodotto scalare dell'aumento della deformazione corrente per la direzione del percorso della deformazione all'istante temporale precedente. Ad ogni inversione di deformazione, si applica la regola di Masing proporzionando le differenze di sollecitazione e di deformazione di un mezzo; ciò produce nelle curve sollecitazione/deformazione dei cicli di isteresi che consentono una appropriata dissipazione di energia. La Figura 45 illustra una tipica risposta del presente modello del suolo, come una relazione fra la sollecitazione tangenziale  $\tau$  e la corrispondente deformazione di taglio  $\gamma$ .

La taratura del modello di isteresi richiede il modulo di taglio di bassa deformazione  $G_0$  e una curva del modulo di decadimento che descriva la riduzione del modulo di taglio secante con l'ampiezza della deformazione di taglio. Per queste analisi, il modulo di rigidità a bassa deformazione è stato tarato sulla base dei risultati dei test a foro trasversale ed è stata descritta in quanto funzione della sollecitazione efficace media. Il modulo di decadimento per le ghiaie di Messina e per i depositi costieri è stato descritto utilizzando i risultati sperimentali ottenuti da Tanaka e *a.l.* (1987) su suoli ghiaiosi vergini (curva 1), mentre le curve del modulo di decadimento per il Conglomerato di Pezzo sono state prese da quelle incluse nel codice EERA da Bardet e *al.* (2000) per una roccia tenera (curva 2).

Tali curve del modulo di decadimento possono essere approssimate utilizzando la seguente espressione per la funzione  $M_s(\gamma)$ :

$$M_s = y_0 + \frac{a}{1 + \exp[-(\log_{10} \gamma - x_0)/b]} \quad (6)$$

Utilizzando i valori per i parametri del suolo  $a$ ,  $b$ ,  $x_0$  e  $y_0$  riportati alla **Errore. L'autoriferimento non è valido per un segnalibro.** per le due diverse curve del modulo di decadimento.

Tabella 5: Parametri costitutivi utilizzati per il modello isteretico del suolo

curva	$a$	$b$	$x_0$	$y_0$
1	0.9762	-0.4393	-1.285	0.03154
2	0.9900	-1.1000	-0.100	0.05000

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

La Figura 46 Mostra un confronto soddisfacente fra la curva del modulo di decadimento prevista utilizzando i parametri della Utilizzando i valori per i parametri del suolo  $a$ ,  $b$ ,  $x_0$  e  $y_0$  riportati alla **Errore. L'autoriferimento non è valido per un segnalibro.** per le due diverse curve del modulo di decadimento.

e la curva-obiettivo. La stessa figura riporta anche, per confronto, una curva di modulo di decadimento molto simile fornita da Seed & Idriss (1970) per i suoli a grana grossa e la variazione corrispondente del rapporto di ammortizzazione equivalente  $D$  con l'ampiezza della deformazione di taglio. In questo modello del suolo, il rapporto equivalente di ammortizzazione è semplicemente una risposta del modello costitutivo, e non può essere ulteriormente calibrato. Benché per  $\gamma > 0,01$  % questo rapporto equivalente di ammortizzazione è in qualche modo superiore a quello trovato da Seed & Idriss (1970), si deve notare che le attuali analisi digitali utilizzano un modello del suolo reale non lineare, e sono eseguite nell'ambito del tempo. Quindi, i valori di  $D$  previsti dal modello di isteresi hanno un diverso significato fisico rispetto a quello normalmente utilizzato in una analisi viscoso-elastica: in un'analisi lineare equivalente (Schnabel e al. 1972), una volta raggiunta la convergenza, i valori secanti del rapporto di ammortizzazione utilizzati per calcolare la risposta dinamica del suolo non variano nel tempo; nel modello attuale, i valori equivalenti maggiori di  $D$  sono attivati solamente negli istanti di tempo in cui le deformazioni sono maggiori. Un confronto preliminare monodimensionale a campo libero fra le previsioni dell'isteresi del suolo e quelle di un calcolo lineare equivalente con un modello viscoso-elastico (Schnabel e al. 1972) hanno prodotto una ragionevole concordanza, ed hanno mostrato che, sotto l'input sismico utilizzato nelle presenti simulazioni, valori della deformazione di taglio maggiori di 0,01 % sono raggiunti solo localmente e istantaneamente.

Nei calcoli numerici, il modello di isteresi è stato utilizzato per aggiornare, ad ogni passo di calcolo, il modulo tangente di taglio di un modello di suolo plastico perfettamente elastico con un criterio di rottura di Mohr-Coulomb. Per la presente analisi, è stata utilizzata una regola di flusso non associata, con una dilatanza costante messa a zero.

L'associazione del modello di isteresi con un modello perfettamente plastico porta alla conseguenza che le deformazioni plastiche associate alla mobilitazione a piena forza possono fornire una dissipazione di energia aggiuntiva.

Con deformazioni molto basse, il modello di isteresi non fornisce alcuna ammortizzazione. Nei

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

calcoli è stata usata una piccola ammortizzazione viscosa ( $D = 4\%$ ) in modo da fornire una qualche dissipazione di energia anche con basse deformazioni. Studi parametrici preliminari hanno mostrato che tale piccola ammortizzazione viscosa non altera i risultati in modo significativo, ma aiuta ad appianare alcune risposte ad alta frequenza che sono l'inevitabile conseguenza dello schema di integrazione temporale completamente esplicito utilizzato dal programma FLAC program (Joyner & Chen 1975).

#### 4.1.3 Parametri del suolo

Le proprietà meccaniche degli strati del suolo nel modello plastico-elastico della riva siciliana sono riassunte alla Tabella 6: Costa siciliana Simulazione numerica: Proprietà meccaniche e fisiche degli strati del suolo e alla Tabella 7: Costa siciliana Simulazione numerica: Parametri di rigidità degli strati del suolo.

Per tutti gli strati del suolo, è stato introdotto un piccolo valore di coesione diverso da zero, il quale non influenza significativamente i risultati delle analisi. Per gli strati di depositi costieri e delle ghiaie di Messina (1), il modulo di rigidità a bassa deformazione fornito dall'espressione:

$$\frac{G_0}{p_{ref}} = K_G \left( \frac{p' + B}{p_{ref}} \right)^m \quad (7)$$

dove  $p'$  è la sollecitazione media efficace,  $p_{ref} = 100$  kPa è una pressione di riferimento, e  $K_G$ ,  $B$  ed  $m$  sono stati ottenuti da un migliore adattamento dei risultati del test a foro trasversale. La curva del modulo di decadimento 1 è stata utilizzata per le ghiaie di Messina (1) e per i depositi costieri, la curva 2 è stata utilizzata per le ghiaie di Messina (2) e (3) e per i depositi continentali. La porosità e la permeabilità degli strati del suolo sono sempre rispettivamente  $n = 0,5$  e  $k_h = 10^{-3}$  m/s.

Tabella 6: Costa siciliana Simulazione numerica: Proprietà meccaniche e fisiche degli strati del suolo

strato	modell o	Curva di isteresi	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
Depositi costieri ( $z < 30$ m sotto il livello del suolo)	MC	1	20	2	44
Depositi costieri ( $z > 30$ m sotto il livello del suolo)	MC	1	20	2	42
Ghiaie di Messina (1) ( $z < 30$ sotto il livello del suolo)	MC	1	20	2	44

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

Ghiaie di Messina (1) (z>30 sotto il livello del suolo)	MC	1	20	2	42
Ghiaie di Messina (2)	MC	2	20	2	42
Ghiaie di Messina (3)	MC	2	20	2	42
Depositi continentali	MC	2	20	2	42

Tabella 7: Costa siciliana Simulazione numerica: Parametri di rigidità degli strati del suolo

strato	$\nu$	$K_G$	$B$ (kPa)	$m$	$G_0$ (Mpa)	$K_0$ (Mpa)
Depositi costieri (z<30 m sotto il livello del suolo)	0.2	800	15	0.5	-	-
Depositi costieri (z>30 m sotto il livello del suolo)	0.2	800	15	0.5	-	-
Ghiaie di Messina (1) (z<30 sotto il livello del suolo)	0.2	892	60	0.86	-	-
Ghiaie di Messina (1) (z>30 sotto il livello del suolo)	0.2	892	60	0.86	-	-
Ghiaie di Messina (2)	0.2	-	-	-	2420	3227
Ghiaie di Messina (3)	0.2	-	-	-	3645	4860
Depositi continentali	0.2	-	-	-	3645	4860

Le proprietà meccaniche degli strati del suolo nel modello plastico-elastico del suolo della riva calabrese sono riassunte alla Tabella 8: Costa calabrese Simulazione numerica: Proprietà meccaniche e fisiche degli strati del suolo e alla Tabella 9: Costa calabrese Simulazione numerica: Parametri di rigidità degli strati del suolo.

Per i depositi costieri, le ghiaie di Messina e i depositi di terrazzo è stato introdotto un piccolo valore diverso da zero per la stabilità numerica, il quale non può influenzare i risultati delle analisi. Per lo strato corroso dalle intemperie del Conglomerato di Pezzo, è stato supposto un valore limitato di coesione,  $c' = 35$  kPa, coerentemente con le indicazioni nei test di carico delle piastre.

Per i depositi costieri e i depositi di terrazzo, il modulo di rigidità a bassa deformazione è definito in quanto funzione della sollecitazione efficace media, mediante l' eq (7) di cui sopra, in cui  $K_G$ ,  $B$  e  $m$  sono stati ottenuti da un migliore adattamento dei risultati del test a foro trasversale. La curva del modulo di decadimento 1 è stata utilizzata per i depositi costieri, quelli di terrazzo e per il conglomerato corroso dalle intemperie, mentre è stata utilizzata la curva 2 per gli altri strati. La porosità e la permeabilità degli strati del suolo sono sempre rispettivamente  $n = 0,5$  e  $k_h = 10^{-3}$  m/s.

Tabella 8: Costa calabrese Simulazione numerica: Proprietà meccaniche e fisiche degli strati del suolo

strato	modello	Curva di	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
--------	---------	----------	-------------------------------	------------	-------------

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

isteresi						
Depositi costieri	MC	1	20	2	44	
Ghiaie di Messina	MC	2	20	2	42	
Conglomerato corroso dalle intemperie	MC	1	20	35	40	
Conglomerato di Pezzo	MC	2	20	70	40	
Depositi di terrazzo	MC	1	20	2	40	
Cristallino	elastico	2	20	-	-	

Tabella 9: Costa calabrese Simulazione numerica: Parametri di rigidità degli strati del suolo

strato	$\nu$	$K_G$	B (kPa)	m	$G_0$ (Mpa)	$K_0$ (Mpa)
Depositi costieri	0.2	800	15	0.5	-	-
Ghiaie di Messina	0.2	-	-	-	3645	4860
Conglomerato corroso dalle intemperie	0.2	-	-	-	563	750
Conglomerato di Pezzo	0.2	-	-	-	750	1000
Depositi di terrazzo	0.2	5000	15	1	-	-
Cristallino	0.2	-	-	-	5780	7705

## 4.2 Elementi strutturali

### 4.2.1 Dimensioni equivalenti

Le analisi dinamiche sono state condotte in condizioni bidimensionali sia in direzione longitudinale che in direzione trasversale. Nelle semplici analisi di deformazioni, le fondazioni reali delle varie strutture (torre, strutture terminali e blocchi di ancoraggio) hanno dovuto essere sostituite da solette di fondazione a nastro, come esplicito di seguito.

#### Torri

Nelle analisi longitudinali a 2D, la reale fondazione della torre, formata da due solette circolari del diametro rispettivo di  $D = 55$  m o  $D = 50$  m per la Sicilia e la Calabria, ad una distanza da centro a centro di  $i = 77.15$  m, sono state sostituite da una soletta a nastro equivalente di larghezza  $B_{eq}$ . I carichi unitari equivalente da applicare alla fondazione a nastro equivalente sono stati ottenuti dividendo i carichi applicati alla fondazione reale per una lunghezza equivalente  $L_{eq}$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Le dimensioni equivalenti  $B_{eq}$  e  $L_{eq}$ , sono state ottenute dalla condizione che l'assestamento e la rotazione del nastro equivalente sottoposto ai carichi equivalenti dovesse essere uguale all'assestamento e alla rotazione della fondazione reale a 3D sotto l'applicazione dei carichi corrispondenti. Per stabilire l'equivalenza, sono stati utilizzate analisi lineari elastiche: A questo proposito, sono state utilizzate le soluzioni per l'assestamento e la rotazione di una soletta di fondazione circolare rigida ed un nastro rigido su un semispazio lineare elastico isotropico pubblicati da Gerrard & Harrison (1970), tenendo conto della interazione fra le due solette di fondazione circolari adiacenti.

Sono stati valutati gli incrementi delle sollecitazioni prodotte dai carichi applicati sul fondo della soletta di fondazione (-15 m s.l.m.), e le deformazioni risultanti sono state integrate allo spessore dello strato deformabile. Nell'elasticità lineare, le dimensioni equivalenti non dipendono dal modulo elastico,  $E$ , e neppure dal valore dei pesi applicati, mentre dipendono invece dallo spessore dello strato deformabile,  $H$ . Lo spessore dello strato deformabile al disotto del livello delle fondazioni delle torri Sicilia e Calabria è rispettivamente  $H = 70$  m e  $H = 18$  m. Le dimensioni equivalenti sono quindi state trovate come quelle che riducono l'ampiezza della diversità delle soluzioni ottenute per la fondazione a nastro equivalente e per la fondazione a 3D. I valori di riduzione delle dimensioni equivalenti ottenuti sono rispettivamente, per la torre Sicilia e per la torre Calabria:  $B_{eq} = 41,25$  m e  $L_{eq} = 146,75$  m e  $B_{eq} = 40,4$  m e  $L_{eq} = 129,4$  m

Nelle analisi trasversali a 2D, la fondazione di ognuna delle torri è stata sostituita da due solette di fondazione a nastro equivalenti della larghezza  $B_{eq} = D$ . I carichi unitari equivalenti da applicare ad ognuna delle solette di fondazione a nastro equivalente sono stati ottenuti dividendo i carichi applicati alla fondazione reale per una lunghezza equivalente  $L_{eq}$ . Siccome le due solette di fondazione interagiscono reciprocamente, la lunghezza equivalente,  $L_{eq}$ , è stata ottenuta dalla condizione che l'assestamento di ogni nastro equivalente sottoposto ai carichi equivalenti dovesse essere uguale all'assestamento di una fondazione rettangolare con dimensioni  $B = l + D$  and  $L = D$ , sotto il carico totale applicato alle due solette di fondazione. In questo caso, gli assestamenti delle fondazioni rettangolari avvolgenti e delle solette di fondazione a nastro sono stati calcolati utilizzando la soluzione elastica data da Gazetas (1991).

### *Strutture terminali*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

La fondazione di ognuna delle strutture terminali consiste di due solette di fondazione rettangolari di dimensioni  $B = 21,2$  m in direzione longitudinale, e di  $L = 70,0$  m in direzione trasversale, ad una distanza da asse ad asse  $i = 55,0$  m in direzione longitudinale, o di  $B = 20,0$  m,  $L = 75,0$  m, e  $i = 32,0$  m, rispettivamente per le rive siciliana e calabrese. Siccome non è stato applicato nessun carico alle strutture terminali, sono state mantenute le dimensioni reali delle fondazioni, sia nella sezione longitudinale che in quella trasversale.

La Figura 48 illustra una vista in pianta ed una sezione longitudinale dei blocchi di ancoraggio Calabria quali definiti nel progetto di gara; questi sono formati da un blocco in cemento armato con una forma di prisma trapezoidale. Le dimensioni in pianta del rettangolo superiore sono: 98 m in direzione trasversale e 87,5 m in direzione longitudinale; il rettangolo inferiore alla base ha dimensioni di 98 m in direzione trasversale e 25 m in direzione longitudinale.

Nelle sezioni longitudinali, i blocchi sono stati sostituiti da solette di fondazione a nastro della stessa forma e dimensione dei blocchi di ancoraggio reali. I carichi unitari equivalenti da applicare alle fondazioni a nastro equivalenti sono stati ottenuti dividendo i carichi applicati alla fondazione reale per una lunghezza equivalente  $L_{eq} = 184$  m, per entrambi i blocchi di ancoraggio, Calabria e Sicilia. Tale lunghezza equivalente è stata ottenuta dalla condizione che gli spostamenti verticali ed orizzontali del nastro equivalente sottoposto ai carichi equivalenti dovrebbero essere uguali agli spostamenti verticali ed orizzontali dei blocchi reali sotto i carichi applicati.

Nella direzione trasversale, i blocchi sono stati sostituiti da solette di fondazione rettangolari a nastro con dimensioni, rispettivamente per il blocco Sicilia e Calabria, di  $B = 118$  m, e  $B = 100$  m. Come per le sezioni longitudinali, i carichi unitari equivalenti da applicare alle solette di fondazione a nastro equivalenti sono stati ottenuti dividendo i carichi applicati ai blocchi reali per una lunghezza equivalente, rispettivamente per il blocco Sicilia e Calabria, di  $L_{eq} = 119$  m e di  $L_{eq} = 139$  m, ottenuta dalla condizione che gli spostamenti verticale ed orizzontali del nastro equivalente sottoposto ai pesi equivalenti dovessero essere uguali agli spostamenti verticali ed orizzontali dei blocchi reali sotto i pesi applicati.

In ogni caso, gli assestamenti delle fondazioni reali e delle solette di fondazione a nastro sono stati calcolati utilizzando la soluzione elastica data da Gazetas (1991).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

#### 4.2.2 Torri

Il modello strutturale della torre incluso nelle analisi è stato derivato a partire da modelli semplificati ad elementi finiti in 2D preparati da *E.d.in. S.r.l.*. Tali modelli consistono di masse concentrate e di travi a una dimensione, come illustrato alla Figura . La sommità della torre è collegata a molle che rappresentano la rigidità del sistema di sospensione. Per l'uso nelle presenti analisi di interazione suolo-struttura, il contatto di base fra la torre e la sua fondazione è stato modellizzato mediante elementi a trave senza peso di elevata rigidità ( $E = 3 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ ,  $A = 1 \times 10^2 \text{ m}^2/\text{m}$ ,  $I = 1 \times 10^4 \text{ m}^4/\text{m}$ ), in modo di rendere le rotazioni eguali a quelle dei plinti di fondazione.

Prima di eseguire le analisi dinamiche numeriche di interazione, la risposta dinamica dei modelli strutturali semplificati della torre è stata testata mediante analisi dinamiche temporali specifiche. In particolare, mediante la procedura sotto indicata, sono state definite la prima frequenza di vibrazione naturale del modello e la prima forma modale normalizzata.

Un impulso ad onde piccole è stato applicato alla base della torre, e le naturali frequenze di vibrazione sono state valutate a partire dallo spettro di Fourier delle vibrazioni libere di nodi scelti per la torre. In alternativa, alla base dei modelli sono stati applicati uno storico di spostamento sinusoidale con una durata di 100 s ed una scansione di frequenza continua compresa fra 0,2Hz e 2Hz, e sono state valutate le frequenze naturali della vibrazione a partire dallo spettro di Fourier degli storici degli spostamenti di nodi selezionati del modello, mentre la prima forma modale è stata recuperata negli istanti di tempo nei quali gli spostamenti della torre erano al massimo.

I risultati di queste analisi preliminari in termini di frequenze naturali di vibrazione sono riassunti alla Figura 49 e alla Figura 50 rispettivamente per i modelli longitudinali delle torri Sicilia e Calabria, e alla Figura 51 e alla Figura 52 per i modelli trasversali rispettivamente della torre Sicilia e Calabria. La prima frequenza naturale della struttura della torre Sicilia è  $f_n = 0,39 \text{ Hz}$  in direzione longitudinale e di  $f_n = 0,34 \text{ Hz}$  in direzione trasversale; per la torre Calabria, la prima frequenza naturale della struttura è  $f_n = 0,39 \text{ Hz}$  in direzione longitudinale e  $f_n = 0,30 \text{ Hz}$  in direzione trasversale.

Le prime forme modali ottenute sia in direzione longitudinale che in quella trasversale per il modello 2D semplificato delle strutture delle torri sono illustrate alla Figura 53 e alla Figura 54 rispettivamente per la torre Sicilia e per la torre Calabria. Il confronto con la prima forma modale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

ottenuta in direzione longitudinale dal modello completo in 3D delle stesse strutture è veramente molto buono.

#### Fondazioni

Si è presunto che le fondazioni della torre si comportino come un materiale elastico con le proprietà elencate alla Fondazioni

Il peso unitario equivalente delle fondazioni nelle sezioni longitudinale e trasversale è stato ottenuto dalla condizione che il peso proprio della fondazione reale in 3D debba essere uguale al peso proprio della fondazione equivalente in 2D. Sono state considerate due parti delle fondazioni, una al di sopra e l'altra al disotto del livello del suolo, del peso unitario rispettivo di  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ . La Fondazioni

riporta i valori di  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  calcolati per le analisi in 2D nelle sezioni longitudinali e trasversali.

Tabella 10: Proprietà delle fondazioni della torre

riva	Sezione	$\gamma_1$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_2$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	E (MPa)
Sicilia	longitudinale	10.03	23.83	0.15	4.0E+04
Sicilia	trasversale	12.07	23.45	0.15	4.0E+04
Calabria	longitudinale	10.99	22.91	0.15	4.0E+04
Calabria	trasversale	10.16	22.17	0.15	4.0E+04

#### Iniezioni di cemento

Il suolo al disotto delle fondazioni della torre sarà trattato con colonne sovrapposte di iniezioni di cemento, di un diametro nominale di 0,6 m, che si estenderanno verso il basso fino ad una profondità di 37 m sotto il livello del suolo sulla riva siciliana, e fino al Conglomerato di Pezzo sulla riva calabrese. Le iniezioni di cemento, inoltre, saranno utilizzate per il trattamento del suolo adiacente alle fondazioni della torre, con un'estensione di circa 30-40 m a partire dal perimetro esterno delle fondazioni, e verso il basso fino ad una profondità di 30 m al disotto del livello del suolo sulla riva siciliana e fino al Conglomerato di Pezzo sulla riva calabrese. Il rapporto dell'area trattata sull'area totale del suolo è di  $A_{tr}/A_{tot} = 100\%$  al disotto delle fondazioni della torre e fino al 42% nella zona attorno alle fondazioni della torre. Le proprietà meccaniche delle colonne di cemento iniettate è stato ottenuto utilizzando i valori della resistenza alla compressione di progetto senza limitazione laterale  $\sigma_c = 6$  MPa e del rapporto  $E/\sigma_c = 500$ , proposto da Rocksoil, e risultati pubblicati (Croce e al., 2004). Le proprietà meccaniche delle zone con iniezioni di cemento riportate alla Tabella 11: Parametri del modello per il suolo con iniezioni di cemento sono quindi state calcolate utilizzando una procedura di omogeneizzazione basata sulle percentuali dell'area di suolo trattata. La curva del modulo di decadimento 1 è stata usata per il suolo iniettato al disotto

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>

delle fondazioni della torre, mentre la curva 2 è stata presa in considerazione per il suolo iniettato laterale.

Tabella 11: Parametri del modello per il suolo con iniezioni di cemento

		modello	Curva ist.	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$\nu$	$G_0$ (Mpa)
Iniezioni di cemento	di	MC	2	22	1560	35	0.2	1250
Iniezione di cemento laterale	di	MC	1	22	655	35	0.2	525

#### Trave di connessione

Nelle analisi trasversali a 2D della torre Sicilia e della torre Calabria, la trave di connessione fra le fondazioni delle due colonne è modellizzata con elementi a trave elastica posti sulla superficie del suolo. La Trave di connessione

mostra le proprietà meccaniche e geometriche delle travi di connessione.

Tabella 12: Simulazione numerica: Proprietà geometriche e meccaniche degli elementi di connessione a trave

riva	$\nu$	E (MPa)	A (m <sup>2</sup> /m)	I (m <sup>4</sup> /m)
Sicilia & Calabria	0.2	3.4E+04	2.79	55.9

#### Carichi applicati

Nelle analisi dinamiche, alle fondazioni delle torri sono stati applicati carichi verticali aggiuntivi uguali alla differenza fra il normale carico applicato alla base di ciascuna torre,  $N = 2.6 \times 10^5$  t, e la somma dei pesi strutturali dovuti alle masse concentrate incluse nei modelli semplificati delle torri. Questi erano pari a  $1,45 \times 10^5$  t, in direzione longitudinale e a  $2,02 \times 10^5$  t in direzione trasversale per la torre Sicilia, e a  $1,24 \times 10^5$  t in direzione longitudinale e  $2,02 \times 10^5$  t in direzione trasversale per la torre Calabria. Tutti i normali carichi sono stati divisi per le lunghezze equivalenti per ottenere i pesi unitari applicati alle fondazioni del modello.

#### 4.2.3 Blocchi di ancoraggio

Si è presunto che i blocchi di ancoraggio si comportino come un materiale elastico con le proprietà elencate alla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Il peso unitario equivalente dei blocchi di ancoraggio nelle sezioni longitudinale e trasversale è stato ottenuto dalla condizione che

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

il peso proprio del blocco reale in 3D debba essere uguale al peso proprio del blocco equivalente in 2D.

Tabella 13: Proprietà dei blocchi di ancoraggio

riva	Sezione	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	E (MPa)
Sicilia	longitudinale	24.8	0.15	4.0E+04
Sicilia	trasversale	25.1	0.15	4.0E+04
Calabria	longitudinale	21.8	0.15	4.0E+04
Calabria	trasversale	21.6	0.15	4.0E+04

Le forze trasmesse dai cavi di sospensione sono state applicate ai blocchi di ancoraggio nei modelli longitudinali, secondo le analisi strutturali eseguite nella fase del progetto di gara per le combinazioni dei carichi allo stato limite ultimo (SLU) Questi sono pari a  $F = 3933$  MN e  $F = 3964$  MN rispettivamente per i blocchi di ancoraggio Sicilia e Calabria, con un'inclinazione di 15 gradi rispetto all'orizzontale, verso l'alto e verso il mare. Tali forze sono state divise per le lunghezze equivalente per ottenere i carichi unitari da applicare ai modelli equivalenti in 2D del blocco, e sono stati applicati nel nodo di convergenza dei cavi del ponte, come indicato nel progetto di gara.

#### 4.2.4 Strutture terminali

In tutti i modelli, si è presunto che le fondazioni delle strutture terminali si comportino come solidi elastici del peso unitario di  $\gamma = 25$  kN/m<sup>3</sup>, un rapporto di Poisson's  $\nu = 0.15$  ed un modulo di elasticità convenzionale  $E = 4.0 \times 10^4$  MPa. Sulla riva siciliana, il suolo al disotto delle fondazioni delle strutture terminali sarà trattato con iniezioni di cemento a colonne secanti, del diametro nominale di 0,6 m, che si estendono verso il basso fino ad una profondità di 26 m al disotto del livello del suolo, con un rapporto della zona trattata sulla zona totale del suolo pari a  $A_{tr}/A_{tot} = 100\%$ . Le proprietà meccaniche del suolo con iniezioni di cemento al disotto delle fondazioni delle strutture terminali sono gli stessi rispetto a quelle del suolo con iniezioni di cemento al disotto delle fondazioni delle torri (vedi la Tabella 11: Parametri del modello per il suolo con iniezioni di cemento qui sopra) Alle fondazioni delle strutture terminali non è stato applicato nessun altro carico se non il peso proprio.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 4.3 Procedura di analisi

Le analisi numeriche in 2D includono uno stadio statico iniziale, nel quale sono calcolati dapprima uno stato iniziale di sollecitazione corretto e le pressioni interstiziali nella massa del suolo, seguito da uno stato dinamico, nel quale gli scenari dei terremoti sono applicati alla base dei modelli.

Durante lo stadio statico, la base della maglia era fissa, in modo tale da evitare spostamenti in tutte le direzioni, e gli spostamenti orizzontali di tutti i confini verticali erano inibiti. Inoltre, viene introdotto un modulo di taglio secante ridotto per gli strati superiori del suolo, per prendere in considerazione il livello di deformazione di taglio indotto nel suolo durante le sequenze costruttive del ponte. Lo spostamento prodotto dai carichi statici era ben concorde con quello valutato con analisi statiche tridimensionali ad elementi finiti.

Dopo aver calcolato lo stato iniziale di sollecitazione a riposo, gli spostamenti di tutti i nodi sono rimessi a zero, e il modulo di taglio secante viene aggiornato per gli strati del suolo in cui ciò è definito, come funzione della sollecitazione media efficace. Vengono quindi attivati gli elementi strutturali del ponte. I pesi unitari equivalenti delle fondazioni delle torri e delle strutture terminali, e quelli dei blocchi di ancoraggio, sono attivati assieme ai carichi statici applicati alle fondazioni della torre e ai blocchi di ancoraggio. Alla fine dello stadio statico, tutti gli spostamenti sono riportati a zero, e il modulo di rigidità dei suoli è impostato al suo valore di bassa deformazione,  $G_0$ . Quest'ultimo è funzione del nuovo stato di sollecitazione efficace appena calcolato, che tiene in considerazione la modificazione della sollecitazione indotta dalla costruzione del ponte.

Prima di applicare gli input sismici alla base del modello, sono rimossi tutti i vincoli laterali dai confini laterali della maglia. Sui lati verticali della maglia, sono applicate condizioni di contorno a campo libero FLAC. I contorni laterali della griglia principale sono accoppiati a colonne a campo libero mediante ammortizzazioni viscosi, simili ai contorni calmi sviluppati da (Lysmer & Kuhlemeyer, 1969). Lungo queste colonne a campo libero, viene condotta una analisi di risposta sismica monodimensionale, in parallelo con il calcolo della griglia principale. In tal modo, vengono attivate le ammortizzazioni per assorbire l'energia solamente quando il moto della griglia principale differisce da quello delle colonne a campo libero.

L'incremento di tempo nello schema di integrazione esplicita del tempo è  $\Delta t = 5 \times 10^{-6}$  s in tutte le analisi, salvo che in quelle dinamiche della sezione trasversale della torre Sicilia, in cui l'intervallo di tempo è  $\Delta t = 2.5 \times 10^{-6}$  s.

Il modello costitutivo adottato per il suolo dissipa energia mediante i cicli di isteresi. Inoltre, è stata introdotta una quantità moderata di ammortizzazione viscosa (rapporto di ammortizzazione  $D = 4\%$ ), per produrre una qualche dissipazione di energia a piccole deformazioni (vedi capitolo 0).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Per gli elementi strutturali, è stata introdotta una ammortizzazione locale equivalente ad un rapporto di ammortizzazione viscosa  $D = 5\%$ . Le ammortizzazioni locali in FLAC operano aggiungendo o sottraendo massa dai nodi strutturali ad un dato momento durante un ciclo di oscillazione; c'è una generale conservazione della massa, in quanto la quantità aggiunta è eguale alla quantità sottratta ad ogni stadio del calcolo.

Gli input sismici sono stati applicati alla base dei modelli numerici secondo le procedure descritte al capitolo 4.4 L'analisi è stata condotta in condizioni asciutte, e cioè trascurando le potenziali variazioni nella pressione dell'acqua interstiziale che possono essere indotte dal terremoto.

#### 4.4 Input sismico

Nelle analisi dinamiche in 2D sono stati usati due scenari di terremoti, più precisamente lo storico delle accelerazioni che corrispondono alla registrazione N14 (terremoto di Kocaeli 17 Agosto 1999, stazione Arcelik) e alla NZ (Terremoto Neozelandese 03 Sett 2010, stazione Darfield) scelti dal prof. Braga.

(vedi documenti CG3600\_P\_CL\_D\_P\_SB\_A2\_G0\_00\_00\_00\_01\_A\_Analisi e CG3600\_P\_RX\_D\_P\_SB\_A2\_G0\_00\_00\_00\_01\_A\_Azione sismica).

La Figura 55 e la Figura 56 illustrano i tre componenti registrati, due orizzontali ed uno verticale, dei due terremoti, assieme al rispettivo spettro di Fourier. Entrambe le registrazioni sono state prese per essere rappresentative dei movimenti di affioramento  $a_{outcrop}$ .

Gli input sismici da applicare alla base dei modelli sono stati calcolati dagli storici dell'accelerazione di affioramento mediante una deconvoluzione monodimensionale fino alla profondità del bedrock e propagazione verso l'alto fino alla quota che corrisponde alla parte inferiore della maglia, secondo la procedura schematicamente abbozzata alla Figura 57 e alla Figura 58. Il bedrock è stato preso per corrispondere alla sommità del Conglomerato di Pezzo sulla riva siciliana e alla sommità del cristallino sulla riva calabrese. La rigidità di taglio del Conglomerato di Pezzo sulla riva siciliana ad una profondità di 450 m sotto il livello del suolo, ( $G = 5780$  MPa, Faccioli, DT\_ISP\_S\_E\_R1\_001 03 Aprile 2004, DT\_ISP\_S\_E\_R2\_001 22 Ottobre 2004) è sufficientemente alta se confrontata alla rigidità dei depositi superficiali di interesse per le strutture da considerare, quali il bedrock; in ogni modo, la rigidità di questo bedrock elastico viene esplicitamente presa in considerazione nella procedura abbozzata di seguito. Gli strati del suolo inclusi in ogni colonna monodimensionale sono gli stessi di quelli utilizzati nelle analisi 2D sulle posizioni specificate nella Figura 57 e nella Figura 58. Sulla riva siciliana, mentre la griglia di calcolo bidimensionale si estende fino alla sommità dei depositi continentali, la colonna

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

monodimensionale utilizzata per ottenere gli storici dell'accelerazione alla base del modello è invece più profonda, e raggiunge la sommità del Conglomerato di Pezzo.

Per soddisfare la condizione di zero sollecitazione di taglio alla superficie libera, le ampiezze delle accelerazioni che si propagano verso l'alto e verso il basso alla superficie del suolo debbono essere uguali. Quindi, il movimento di propagazione ad onda verso l'alto nel bedrock  $a_{l,bedrock}$  può essere calcolato come un mezzo del movimento di affioramento:

$$a_{l,bedrock}(t) = 0.5 \cdot a_{outcrop}(t) \quad (8)$$

L'accelerazione che si propaga verso l'alto può quindi essere convertita in un'onda di sollecitazione (Joyner & Chen 1975):

$$\begin{aligned} \tau(t) &= 2\rho V_s v_{x,l}(t) \\ \sigma(t) &= 2\rho V_p v_{y,l}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

In cui  $\rho = 2 \text{ Mg/m}^3$  è la densità di massa,  $V_s$  e  $V_p$  sono le velocità d'onda di compressione e di taglio del bedrock, e  $v_{x,l}$  e  $v_{y,l}$  sono i componenti orizzontale e verticale della velocità di spostamento incidente calcolata integrando l'accelerazione che si propaga verso l'alto.

Oltre agli storici delle sollecitazioni, vengono applicati i contorni calmi sul fondo delle colonne monodimensionali, i quali consistono in ammortizzazioni legate al confine in modo indipendente nelle direzioni normale e tangenziale. Le ammortizzazioni forniscono trazioni viscosse normali e di taglio:

$$\begin{aligned} t_s &= -\rho V_s v_x \\ t_n &= -\rho V_p v_y \end{aligned} \quad (10)$$

dove  $v_x$  e  $v_y$  sono i componenti orizzontali e verticali della velocità al contorno inferiore. L'applicazione simultanea degli storici delle sollecitazioni e dei contorni calmi al fondo delle colonne monodimensionali permettono di prendere in considerazione la rigidità finita del bedrock.

Sia sulla riva siciliana che su quella calabrese, la deconvoluzione e la propagazione verso l'alto sono state eseguite due volte per ogni terremoto, combinando la componente verticale sia con il componente orizzontale massimo ( $H_{max}$ ) che con quello minimo ( $H_{min}$ ) dell'accelerazione (vedi Tabella 14: Deconvoluzione monodimensionale e analisi della propagazione verso l'alto) Le accelerazioni registrate sono state filtrate utilizzando un filtro passa-basso Butterworth a 15 Hz, per la compatibilità con le dimensioni degli elementi della maglia, ed è stata applicata una correzione quadratica di riferimento prima che questi fossero convertiti in storici di sollecitazione. Per ridurre il tempo di calcolo per il terremoto neozelandese NZ, con una durata totale di circa 82 s, nelle analisi numeriche a 2D sono state considerate solamente le accelerazioni comprese fra 15 s e 70 s della registrazione originale.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	<i>Codice documento</i> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

Le accelerazioni verticali ed orizzontali calcolate nelle analisi numeriche monodimensionali ad una profondità che corrisponde alla base del modello numerico ( $z = 220$  m sotto il livello del suolo per la riva siciliana e  $z = 370$  m sotto il livello del suolo per la riva calabrese) sono state utilizzate come i movimenti di input per le analisi numeriche a 2D. Le accelerazioni verticale calcolate alla base del modello che combina l'accelerazione verticale sia con  $H_{max}$  che con  $H_{min}$  sono praticamente identiche. Quindi, gli storici delle accelerazioni verticali ottenute dalle analisi 1, 3, 5 e 7 nella tabella 14 sono considerate come il movimento di input verticale per le analisi in 2D, sia in direzione longitudinale che in direzione trasversale. La Figura 59 e la Figura 60 confrontano gli storici dell'accelerazione di input con le registrazioni originali dei movimenti di affioramento.

Tabella 14: Deconvoluzione monodimensionale e analisi della propagazione verso l'alto

Analisi della deconvoluzione	riva	Terremoto di progetto	Accelerazioni e orizzontale	Accelerazione verticale
1	Sicilia	N14	$H_{max}$	V
2	Sicilia	N14	$H_{min}$	V
3	Sicilia	NZ	$H_{max}$	V
4	Sicilia	NZ	$H_{min}$	V
5	Calabria	N14	$H_{max}$	V
6	Calabria	N14	$H_{min}$	V
7	Calabria	NZ	$H_{max}$	V
8	Calabria	NZ	$H_{min}$	V

Le registrazioni degli input sismici sono state applicate alla base dei modelli in 2D utilizzando le quattro combinazioni riassunte alla Tabella 15: Combinazioni degli input sismici negli stadi dinamici delle analisi numeriche a 2D. Un segno positivo dell'accelerazione orizzontale indica che questa è positiva verso Sud e verso Est, rispettivamente nelle sezioni longitudinali e trasversali.

Tabella 15: Combinazioni degli input sismici negli stadi dinamici delle analisi numeriche a 2D

combinazione	Longitudinale	Trasversale	Verticale
1	$H_{max}$	$H_{min}$	V
2	$-H_{max}$	$-H_{min}$	V

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>

3	$H_{\min}$	$H_{\max}$	V
4	$-H_{\min}$	$-H_{\max}$	V

## 4.5 Risultati delle analisi

I risultati delle analisi di interazione suolo-struttura sono stati espressi in termini di storici di spostamenti e di rotazioni su punti selezionati nei blocchi di ancoraggio, nelle fondazioni delle torri e nelle strutture terminali. Questi storici costituiscono l'input per analisi strutturali dinamiche aggiuntive del ponte.

I principali risultati delle analisi sono riassunti alle **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** a 19 e dalla Figura 61 alla Figura 66. La **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e la **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riuniscono gli spostamenti finali e le rotazioni delle fondazioni del ponte, per le due registrazioni sismiche N14 e NZ e per i quattro diversi modi in cui ogni registrazione può essere applicata ai contorni del modello (combinazioni da 1 a 4, vedi capitolo 0) Il segno degli spostamenti e delle rotazioni è coerente con gli assi di riferimento delle griglie di calcolo (rotazioni positive antiorarie)

Tali spostamenti e rotazioni finali sono tracciati nei grafici a barre dalla Figura 61 alla Figura 64 Le rotazioni sul piano trasversale sono sempre trascurabili e non sono stati tracciati nei grafici a barre. Gli spostamenti longitudinali permanenti e le rotazioni in queste figure sono sempre diretti verso il mare.

Come commento generale, i massimi spostamenti permanenti orizzontali nella direzione longitudinale si verificano sul lato Calabria, mentre i massimi spostamenti orizzontali in direzione trasversale avvengono sulla riva siciliana. L'ordine di grandezza degli spostamenti orizzontali finali indotta da due registrazioni sismiche è comparabile. Le fondazioni delle torri si muovono verso il mare di circa 20 mm (Sicilia) a 30 mm (Calabria), le rotazioni corrispondenti sul piano longitudinale essendo di circa 0,005 gradi (Sicilia) e di 0,015 gradi (Calabria). Gli spostamenti orizzontali delle fondazioni della torre Sicilia in direzione trasversale sono di circa 16 mm, mentre quelli della torre Calabria sono inferiori a 2 mm.

I blocchi di ancoraggio subiscono spostamenti permanenti che sono sempre inferiori a 10 mm (Sicilia) e a 20 mm (Calabria) in direzione longitudinale. Gli spostamenti permanenti trasversali del blocco ancoraggio Sicilia sono inferiori a 4 mm, mentre quelli del blocco ancoraggio Calabria sono trascurabili. Gli assestamenti indotti dal terremoto sono maggiori per le fondazioni della torre Calabria e la struttura terminale Sicilia, ma non superano i 10 mm.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

In genere, le fondazioni della struttura terminale mostrano spostamenti permanenti che sono in qualche modo intermedi fra quelli delle torri e quelli dei blocchi di ancoraggio. Un'eccezione è rappresentata dalla rotazione longitudinale della fondazione della struttura terminale Sicilia, che è la maggiore sul lato siciliano, e raggiunge circa 0,01 gradi.

La **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e la **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riportano le massime accelerazioni calcolate nelle fondazioni del ponte durante i terremoti. Queste massime accelerazioni sono tracciate nei grafici a barre della Figura 65 e della Figura 66, nelle quali sono anche indicate, per confronto, le massime accelerazioni applicate alla base delle griglie di calcolo. Da notare che le analisi di deconvoluzione producono accelerazioni massime più piccole alla base delle griglie di calcolo della Sicilia.

L'esame della Figura 65 e della Figura 66 rivela che le amplificazioni più significative sono calcolate sul lato calabrese per entrambe le registrazioni sismiche. Al contrario, le accelerazioni sul lato Sicilia sopportano una qualche de-amplificazione, in particolare per la registrazione sismica NZ. Quindi, l'accelerazione orizzontale massima nelle fondazioni Calabria raggiunge circa 0,4-0,45 g per la registrazione NZ, mentre l'accelerazione orizzontale sul lato Sicilia è sempre inferiore a 0,3 g.

La registrazione sismica N14 è caratterizzata da accelerazioni di cresta significativamente inferiori rispetto a quelle della registrazione NZ, e questo si riflette nei valori inferiori delle accelerazioni calcolate nelle fondazioni del ponte. Eccezionalmente, la registrazione sismica N14 è ancora in grado di produrre spostamenti simili a quelli indotti dalla registrazione NZ, probabilmente per il suo contenuto di frequenza, più ricco di frequenze basse.

L'accelerazione verticale è significativamente amplificata per tutti gli elementi della fondazione, e tale amplificazione è simile sui lati Sicilia e Calabria.

La Figura 67 e la Figura 90 illustrano una selezione degli storici calcolati, in termini sia di accelerazioni che di spostamenti. Gli storici di accelerazione sono sempre indicati assieme al rispettivo spettro di Fourier. Più specificatamente, questa figura illustra gli storici di accelerazione e spostamento solamente in direzione longitudinale; gli storici Calabria si riferiscono alla combinazione 1, mentre gli storici Sicilia si riferiscono alla combinazione 2.

Spostamenti permanenti sono accumulati nei primi 10 s (per la registrazione NZ) e nei primi 5-6s (per la registrazione N14) di movimento forte. Il confronto dello spettro di Fourier sulle fondazioni e alla base della griglia mostrano che sul lato Calabria amplificazioni importanti avvengono a frequenze di circa 3 Hz, e ciò è coerente con il rilevamento che i maggiori spostamenti delle fondazioni Calabria sono prodotte dalla registrazione NZ, che è più ricca di queste frequenze Al

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno- fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

contrario, il lato Sicilia amplifica le frequenze più piccole (1 – 1.5 Hz), che caratterizzano per la maggior parte la registrazione N14, e ciò può giustificare gli spostamenti significativi che questa registrazione è in grado di produrre anche con le piccole accelerazioni di cresta illustrate alla Figura 65

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
		Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0

Tabella 16. Spostamenti e rotazioni alla fine del terremoto N14

location	comb.	shore	horizontal displacements		vertical displacements		rotations	
			longitudinal mm	transversal mm	longitudinal mm	transversal mm	longitudinal °	transversal °
block	1	sicilia	-6.9	-1.6	-0.9	0.7	0.0015	0.0003
tower (column sx)	1	sicilia	-6.4	0.2	-1.7	-1.6	0.0027	0.0018
tower (column dx)	1	sicilia	-6.4	0.7	-1.7	-0.1	0.0027	0.0003
terminal struct. sx	1	sicilia	-11.8	1.6	-0.1	-1.4	0.0043	0.0009
terminal struct. dx	1	sicilia	-9.9	1.6	-1.4	-1.4	-0.0004	0.0009
block	1	calabria	-7.0	0.2	1.1	-0.3	-0.0005	0.0000
tower (column sx)	1	calabria	-30.7	1.8	-8.5	0.0	0.0113	0.0001
tower (column dx)	1	calabria	-30.7	1.8	-8.5	0.2	0.0113	0.0000
terminal struct. sx	1	calabria	-10.3	0.6	-0.6	0.0	0.0009	0.0000
terminal struct. dx	1	calabria	-9.4	0.6	-0.1	0.0	0.0008	0.0000
block	2	sicilia	6.4	1.6	0.5	0.7	-0.0012	0.0003
tower (column sx)	2	sicilia	18.1	-0.2	-3.1	-1.6	0.0017	0.0018
tower (column dx)	2	sicilia	18.1	-0.7	-3.1	-0.1	0.0017	0.0003
terminal struct. sx	2	sicilia	7.5	-1.6	-1.3	-1.4	0.0060	0.0009
terminal struct. dx	2	sicilia	13.6	-1.6	-2.1	-1.4	-0.0099	0.0009
block	2	calabria	-2.8	-0.2	-0.6	-0.3	-0.0003	0.0000
tower (column sx)	2	calabria	-10.8	-1.8	-2.8	0.0	0.0035	0.0001
tower (column dx)	2	calabria	-10.8	-1.8	-2.8	0.2	0.0035	0.0000
terminal struct. sx	2	calabria	-3.3	-0.6	-1.4	0.0	0.0003	0.0000
terminal struct. dx	2	calabria	-2.9	-0.6	-1.2	0.0	0.0005	0.0000
block	3	sicilia	0.9	-3.8	2.0	1.2	0.0014	-0.0007
tower (column sx)	3	sicilia	5.8	-16.3	0.3	-2.3	-0.0038	0.0009
tower (column dx)	3	sicilia	5.8	-16.1	0.3	-1.3	-0.0038	0.0011
terminal struct. sx	3	sicilia	9.5	-10.0	0.6	-1.2	-0.0039	0.0003
terminal struct. dx	3	sicilia	7.9	-10.0	-1.1	-1.2	-0.0005	0.0003
block	3	calabria	-4.1	0.5	0.6	0.4	-0.0001	0.0000
tower (column sx)	3	calabria	-10.0	1.3	-1.9	0.0	0.0027	-0.0002
tower (column dx)	3	calabria	-10.0	1.3	-1.9	-0.2	0.0027	-0.0003
terminal struct. sx	3	calabria	-3.8	-0.4	-0.4	0.3	0.0003	0.0000
terminal struct. dx	3	calabria	-3.5	-0.4	-0.2	0.3	0.0004	0.0000
block	4	sicilia	2.3	3.8	0.6	1.2	0.0007	-0.0007
tower (column sx)	4	sicilia	-3.5	16.3	1.1	-2.3	-0.0037	0.0009
tower (column dx)	4	sicilia	-3.5	16.1	1.1	-1.3	-0.0037	0.0011
terminal struct. sx	4	sicilia	-2.8	10.0	0.3	-1.2	0.0027	0.0003
terminal struct. dx	4	sicilia	-1.8	10.0	0.5	-1.2	-0.0012	0.0003
block	4	calabria	-3.9	-0.2	0.1	0.4	0.0000	0.0000
tower (column sx)	4	calabria	-10.2	-1.3	-2.7	0.0	0.0038	-0.0002
tower (column dx)	4	calabria	-10.2	-1.3	-2.7	-0.2	0.0038	-0.0003
terminal struct. sx	4	calabria	-3.4	0.4	-0.1	0.3	0.0004	0.0000
terminal struct. dx	4	calabria	-3.1	0.4	0.0	0.3	0.0001	0.0000

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
		<b>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</b>	<i>Codice documento</i> <b>PB0032_F0_ITA.doc</b>	<i>Rev</i> <b>F0</b>

Tabella 17: Spostamenti e rotazioni alla fine del terremoto N14

location	comb.	shore	horizontal displacements		vertical displacements		rotations	
			longitudinal mm	transversal mm	longitudinal mm	transversal mm	longitudinal °	transversal °
block	1	sicilia	6.1	19.0	4.0	4.4	-0.0029	-0.0006
tower (column sx)	1	sicilia	20.3	-0.2	1.2	1.6	-0.0014	-0.0008
tower (column dx)	1	sicilia	20.3	0.3	1.2	0.5	-0.0014	-0.0005
terminal struct. sx	1	sicilia	20.6	-8.7	6.8	0.9	0.0022	0.0014
terminal struct. dx	1	sicilia	16.6	-8.7	3.0	0.9	0.0078	0.0014
block	1	calabria	-18.1	3.3	-0.5	0.5	-0.0027	0.0001
tower (column sx)	1	calabria	-28.4	0.4	-8.7	-0.7	0.0144	0.0000
tower (column dx)	1	calabria	-28.4	0.3	-8.7	-0.9	0.0144	0.0001
terminal struct. sx	1	calabria	-8.2	-1.7	0.3	-0.5	0.0015	0.0000
terminal struct. dx	1	calabria	-7.3	-1.7	0.6	-0.5	0.0010	0.0000
block	2	sicilia	-3.2	-19.0	-2.8	4.4	-0.0043	-0.0006
tower (column sx)	2	sicilia	7.7	0.2	0.5	1.6	-0.0031	-0.0008
tower (column dx)	2	sicilia	7.7	-0.3	0.5	0.5	-0.0031	-0.0005
terminal struct. sx	2	sicilia	-5.0	8.7	-1.6	0.9	-0.0021	0.0014
terminal struct. dx	2	sicilia	-1.9	8.7	-2.5	0.9	-0.0010	0.0014
block	2	calabria	-21.3	-4.6	0.0	0.4	-0.0035	0.0000
tower (column sx)	2	calabria	-24.7	-0.4	-7.3	-0.7	0.0118	0.0000
tower (column dx)	2	calabria	-24.7	-0.3	-7.3	-0.9	0.0118	0.0001
terminal struct. sx	2	calabria	-6.7	1.7	-0.2	-0.5	0.0010	0.0000
terminal struct. dx	2	calabria	-5.9	1.7	0.5	-0.5	0.0014	0.0000
block	3	sicilia	18.0	7.5	5.1	4.1	-0.0064	0.0003
tower (column sx)	3	sicilia	42.6	19.4	-2.6	0.7	-0.0057	-0.0001
tower (column dx)	3	sicilia	42.6	19.5	-2.6	1.0	-0.0057	0.0002
terminal struct. sx	3	sicilia	36.0	16.2	7.6	0.1	0.0069	0.0003
terminal struct. dx	3	sicilia	39.5	16.2	8.2	0.1	-0.0066	0.0003
block	3	calabria	-7.0	-0.1	3.0	0.6	-0.0014	0.0000
tower (column sx)	3	calabria	-14.6	-3.1	-6.2	0.7	0.0065	0.0000
tower (column dx)	3	calabria	-14.6	-3.1	-6.2	0.4	0.0065	-0.0005
terminal struct. sx	3	calabria	-3.3	-2.1	-1.0	-0.2	0.0004	-0.0001
terminal struct. dx	3	calabria	-2.3	-2.1	-1.1	-0.2	-0.0002	-0.0001
block	4	sicilia	-21.5	-7.5	2.3	4.1	0.0006	0.0003
tower (column sx)	4	sicilia	-13.1	-19.4	3.1	0.7	0.0012	-0.0001
tower (column dx)	4	sicilia	-13.1	-19.5	3.1	1.0	0.0012	0.0002
terminal struct. sx	4	sicilia	-18.9	-16.2	5.6	0.1	0.0043	0.0003
terminal struct. dx	4	sicilia	-17.2	-16.2	4.0	0.1	-0.0029	0.0003
block	4	calabria	-17.3	-1.0	0.9	0.2	-0.0017	0.0000
tower (column sx)	4	calabria	-20.7	3.1	-6.6	0.7	0.0082	0.0000
tower (column dx)	4	calabria	-20.7	3.1	-6.6	0.4	0.0082	-0.0005
terminal struct. sx	4	calabria	-9.0	2.1	0.7	-0.2	0.0011	-0.0001
terminal struct. dx	4	calabria	-8.0	2.1	0.9	-0.2	0.0000	-0.0001

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
		<b>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</b>	<i>Codice documento</i> <b>PB0032_F0_ITA.doc</b>	<i>Rev</i> <b>F0</b>

Tabella 18: Accelerazioni massime calcolate durante il terremoto N14

location	comb.	shore	max horiz. acceleration		max vert. acceleration	
			longitudinal	transversal	longitudinal	transversal
			g	g	g	g
base	1	sicilia	0.122	0.094	0.071	0.071
block	1	sicilia	0.139	0.098	0.110	0.100
tower (column sx)	1	sicilia	0.139	0.093	0.116	0.107
tower (column dx)	1	sicilia	0.139	0.081	0.116	0.105
terminal struct. sx	1	sicilia	0.159	0.083	0.137	0.127
terminal struct. dx	1	sicilia	0.191	0.083	0.141	0.127
base	1	calabria	0.178	0.104	0.084	0.084
block	1	calabria	0.216	0.107	0.112	0.124
tower (column sx)	1	calabria	0.251	0.174	0.121	0.084
tower (column dx)	1	calabria	0.251	0.163	0.121	0.081
terminal struct. sx	1	calabria	0.229	0.167	0.119	0.101
terminal struct. dx	1	calabria	0.224	0.167	0.125	0.101
base	2	sicilia	0.122	0.094	0.071	0.071
block	2	sicilia	0.151	0.098	0.090	0.100
tower (column sx)	2	sicilia	0.167	0.093	0.137	0.107
tower (column dx)	2	sicilia	0.167	0.081	0.137	0.105
terminal struct. sx	2	sicilia	0.154	0.083	0.156	0.127
terminal struct. dx	2	sicilia	0.189	0.083	0.132	0.127
base	2	calabria	0.178	0.104	0.084	0.084
block	2	calabria	0.218	0.107	0.113	0.124
tower (column sx)	2	calabria	0.259	0.174	0.099	0.084
tower (column dx)	2	calabria	0.259	0.163	0.099	0.081
terminal struct. sx	2	calabria	0.236	0.167	0.106	0.101
terminal struct. dx	2	calabria	0.222	0.167	0.110	0.101
base	3	sicilia	0.094	0.122	0.071	0.071
block	3	sicilia	0.121	0.130	0.110	0.093
tower (column sx)	3	sicilia	0.120	0.100	0.123	0.109
tower (column dx)	3	sicilia	0.120	0.097	0.123	0.094
terminal struct. sx	3	sicilia	0.159	0.095	0.136	0.119
terminal struct. dx	3	sicilia	0.143	0.095	0.133	0.119
base	3	calabria	0.104	0.178	0.084	0.084
block	3	calabria	0.146	0.200	0.100	0.119
tower (column sx)	3	calabria	0.176	0.237	0.096	0.080
tower (column dx)	3	calabria	0.176	0.244	0.096	0.092
terminal struct. sx	3	calabria	0.169	0.279	0.106	0.110
terminal struct. dx	3	calabria	0.171	0.279	0.105	0.110
base	4	sicilia	0.094	0.122	0.071	0.071
block	4	sicilia	0.126	0.130	0.103	0.093
tower (column sx)	4	sicilia	0.115	0.100	0.133	0.109
tower (column dx)	4	sicilia	0.115	0.097	0.133	0.094
terminal struct. sx	4	sicilia	0.143	0.095	0.142	0.119
terminal struct. dx	4	sicilia	0.175	0.095	0.153	0.119
base	4	calabria	0.104	0.178	0.084	0.084
block	4	calabria	0.154	0.199	0.136	0.118
tower (column sx)	4	calabria	0.163	0.237	0.083	0.080
tower (column dx)	4	calabria	0.163	0.244	0.083	0.092
terminal struct. sx	4	calabria	0.177	0.279	0.087	0.110
terminal struct. dx	4	calabria	0.171	0.279	0.084	0.110

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</b>		<i>Codice documento</i> <b>PB0032_F0_ITA.doc</b>	<i>Rev</i> <b>F0</b>	<i>Data</i> <b>20/06/2011</b>

Tabella 19: Accelerazioni massime calcolate durante il terremoto NZ

location	comb.	shore	max horiz. acceleration		max vert. acceleration	
			longitudinal	transversal	longitudinal	transversal
			g	g	g	g
base	1	sicilia	0.226	0.207	0.096	0.096
block	1	sicilia	0.182	0.166	0.143	0.184
tower (column sx)	1	sicilia	0.169	0.132	0.169	0.171
tower (column dx)	1	sicilia	0.169	0.142	0.169	0.156
terminal struct. sx	1	sicilia	0.228	0.128	0.209	0.195
terminal struct. dx	1	sicilia	0.273	0.128	0.178	0.195
base	1	calabria	0.306	0.287	0.134	0.109
block	1	calabria	0.387	0.217	0.214	0.182
tower (column sx)	1	calabria	0.457	0.305	0.223	0.186
tower (column dx)	1	calabria	0.457	0.330	0.223	0.198
terminal struct. sx	1	calabria	0.423	0.400	0.181	0.271
terminal struct. dx	1	calabria	0.422	0.400	0.170	0.271
base	2	sicilia	0.226	0.207	0.096	0.096
block	2	sicilia	0.175	0.166	0.155	0.184
tower (column sx)	2	sicilia	0.222	0.132	0.180	0.171
tower (column dx)	2	sicilia	0.222	0.142	0.180	0.156
terminal struct. sx	2	sicilia	0.242	0.128	0.183	0.195
terminal struct. dx	2	sicilia	0.231	0.128	0.188	0.195
base	2	calabria	0.306	0.287	0.134	0.109
block	2	calabria	0.385	0.221	0.161	0.185
tower (column sx)	2	calabria	0.415	0.305	0.225	0.186
tower (column dx)	2	calabria	0.415	0.330	0.225	0.198
terminal struct. sx	2	calabria	0.365	0.400	0.227	0.271
terminal struct. dx	2	calabria	0.360	0.400	0.207	0.271
base	3	sicilia	0.207	0.226	0.096	0.096
block	3	sicilia	0.217	0.167	0.178	0.183
tower (column sx)	3	sicilia	0.187	0.134	0.173	0.166
tower (column dx)	3	sicilia	0.187	0.146	0.173	0.196
terminal struct. sx	3	sicilia	0.241	0.137	0.200	0.193
terminal struct. dx	3	sicilia	0.215	0.137	0.200	0.193
base	3	calabria	0.306	0.287	0.134	0.109
block	3	calabria	0.280	0.237	0.163	0.184
tower (column sx)	3	calabria	0.363	0.404	0.240	0.201
tower (column dx)	3	calabria	0.363	0.401	0.240	0.201
terminal struct. sx	3	calabria	0.398	0.456	0.196	0.266
terminal struct. dx	3	calabria	0.358	0.456	0.177	0.266
base	4	sicilia	0.207	0.226	0.096	0.096
block	4	sicilia	0.216	0.167	0.128	0.183
tower (column sx)	4	sicilia	0.210	0.134	0.181	0.166
tower (column dx)	4	sicilia	0.210	0.146	0.181	0.196
terminal struct. sx	4	sicilia	0.237	0.137	0.205	0.193
terminal struct. dx	4	sicilia	0.224	0.137	0.196	0.193
base	4	calabria	0.306	0.287	0.134	0.109
block	4	calabria	0.287	0.244	0.193	0.186
tower (column sx)	4	calabria	0.395	0.404	0.215	0.201
tower (column dx)	4	calabria	0.395	0.401	0.215	0.201
terminal struct. sx	4	calabria	0.329	0.456	0.167	0.266
terminal struct. dx	4	calabria	0.329	0.456	0.176	0.266

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

## 5 RIFERIMENTI

Baldi, G. Bellotti, R. Ghionna, V., Jamiolkowski, M. and Pasqualini, E. (1985). *Penetration Resistance and Liquefaction of Sands*. Proc. XI ICSMFE, San Francisco, V.4, pp.1891-1896

Bardet J.P., Ichii, K., and Lin, C.H. (2000). *EERA. A computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of layered soil deposits*. University of Southern California, Dept. of Civil Engineering.

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

Croce P., Flora A., Modoni G. (2004) *Jet grouting. Tecnica, progetto e controllo*. Hevelius Edizioni, Benevento

Cubrinovski M. e Ishihara K. (1999). *Empirical Correlation between SPT N-value and Relative Density of Sandy Soils*. Soils and Foundations. 5: 61-71.

Gazetas G. (1991). *Foundation vibrations*. In: Foundation Engineering Handbook, 2<sup>nd</sup> edition, H.-Y. Fang, ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 553-593.

Gerrard C.M. & Harrison W.J. (1970) *Circular loads applied to a cross-anisotropic half space*, CSIRO, Aust. Div. App. Geomech., Tech. Paper No. 8

Itasca (2005). *FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua v.5.0 User's Manual*. ITASCA, USA.

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

Joyner, W.B., and Chen, A.T.F. (1975). *Calculation of nonlinear ground response in earthquakes*. Bulletin of the Seismological Society of America, 65(5), 1315-1336.

Lysmer J., Kuhlemeyer R.L. (1969) *Finite dynamic model for infinite media*. Journal of Engineering Mechanics, 95(EM4), 859-877.

Mansur, C.I. e Kaufman, R.I. (1962). *Dewatering*, Cap.3 in Foundation Engineering. McGraw Hill, N.Y.

Masing, G. (1926). *Eigenspannungen und Verfertigung bim Messing*. Proceedings 2nd Int. Congress on Applied Mechanics, Zurich.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Mesri G. (1993). *Aging of soils*. Aging Symp., Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, Mexico City, Mexico, 1, 1-29

Schmertmann, J.H. (1978). *Guidelines for Cone Penetration Test Performance and Design*. Report HWA-TS-78-209, US Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B. (1972). *SHAKE, a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*. Report: Earthquake Engineering research Center, University of California, Berkeley.

Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1970). *Soil moduli and damping factors for dynamic analysis*. Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley.

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

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

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>		
<p align="center">Analisi di interazione dinamica terreno- fondazione</p>		<p><i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc</p>	<p><i>Rev</i> F0</p>	<p><i>Data</i> 20/06/2011</p>

## 6 FIGURE

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
		Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento PB0032_F0_ITA.doc	Rev F0

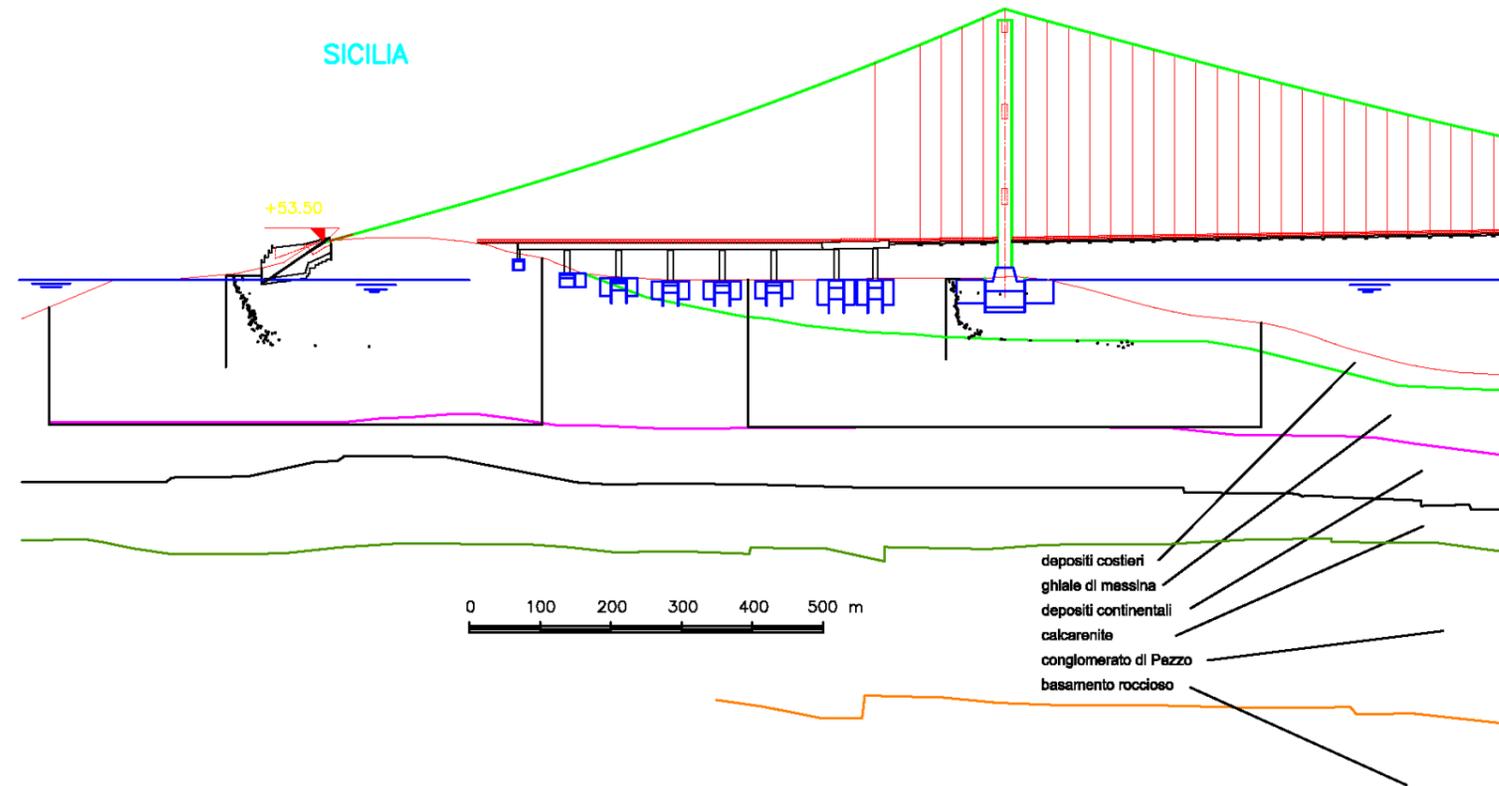


Figura 1: Profilo del suolo sulla riva siciliana dello Stretto di Messina

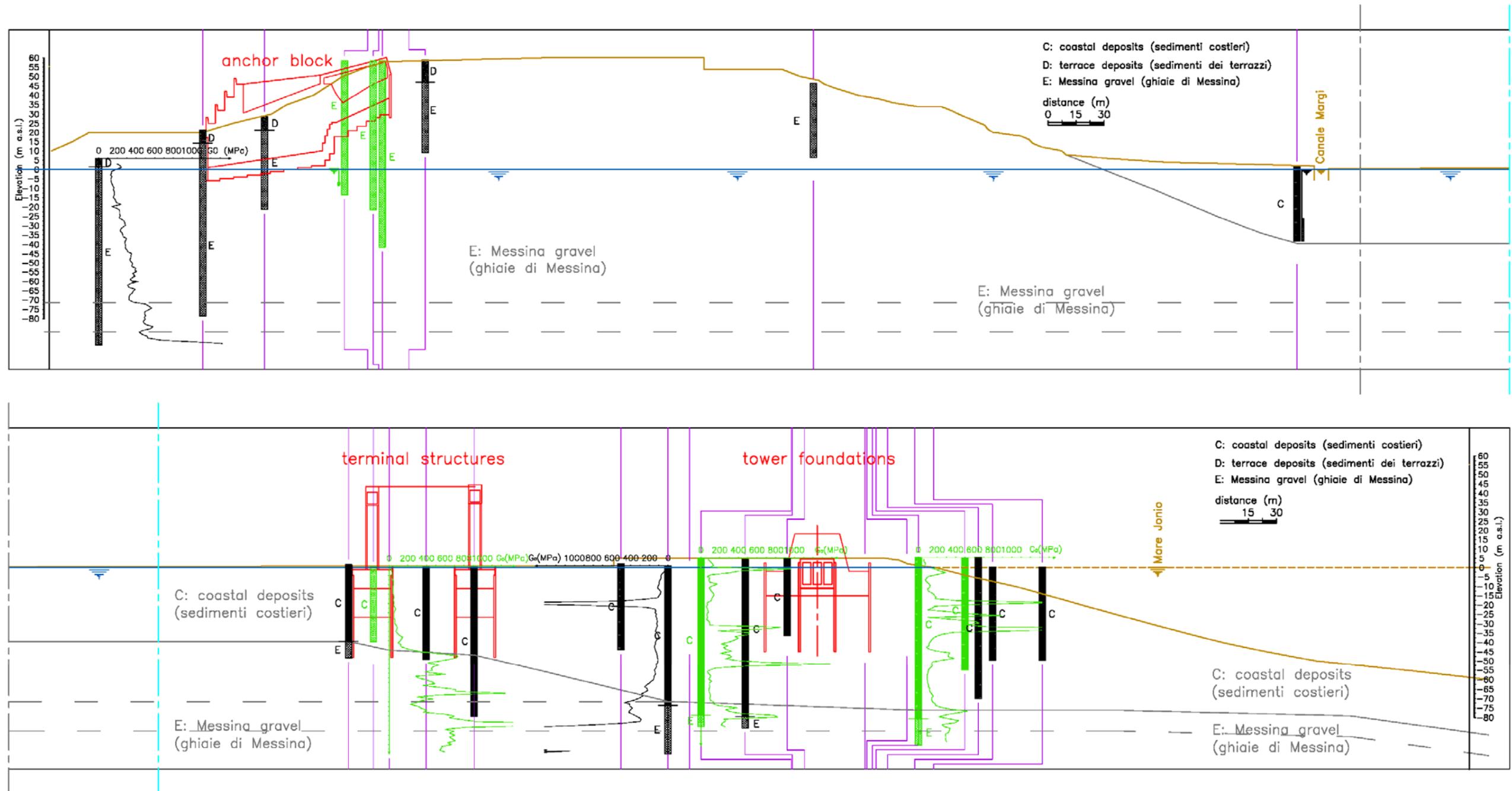


Figura 2: riva siciliana –sezione longitudinale: vista globale

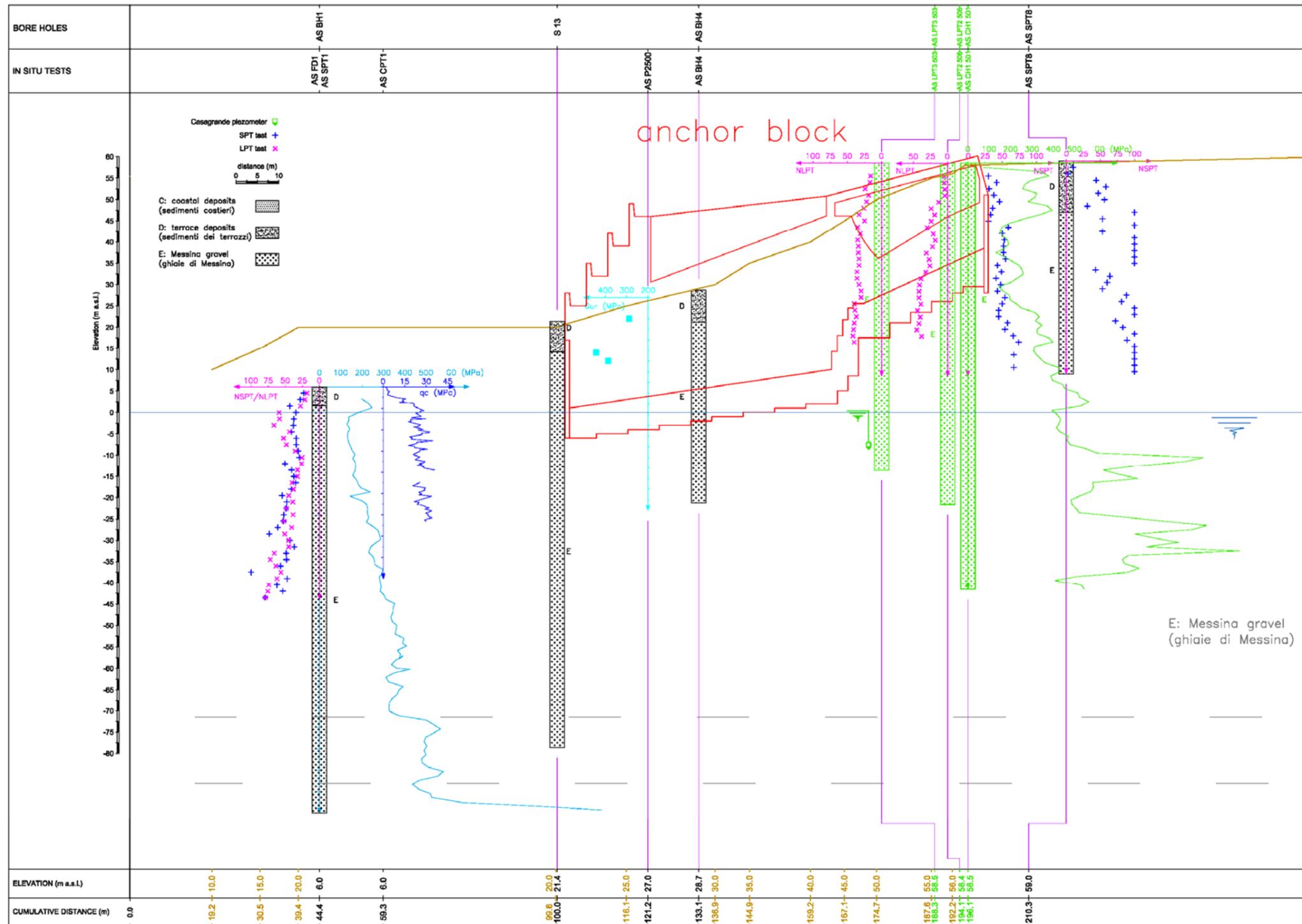


Figura 3: Riva siciliana –sezione longitudinale presso il blocco di ancoraggio

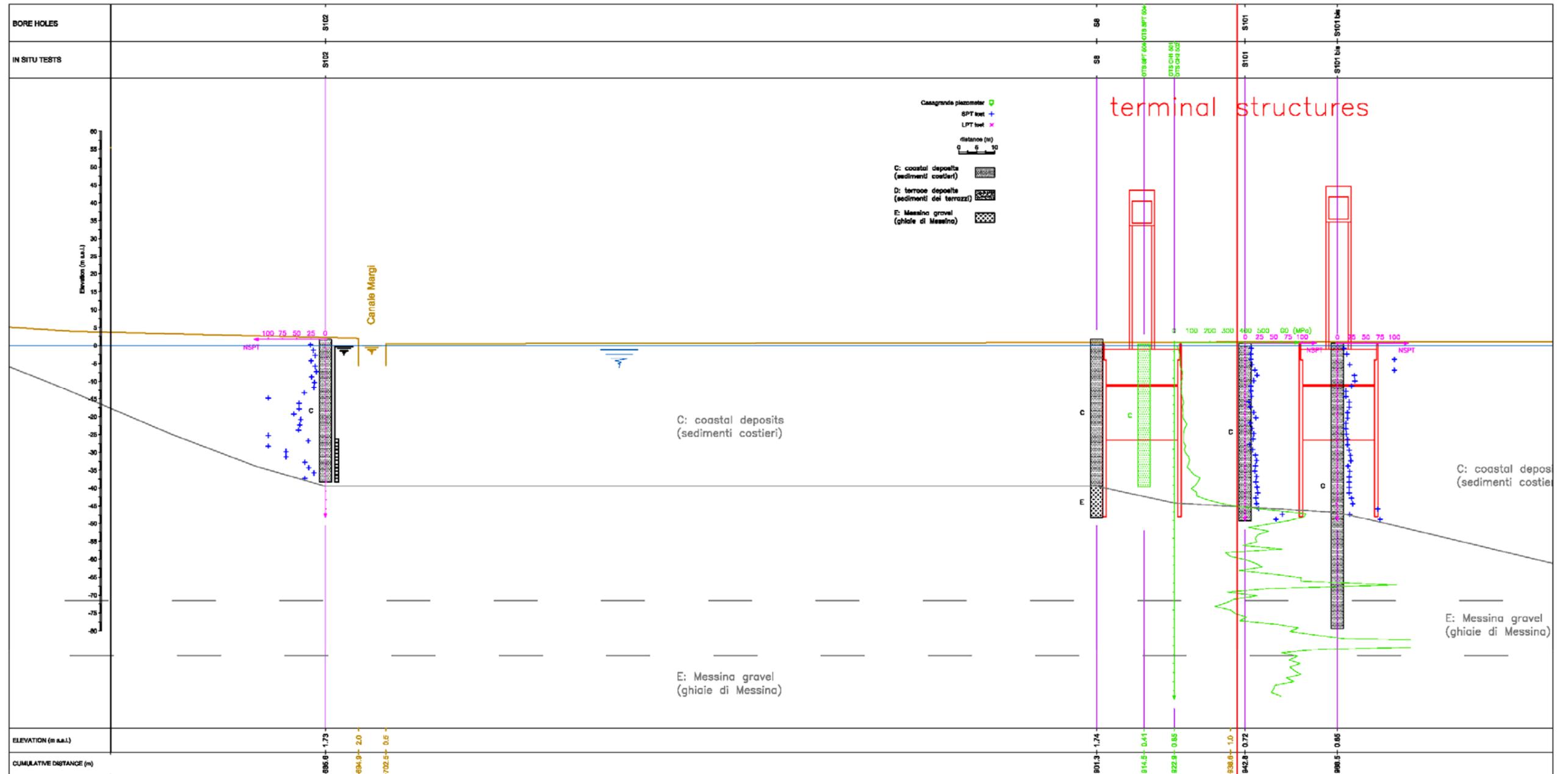


Figura 4: riva siciliana – sezione longitudinale presso le strutture terminali

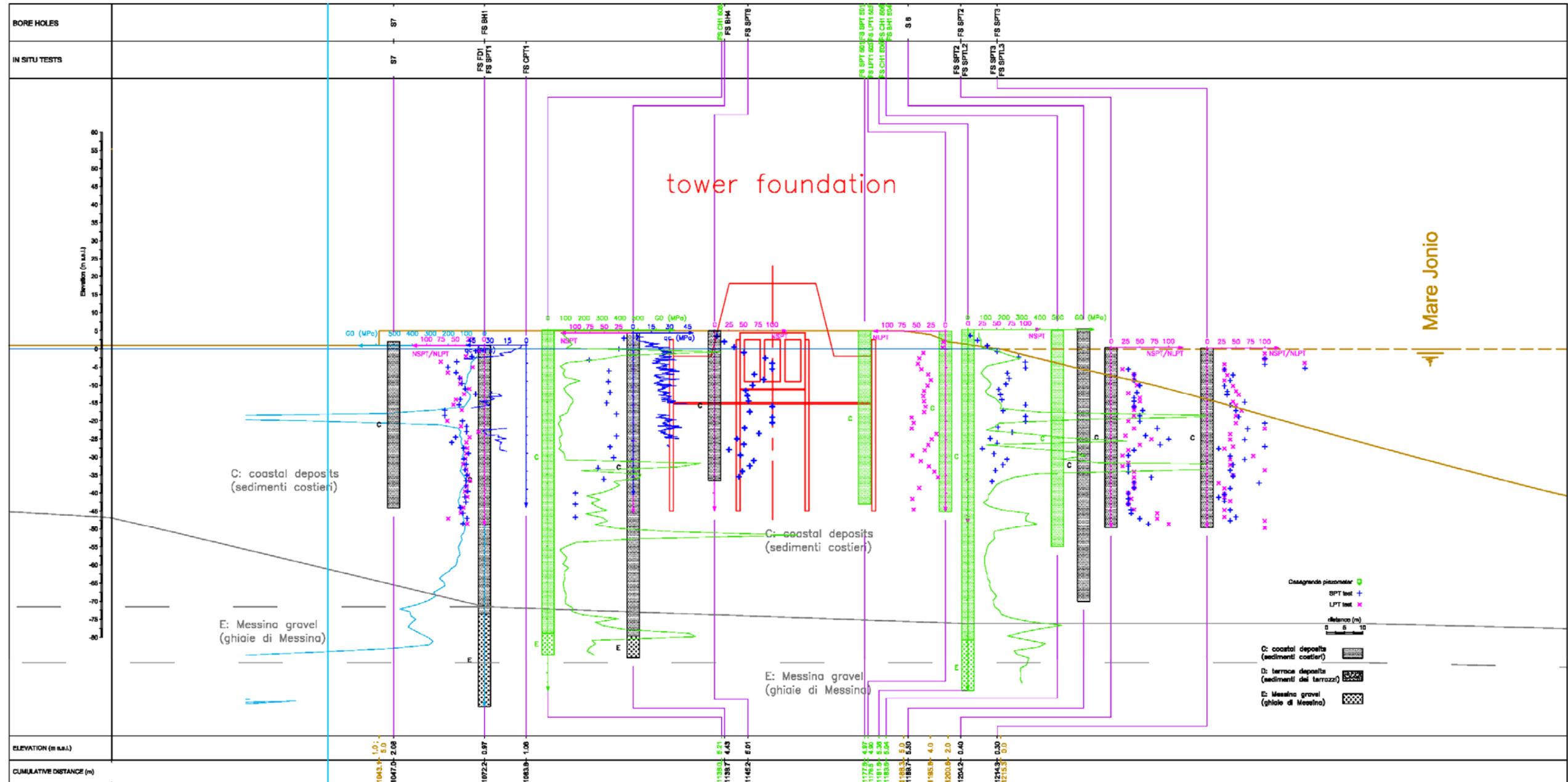


Figura 5: riva siciliana – seziona longitudinale presso la fondazione della torre

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011	

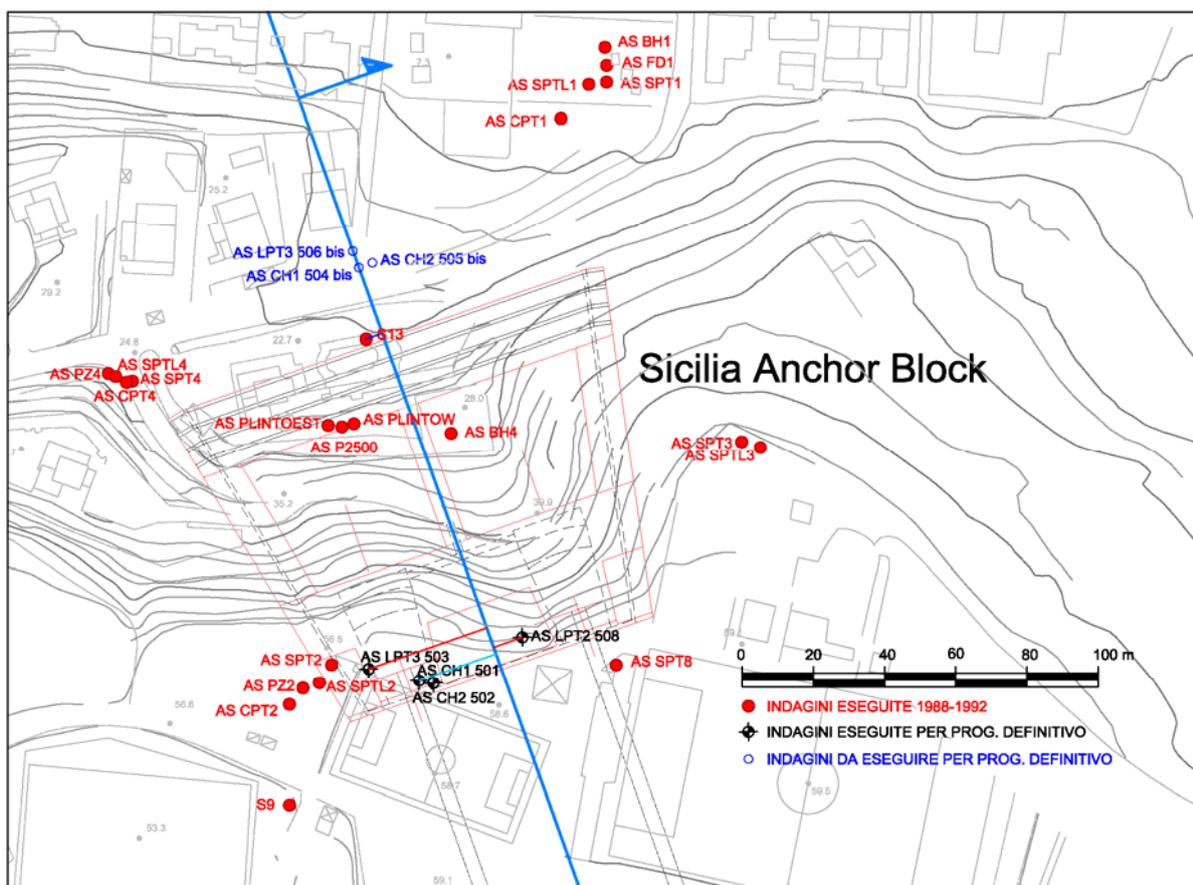


Figura 6: riva siciliana –vista in pianta del blocco di ancoraggio

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

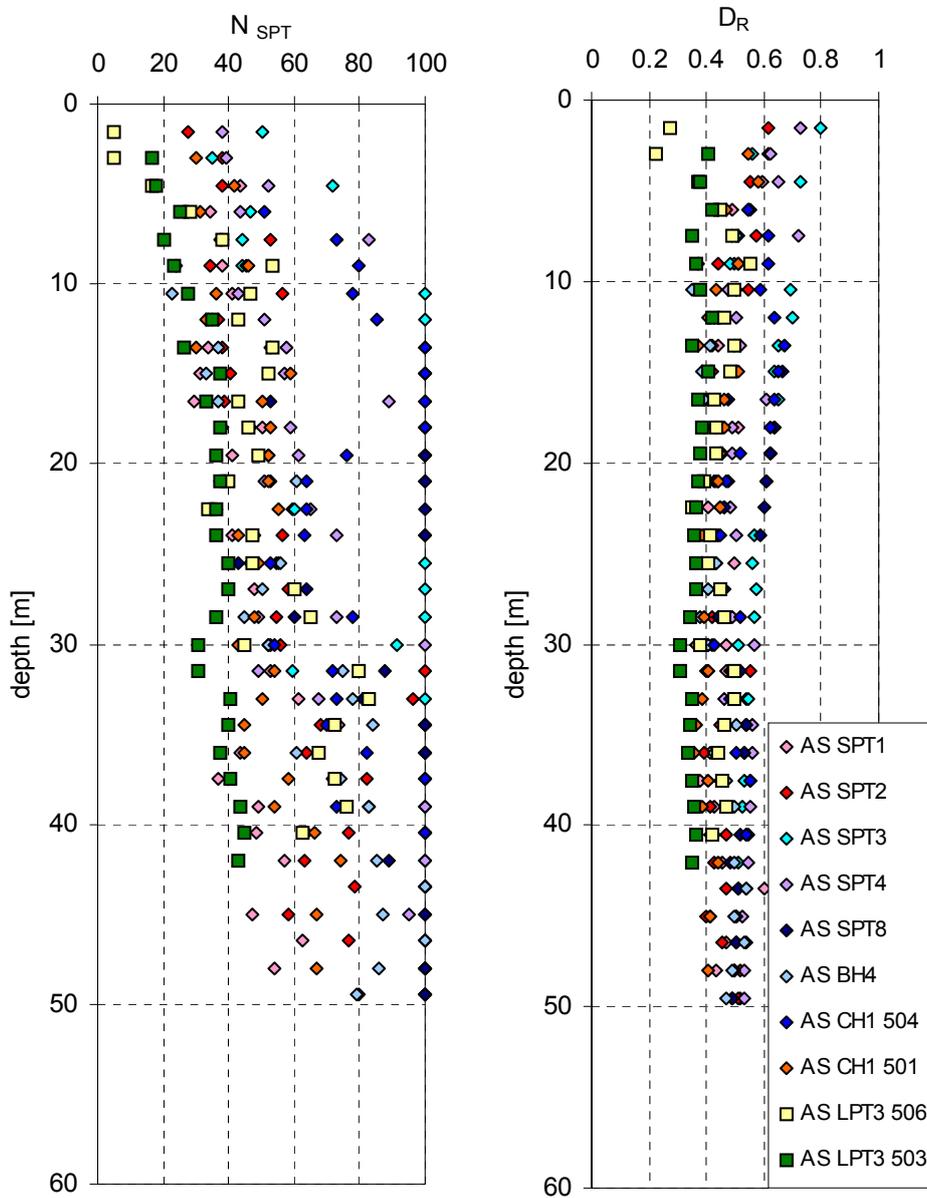
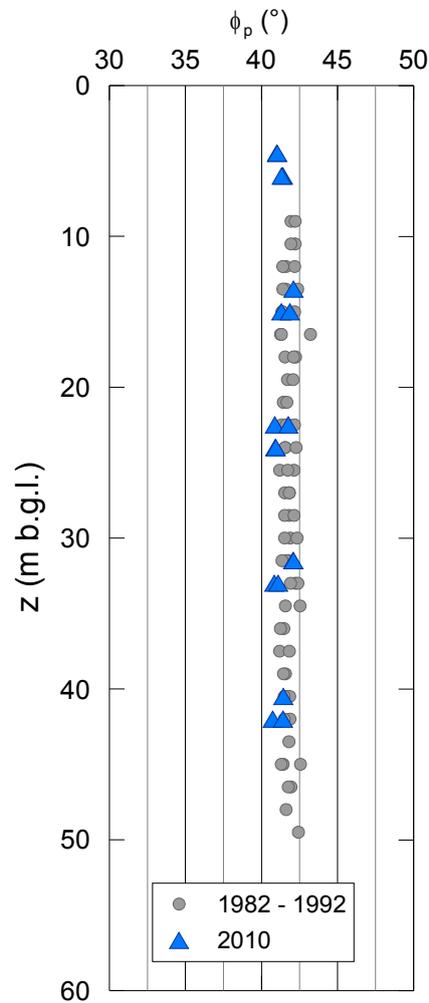


Figura 7: Blocco di ancoraggio Sicilia – densità relativa tratta dai risultati dei test SPT e LPT

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011	



*Figura 8: Blocco di ancoraggio Sicilia – angolo di resistenza al taglio di cresta tratto dai risultati dei test SPT e LPT*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

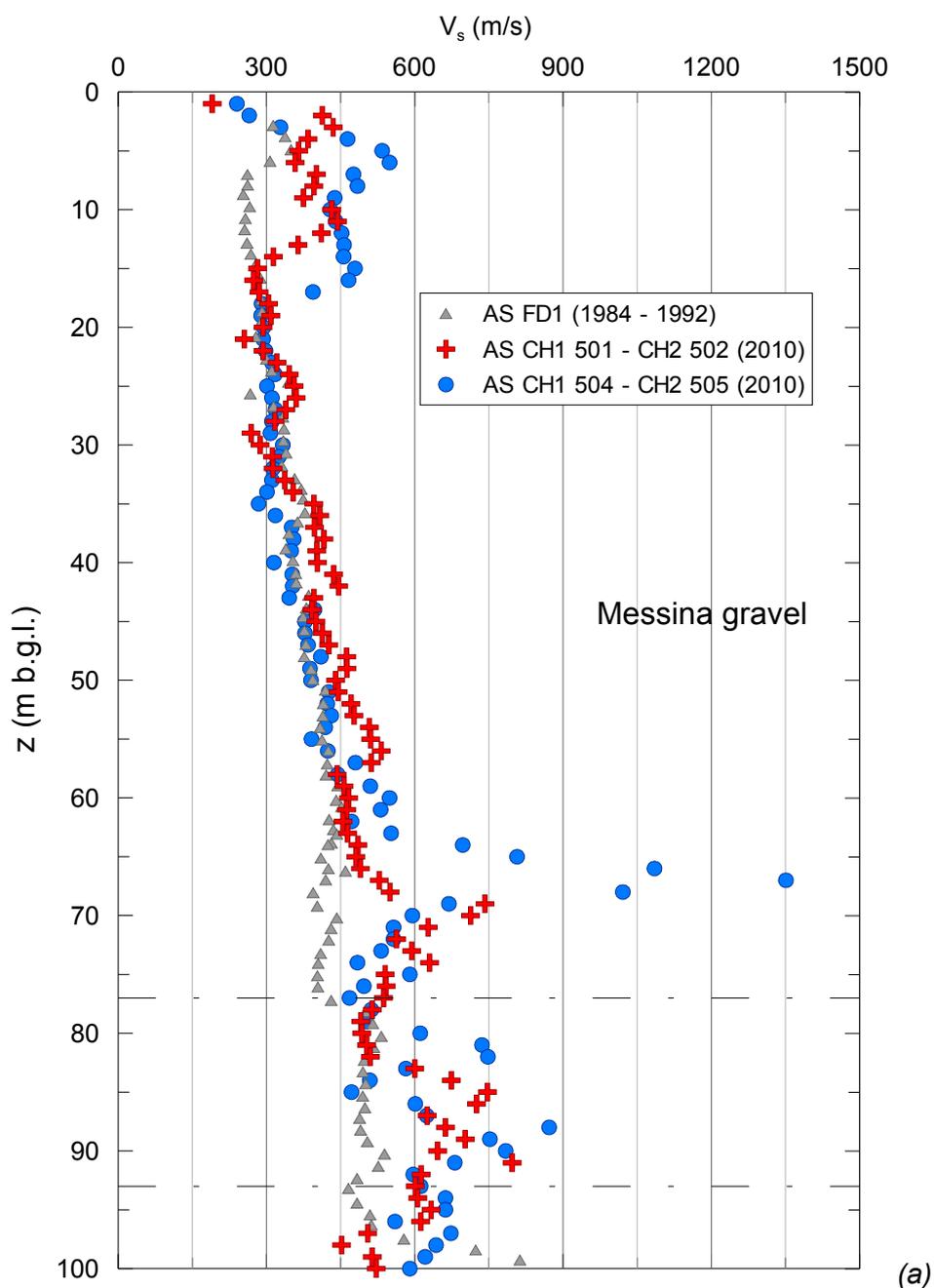


Figura 9: Blocco di ancoraggio Sicilia - (a)  $V_s$  e (b) profili  $G_0$  dai test a foro trasversale (continua)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

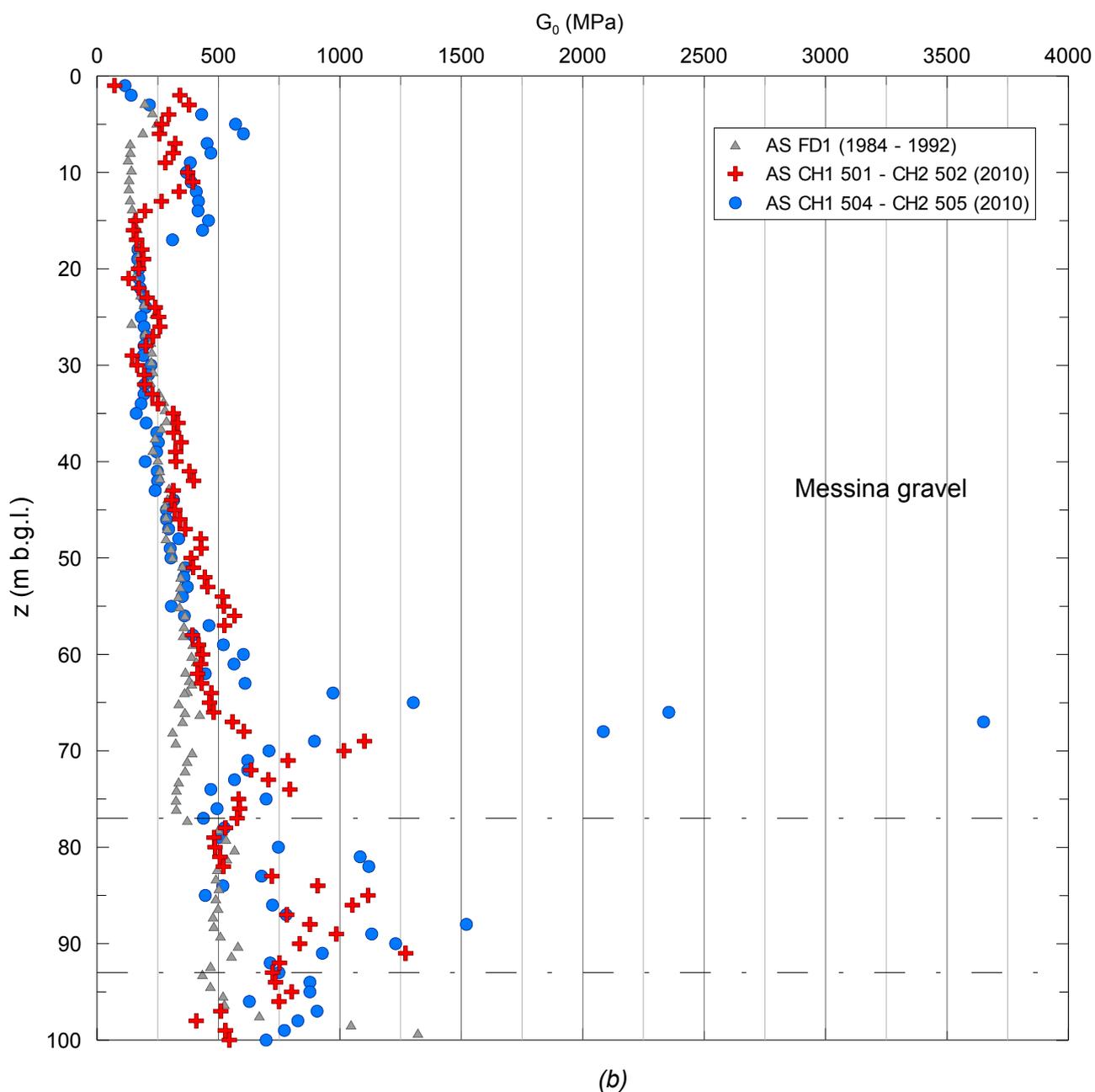
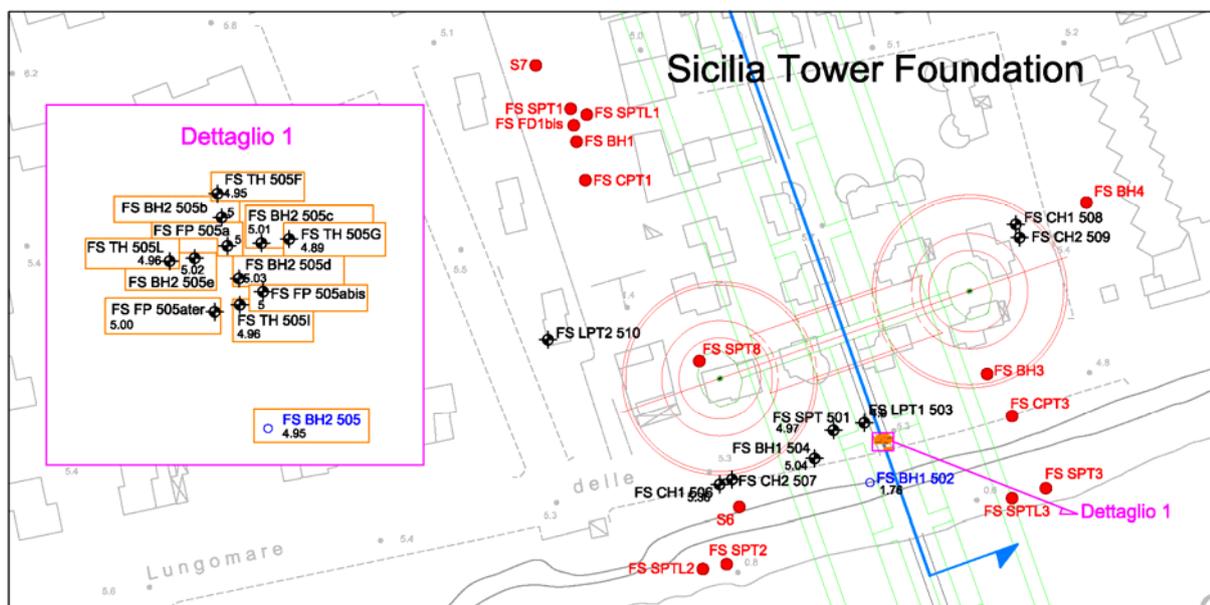
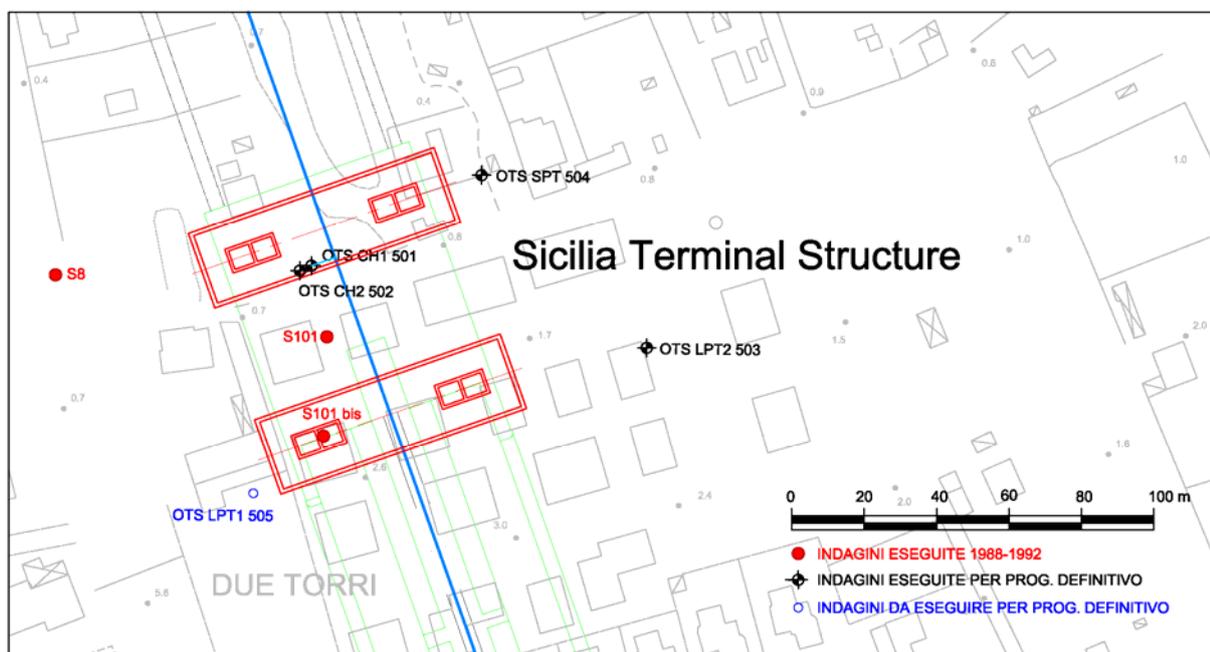


Figura 9: Blocco di ancoraggio Sicilia - (a)  $V_s$  e (b) profili  $G_0$  dai test a foro trasversale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011	



(a)



(b)

Figura 10: riva siciliana – vista in pianta della torre, della struttura terminale e posizione dei fori di sondaggio

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

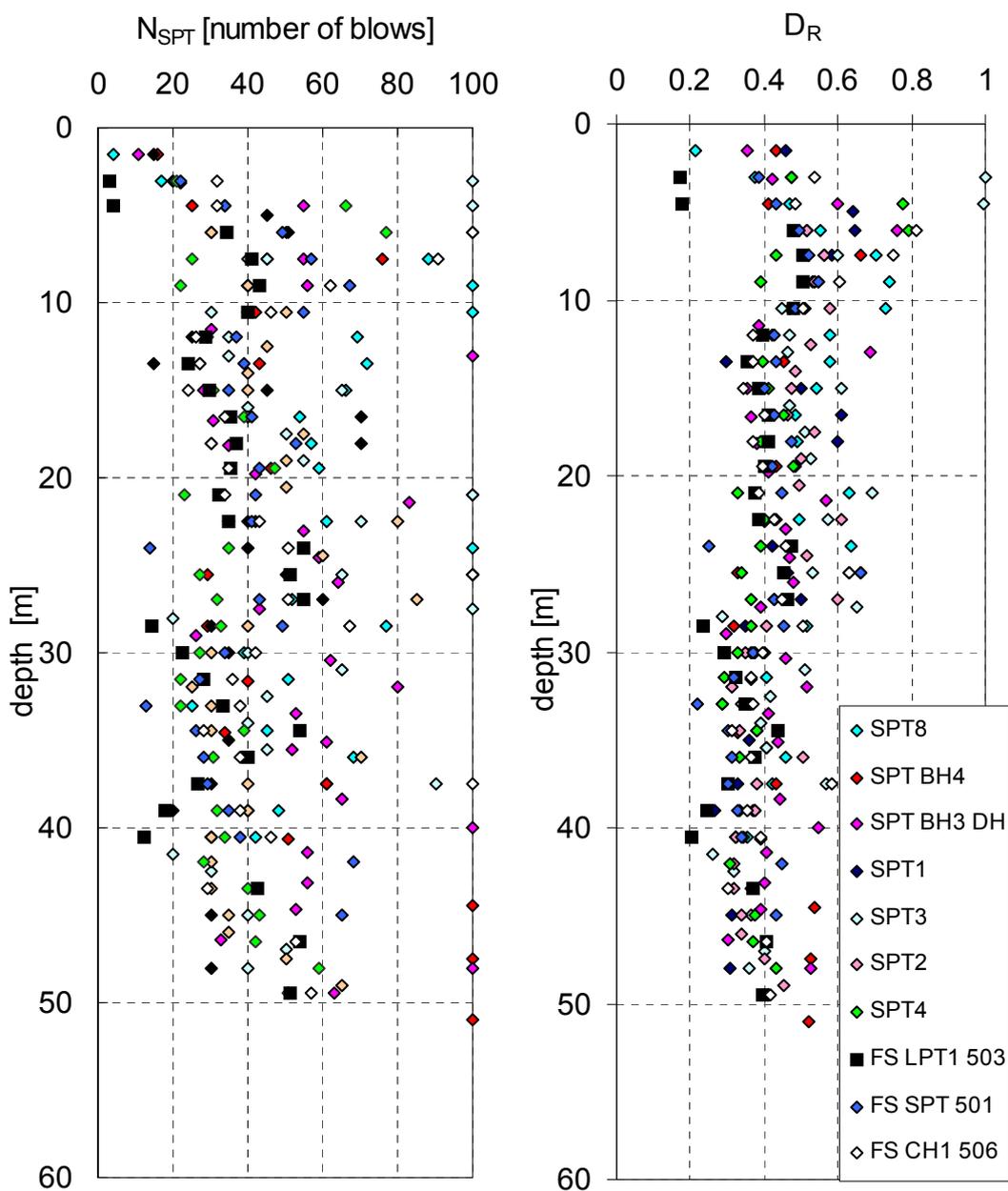


Figura 11: Torre Sicilia – densità relativa tratta dai risultati dei test SPT e LPT

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

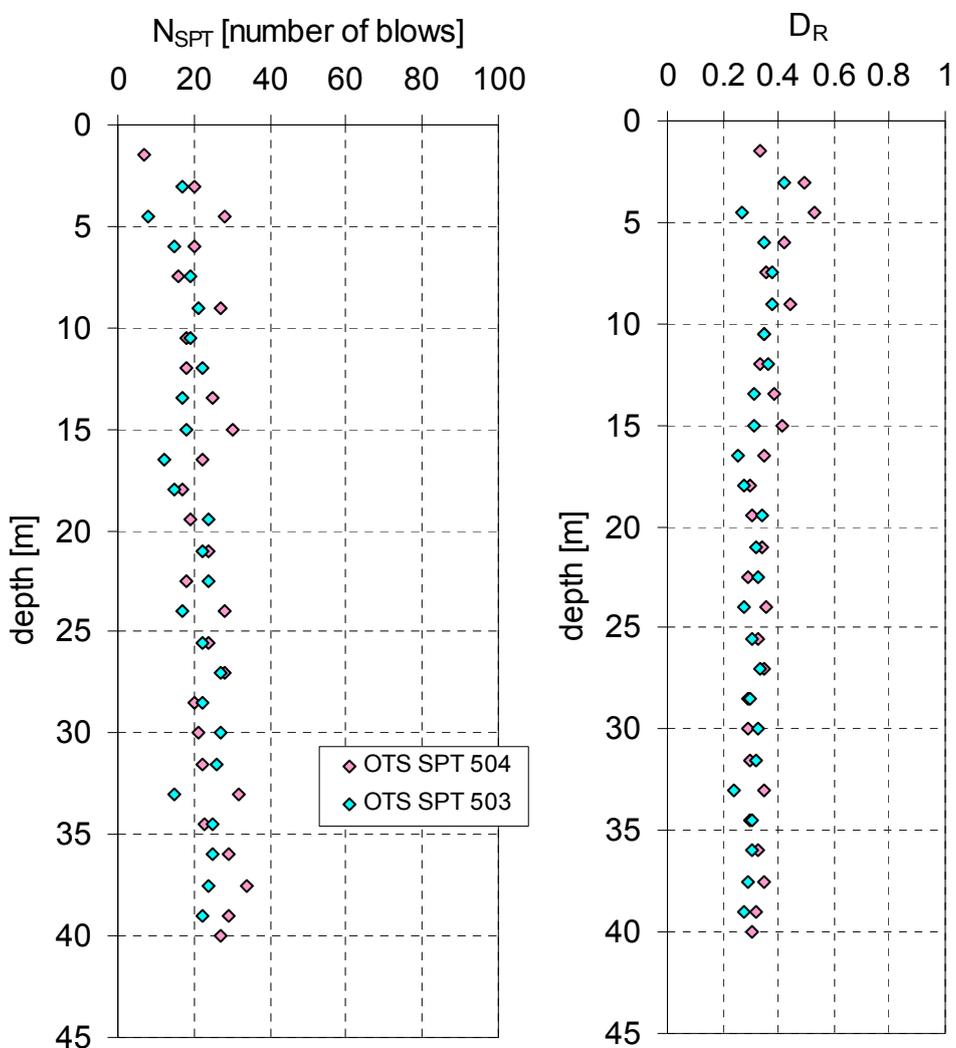


Figura 12: Struttura terminale Sicilia - densità relativa tratta dai risultati dei test SPT e LPT

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

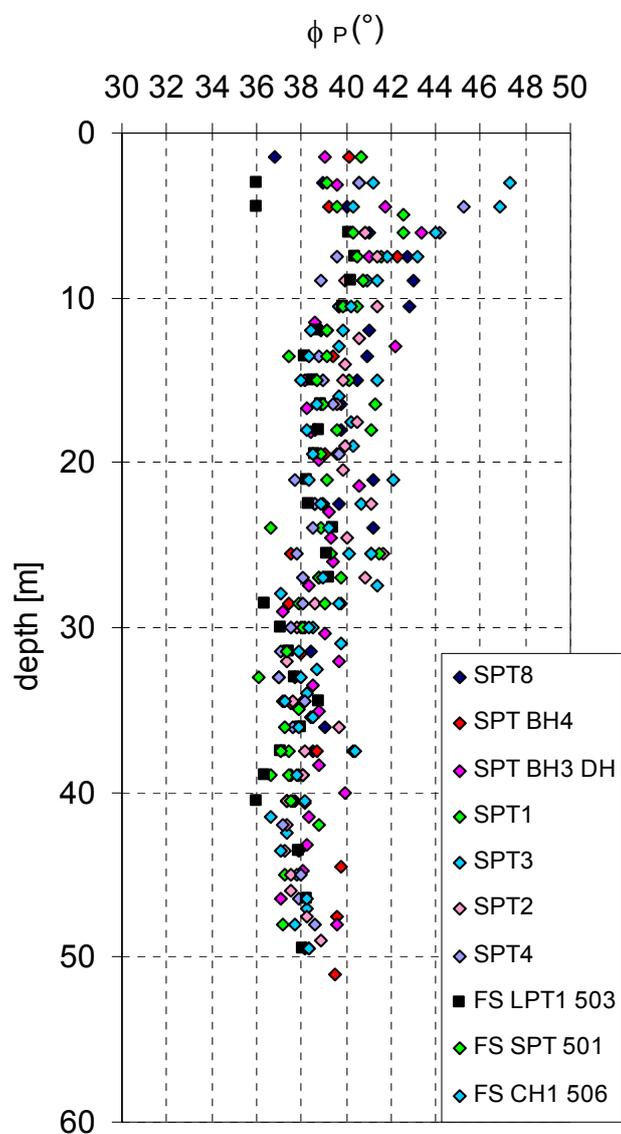


Figura 13: Torre Sicilia - angolo della resistenza al taglio di cresta tratto dai risultati dei test SPT e LPT

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

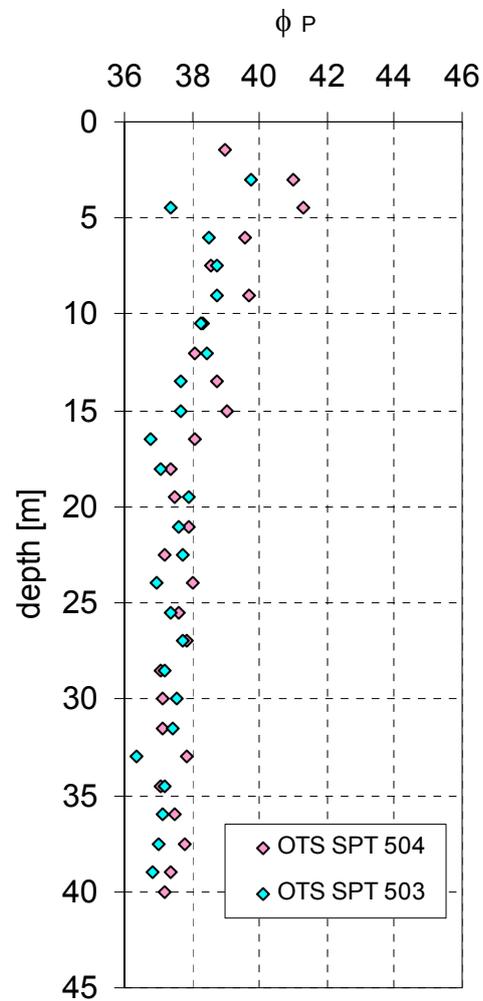


Figura 14: Struttura terminale Sicilia - angolo della resistenza al taglio di cresta tratto dai risultati dei test SPT e LPT

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

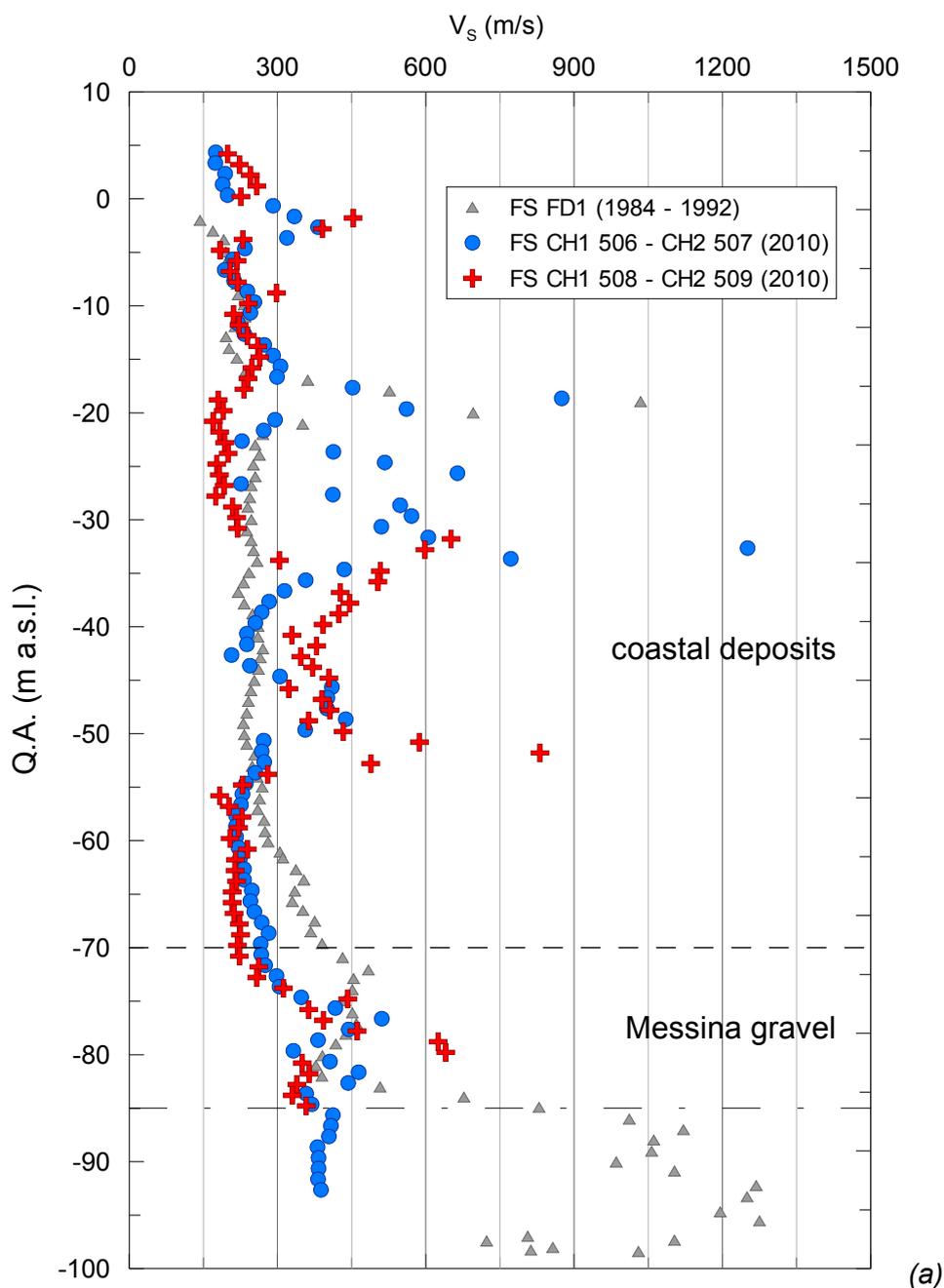


Figura 15: Torre Sicilia – (a)  $V_s$  and (b) profilo  $G_0$  dai test a foro trasversale (continua)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

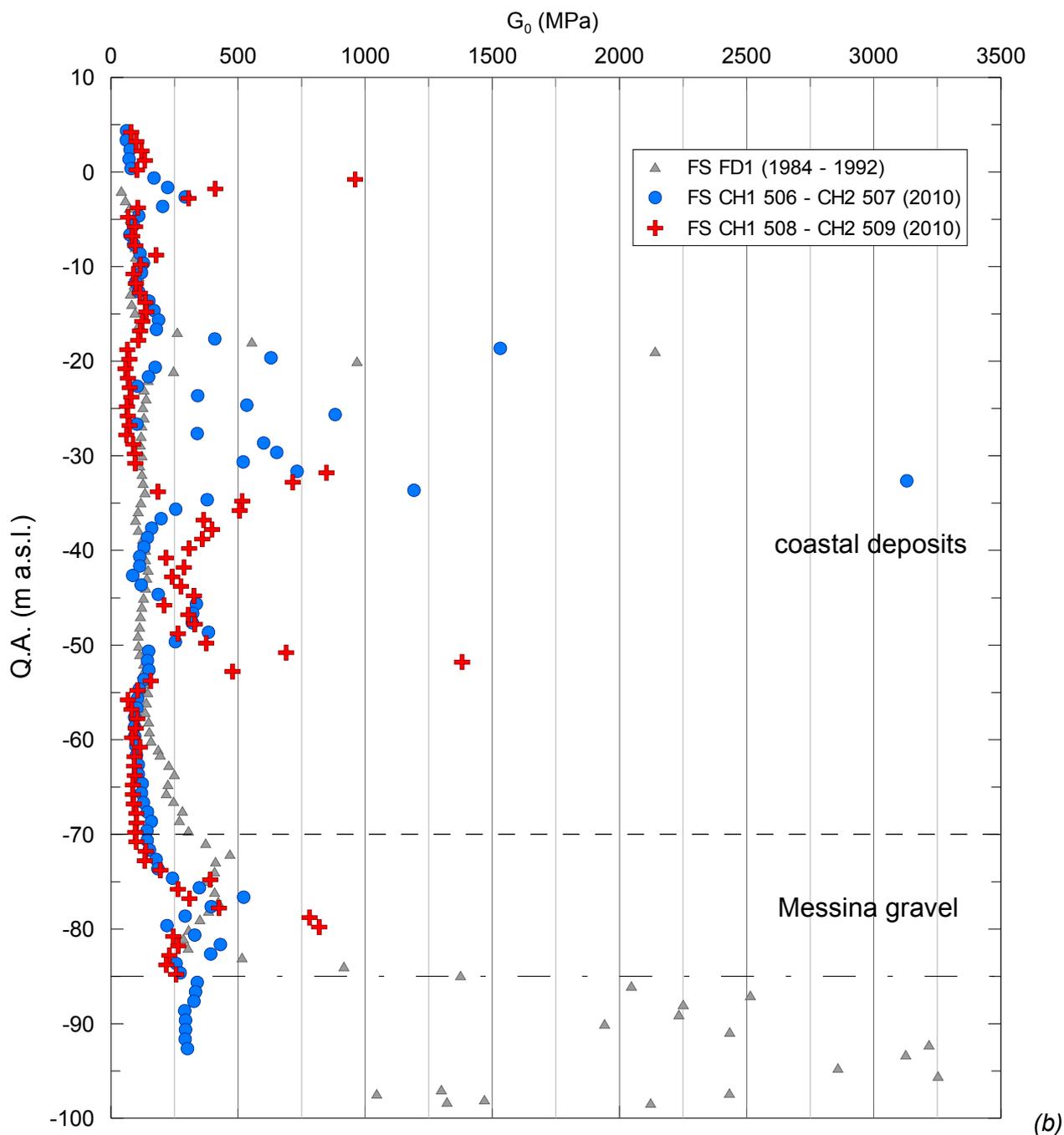


Figura 15: Torre Sicilia – (a)  $V_s$  and (b) profilo  $G_0$  dai test a foro trasversale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

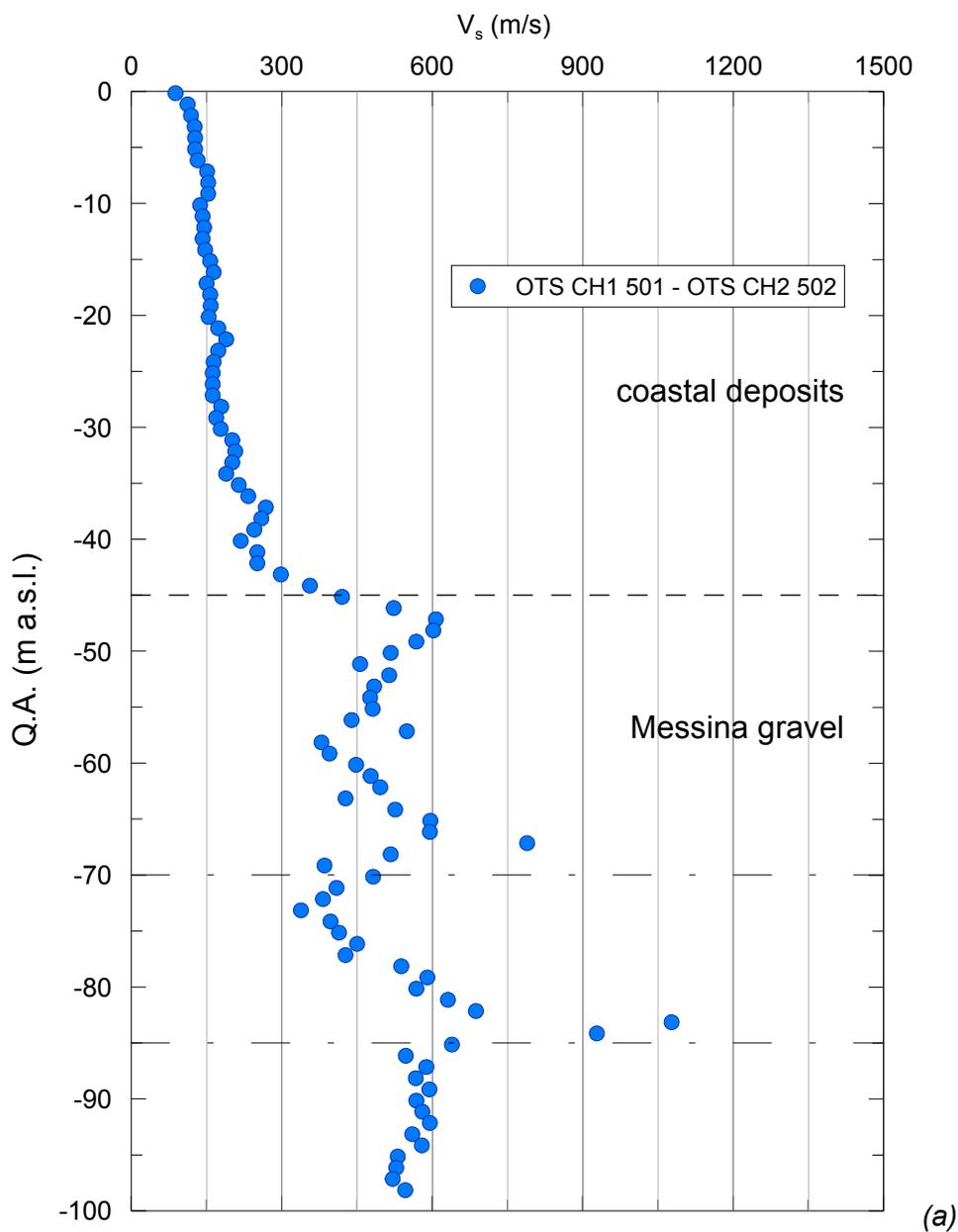


Figura 16: Struttura terminale Sicilia - (Torre Sicilia - (a)  $V_s$  and (b) profili  $G_0$  dai test a foro trasversale (continua)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

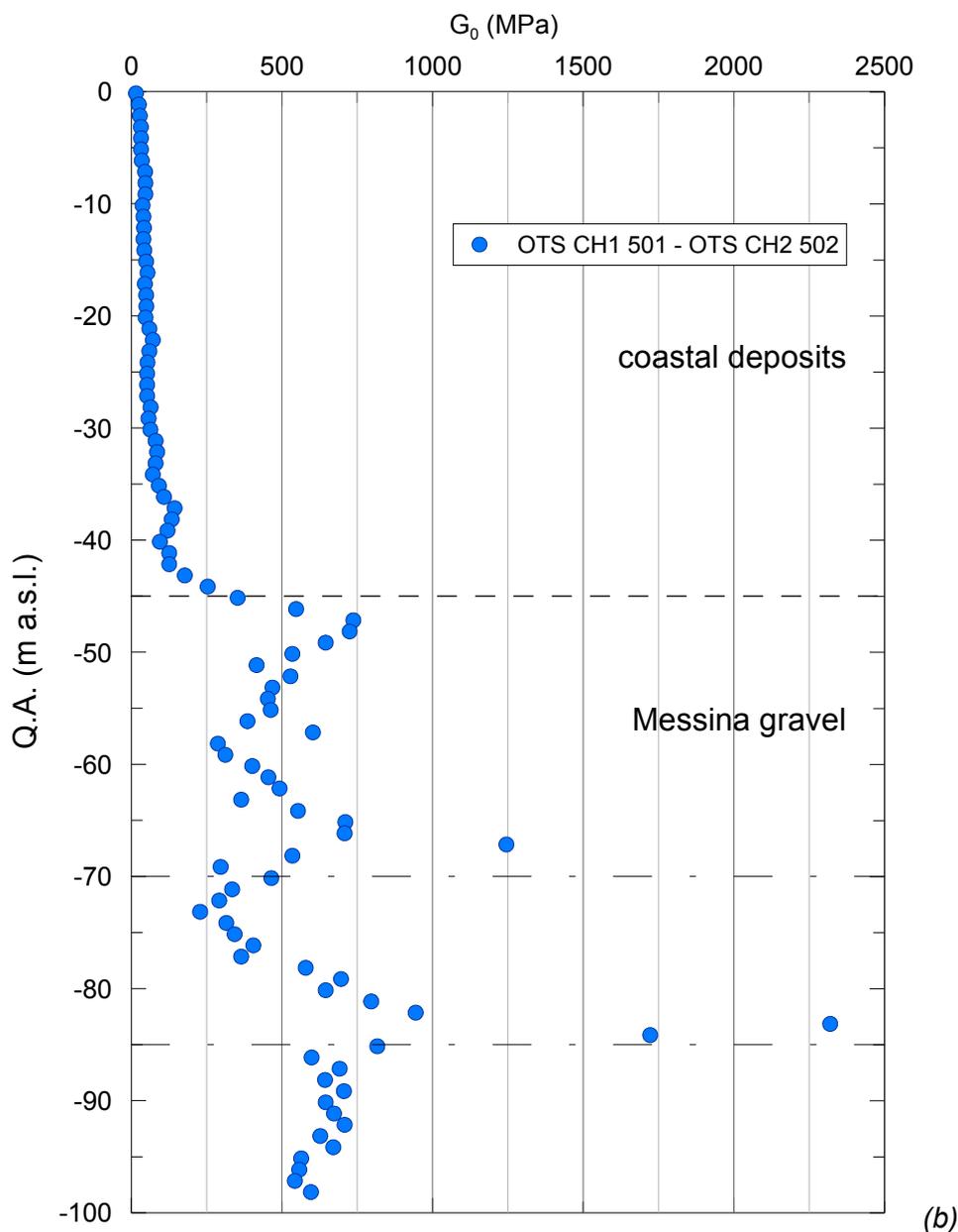


Figura 16: Struttura terminale Sicilia - (a)  $V_s$  e (b) profili  $G_0$  dai test a foro trasversale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011	

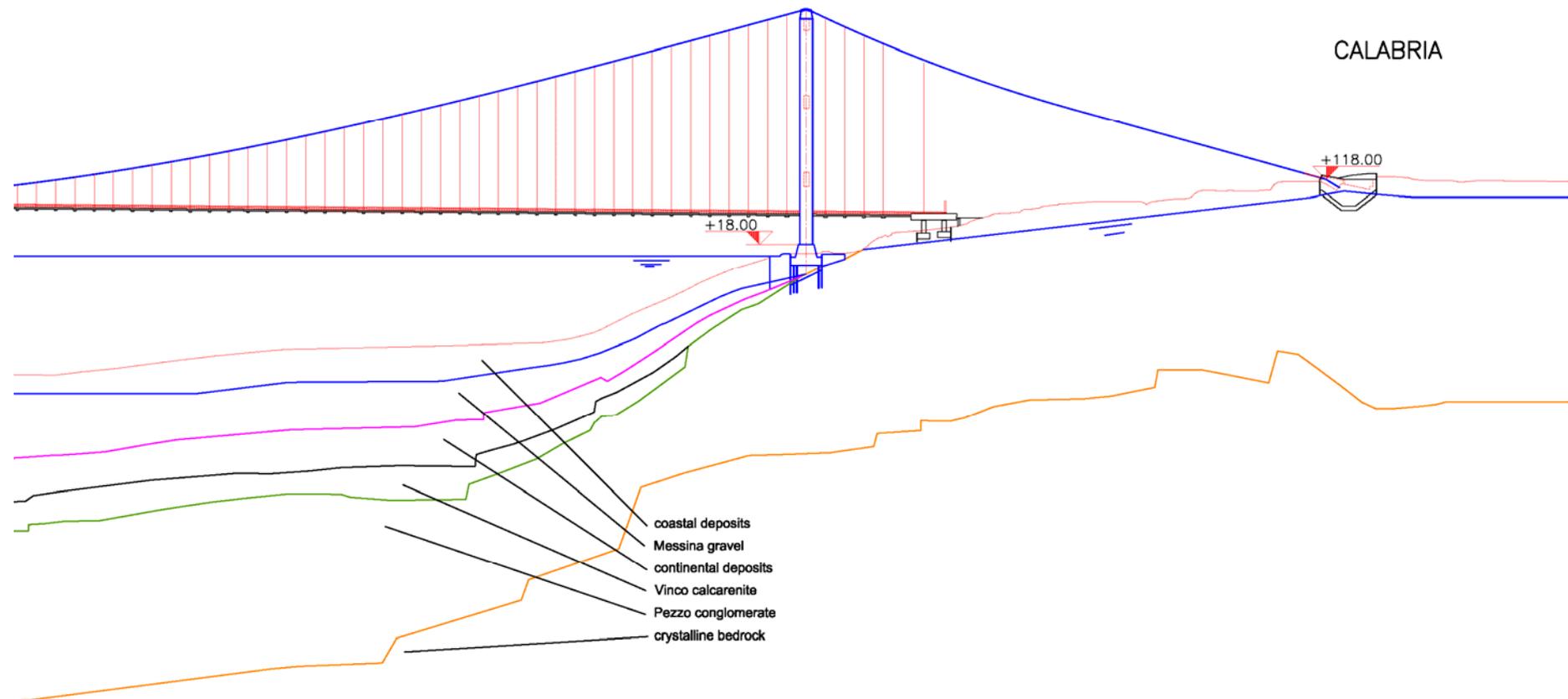


Figura 17: Profilo del suolo sulla riva calabrese dello stretto di Messina

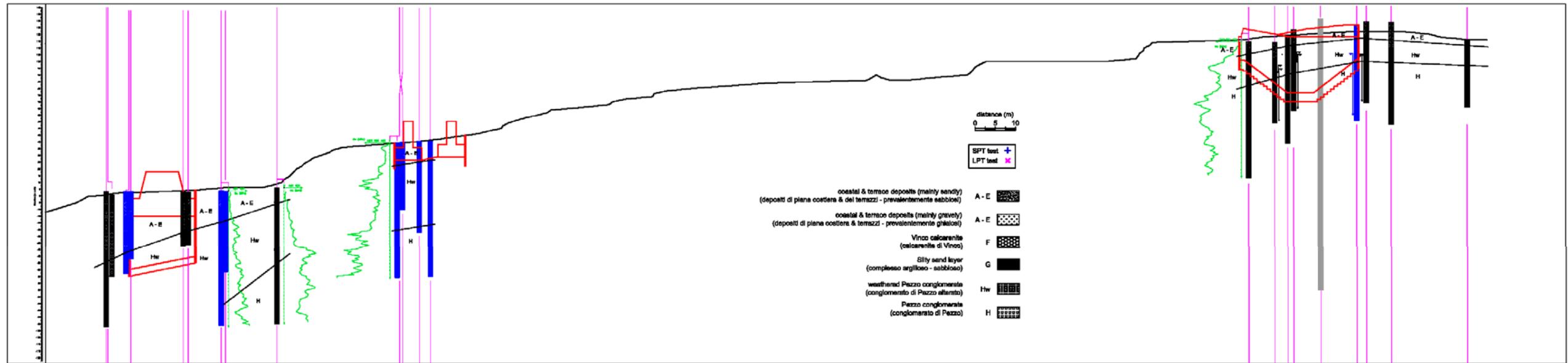


Figura 18: riva calabrese – sezione longitudinale geotecnica: vista generale

**CALABRIA LONGITUDINAL SECTION - TOWER AND TERMINAL STRUCTURE**

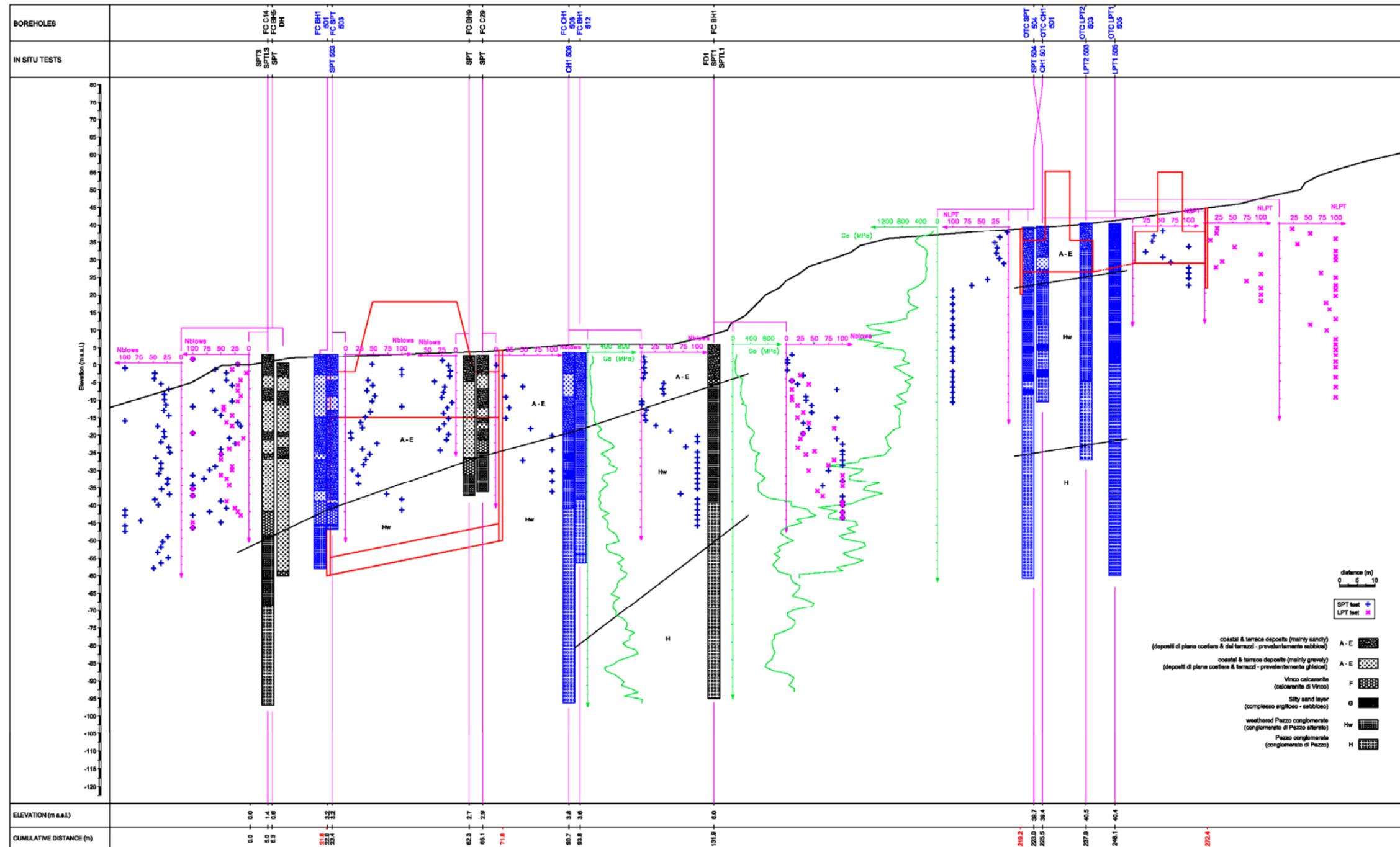


Figura 19: riva calabrese – sezione longitudinale geotecnica presso la torre e la struttura terminale

CALABRIA LONGITUDINAL SECTION - ANCHOR BLOCK

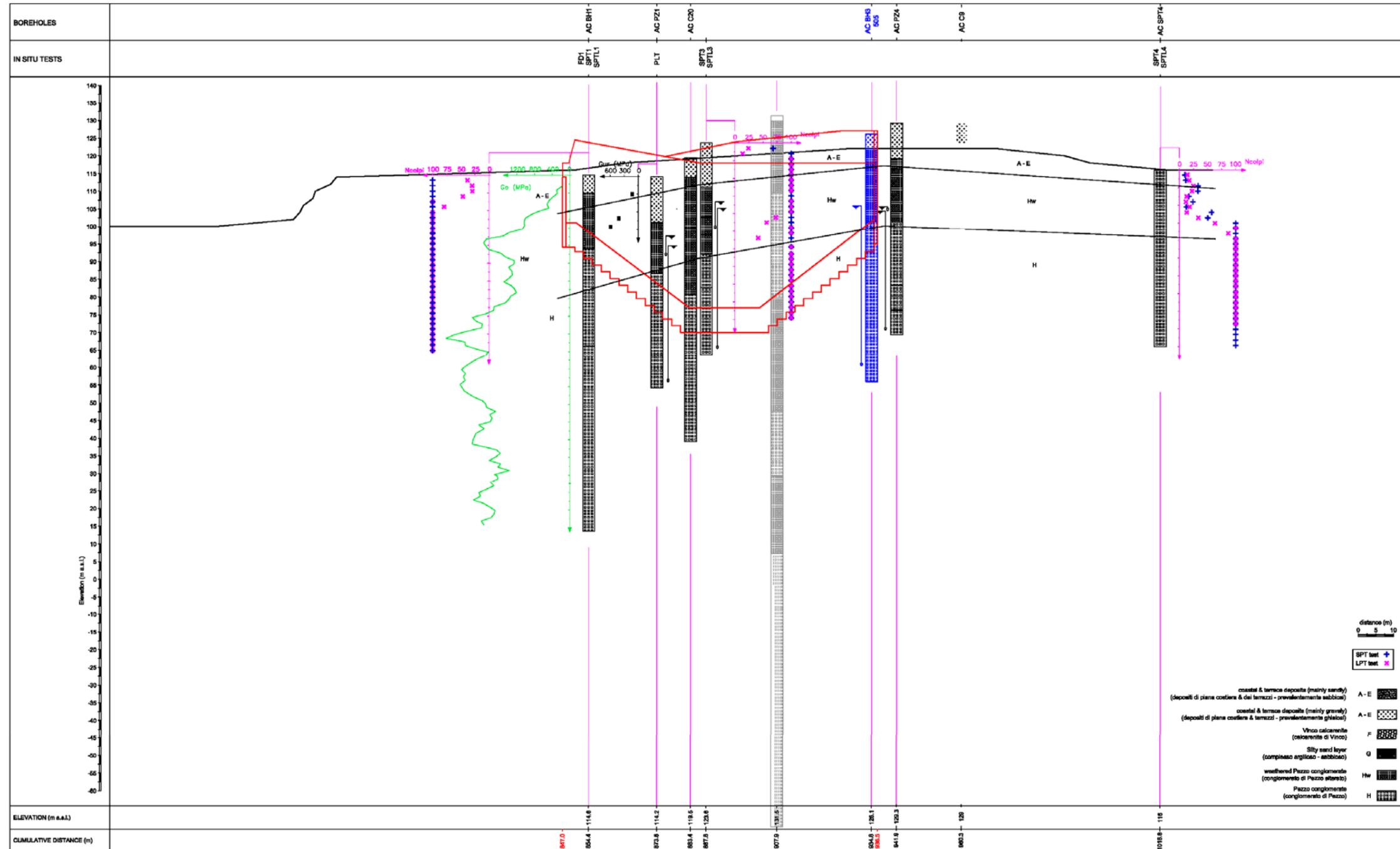


Figura 20: riva calabrese – sezione longitudinale geotecnica presso il blocco di ancoraggio

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011	

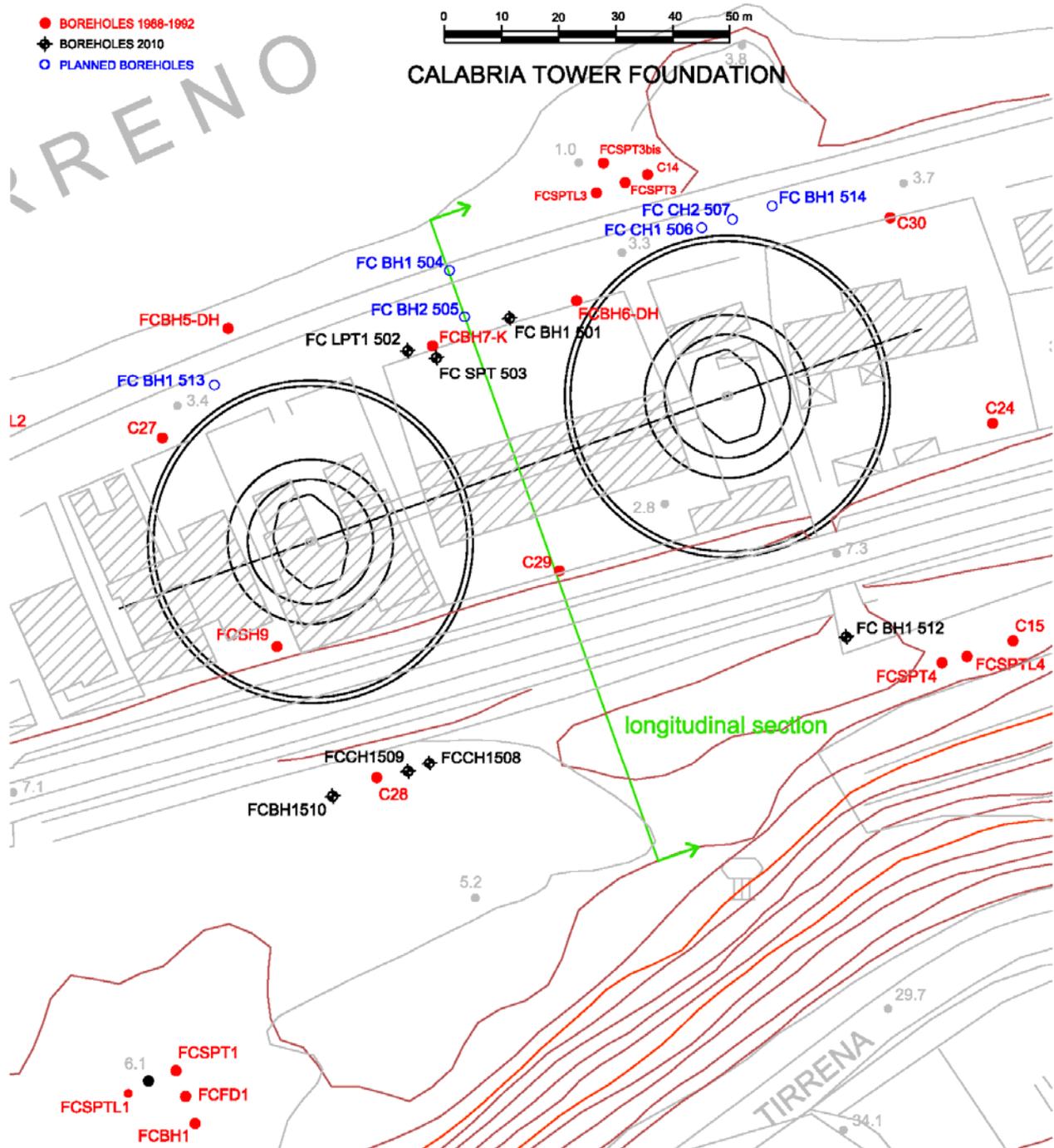


Figura 21: Riva calabrese – vista in pianta della torre e posizione dei fori di sondaggio

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011	

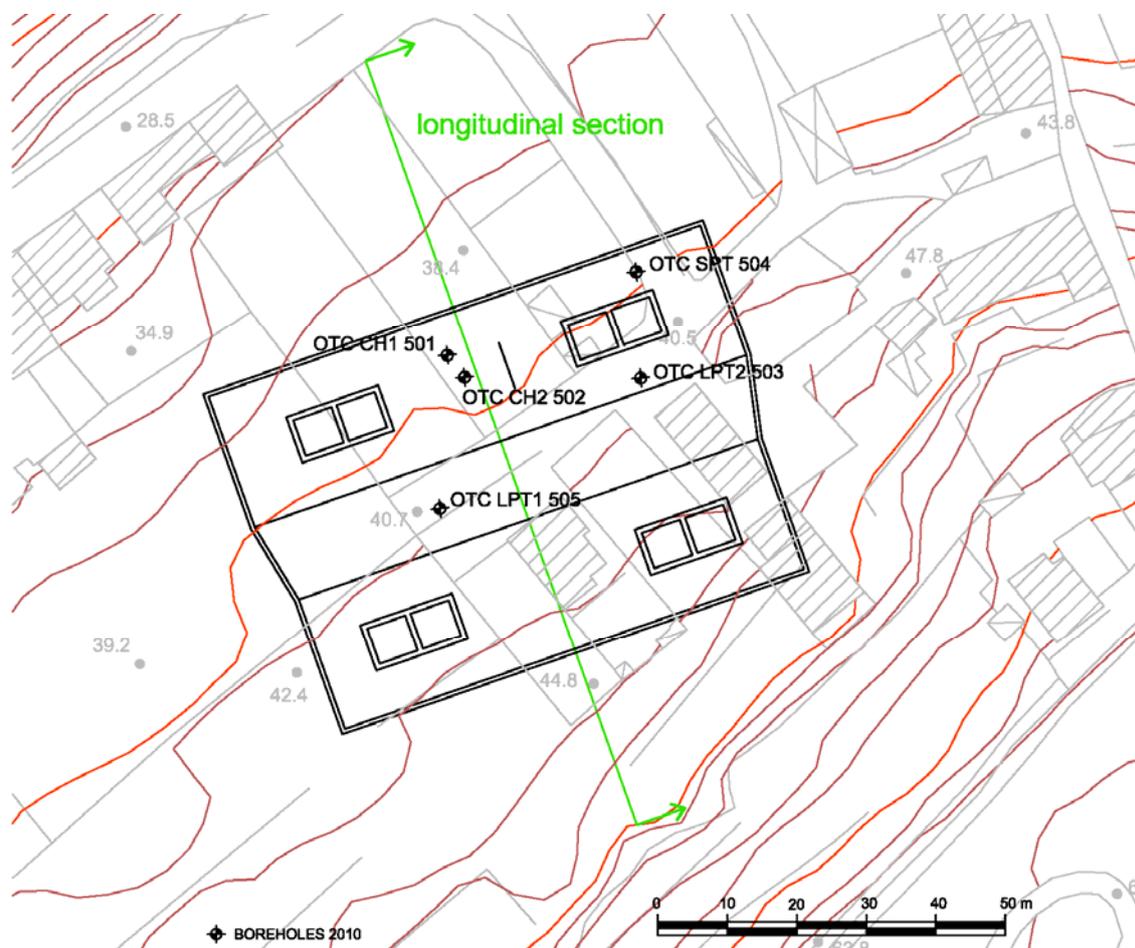


Figura 22: riva calabrese – vista in pianta della Struttura Terminale e posizione dei fori di sondaggio

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

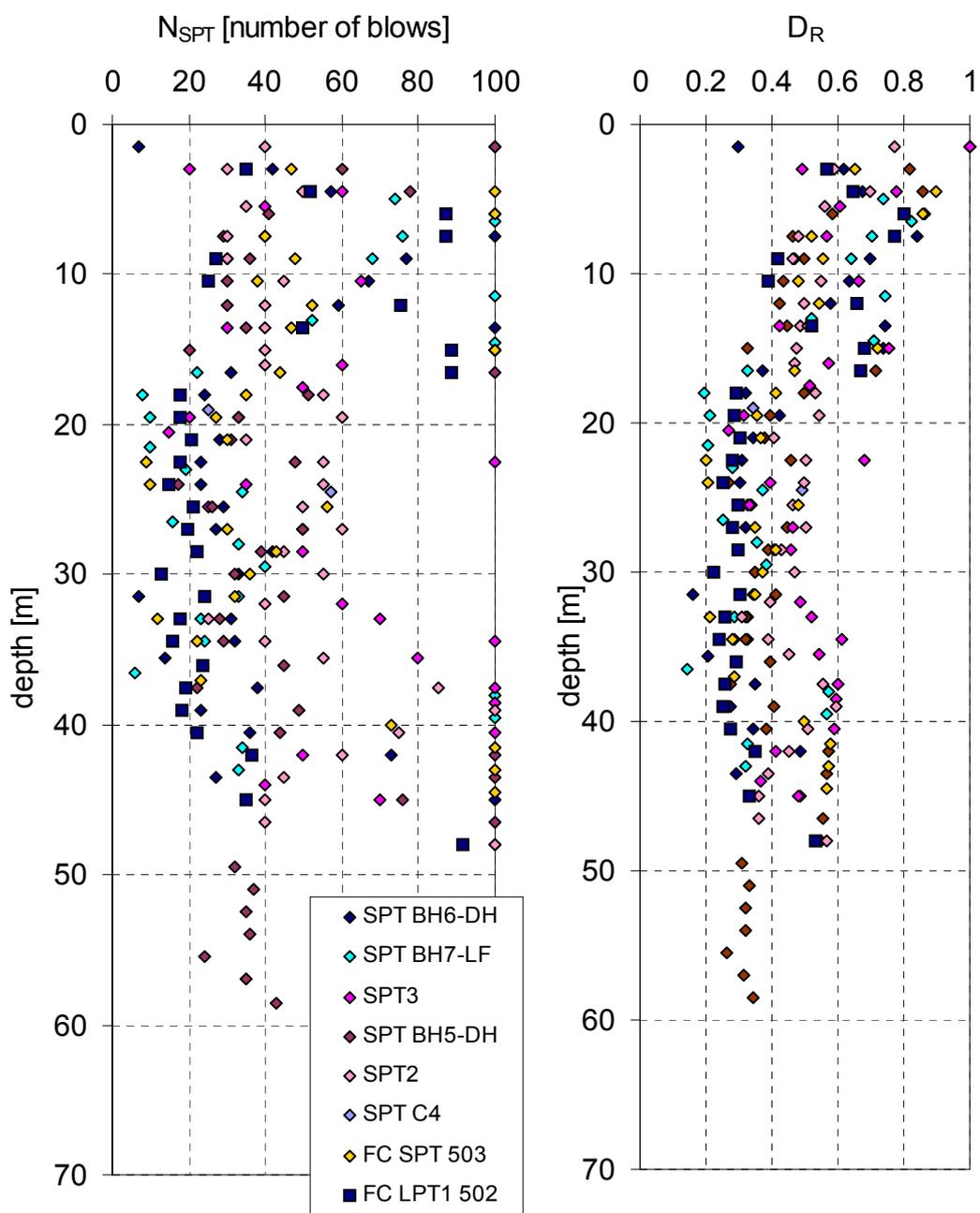


Figura 23: Torre Calabria (lato nord), depositi costieri – densità relativa tratta dai risultati dei test SPT e LPT

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

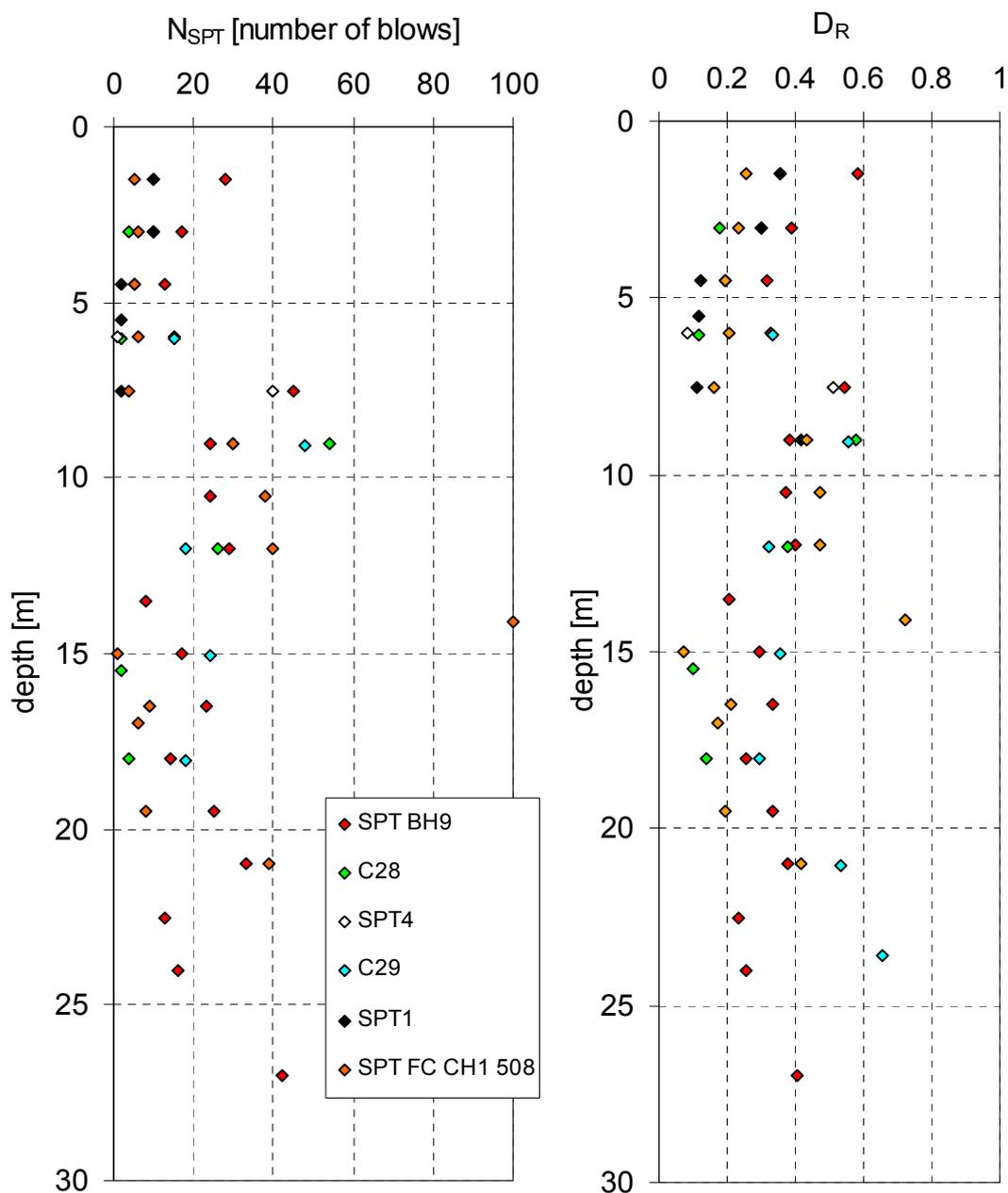


Figura 24: Torre Calabria Tower (lato sud), depositi costieri – densità relativa tratta dai risultati SPT

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

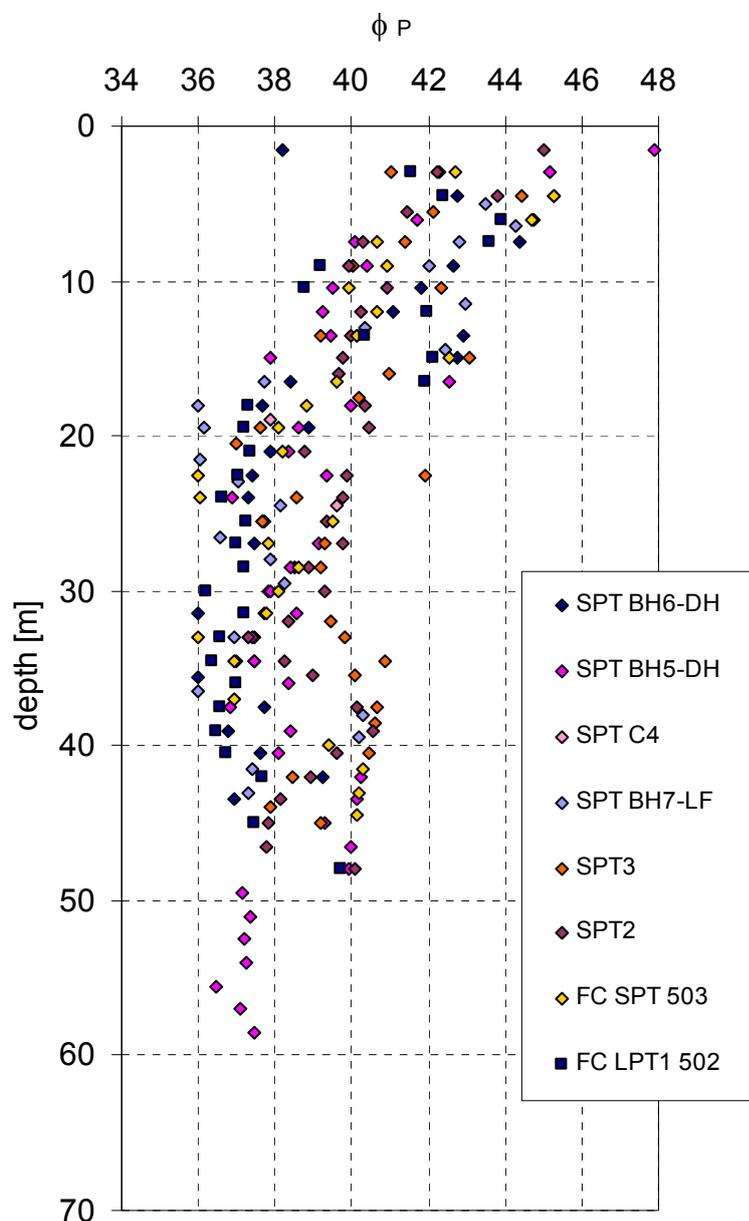


Figura 25: Torre Calabria (lato nord), depositi costieri – angolo della resistenza al taglio di cresta tratto dai risultati SPT e LPT

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

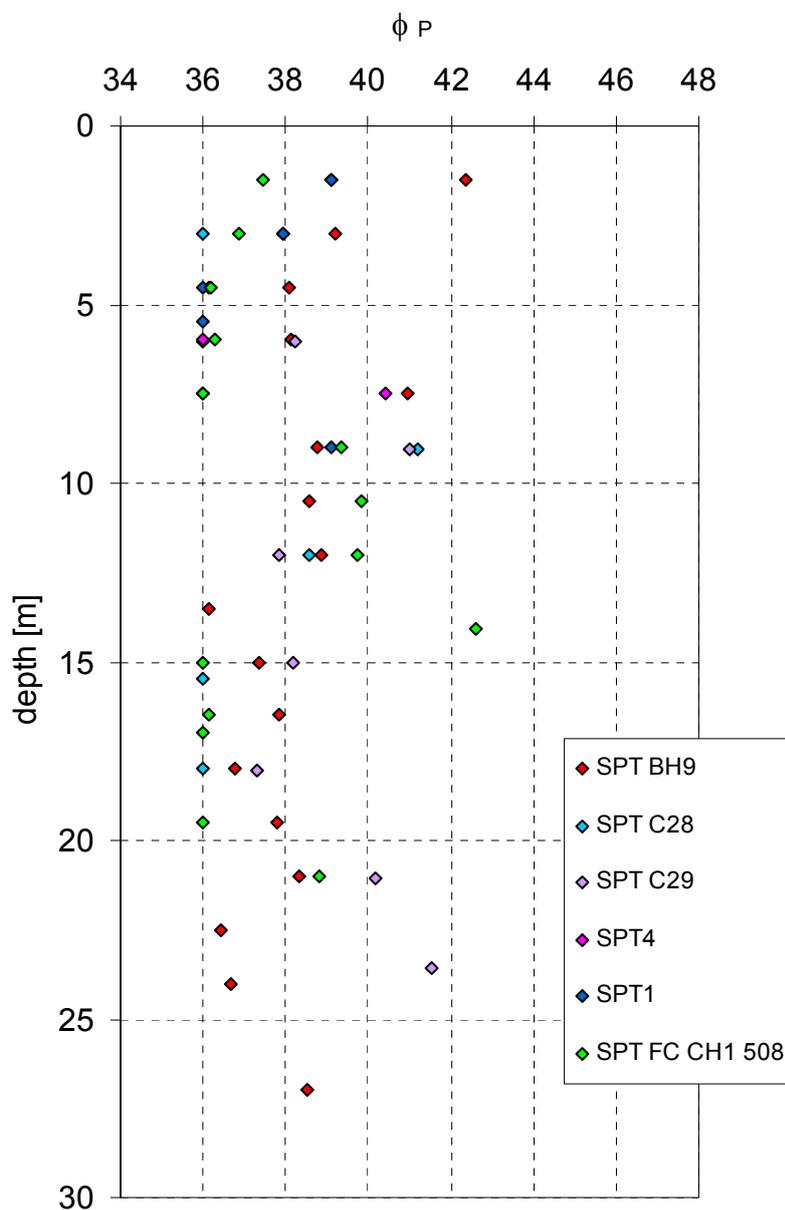


Figura 26: Torre Calabria (lato sud), depositi costieri – angolo della resistenza al taglio di cresta tratto dai risultati SPT e LPT

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

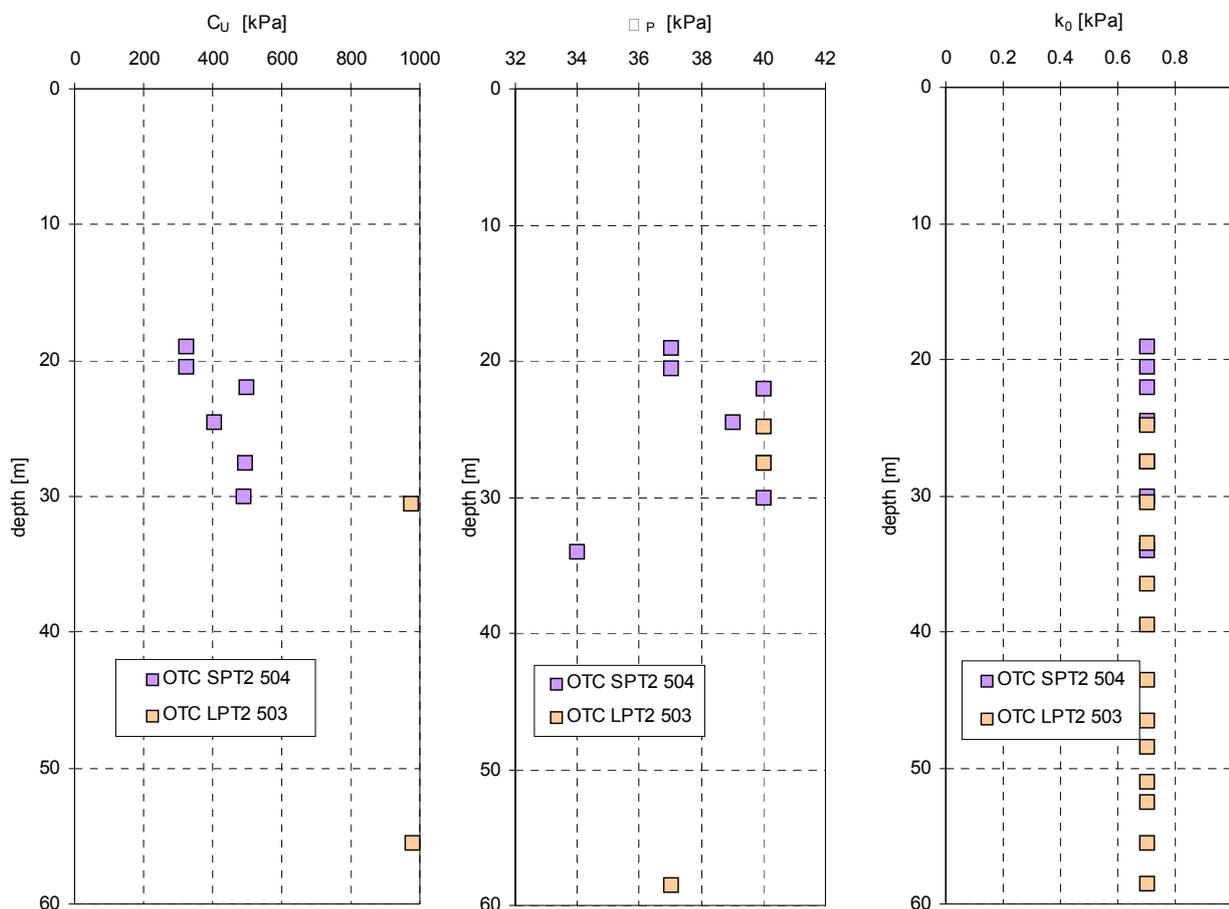


Figura 27: Struttura terminale Calabria: Conglomerato di Pezzo profili -  $c$ ,  $p$  e  $K_0$  derivati dal test con dilatometro

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

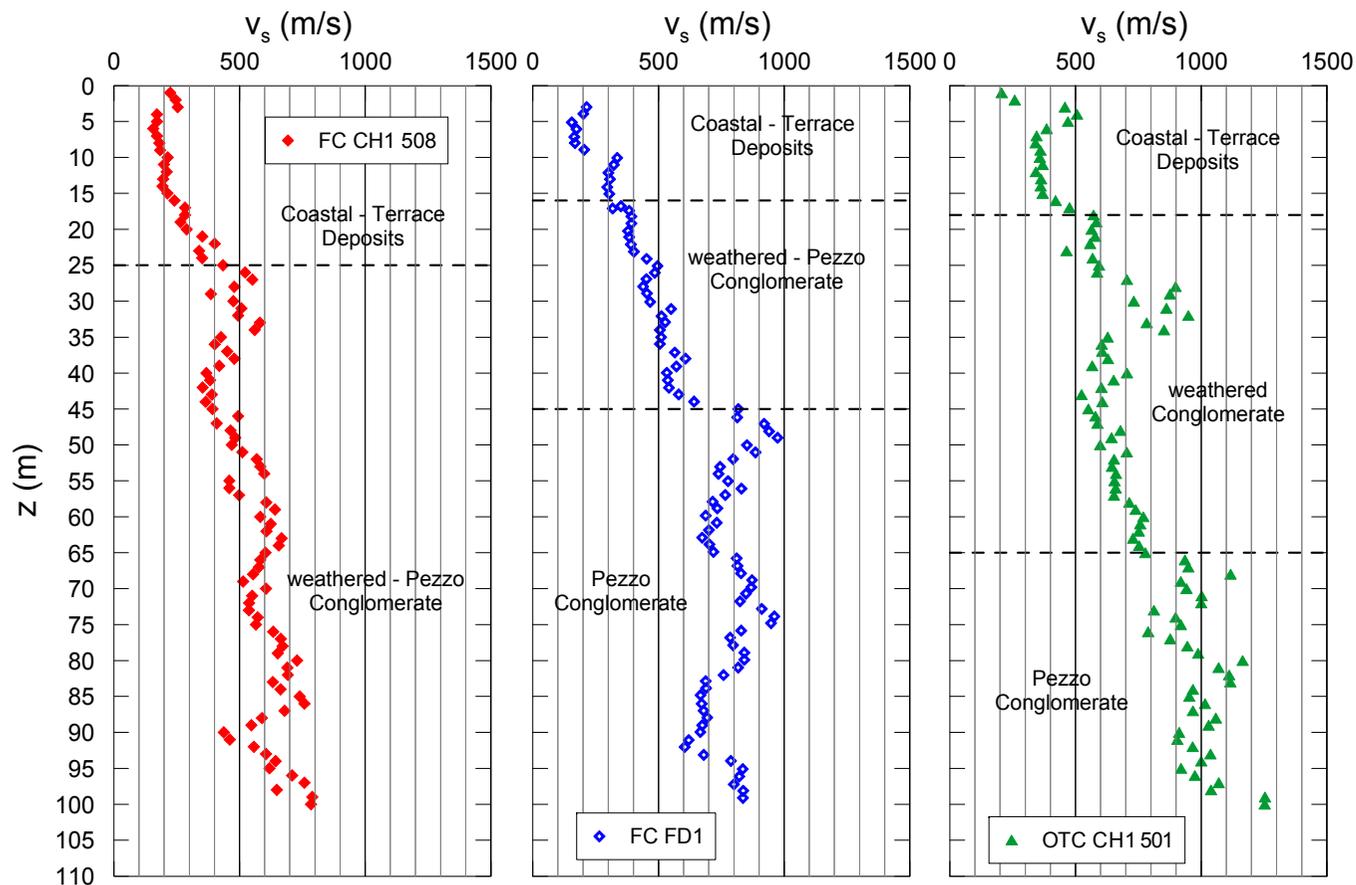


Figura 28: Torre Calabria e sito della Struttura terminale profilo  $-v_s$  derivato dai test a foro trasversale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

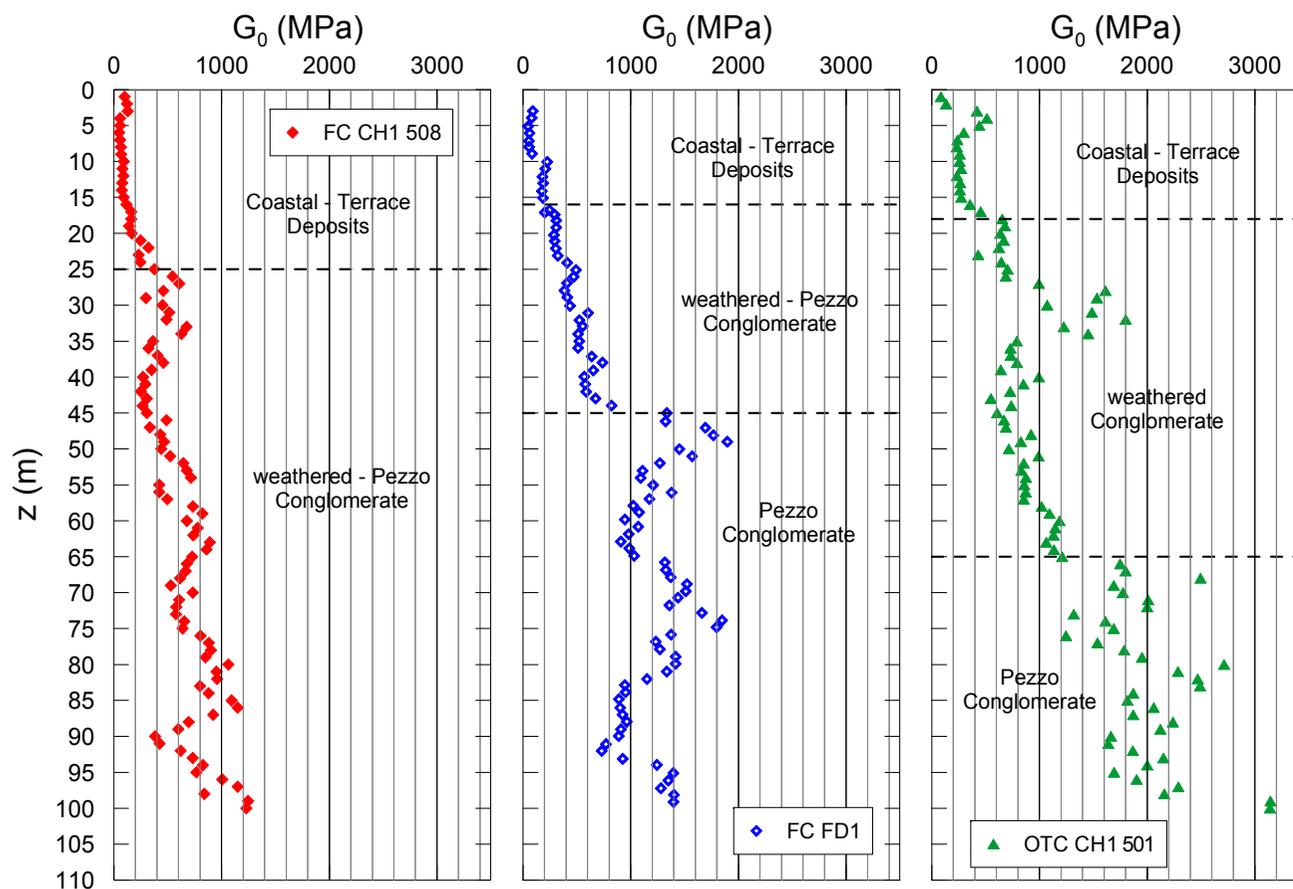


Figura 29: Torre Calabria e sito della Struttura terminale profilo - $G_0$  derivato dai test a foro trasversale

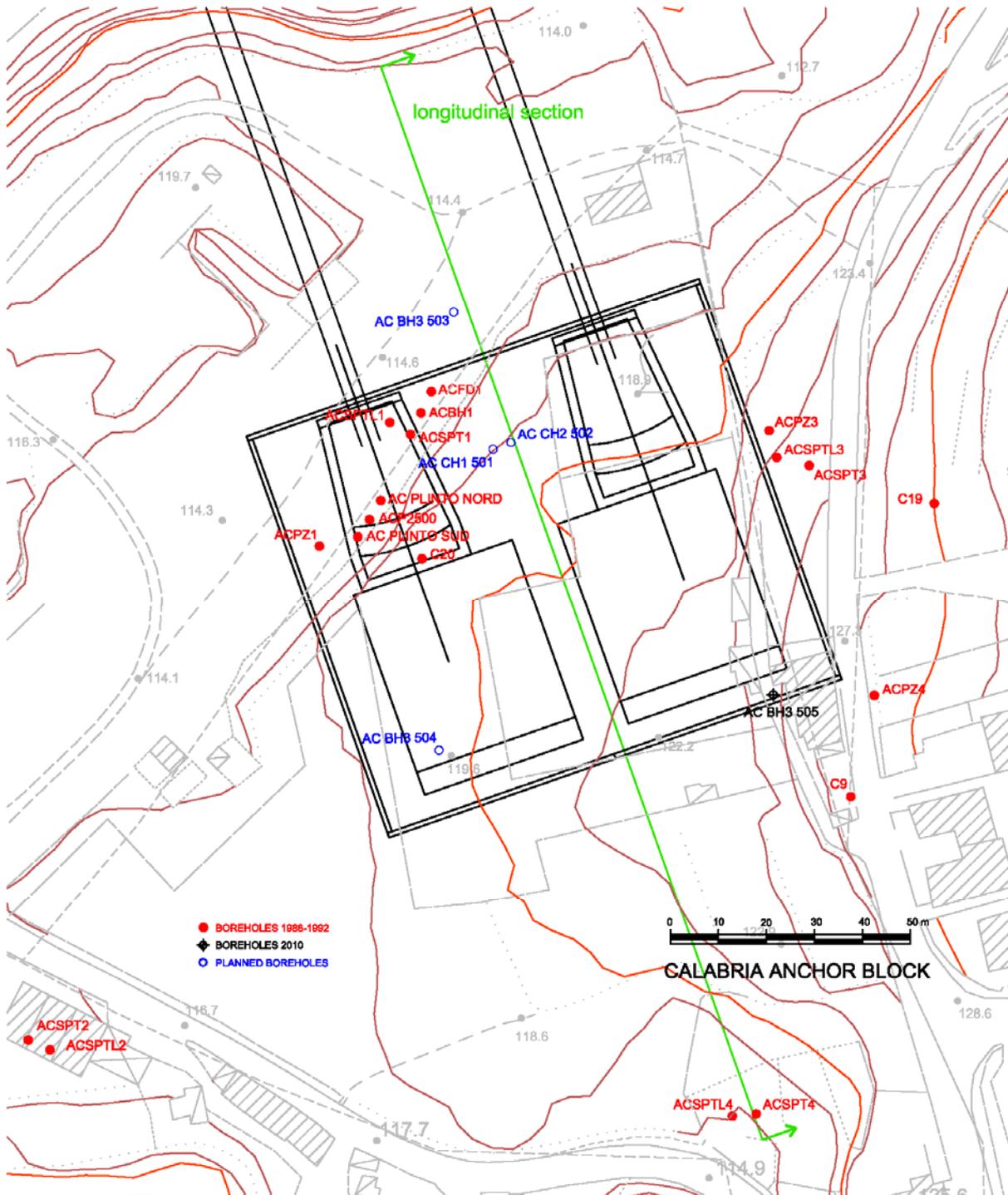


Figura 30: riva calabrese – vista in pianta del blocco di ancoraggio

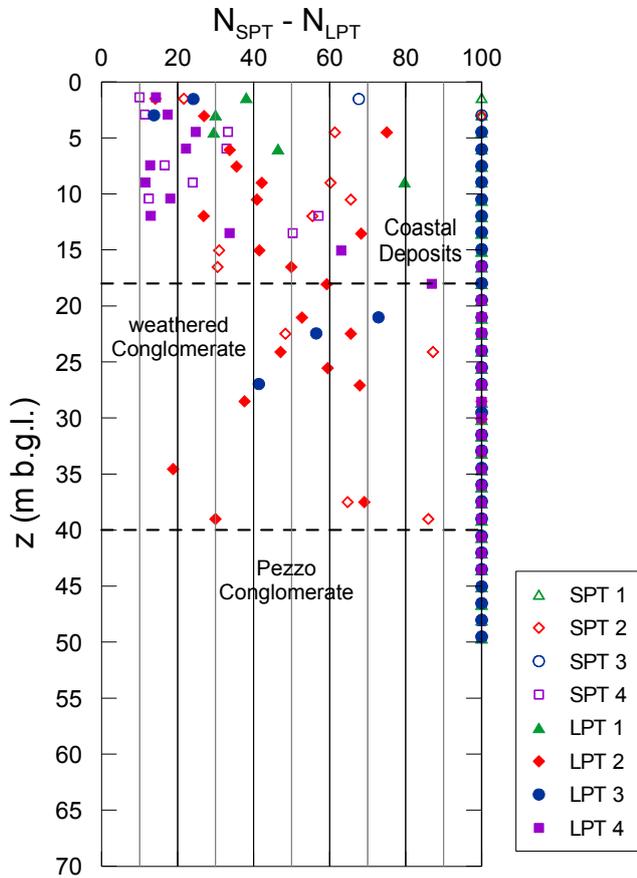


Figura 31: Blocco di ancoraggio Calabria – risultati dei test SPT e LPT

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

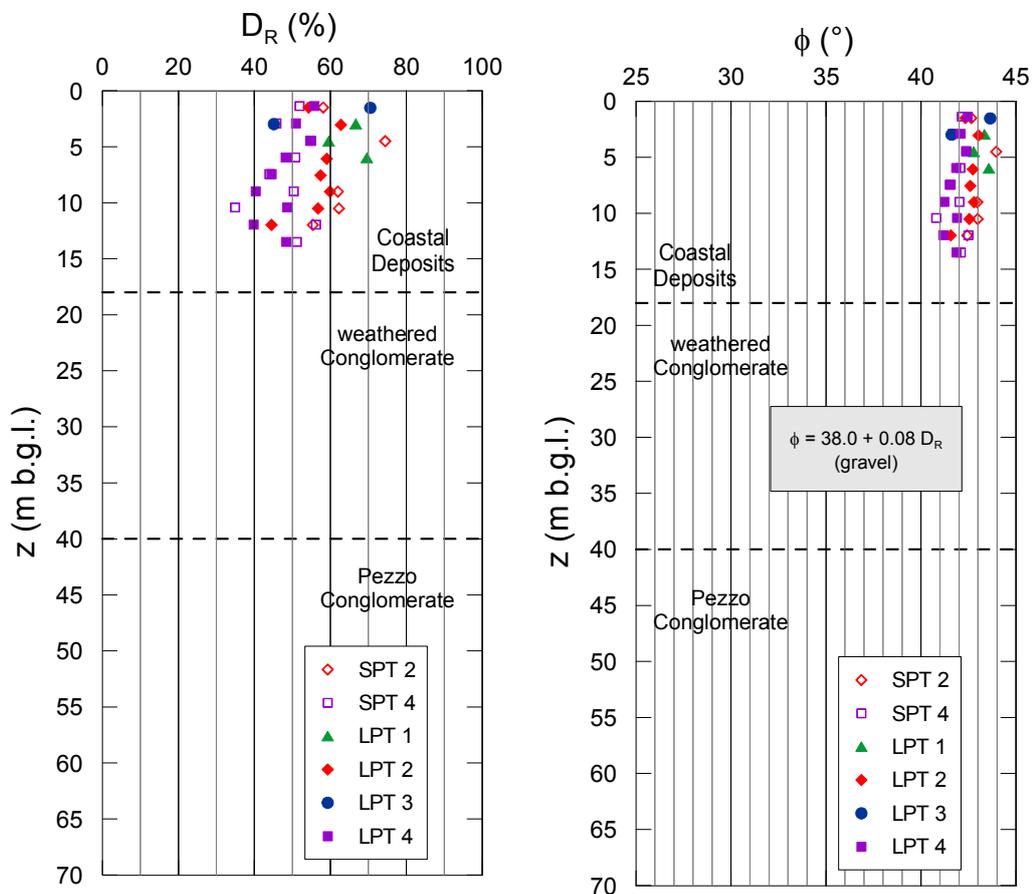


Figura 32: Blocco di ancoraggio Calabria – densità relativa e angolo di resistenza al taglio

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

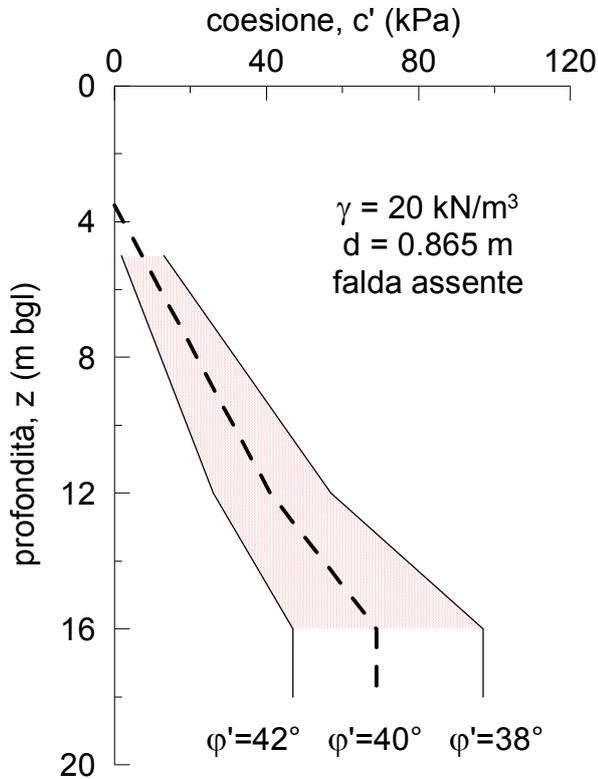


Figura 33: Blocco di ancoraggio Calabria – profil  $c'$  da test di carico su piastra più grande

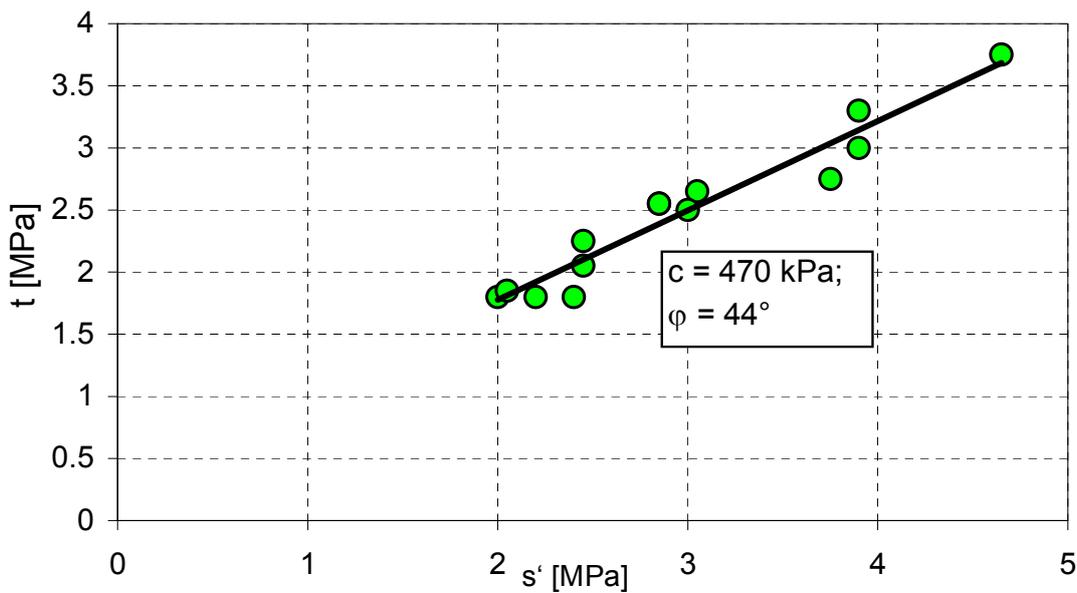


Figura 34: Blocco di ancoraggio Calabria – risultati dei test TX (foro di sondaggio AC BH3 505)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

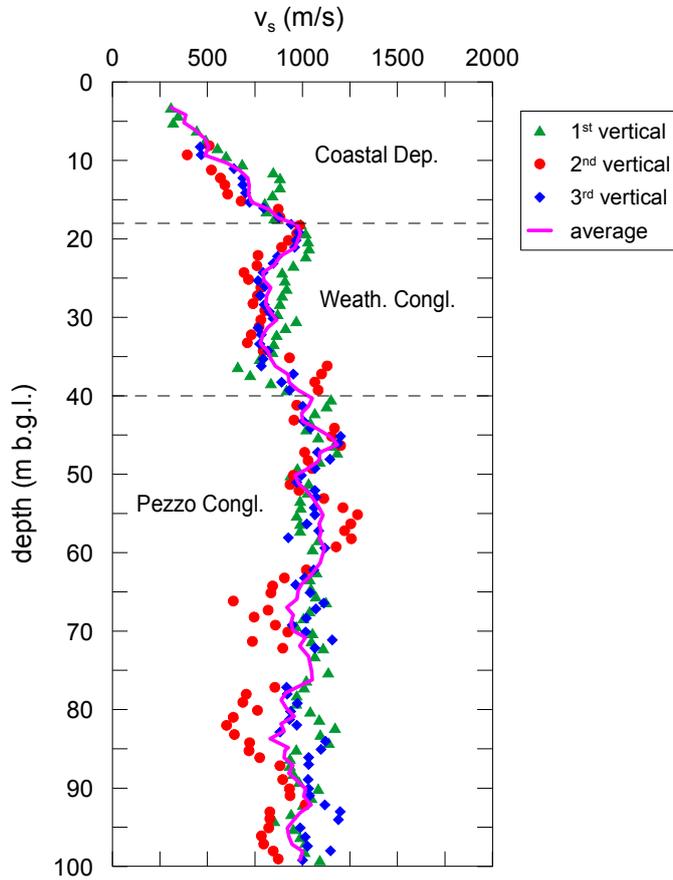


Figura 35: Blocco di ancoraggio Calabria – profilo  $v_s$  derivato dai test a foro trasversale

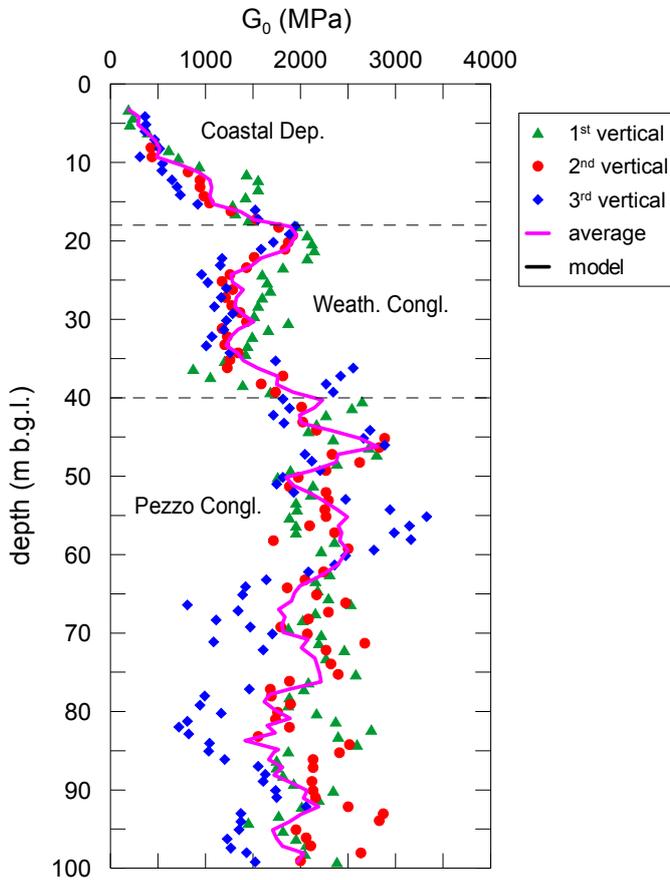
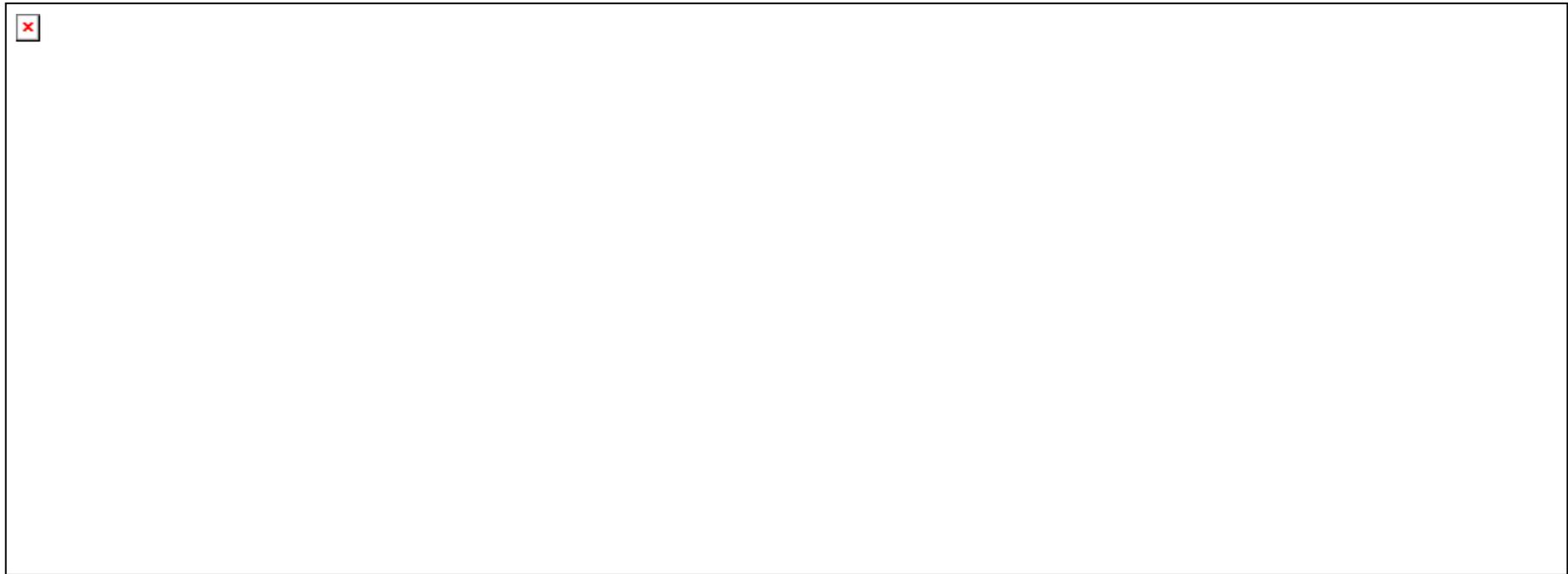


Figura 36: Blocco di ancoraggio Calabria – profilo  $G_0$  derivato dai test a foro trasversale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

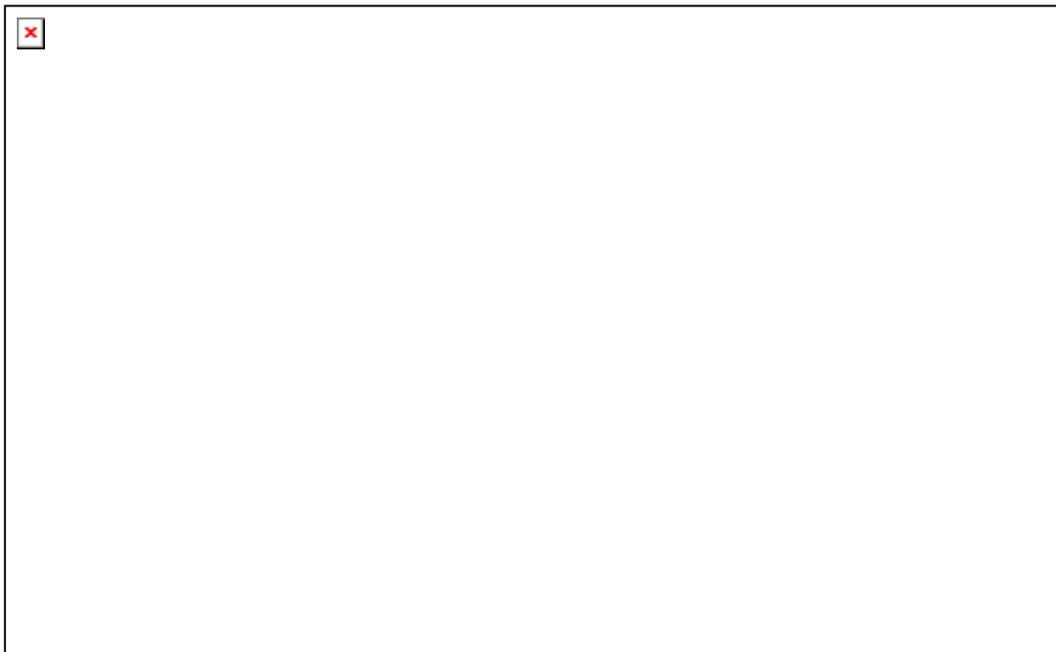


*Figura 37: Modello FD: sezione longitudinale della riva siciliana*

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>		
<p align="center">Analisi di interazione dinamica terreno- fondazione</p>	<p><i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc</p>	<p><i>Rev</i> F0</p>	<p><i>Data</i> 20/06/2011</p>	



*Figura 38: modello FD : sezione trasversale della torre Sicilia*



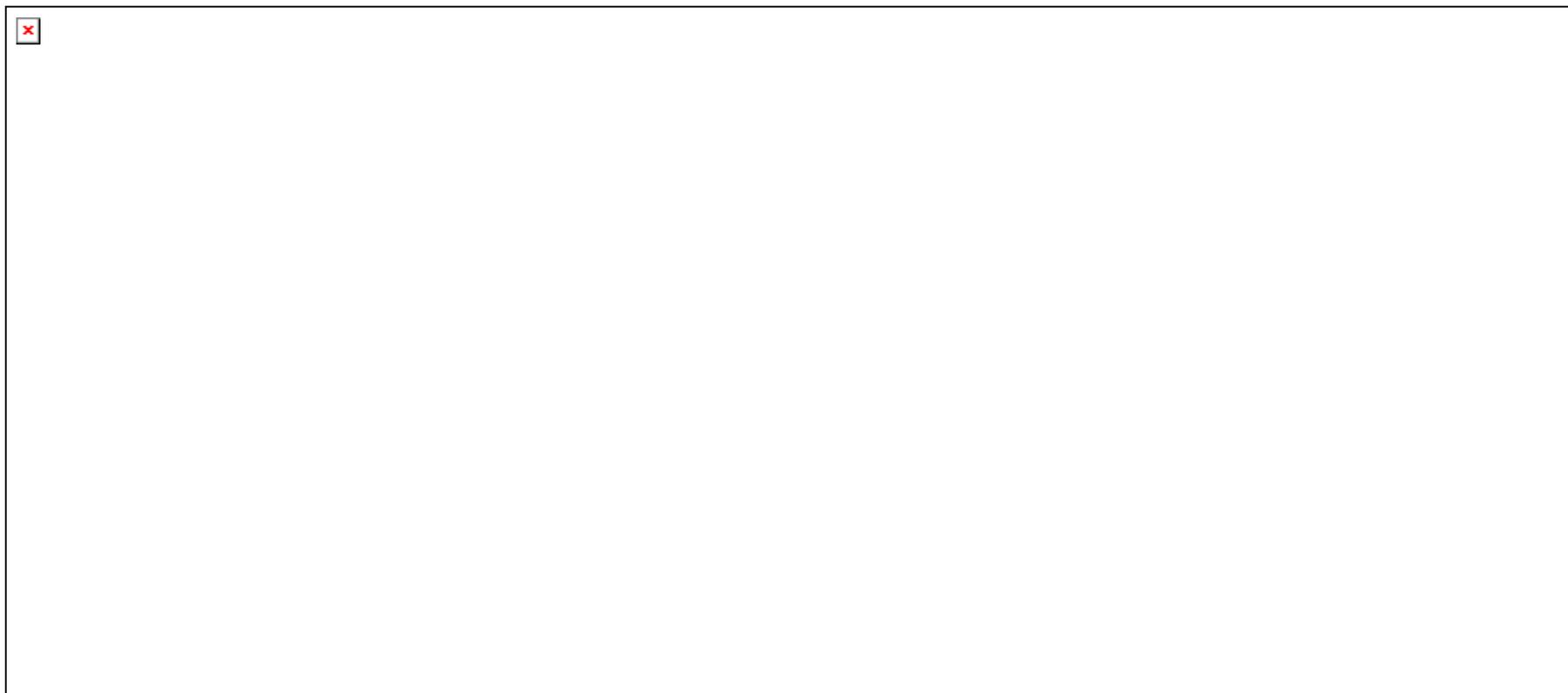
*Figura 39: modello FD: sezione trasversale del blocco ancoraggio Sicilia*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



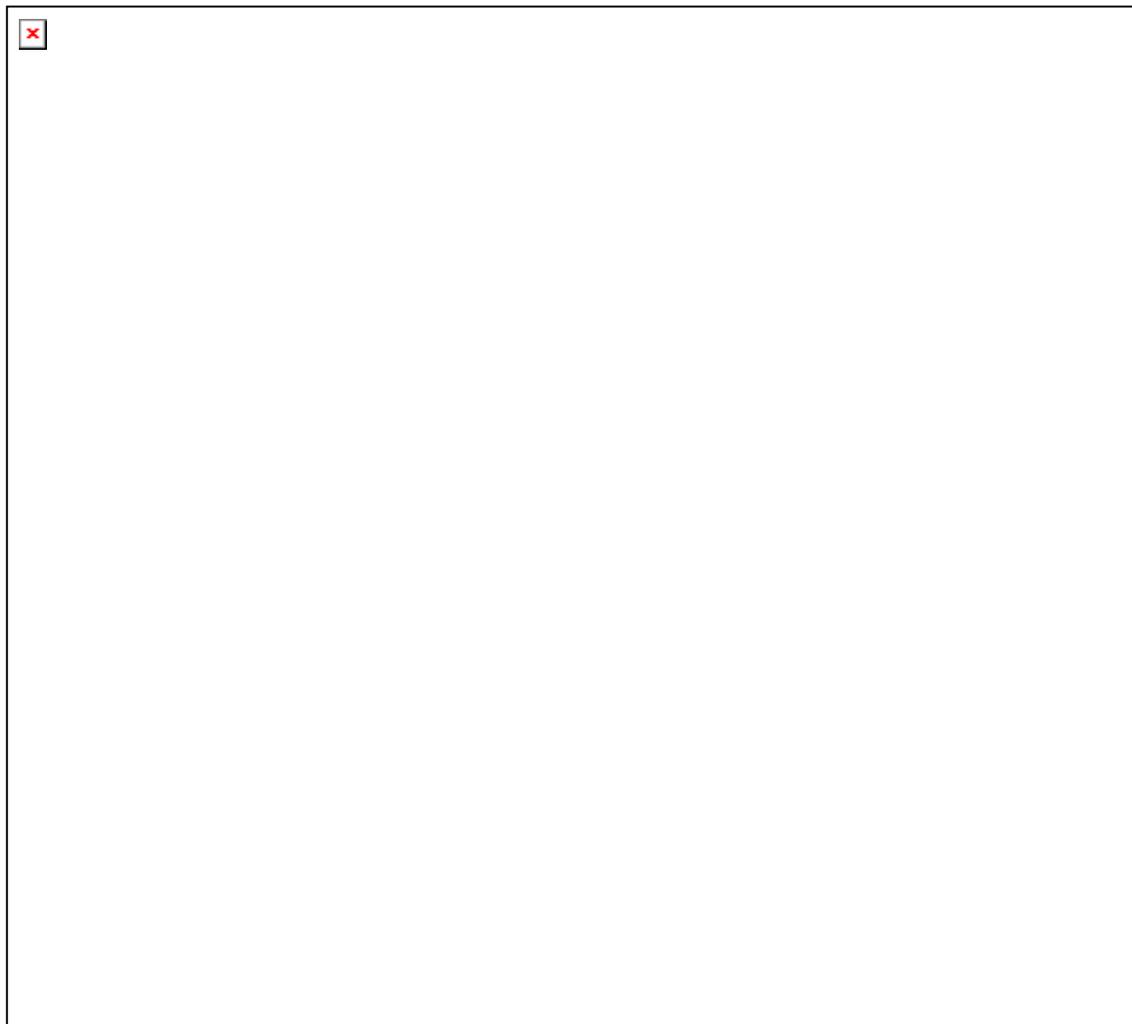
*Figura 40: modello FD: sezione trasversale della struttura terminale Sicilia*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno- fondazione	<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	



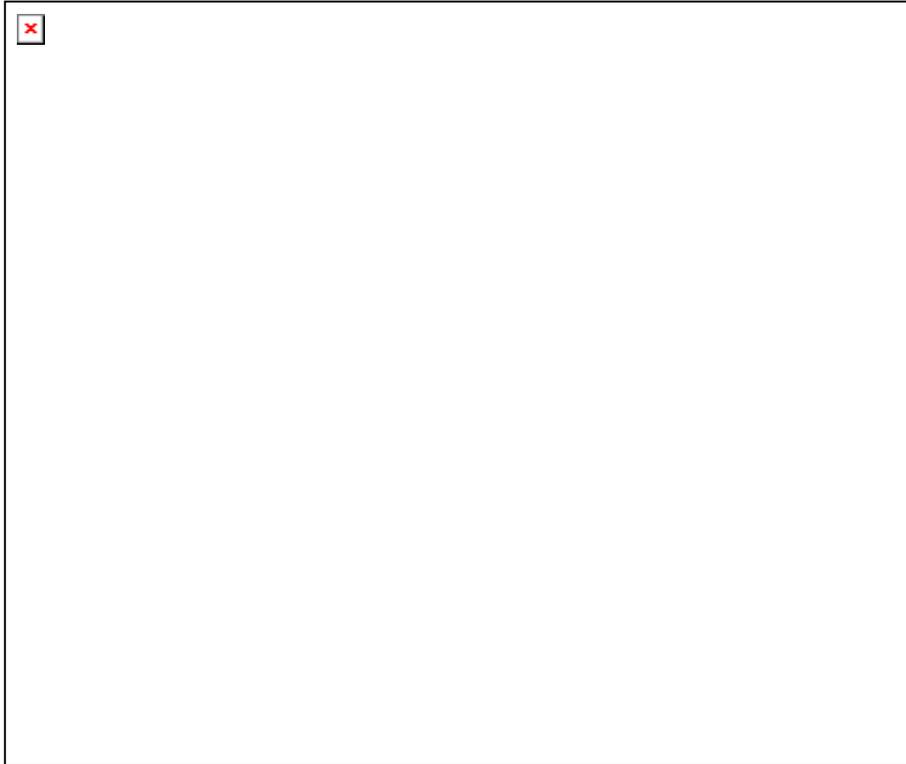
*Figura 41: modello FD: sezione longitudinale della riva calabrese*

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>		
<p align="center">Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</p>		<p><i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc</p>	<p><i>Rev</i> F0</p>	<p><i>Data</i> 20/06/2011</p>

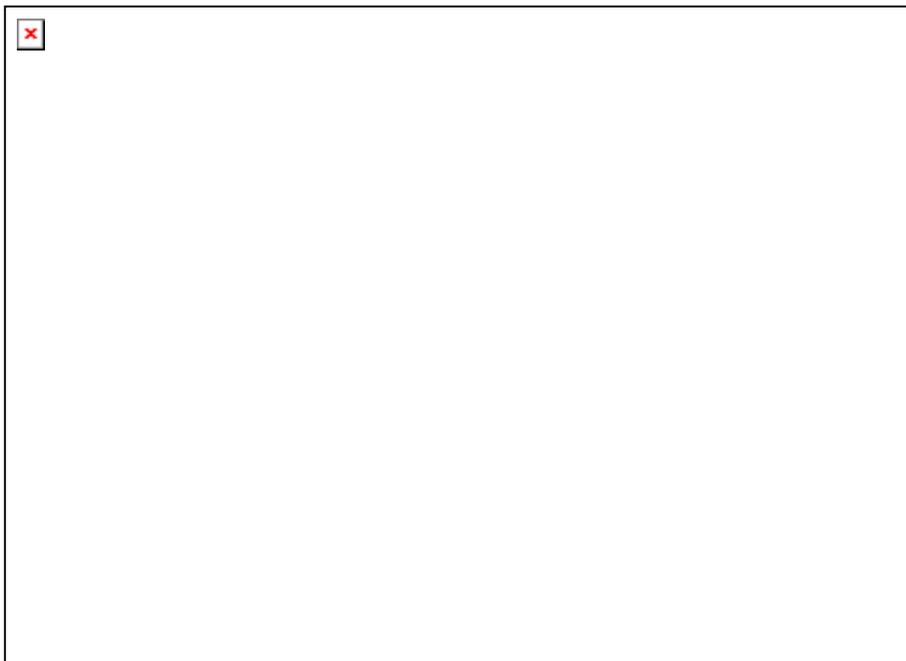


*Figura 42: modello FD: sezione trasversale della Torre Calabria*

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>		
<p align="center">Analisi di interazione dinamica terreno- fondazione</p>	<p><i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc</p>	<p><i>Rev</i> F0</p>	<p><i>Data</i> 20/06/2011</p>	



*Figura 43: modello FD: sezione trasversale del blocco di ancoraggio Calabria*



*Figura 44: modello FD: sezione trasversale della struttura terminale Calabria*

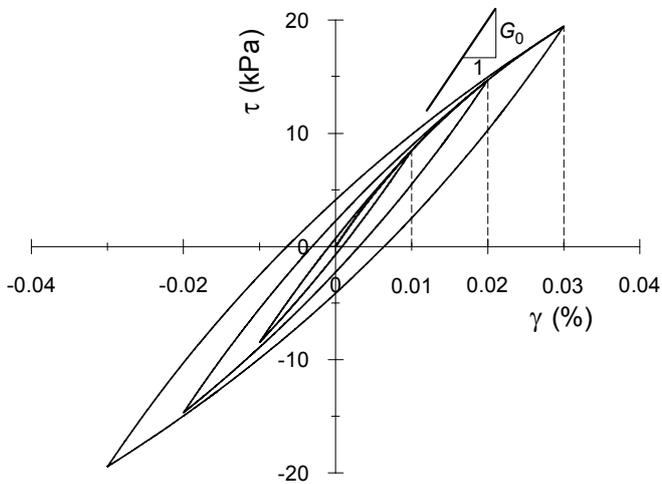


Figura 45: Tipica risposta alla sollecitazione di taglio del modello di isteresi del suolo

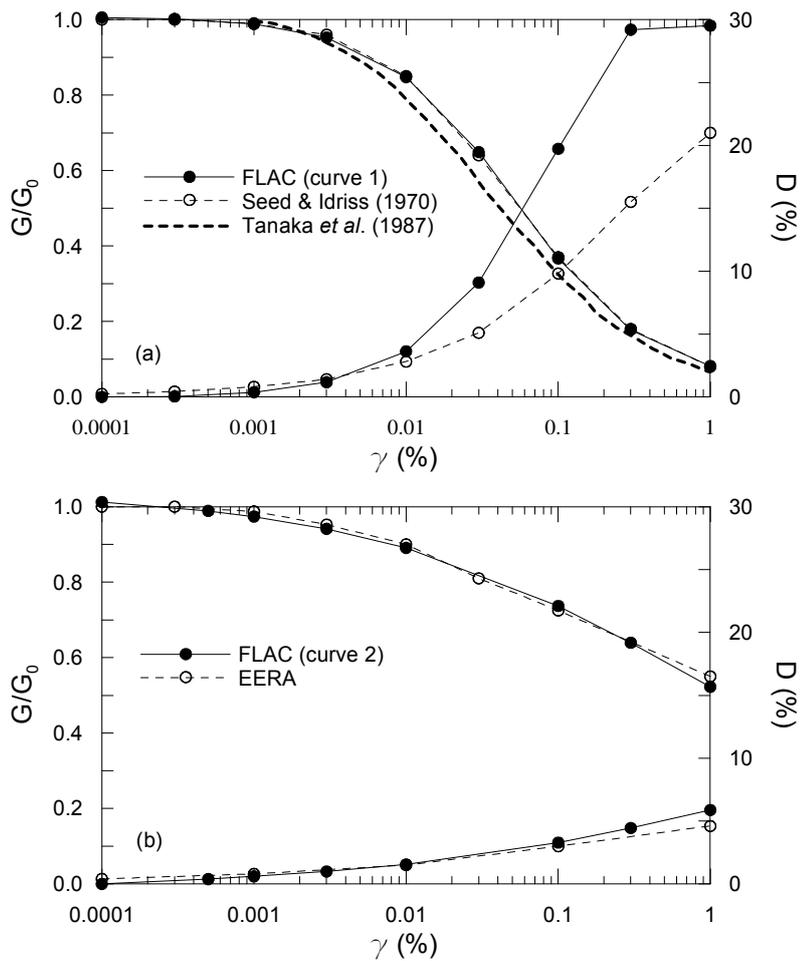


Figura 46: Taratura del modello di isteresi

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

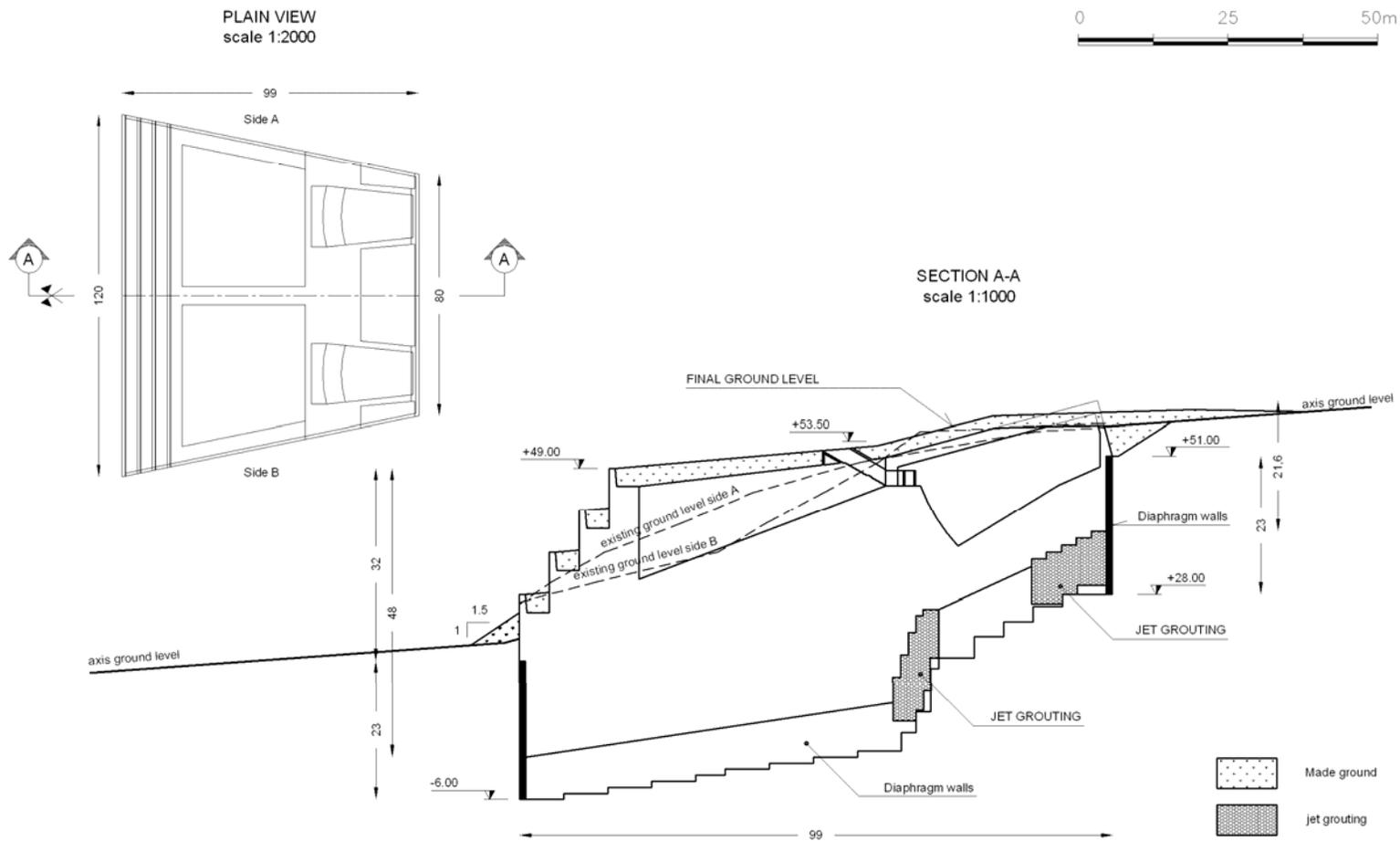


Figura 47: Vista in pianta e sezione trasversale del blocco di ancoraggio Sicilia

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

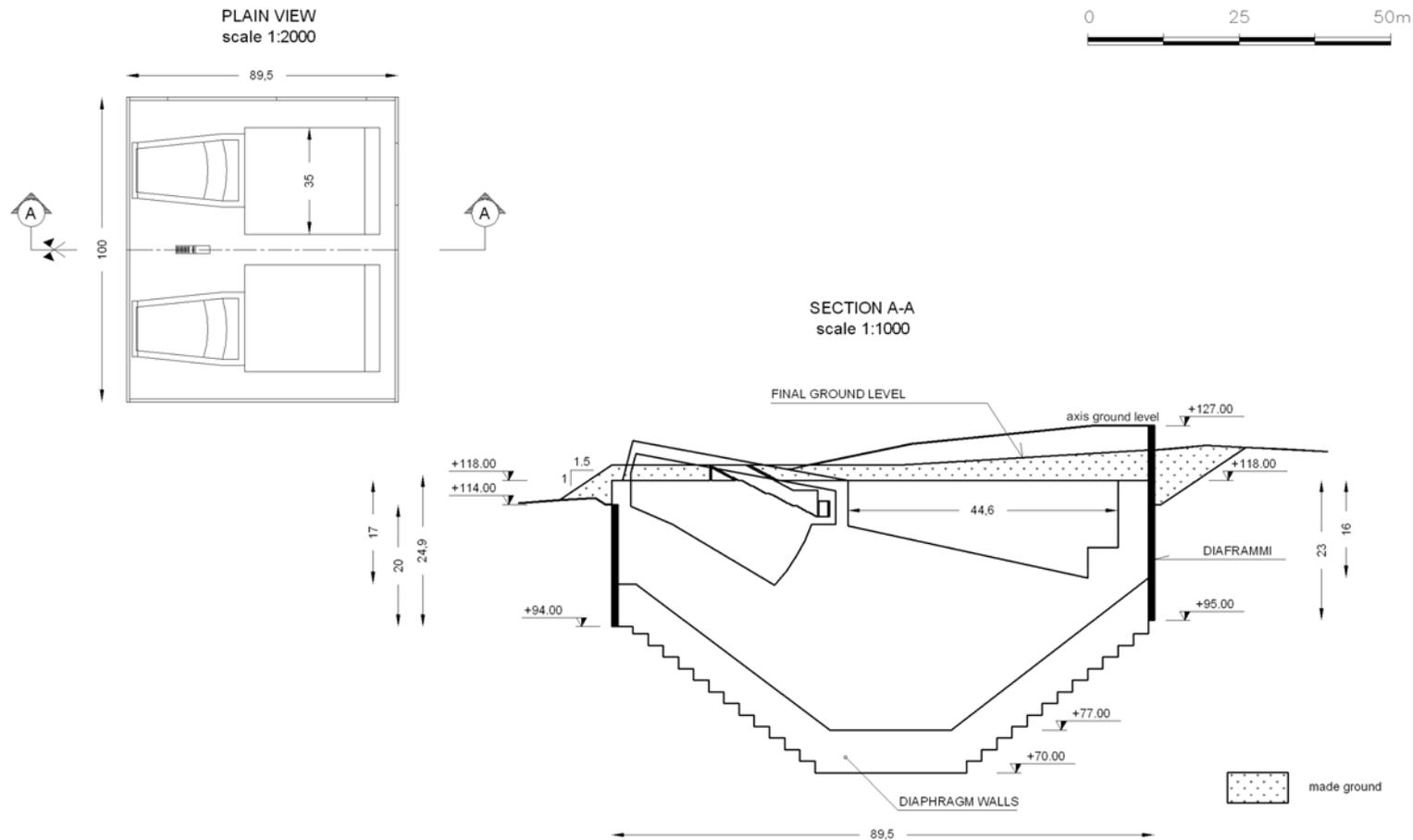


Figura 48: Vista in pianta e sezione trasversale del blocco di ancoraggio Calabria

**TRANSVERSAL  
MODEL**

**LONGITUDINAL  
MODEL**

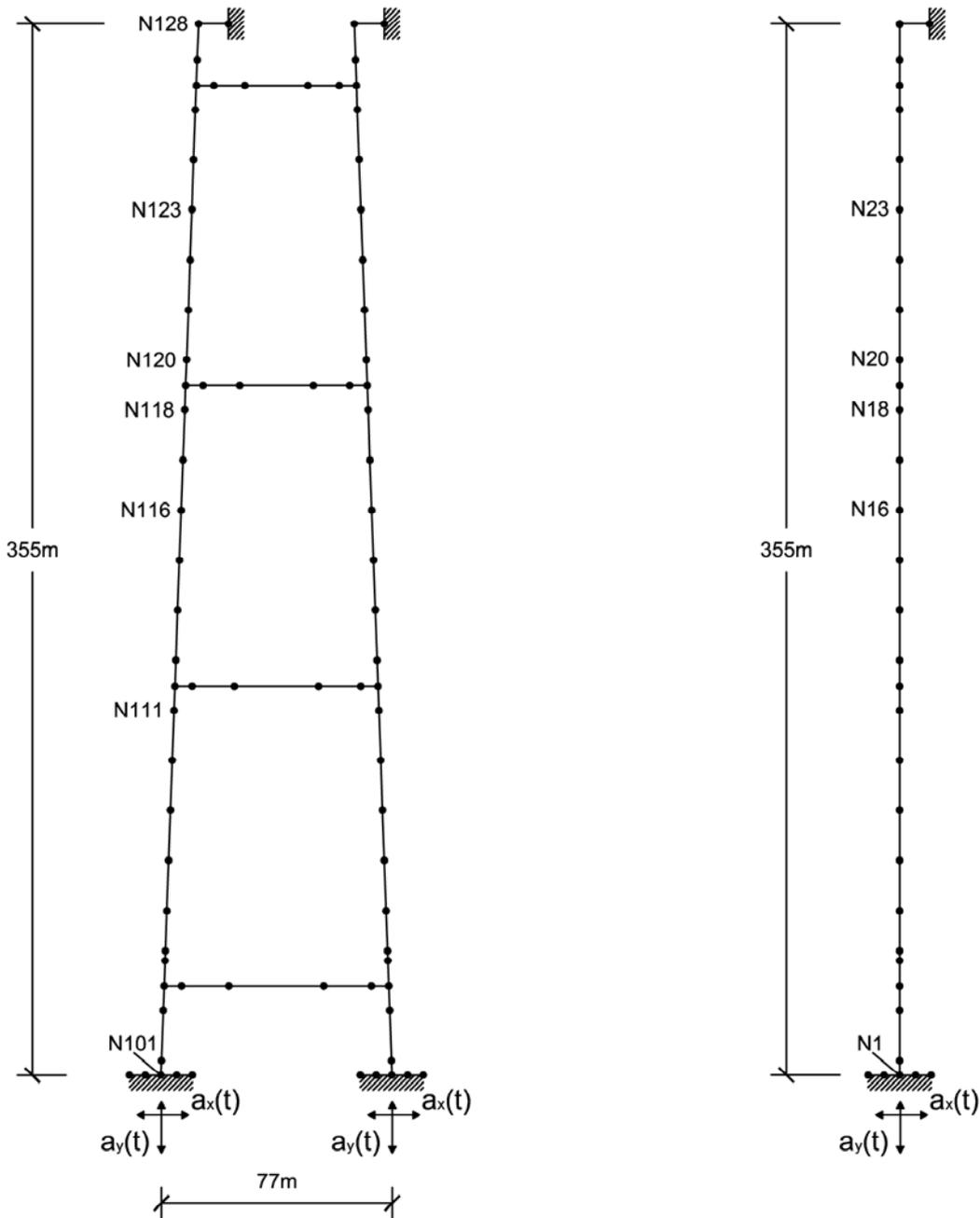


Figura 49. Modello longitudinale e trasversale delle due torri

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</b>		<b>Codice documento</b> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<b>Rev</b> <i>F0</i>	<b>Data</b> <i>20/06/2011</i>

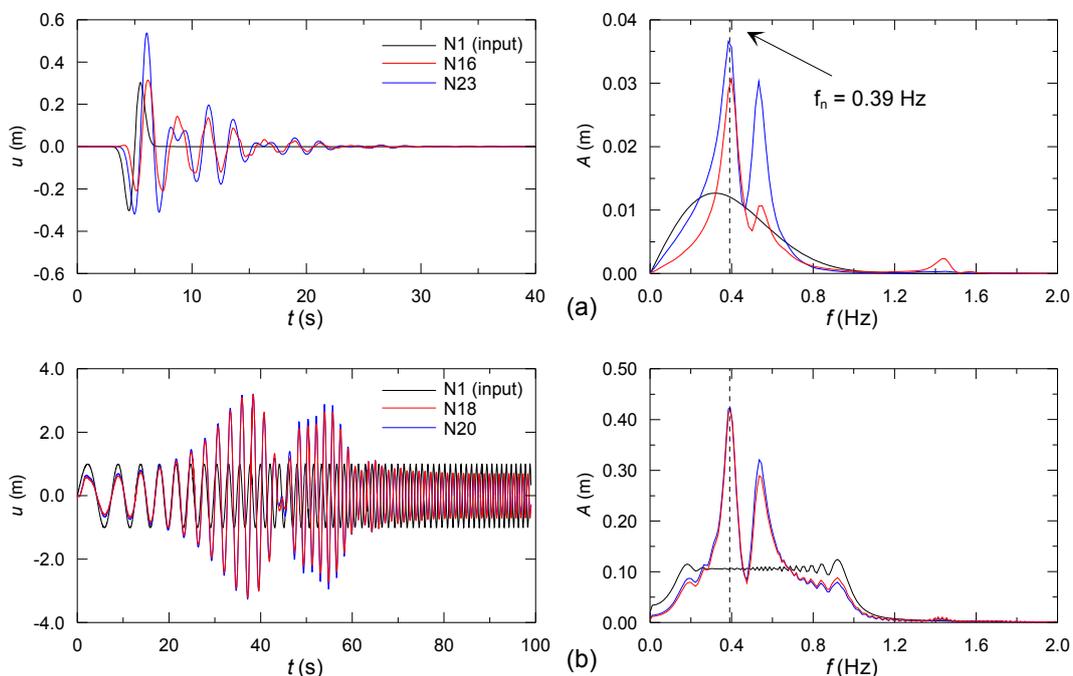


Figura 49. Modello longitudinale della torre Sicilia. Risposta dinamica per il movimento di input di una piccola onda (a) e un assestamento (b)

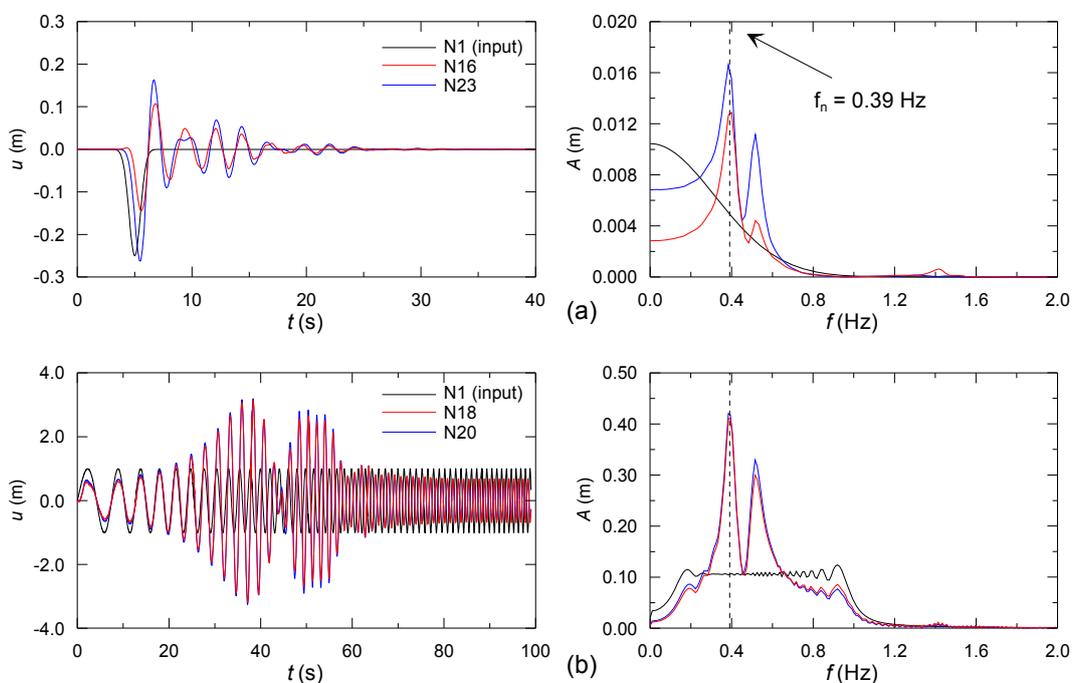


Figura 50. Modello longitudinale della torre Calabria. Risposta dinamica per il movimento di input di una piccola onda (a) e un assestamento (b)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</b>		<b>Codice documento</b> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<b>Rev</b> <i>F0</i>	<b>Data</b> <i>20/06/2011</i>

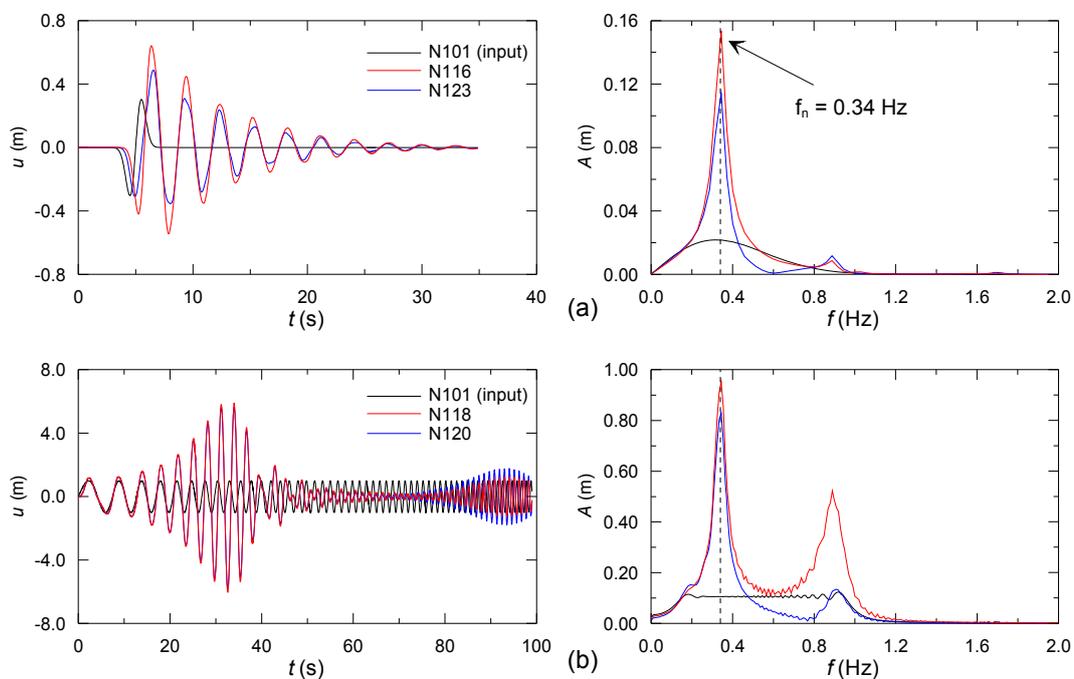


Figura 51. Modello trasversale della torre Sicilia. Risposta dinamica per il movimento di input da una piccola onda (a) e un assestamento (b)

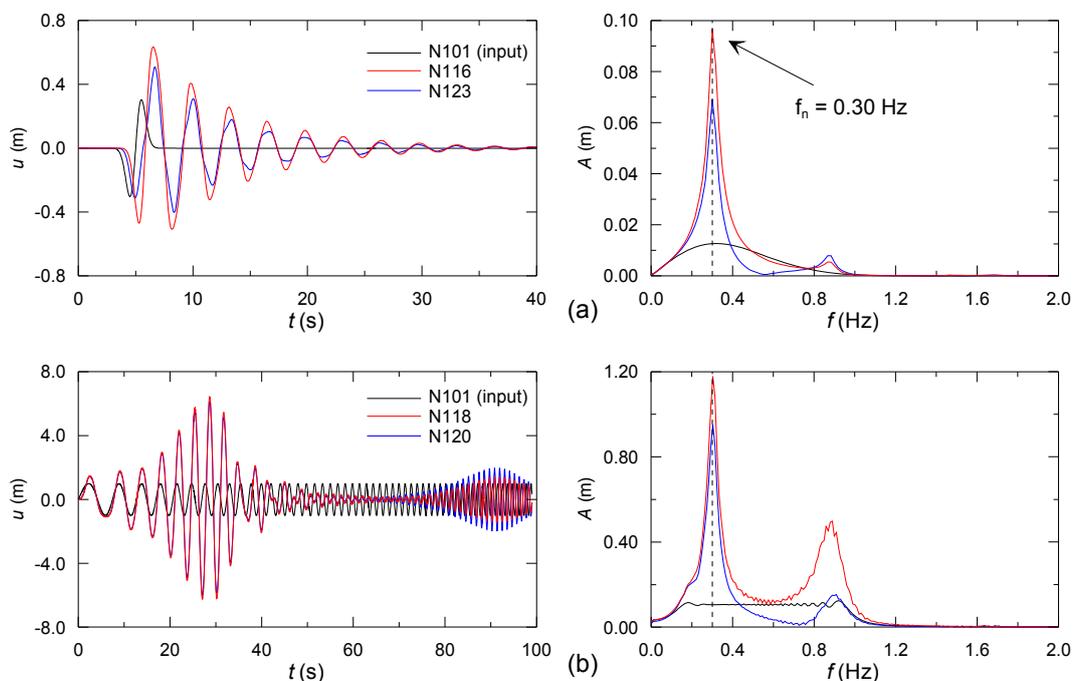


Figura 52. Modello trasversale della torre Calabria tower. Risposta dinamica per il movimento di input da una piccola onda (a) e un assestamento (b)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

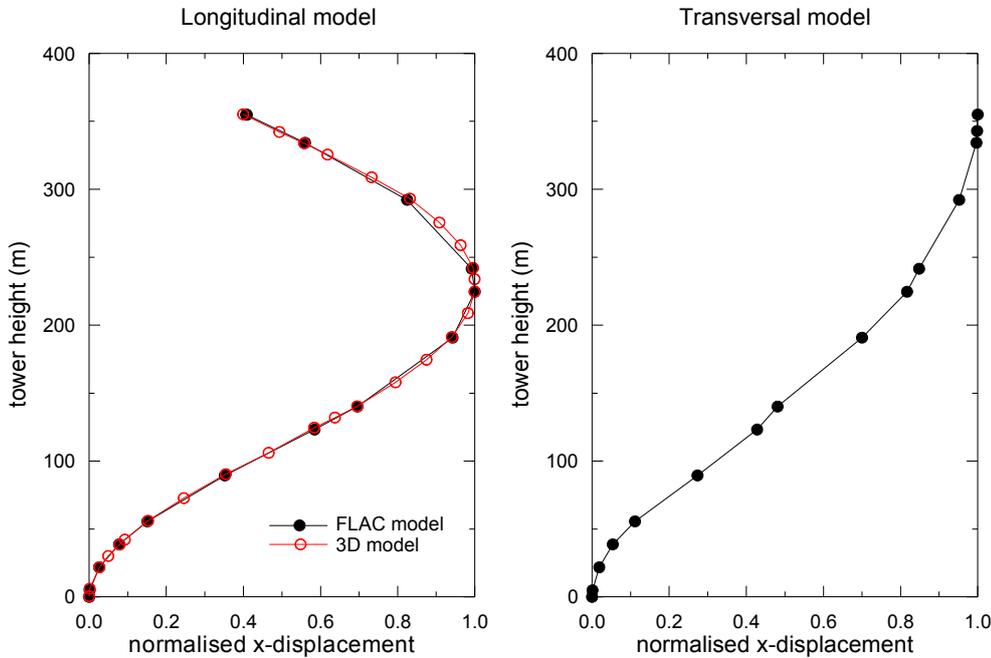


Figura 53. Forma modale normalizzata della torre Sicilia per il modello longitudinale e trasversale. Confronto fra il modello a 3D e il modello FLAC

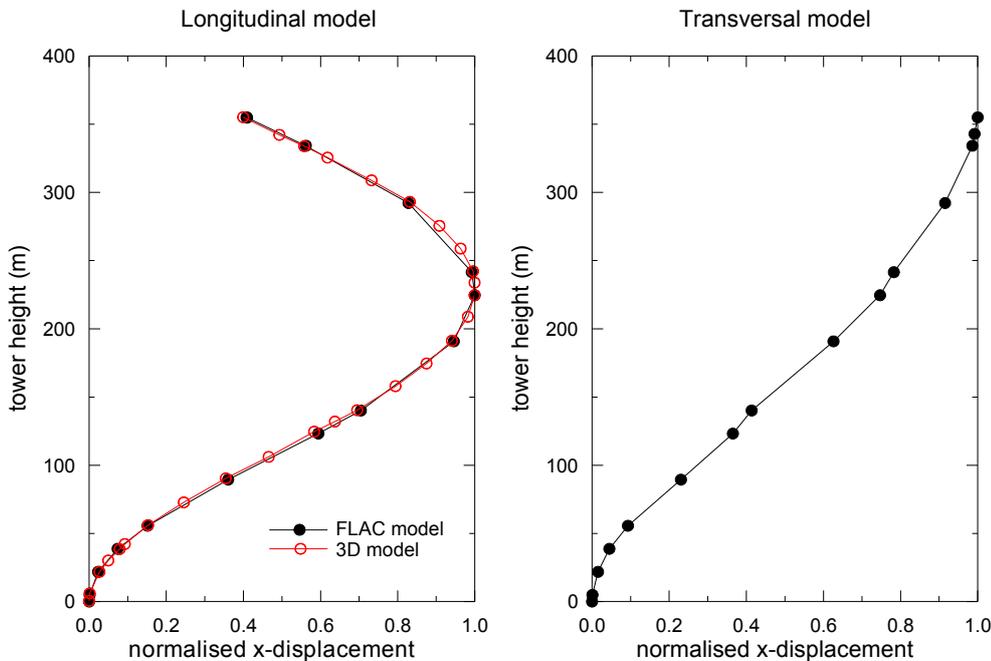


Figura 54. Forma modale normalizzata della torre Calabria tower per il modello longitudinale e trasversale. Confronto fra il modello a 3D e il modello FLAC.

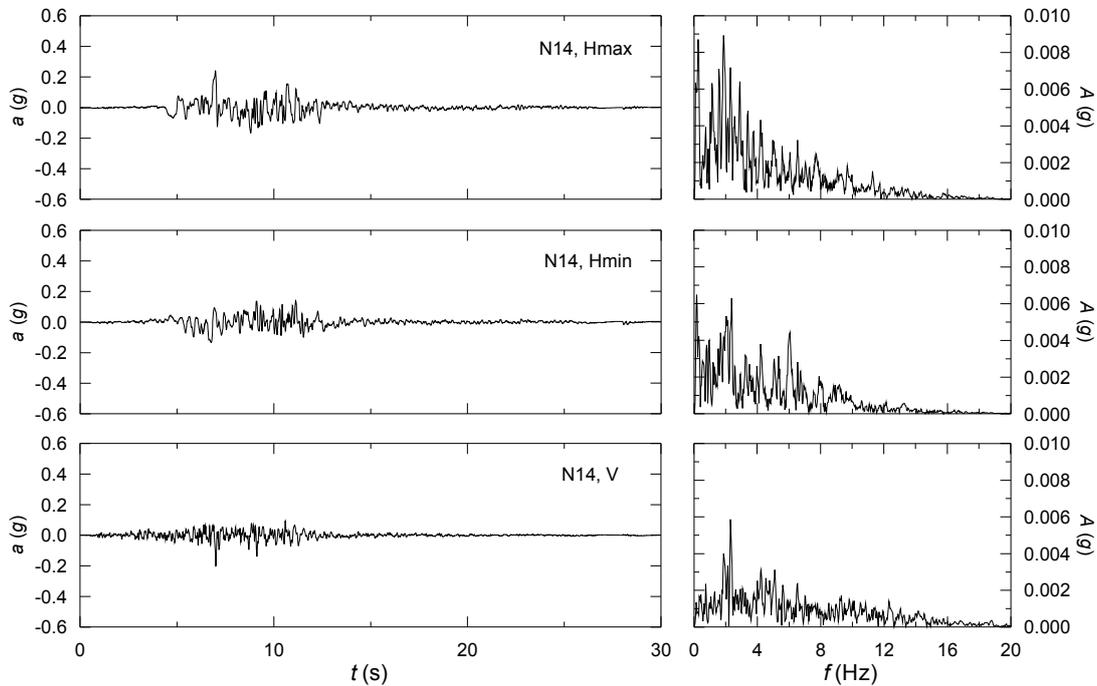


Figura 55. terremoto N14. Storici e spettro di Fourier dei tre componenti del segnale registrato

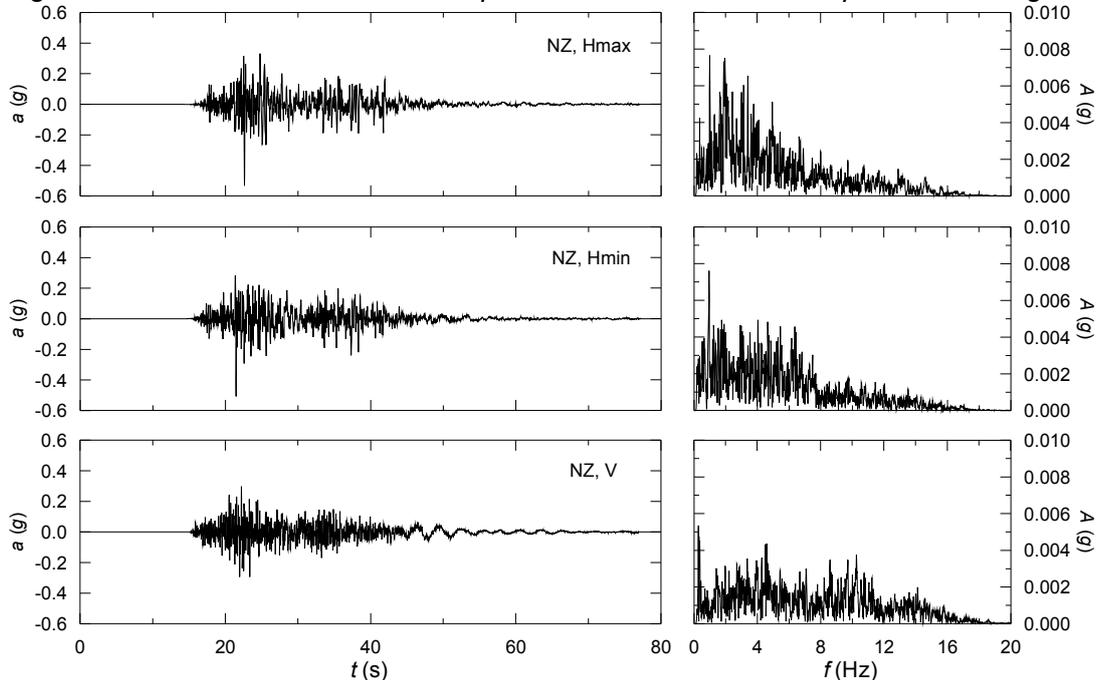


Figura 56. Terremoto NZ. Storici e spettro di Fourier dei tre componenti del segnale registrato

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

SICILIA

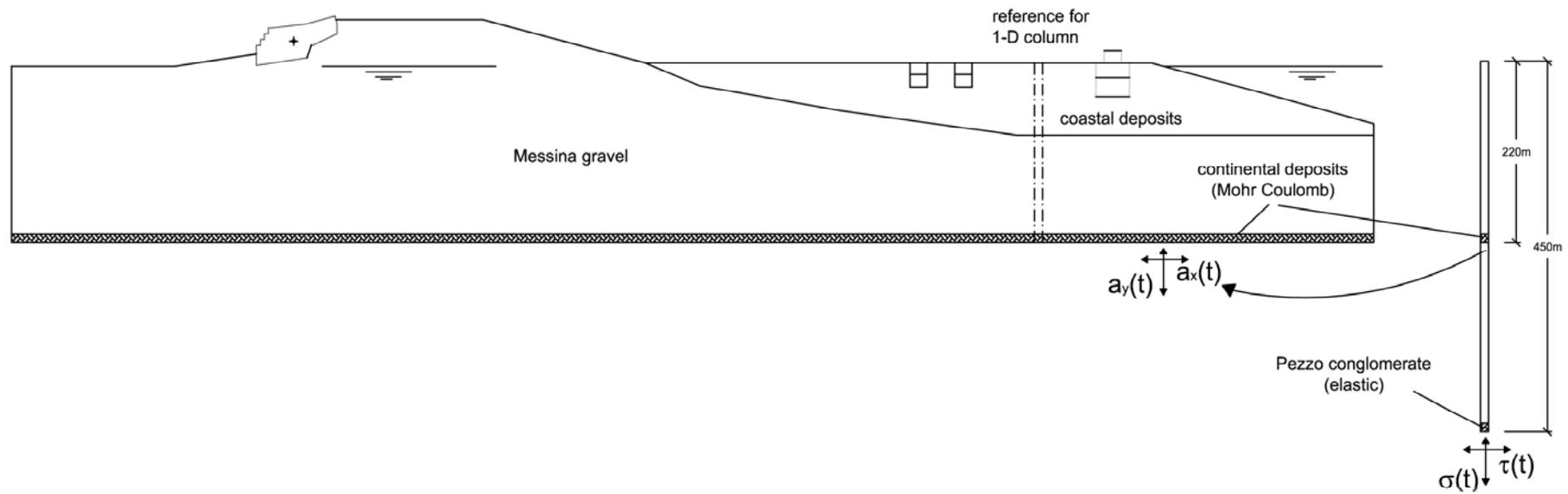


Figura 57. Schema dell'analisi di deconvoluzione per la riva siciliana.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

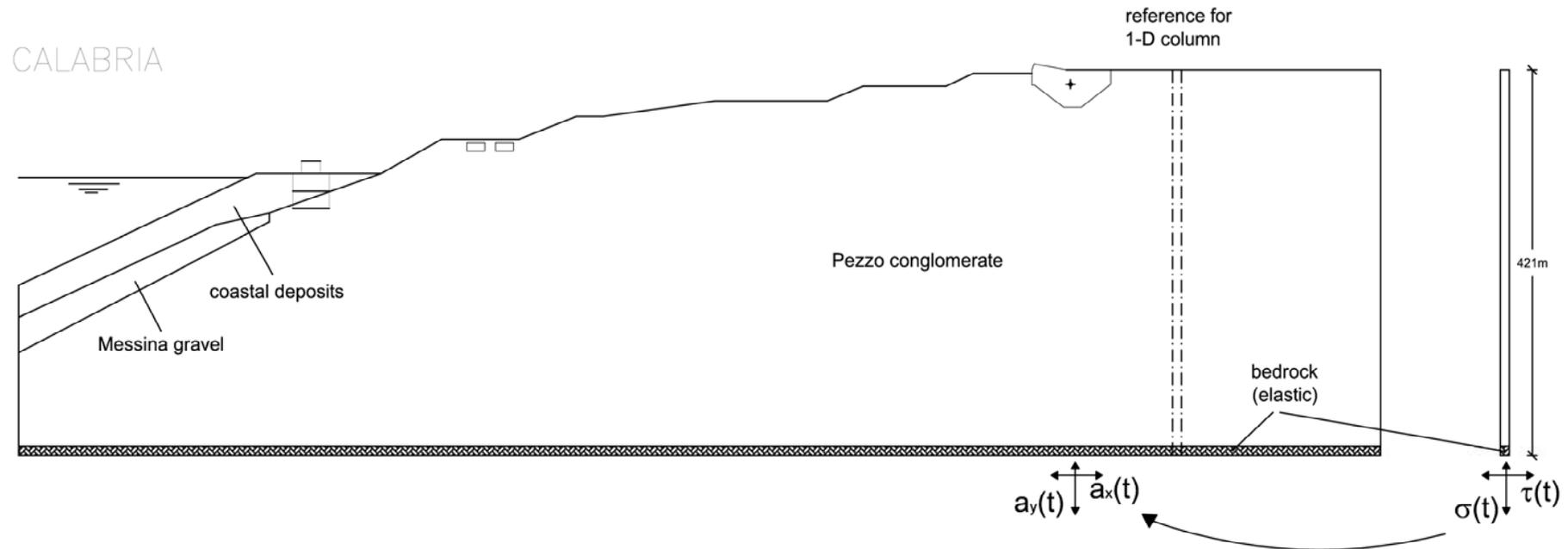
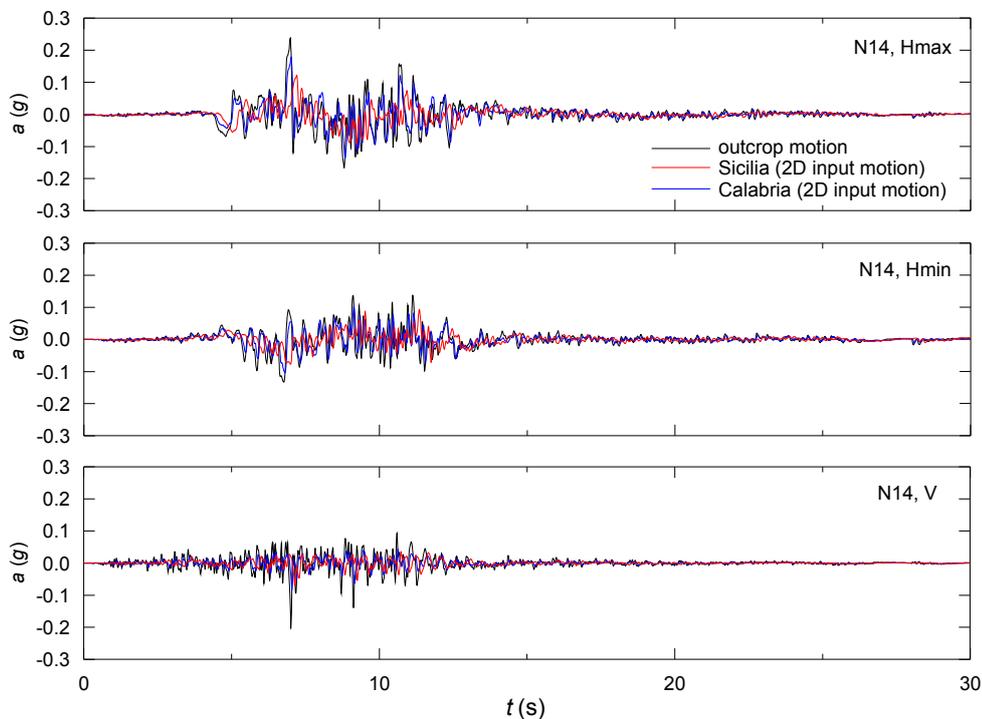
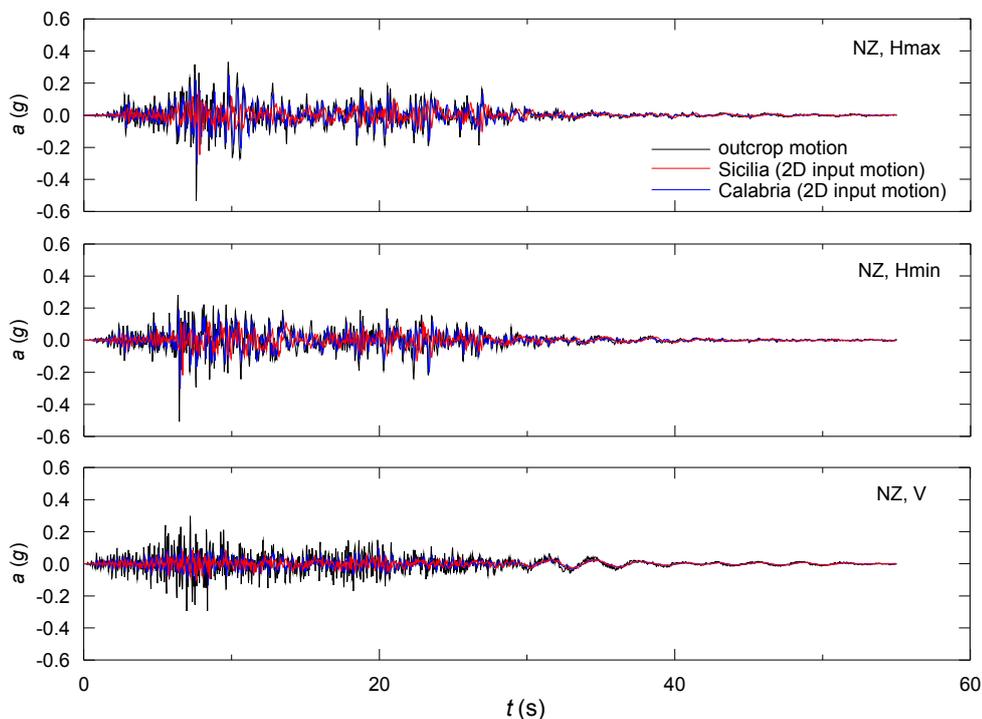


Figura 58. Schema dell'analisi di deconvoluzione per la riva calabrese.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</b>		<i>Codice documento</i> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>

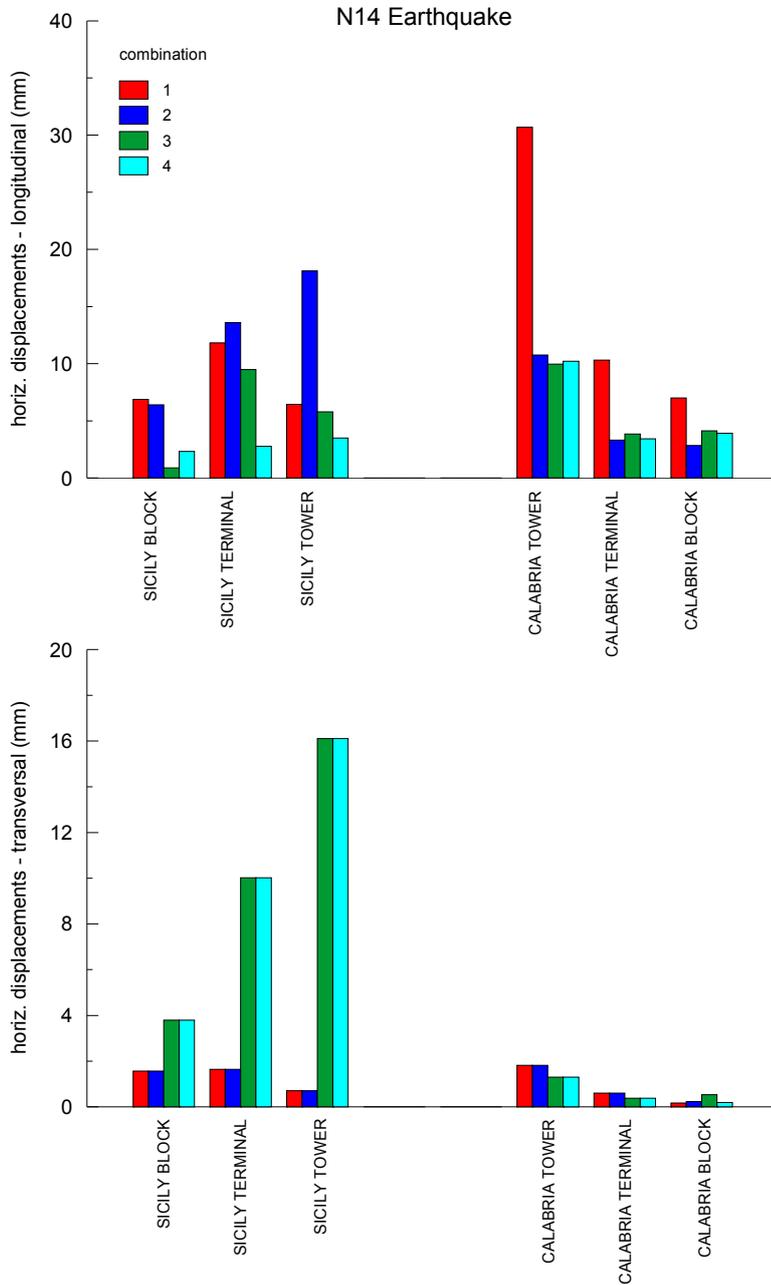


*Figura 59. Terremoto di progetto N14. Storici dell'accelerazione calcolati dall'analisi di deconvoluzione alla profondità di riferimento per la base della maglia nelle analisi a 2D*



*Figura 60. Terremoto di progetto NZ. Storici dell'accelerazione calcolati dall'analisi di deconvoluzione alla profondità di riferimento per la base della maglia nelle analisi a 2D*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</b>		<i>Codice documento</i> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>



*Figura 61. Spostamenti orizzontali permanenti prodotti dalla registrazione N14*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</b>		<i>Codice documento</i> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>

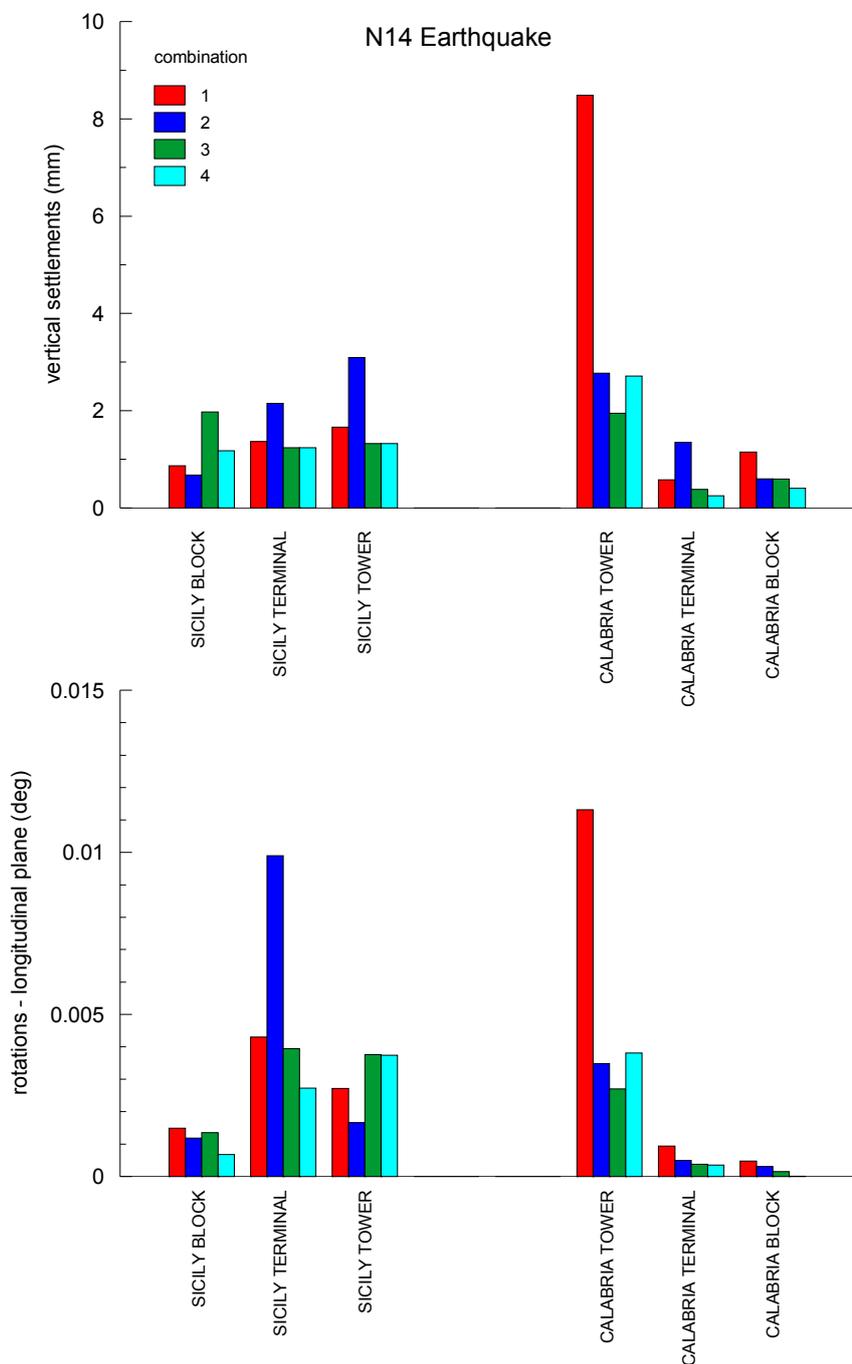
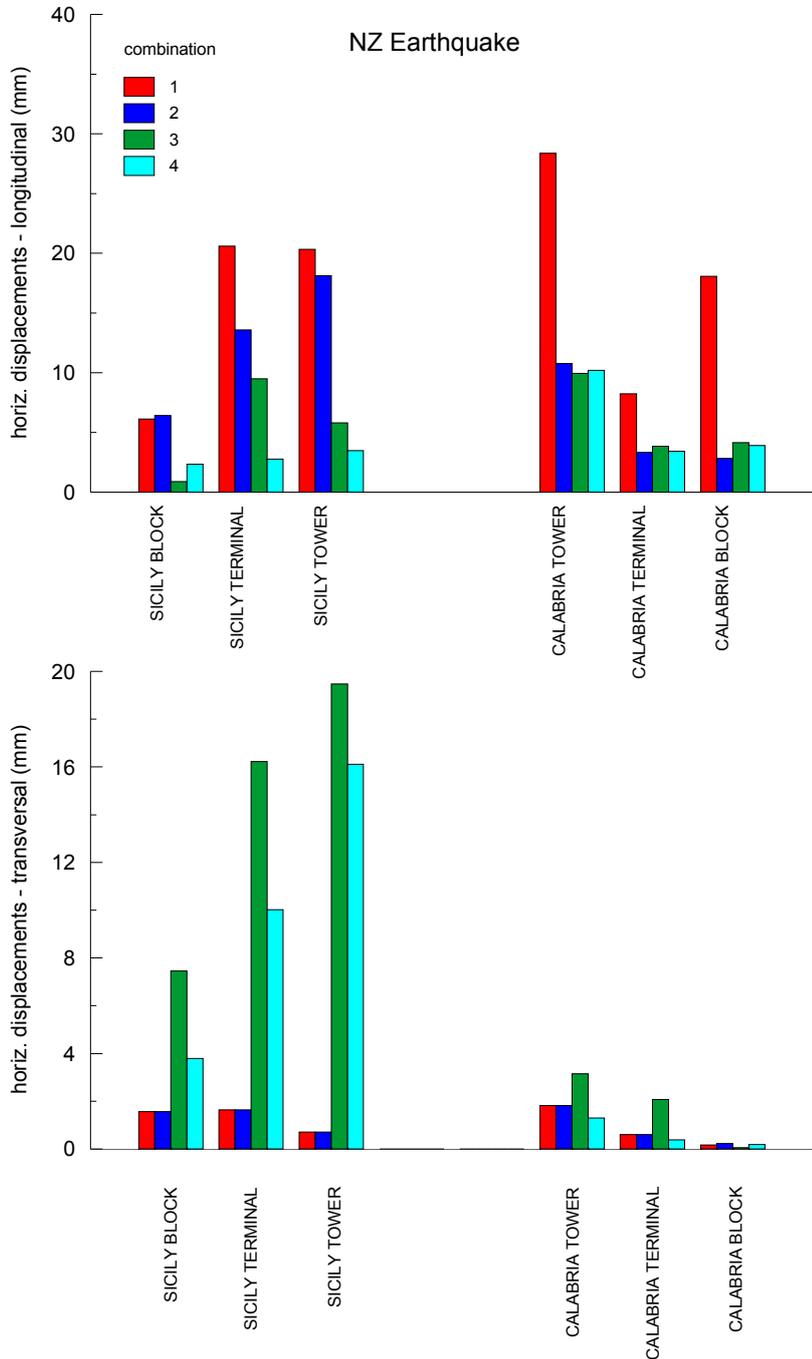


Figura 62. Assestamenti permanenti e rotazioni prodotti dalla registrazione N14

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</b>		<i>Codice documento</i> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>



*Figura 63. Spostamenti orizzontali permanenti prodotti dalla registrazione NZ*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</b>		<i>Codice documento</i> <b>PB0032_F0_ITA.doc</b>	<i>Rev</i> <b>F0</b>	<i>Data</i> <b>20/06/2011</b>

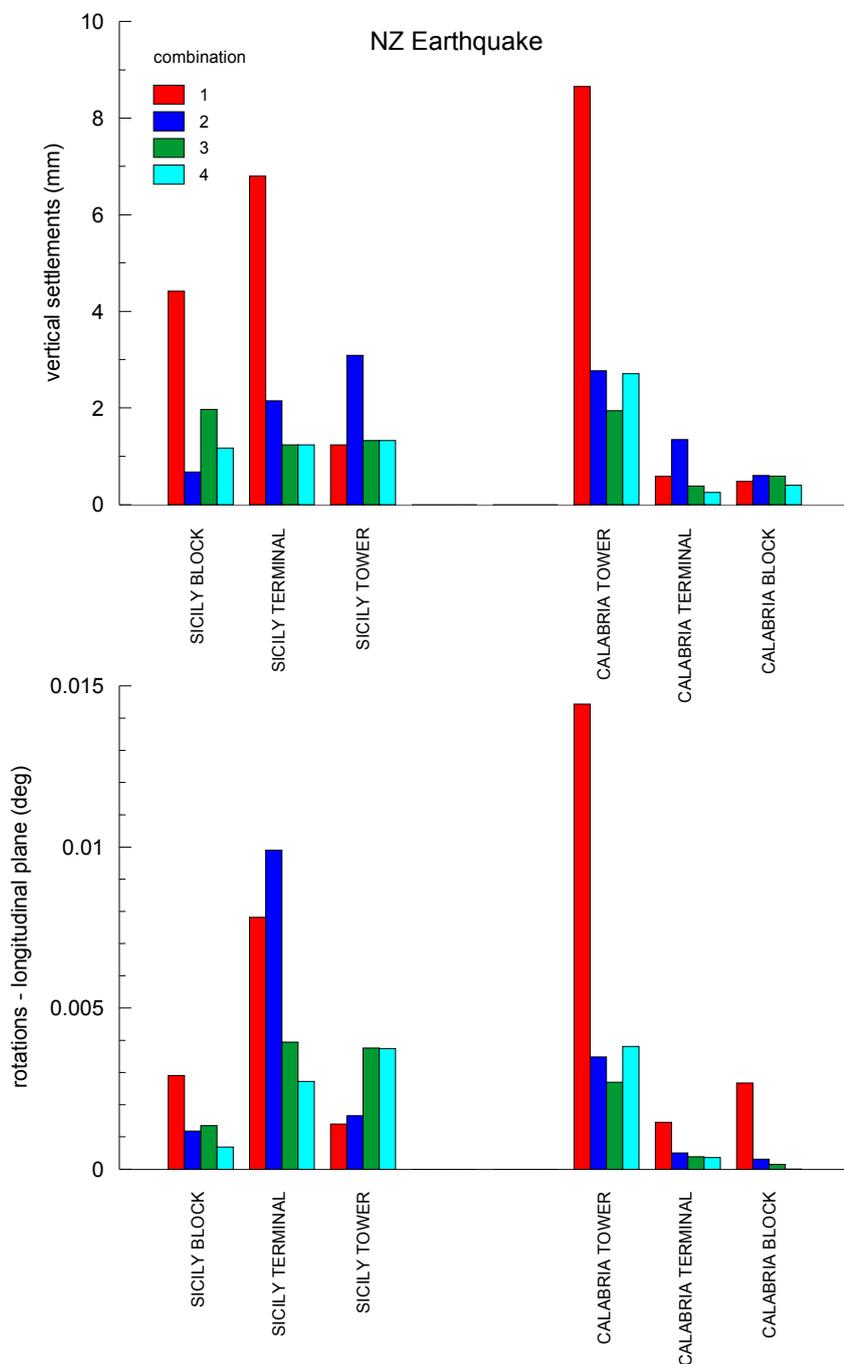


Figura 64. Assestamenti permanenti e rotazioni prodotti dalla registrazione NZ

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>

### N14 Earthquake

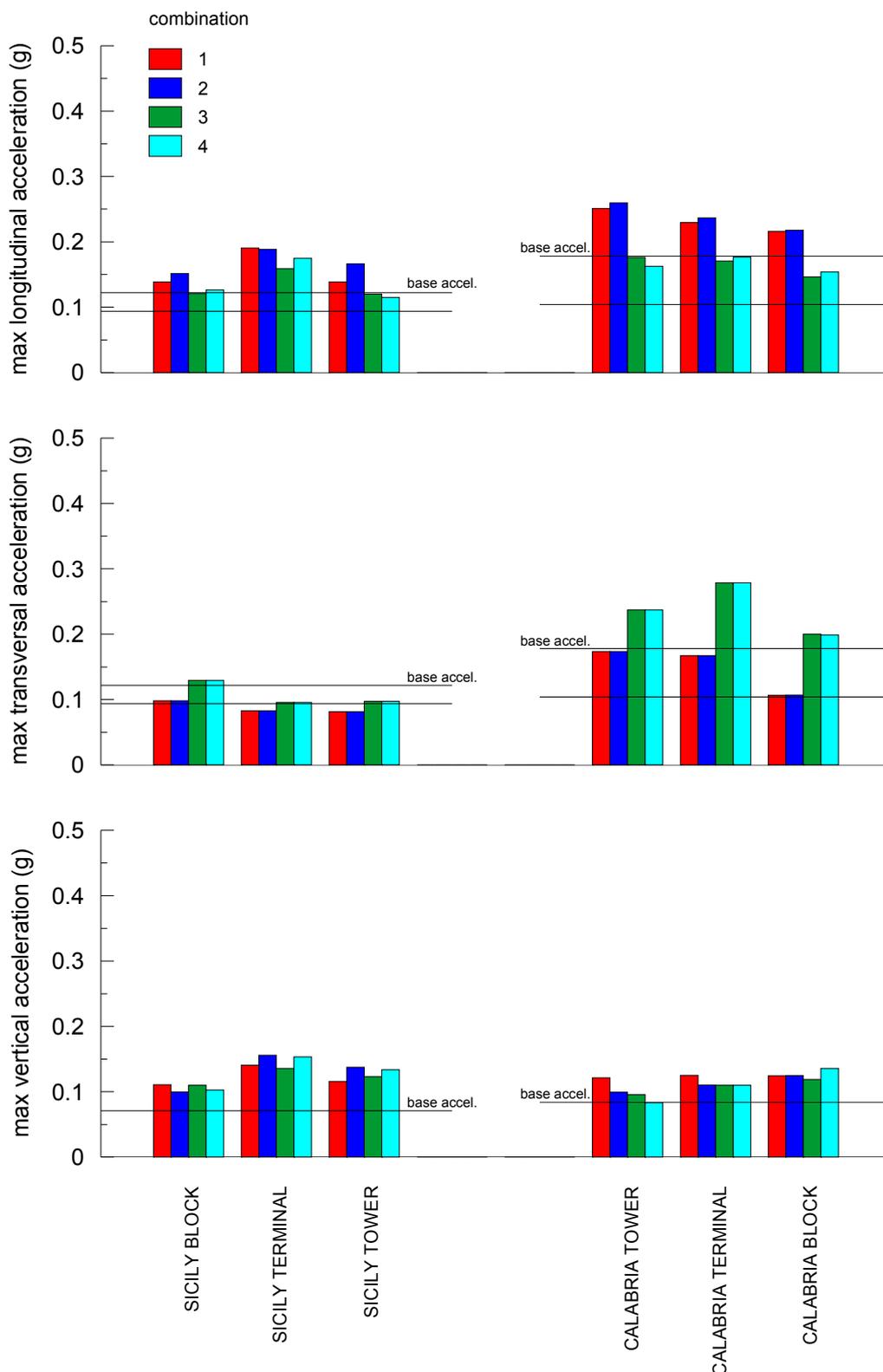


Figura 65. Accelerazioni massime calcolate durante la registrazione N14

### NZ Earthquake

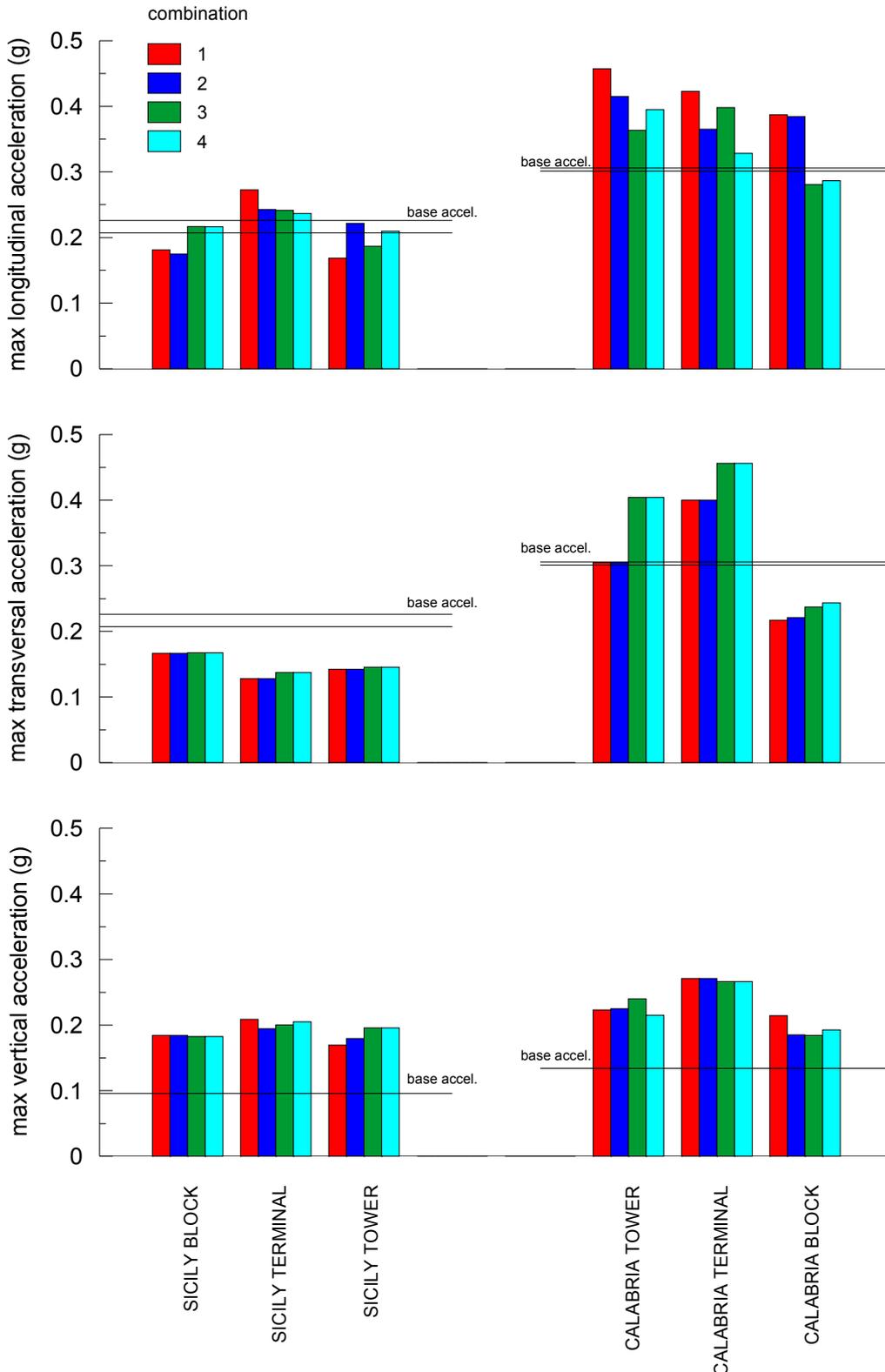


Figura 66. Accelerazioni massime calcolate durante la registrazione NZ

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

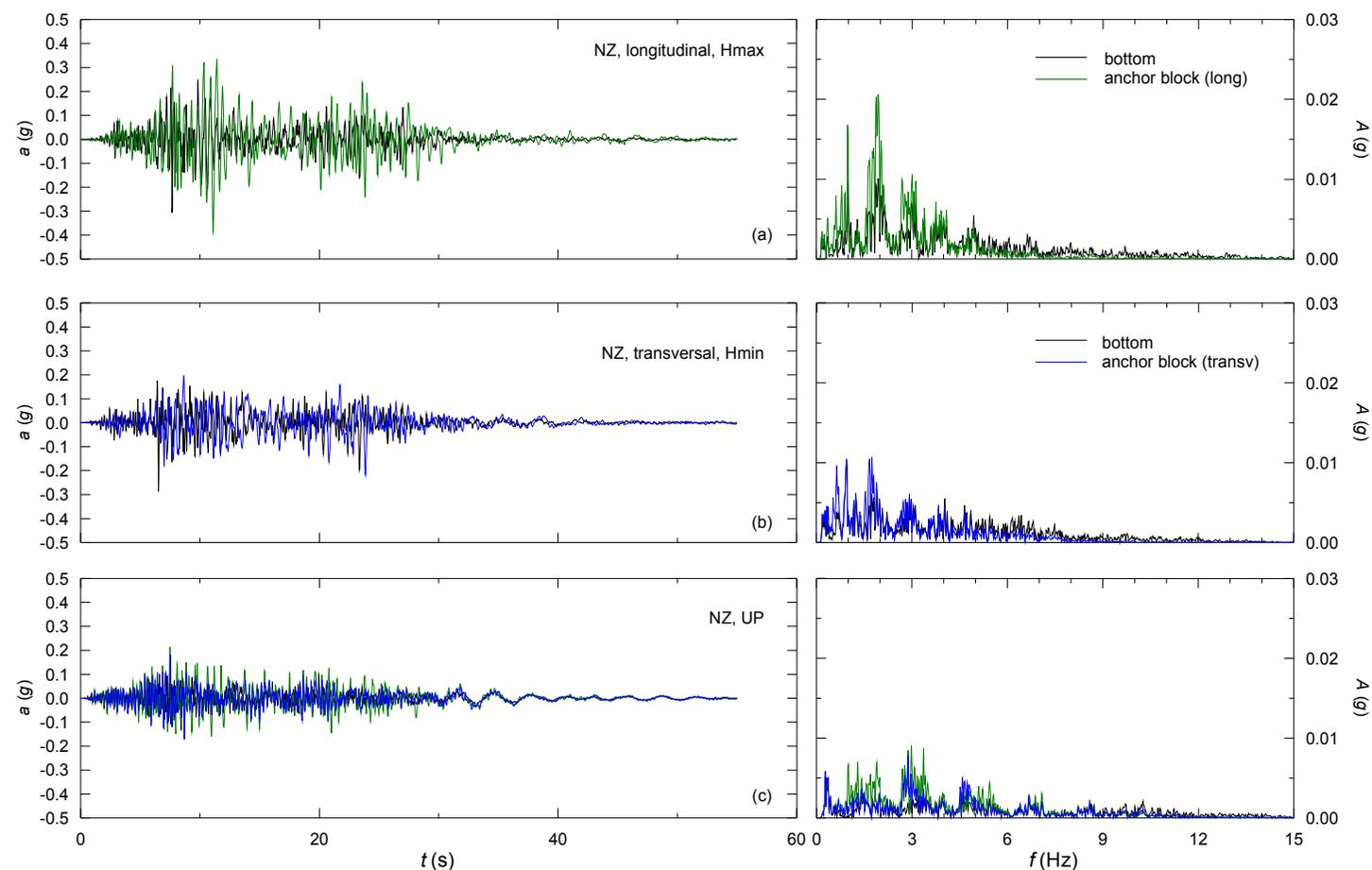
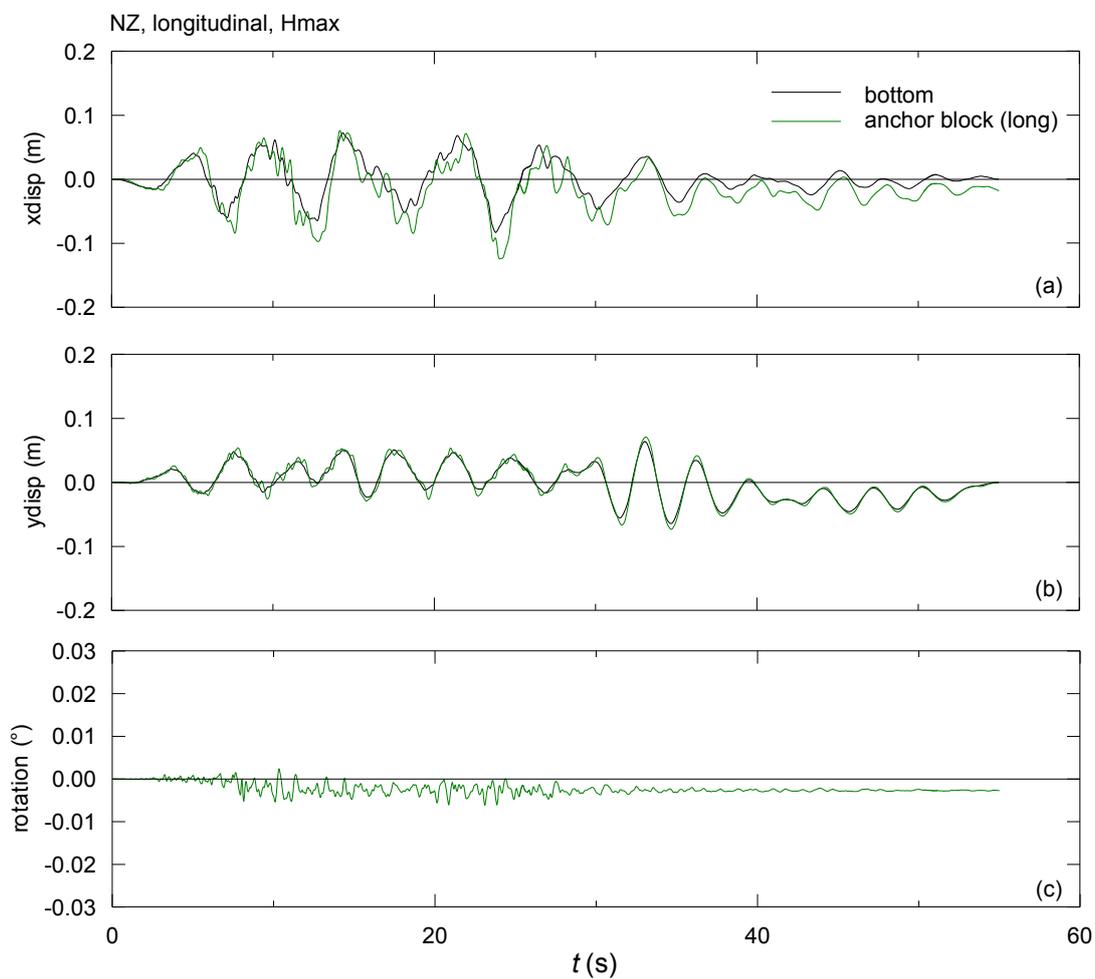


Figura 67. Terremoto NZ, comb.1, riva dalabrese. Storici di accelerazione e spettri di Fourier al baricentro del blocco di ancoraggio: (a) accelerazione orizzontale in direzione longitudinale, (b) accelerazione orizzontale in direzione trasversale e (c) accelerazione verticale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</b>		<b>Codice documento</b> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<b>Rev</b> <i>F0</i>	<b>Data</b> <i>20/06/2011</i>



*Figura 68. terremoto NZ, comb.1. Sezione longitudinale della riva calabrese: (a) spostamenti orizzontali e (b) spostamenti verticali, e (c) storici delle rotazioni al baricentro del blocco di ancoraggio*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

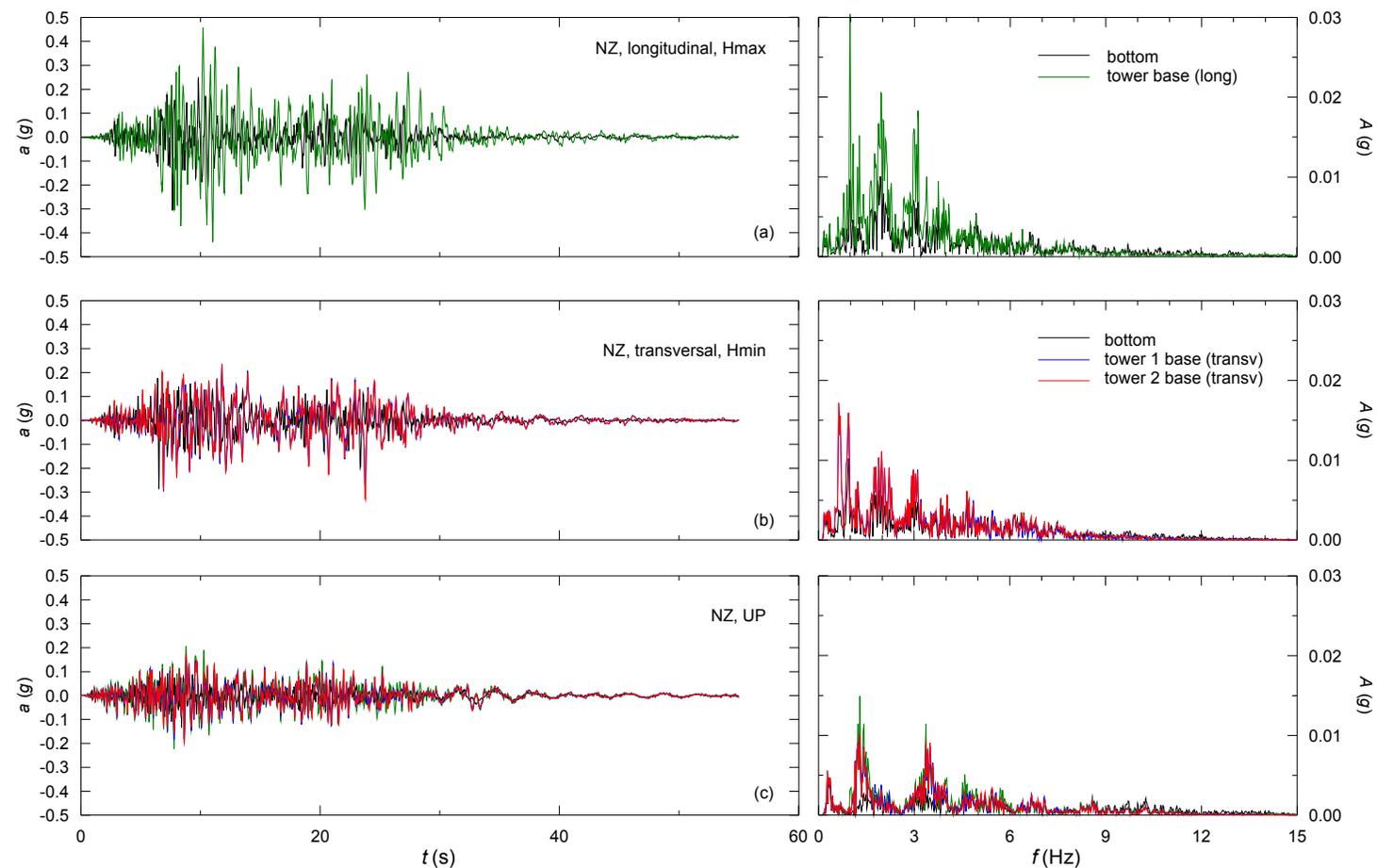
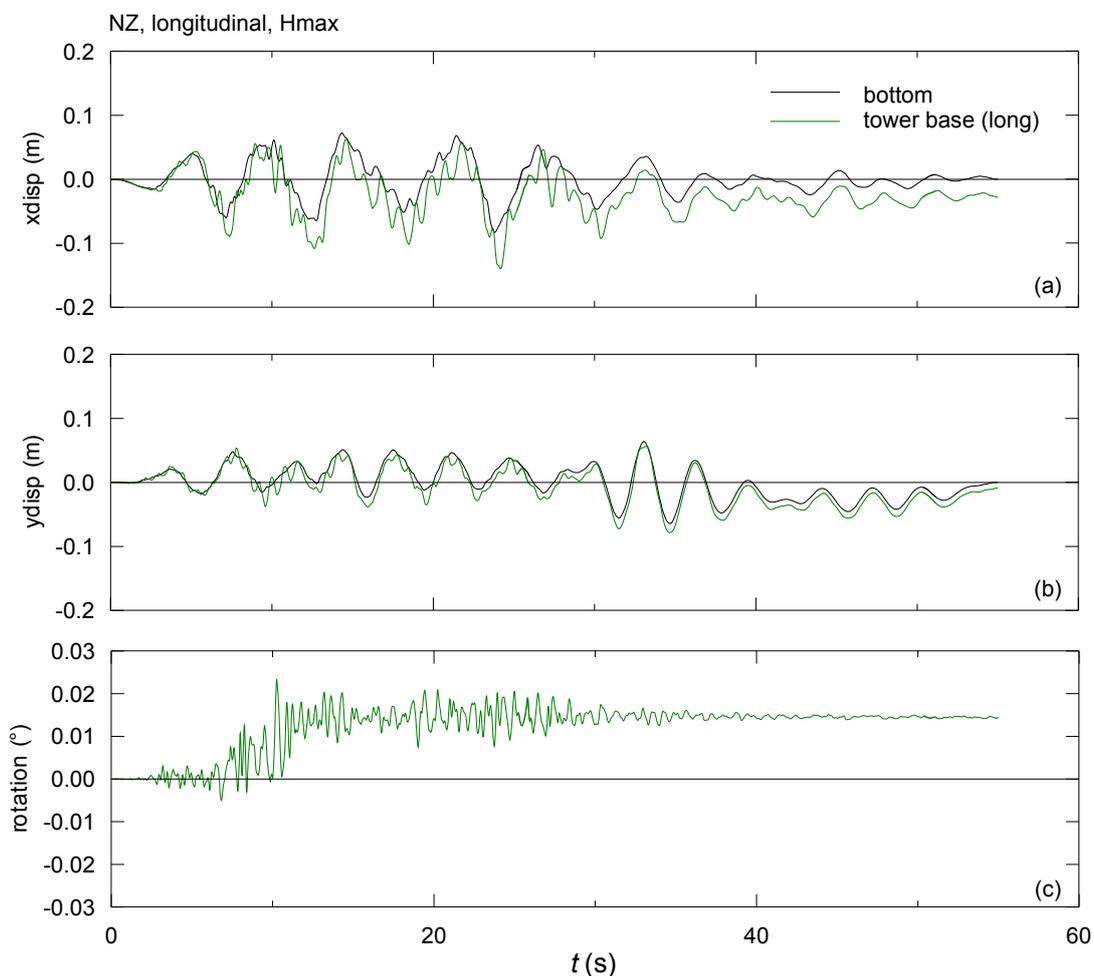


Figura 69. Terremoto NZ, comb.1, riva calabrese. Storici di accelerazione e spettro di Fourier alla base della torre: (a) accelerazione orizzontale in direzione longitudinale, (b) accelerazione orizzontale in direzione trasversale e (c) accelerazione verticale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011



*Figura 70. Terremoto NZ, comb.1. Sezione longitudinale della riva calabrese: (a) spostamenti orizzontali e (b) spostamenti verticali e (c) storici della rotazione alla base della torre*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

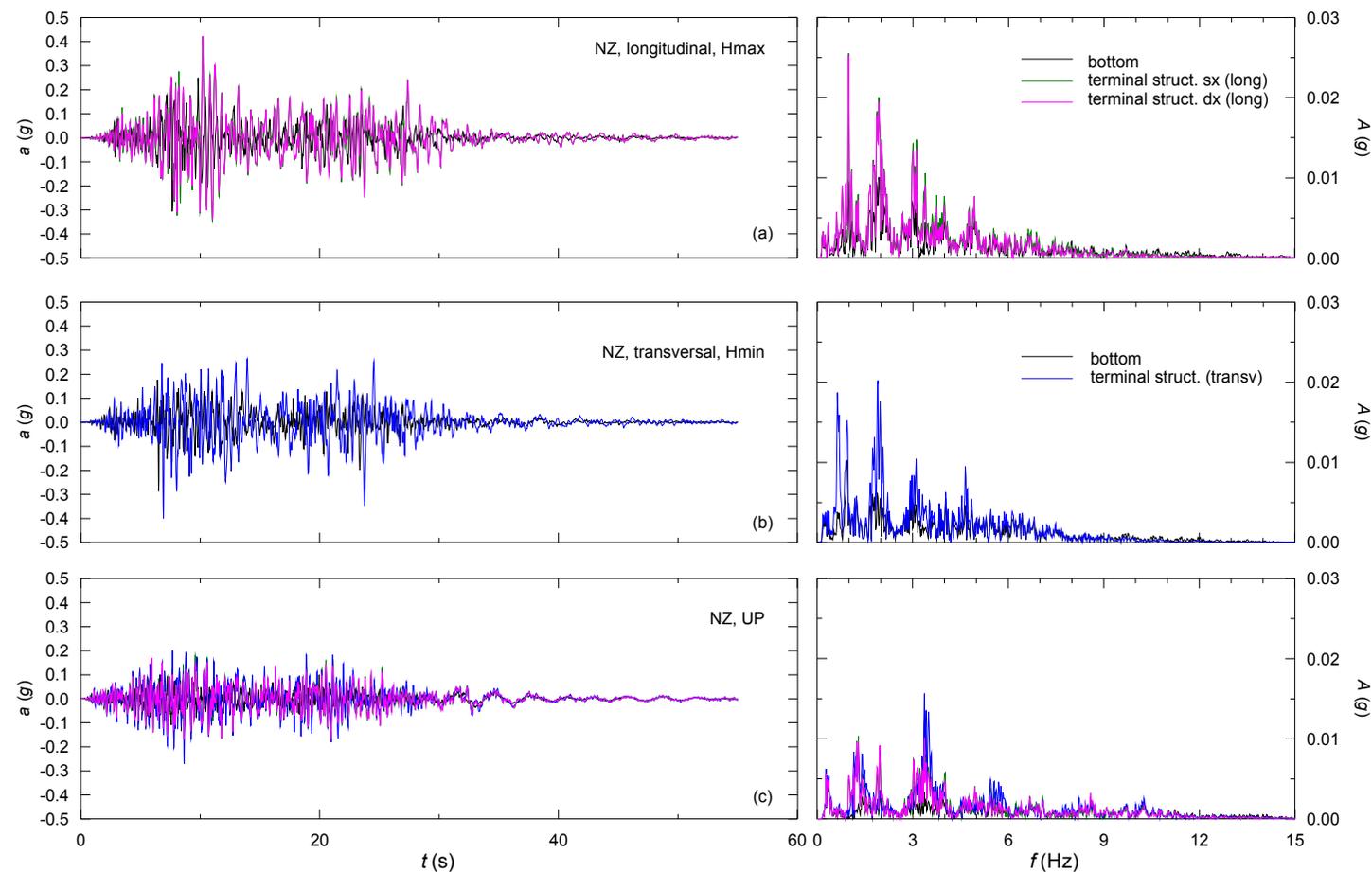


Figura 71. Terremoto NZ, comb.1, riva calabrese. Storici dell'accelerazione e spettri di Fourier nel baricentro della struttura terminale: (a) accelerazione orizzontale in direzione longitudinale direction, (b) accelerazione orizzontale in direzione trasversale e (c) accelerazione verticale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

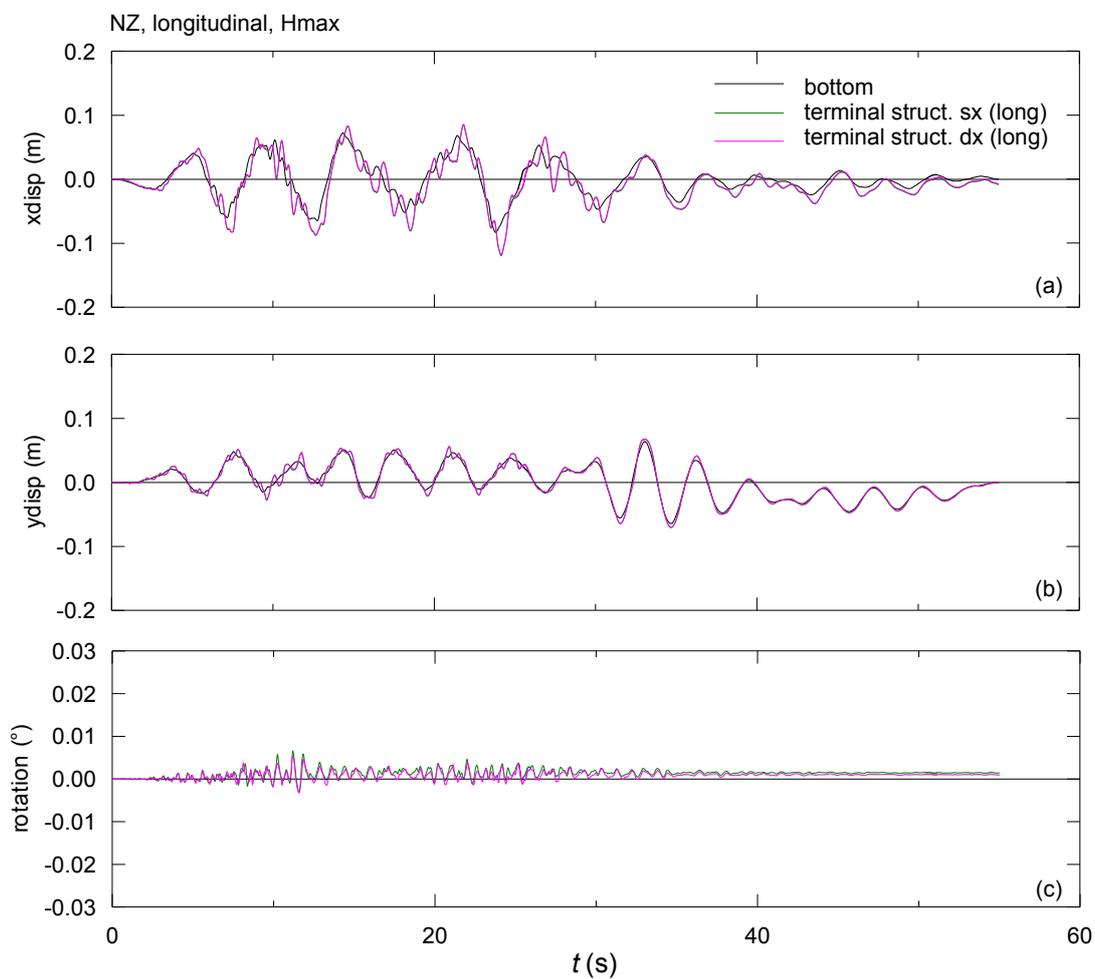


Figura 72. Terremoto NZ, comb.1. Sezione longitudinale della riva calabrese: (a) spostamenti orizzontali e (b) spostamenti verticali e (c) storici di rotazione al baricentro delle strutture terminali

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

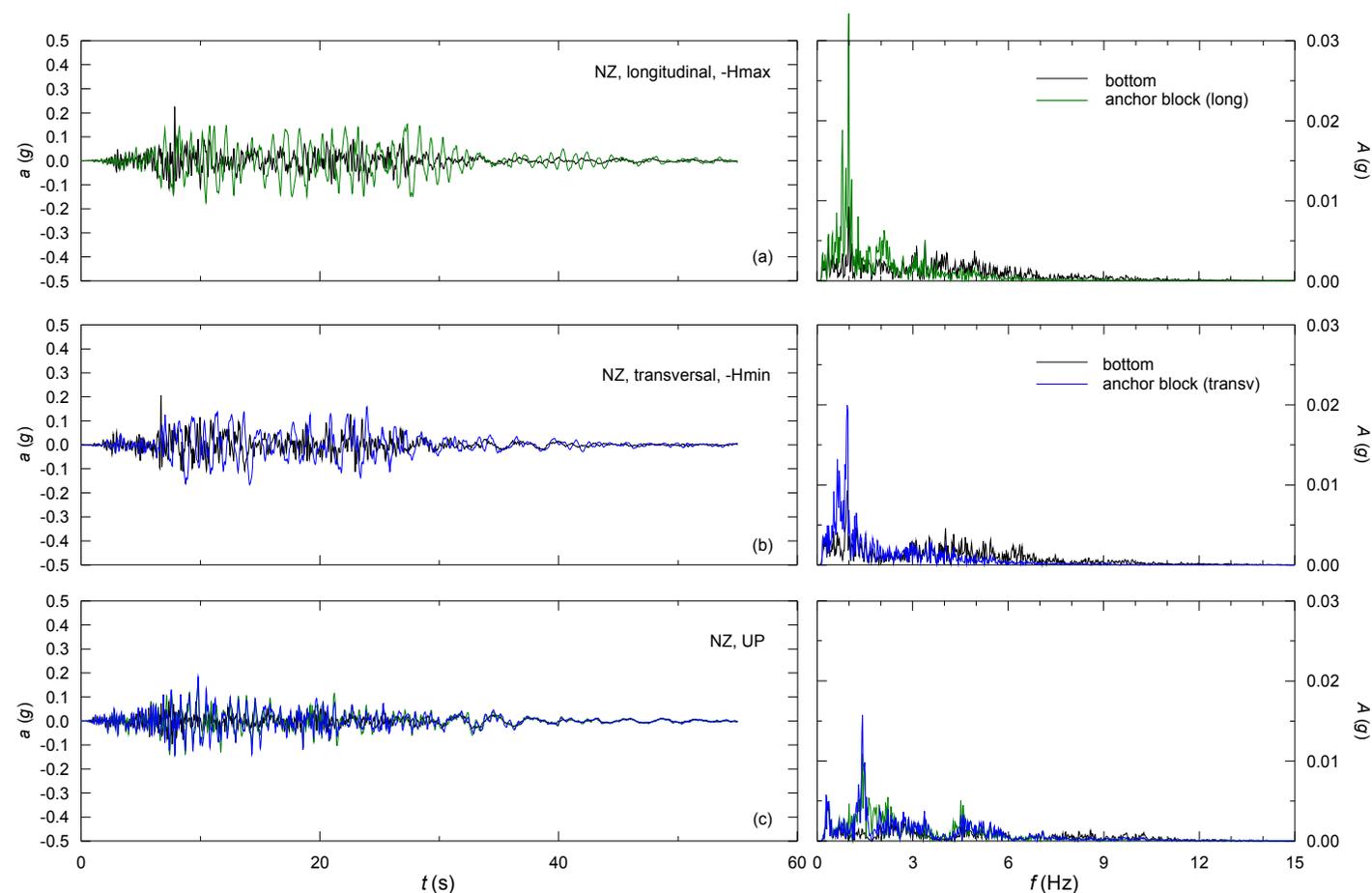
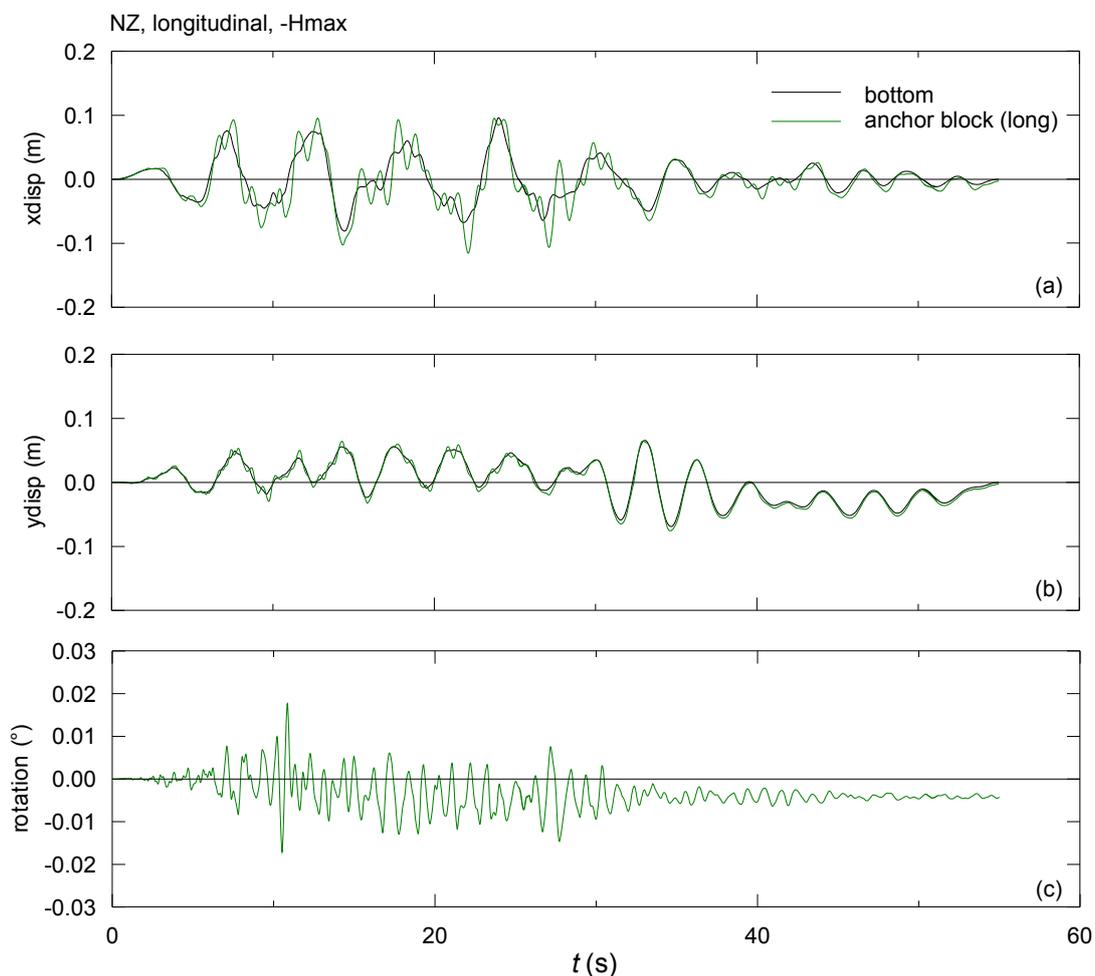


Figura 73. Terremoto NZ, comb.2, riva siciliana. Storici di accelerazione e spettri di Fourier nel baricentro del blocco di ancoraggio: (a) accelerazione orizzontale in direzione longitudinale, (b) accelerazione orizzontale in direzione trasversale e (c) accelerazione verticale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione</b>		<b>Codice documento</b> <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	<b>Rev</b> <i>F0</i>	<b>Data</b> <i>20/06/2011</i>



**Figura 74.** *Terremoto NZ, comb.2. Sezione longitudinale della riva siciliana: (a) spostamenti orizzontali e (b) spostamenti verticali e (c) storici delle rotazioni nel baricentro del blocco di ancoraggio*

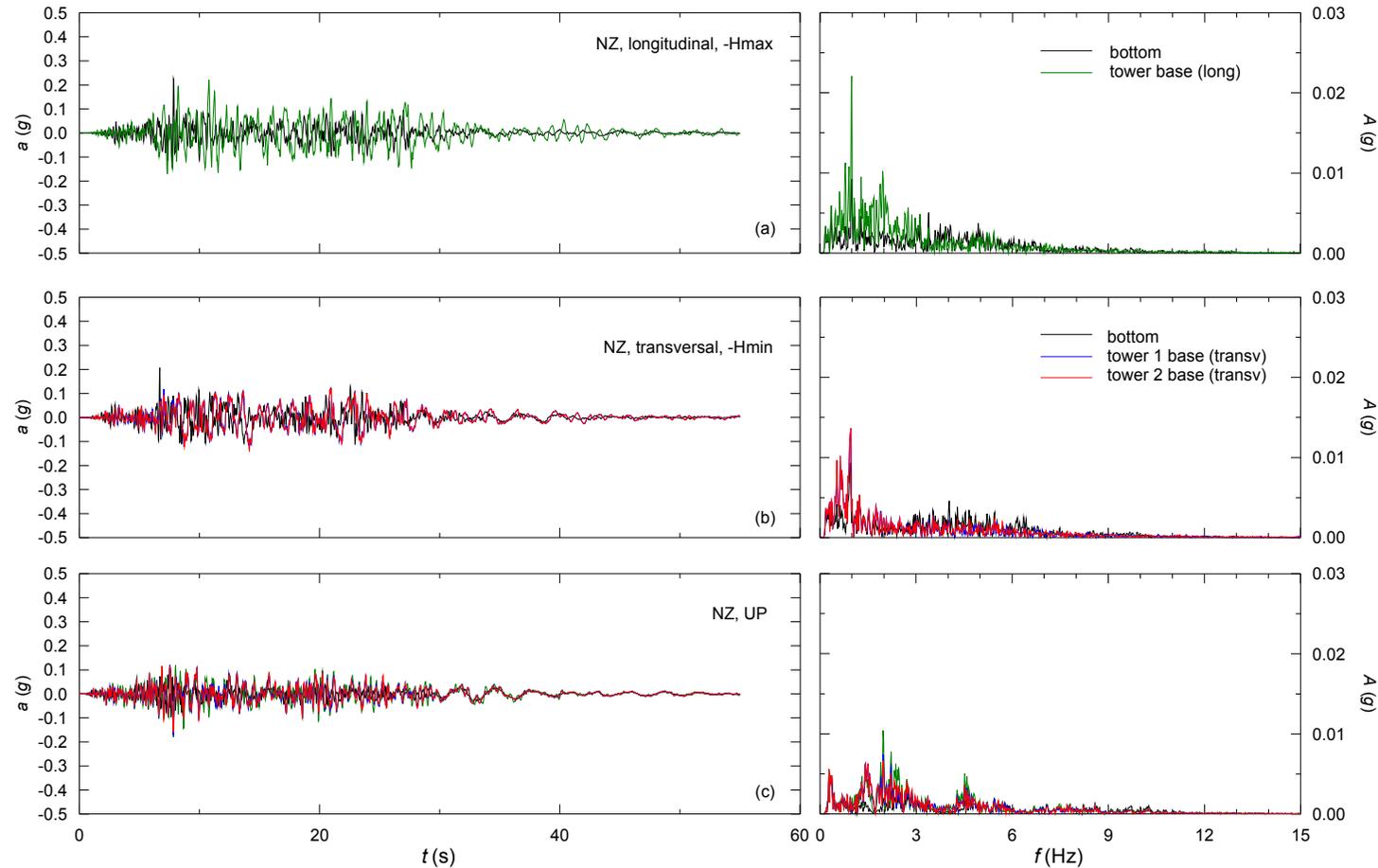


Figura 75. Terremoto NZ, comb.2, riva siciliana. Storici di accelerazione e spettri di Fourier alla base della torre: (a) accelerazione orizzontale in direzione longitudinale, (b) accelerazione orizzontale in direzione trasversale e c) accelerazione verticale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

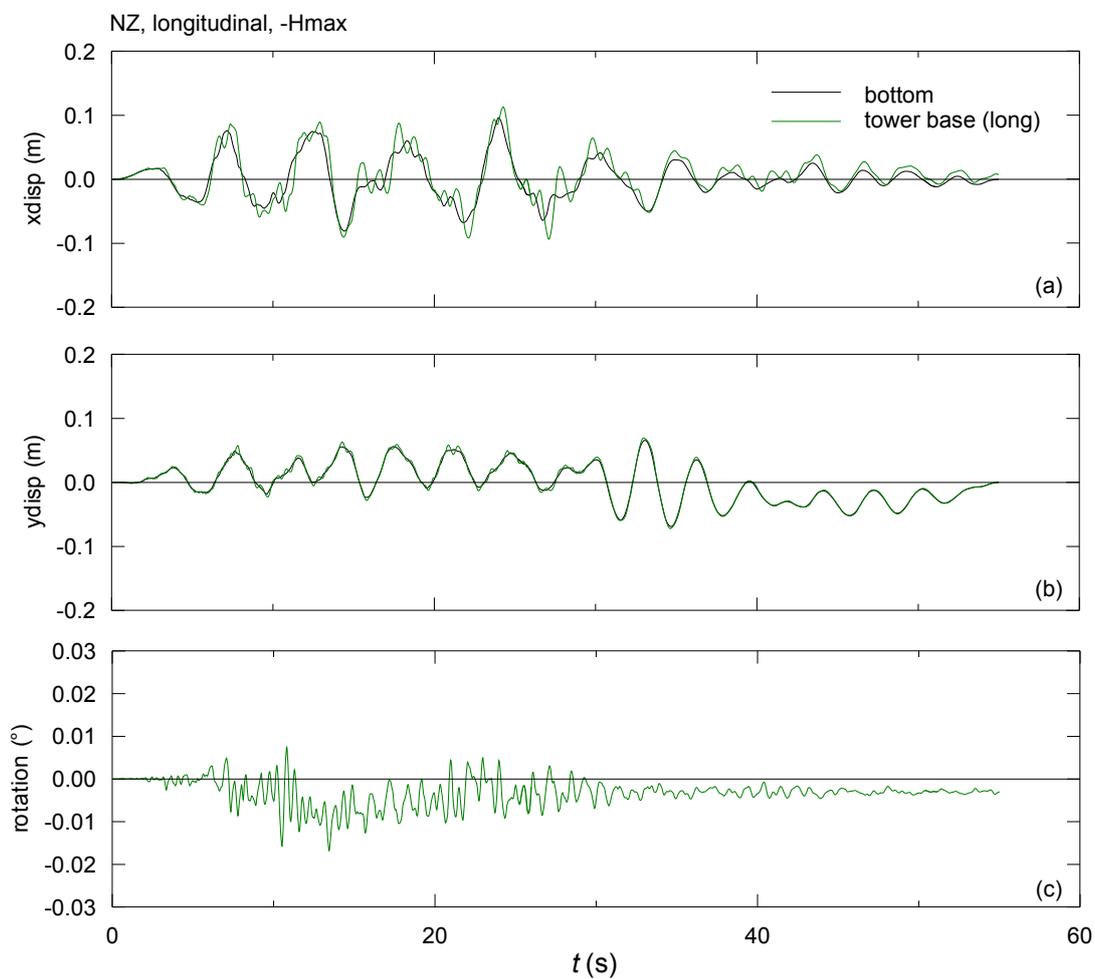


Figura 76. Terremoto NZ, comb.2. Sezione longitudinale della riva siciliana: (a) spostamenti orizzontali e (b) spostamenti verticali e (c) storici delle rotazioni alla base della torre

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		<i>Codice documento</i> PB0032_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

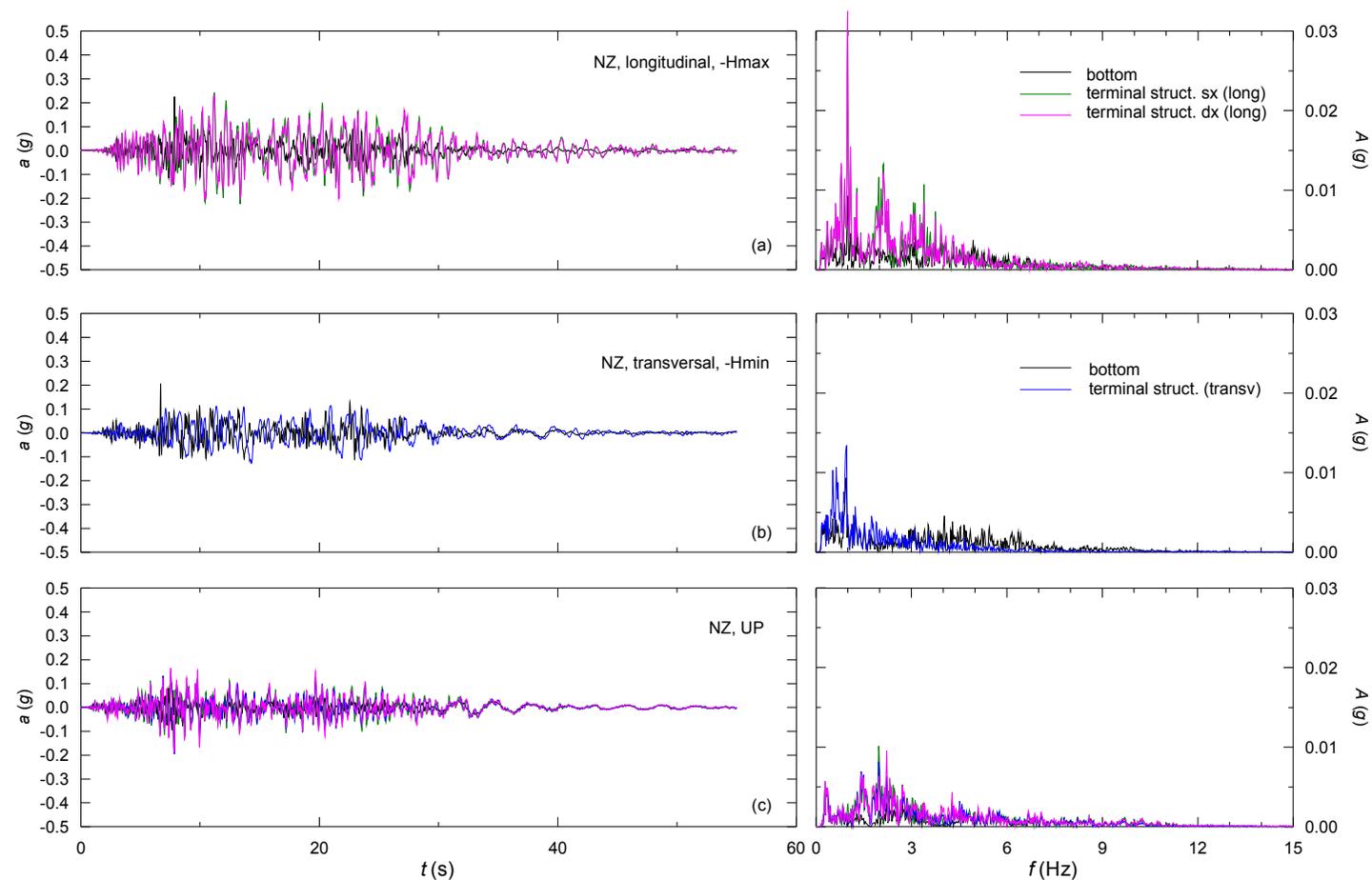
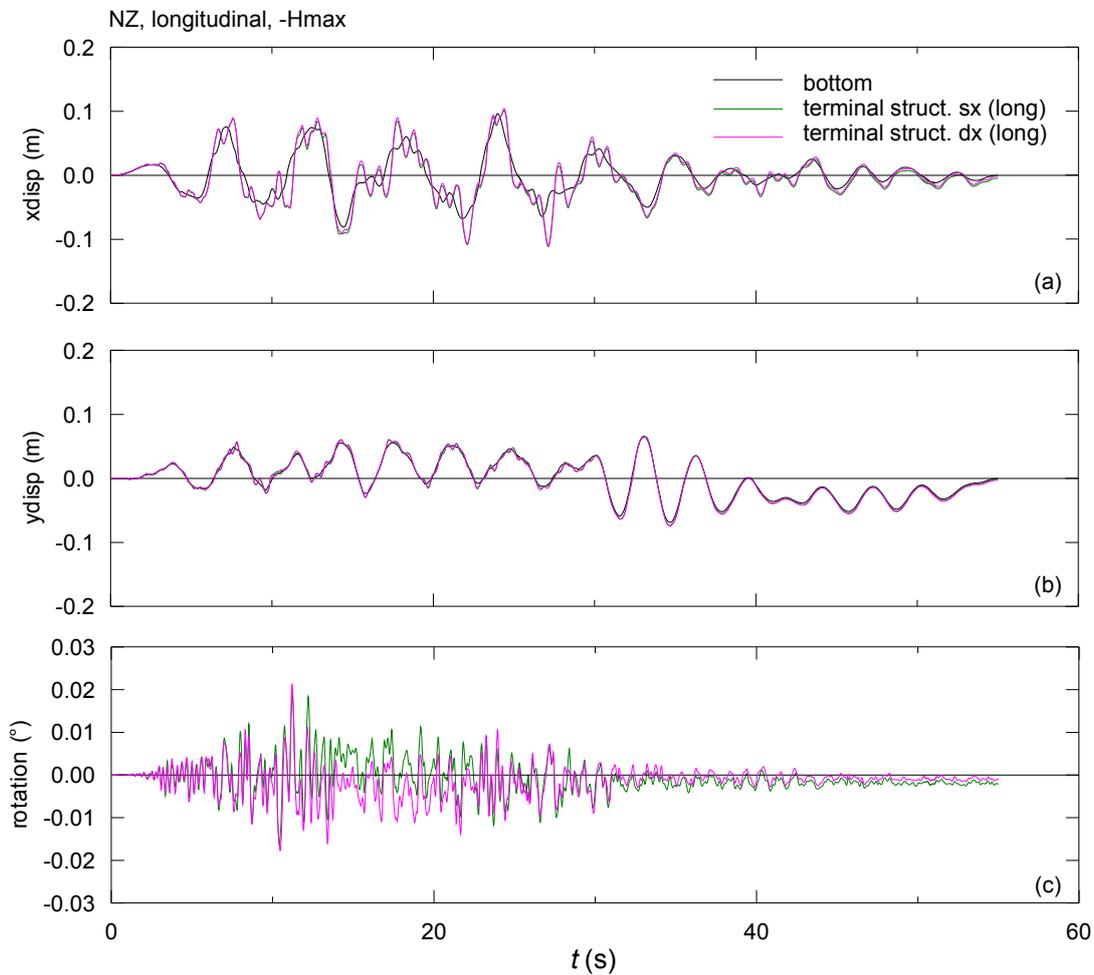


Figura 77. Terremoto NZ, comb.2, riva siciliana. Storici di accelerazione e spettri di Fourier nel baricentro delle strutture terminali: (a) accelerazione orizzontale in direzione longitudinale, (b) accelerazione orizzontale in direzione trasversale e (c) accelerazione verticale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011



*Figura 78. Terremoto NZ, comb.2. Sezione longitudinale della riva siciliana: (a) spostamenti orizzontali e (b) spostamenti verticali e (c) storici delle rotazioni nel baricentro delle strutture terminali*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

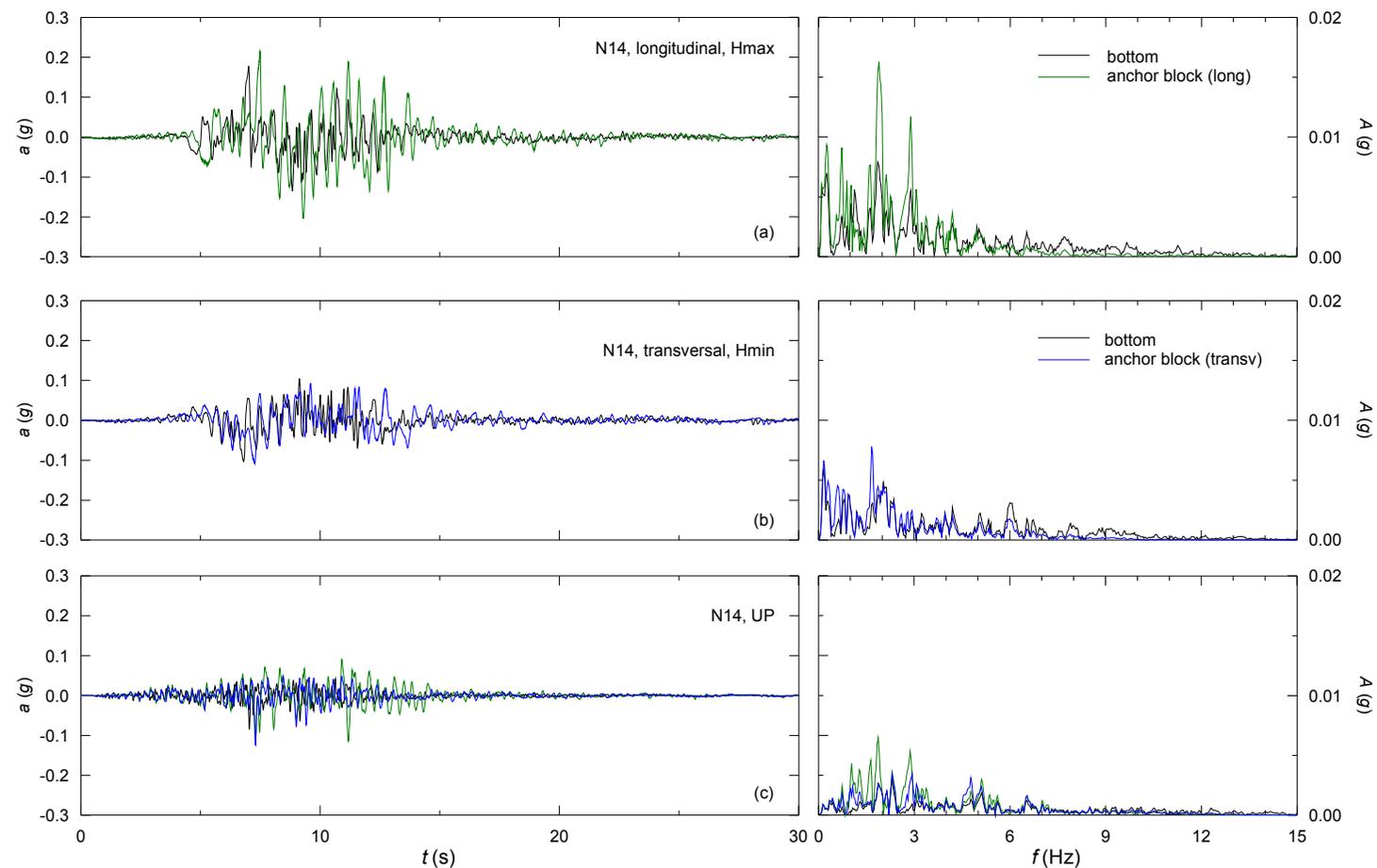


Figura 79. Terremoto N14, comb.1, Riva calabrese. Storici di accelerazione e spettri di Fourier nel baricentro del blocco di ancoraggio: (a) accelerazione orizzontale in direzione longitudinale, (b) accelerazione orizzontale in direzione trasversale e (c) accelerazione verticale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

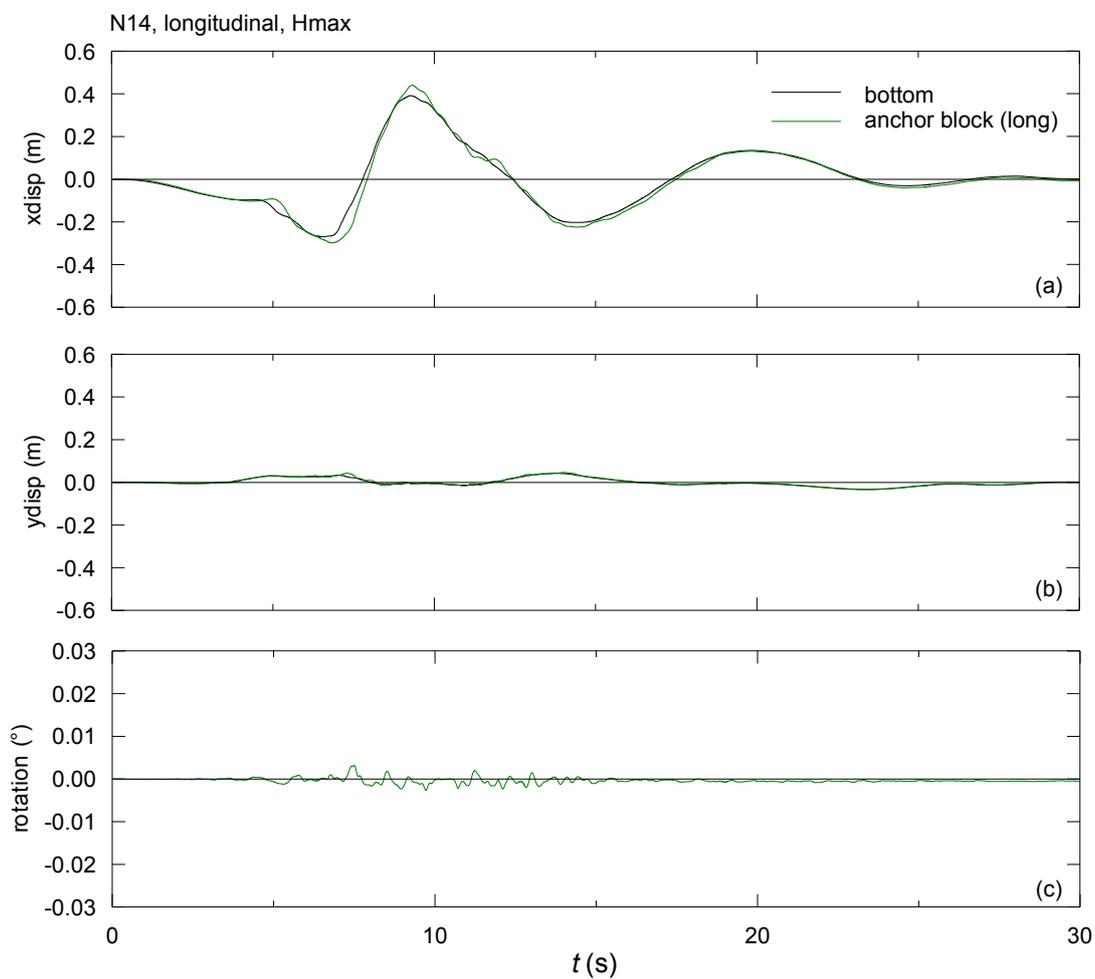


Figure 80. Terremoto N14, comb.1. Sezione longitudinale della riva calabrese: (a) spostamenti orizzontali e (b) spostamenti verticali, e (c) storici delle rotazioni nel baricentro del blocco di ancoraggio

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

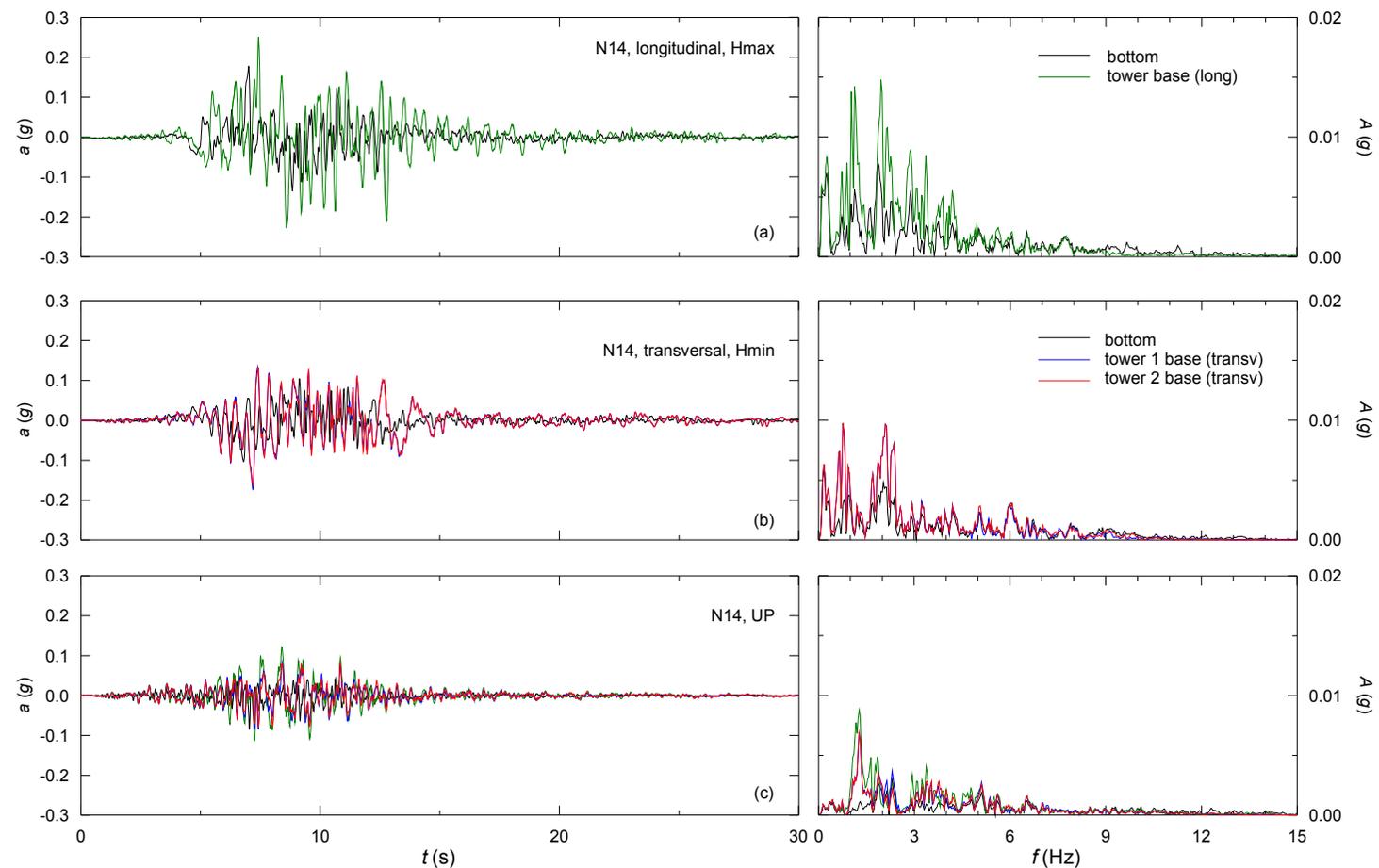


Figura 81. Terremoto N14, comb.1, riva calabrese. Storici di accelerazione e spettri di Fourier alla base della torre: (a) accelerazione orizzontale in direzione longitudinale, (b) accelerazione orizzontale in direzione trasversale e (c) accelerazione verticale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011	

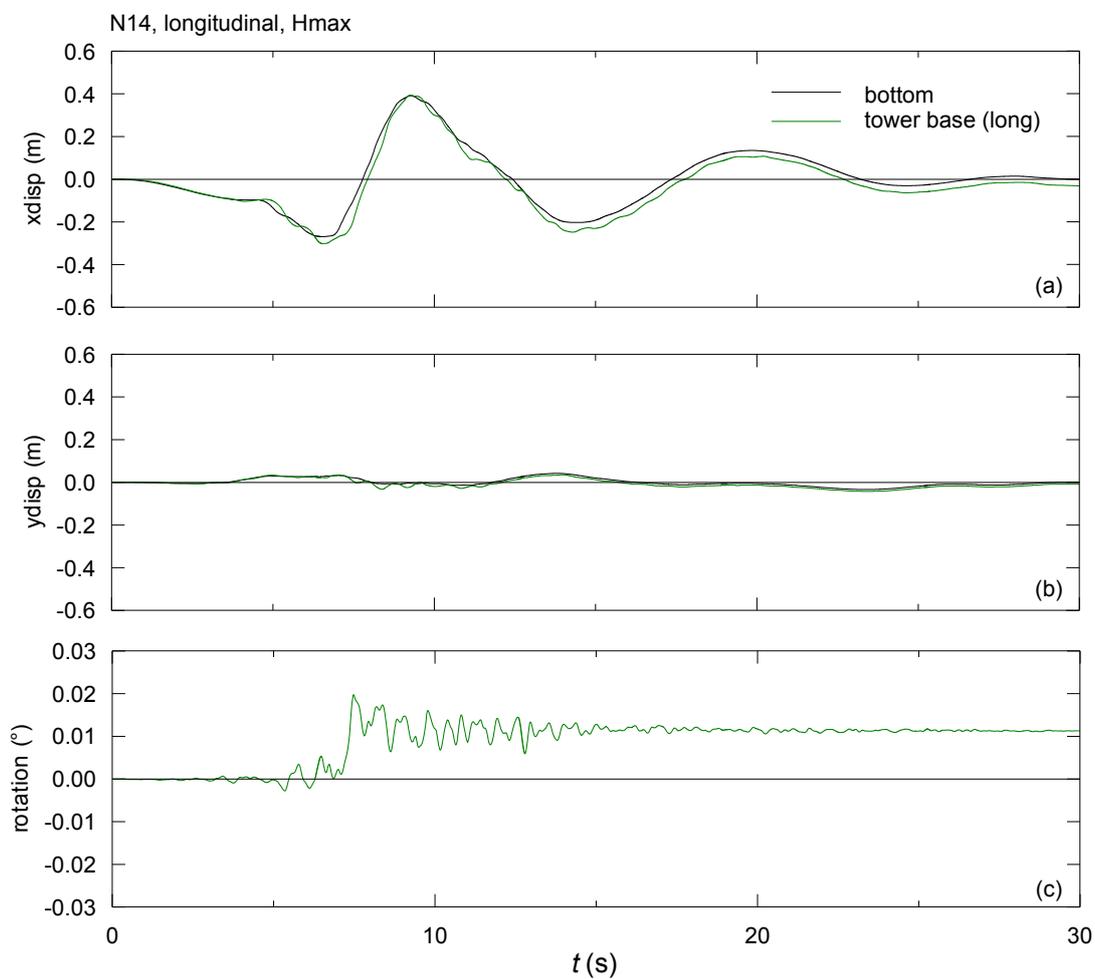


Figura 82. Terremoto N14, comb.1. Sezione longitudinale della riva calabrese: (a) spostamenti orizzontali e (b) spostamenti verticali, e (c) storici delle rotazioni alla base della torre

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

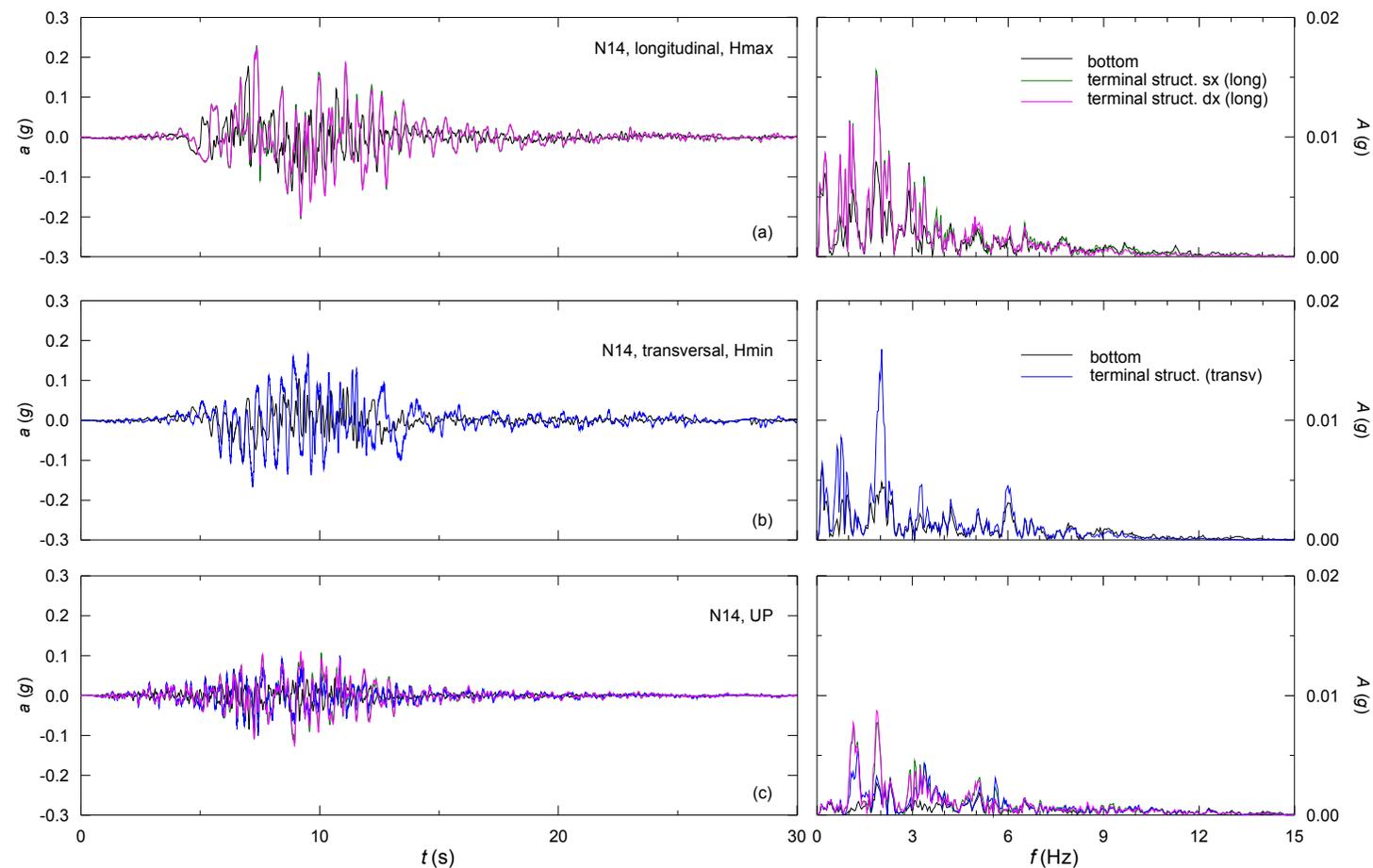


Figura 83. Terremoto N14, comb.1, riva calabrese. Accelerazione e spettri di Fourier nel baricentro delle strutture terminali: (a) accelerazione orizzontale in direzione longitudinale, (b) accelerazione orizzontale in direzione trasversale e (c) accelerazione verticale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

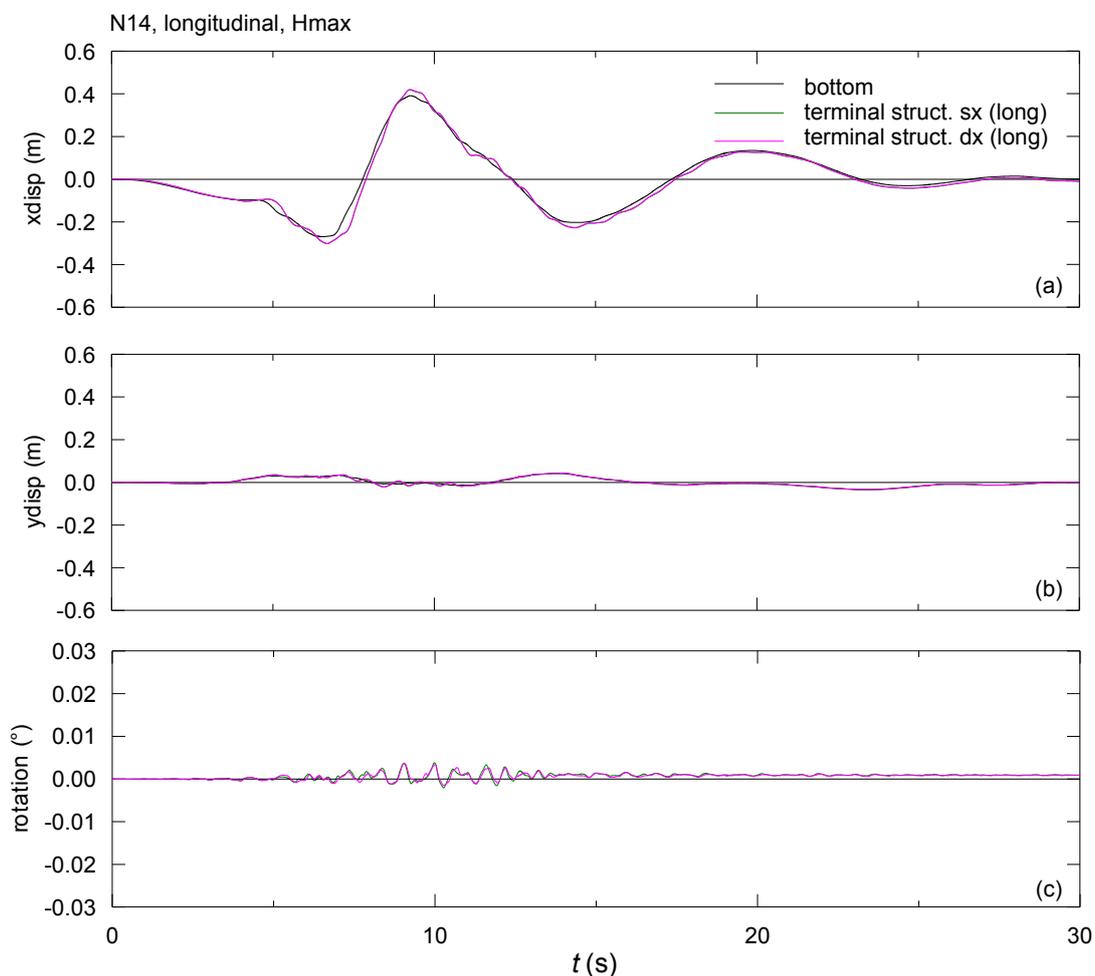


Figura 84. Terremoto N14, comb.1. Sezione longitudinale della riva calabrese: (a) spostamenti orizzontali e (b) spostamenti verticali, e (c) storici delle rotazioni nel baricentro delle strutture terminali

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

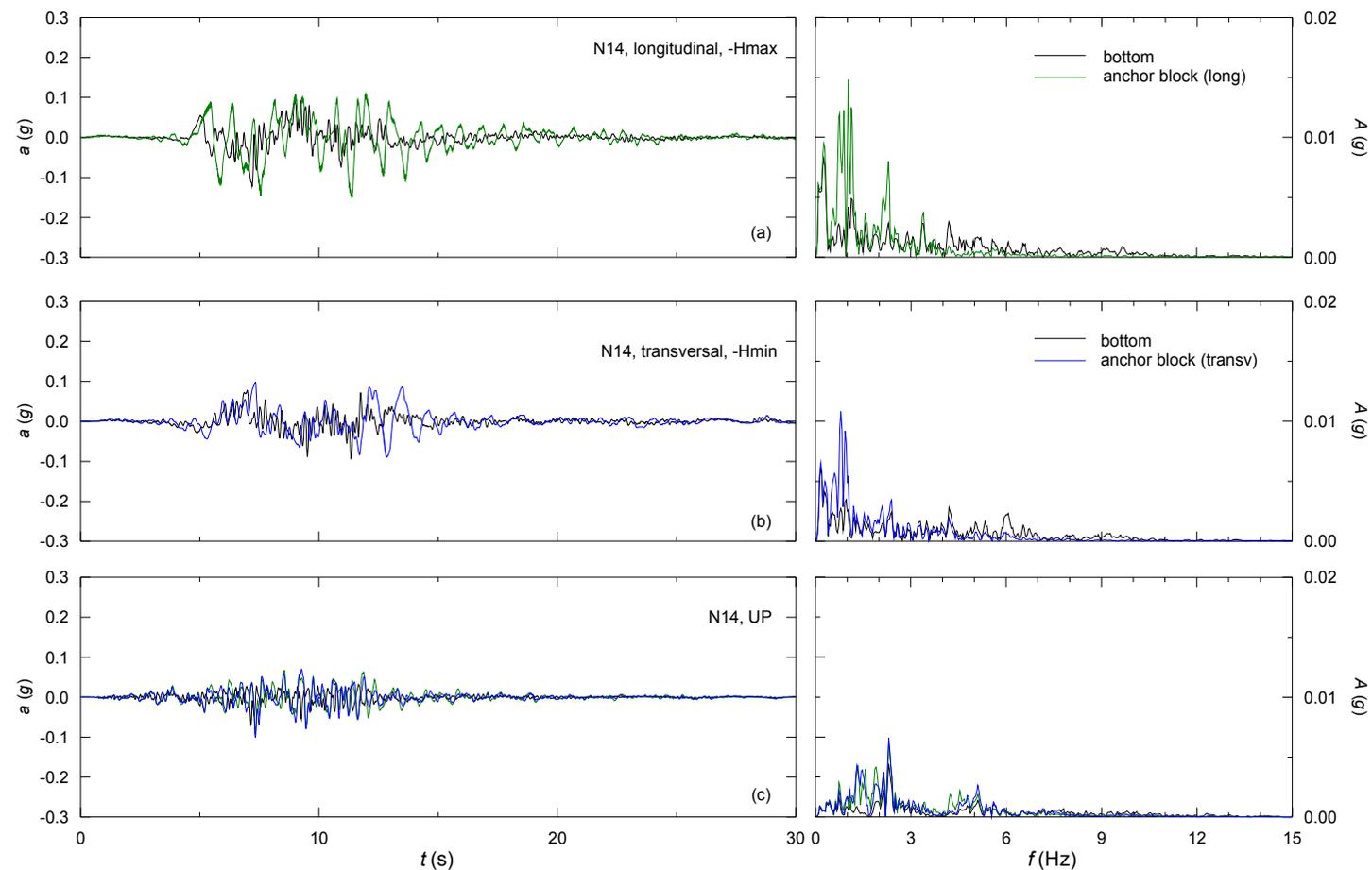


Figura 85. Terremoto N14, comb.2, riva siciliana. Storici di accelerazione e spettri di Fourier nel baricentro del blocco di ancoraggio: (a) accelerazione orizzontale in direzione longitudinale, (b) accelerazione orizzontale in direzione trasversale e (c) accelerazione verticale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

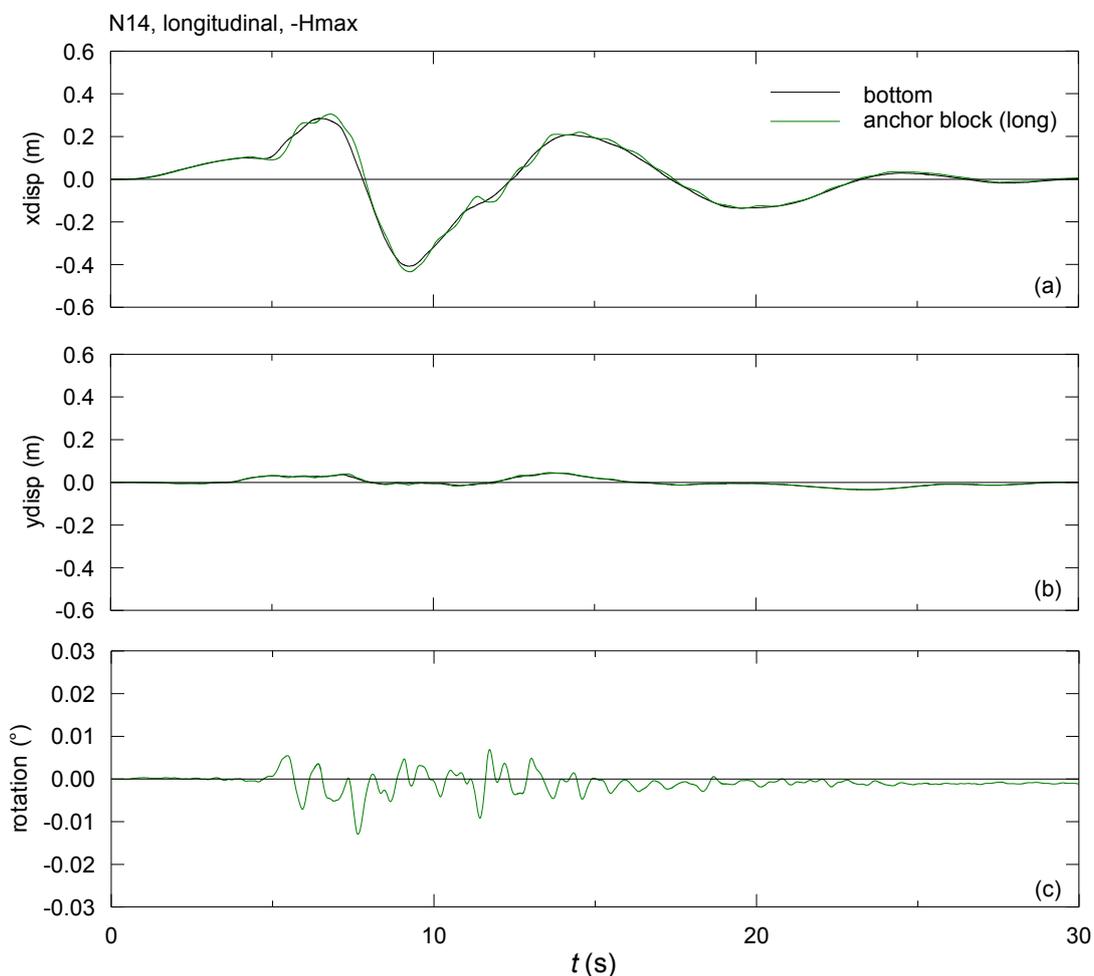


Figura 86. Terremoto N14, comb.2. Sezione longitudinale della riva siciliana: (a) spostamenti orizzontali e (b) spostamenti verticali, e (c) storici delle rotazioni nel baricentro del blocco di ancoraggio

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

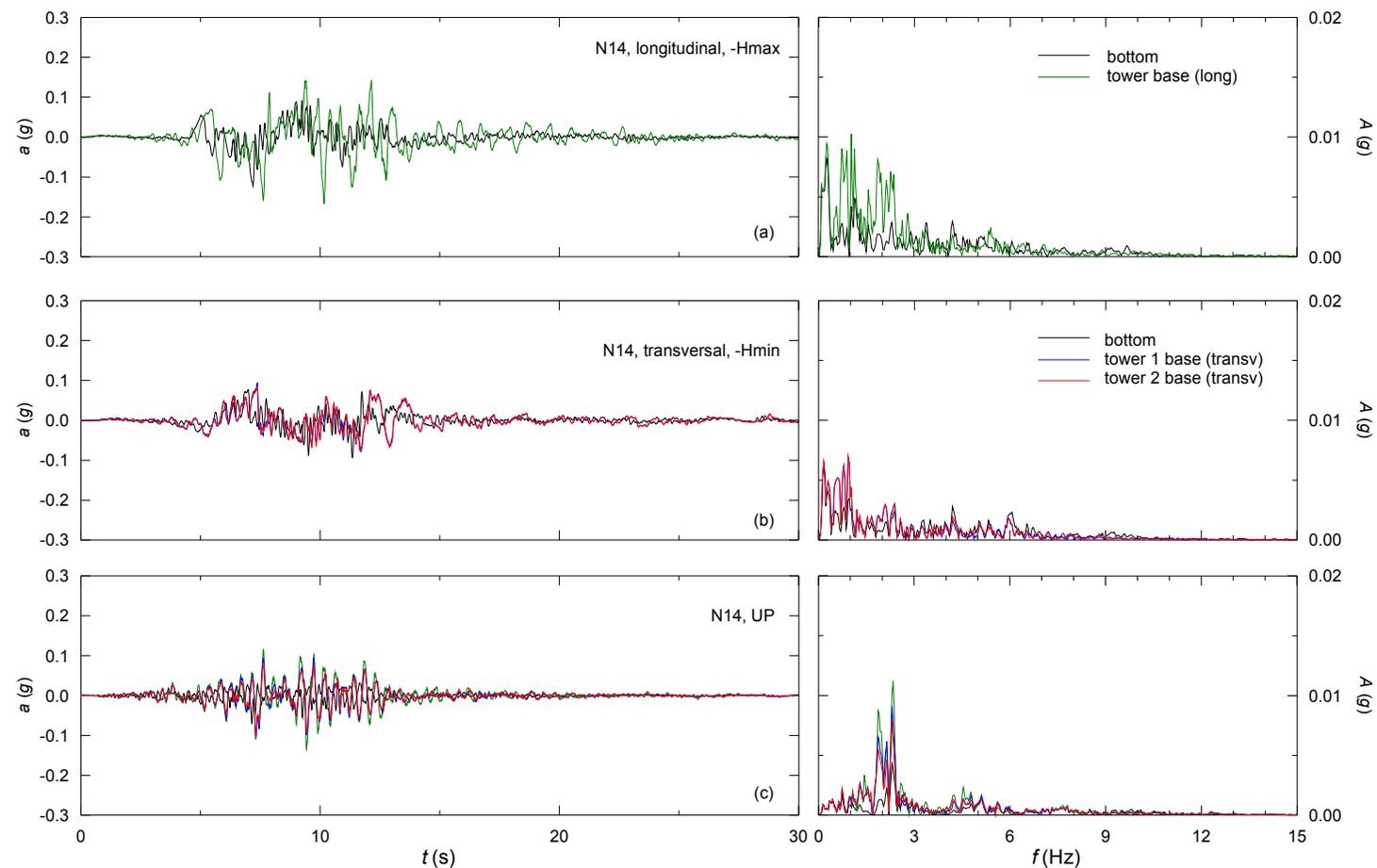


Figura 87. Terremoto N14, comb.2, riva siciliana. Storici di accelerazione e spettri di Fourier alla base della torre (a) accelerazione orizzontale in direzione longitudinale, (b) accelerazione orizzontale in direzione trasversale e (c) accelerazione verticale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione	Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011	

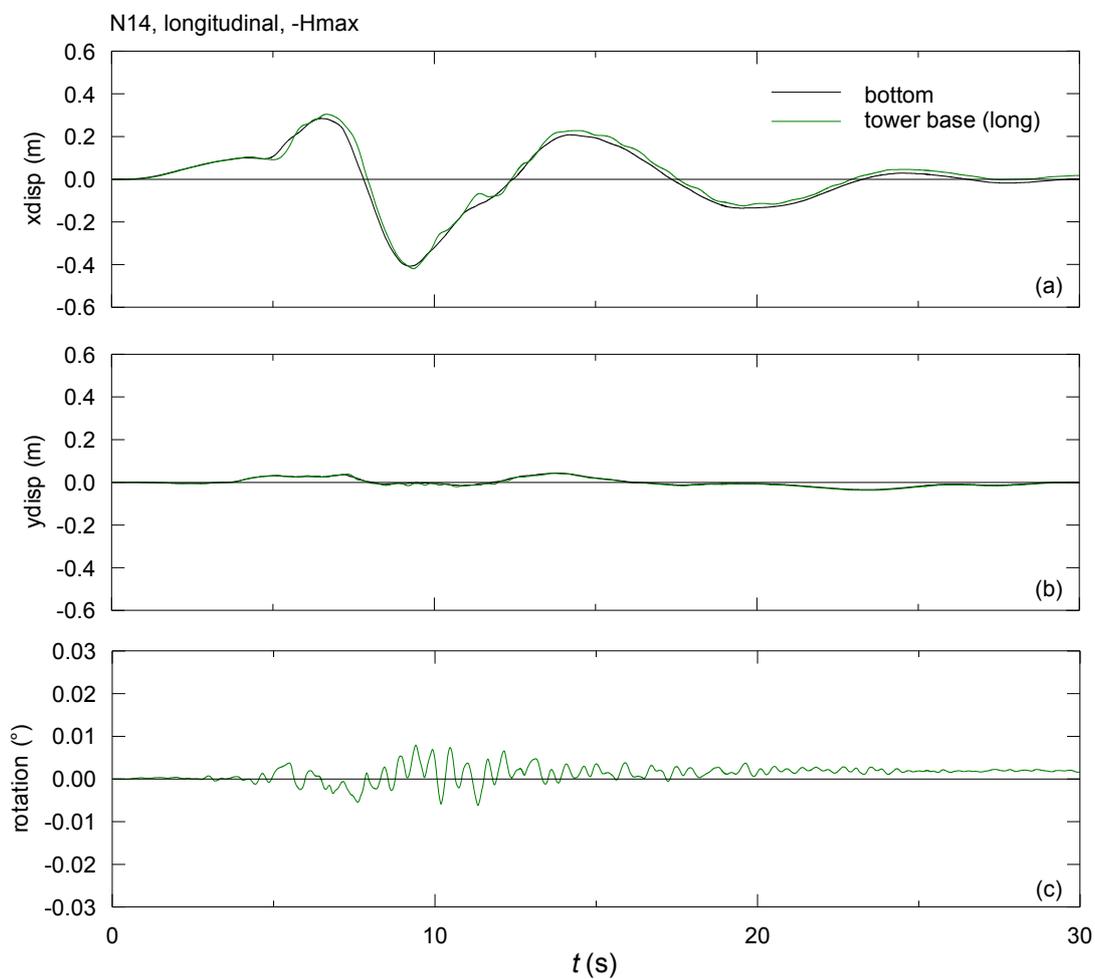


Figura 88. Terremoto N14, comb.2. Sezione longitudinale della riva siciliana: (a) spostamenti orizzontali e (b) spostamenti verticali, e (c) storici delle rotazioni alla base della torre

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

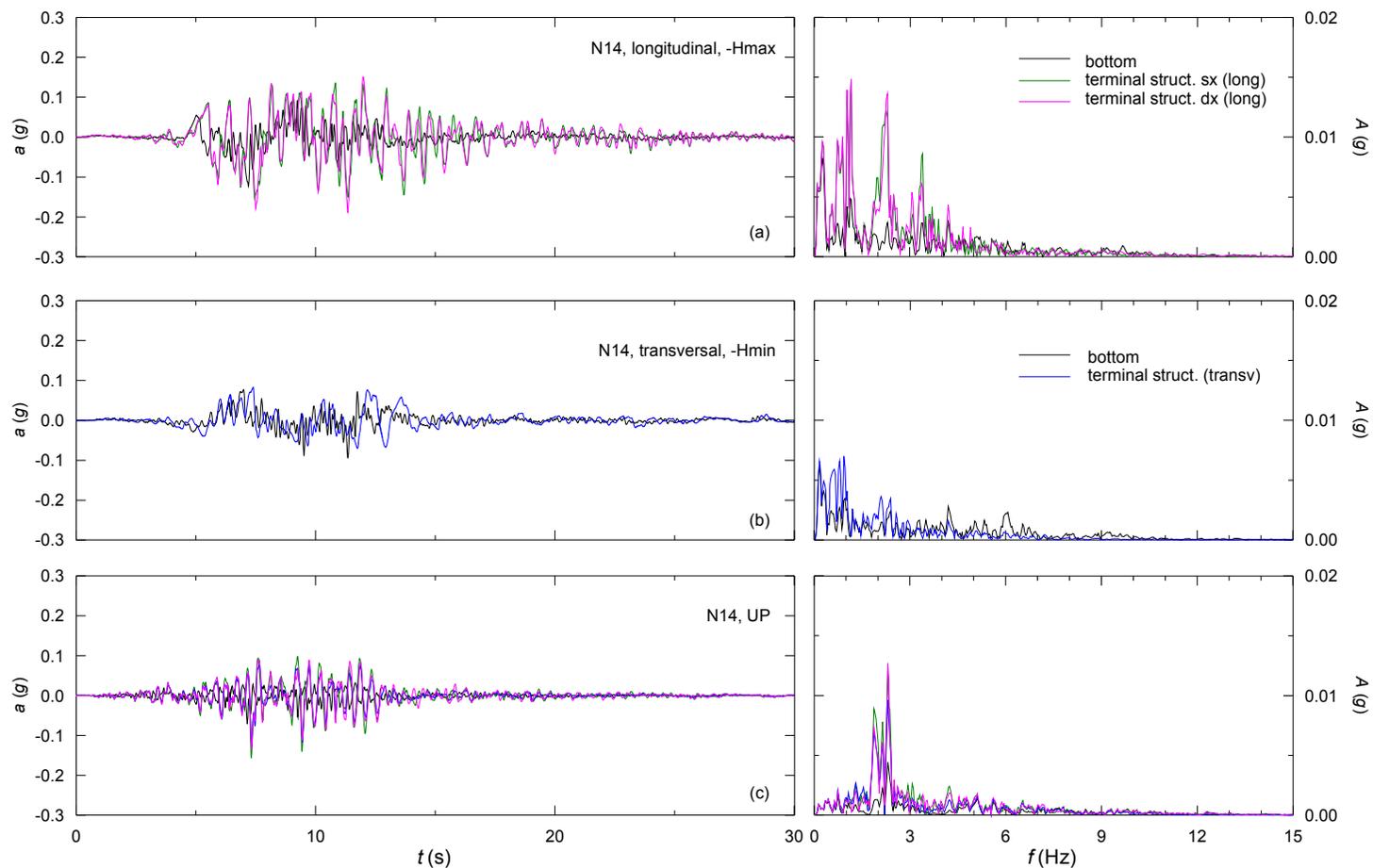


Figure 89. Terremoto N14, comb.2, riva siciliana. Storici di accelerazione e spettri di Fourier nel baricentro delle strutture terminali: (a) accelerazione orizzontale in direzione longitudinale, (b) accelerazione orizzontale in direzione trasversale e (c) accelerazione verticale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Analisi di interazione dinamica terreno-fondazione		Codice documento <i>PB0032_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

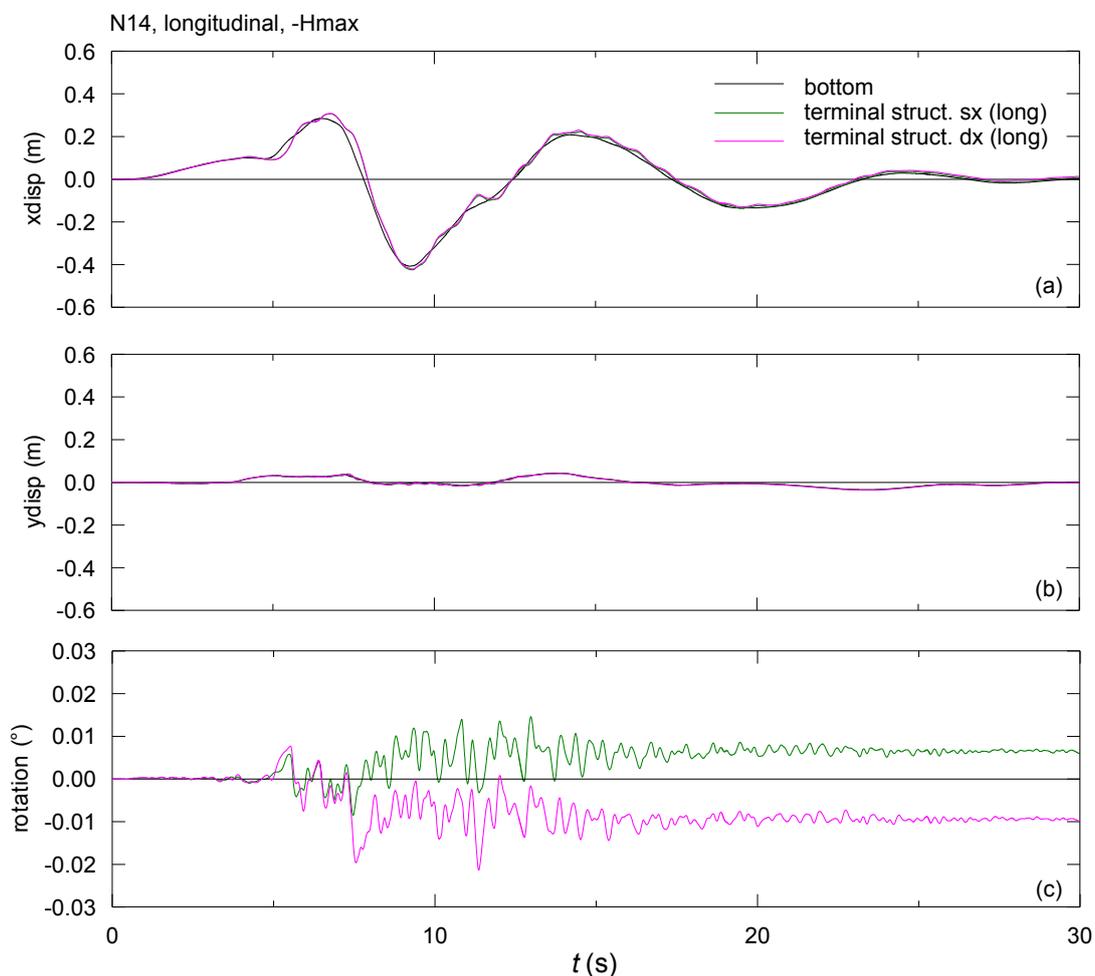


Figura 90. Terremoto N14, comb.2. Sezione longitudinale della riva siciliana: (a) spostamenti orizzontali e (b) spostamenti verticali, e (c) storici delle rotazioni nel baricentro delle strutture terminali