



PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



PROGETTO DEFINITIVO

EUROLINK S.C.p.A.

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

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

<p><i>Unità Funzionale</i> <i>Tipo di sistema</i> <i>Raggruppamento di opere/attività</i> <i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i> <i>Titolo del documento</i></p>	<p>OPERA DI ATTRAVERSAMENTO STUDI DI BASE ANALISI GLOBALI Foundation Evaluation Matrici equivalenti di rigidità e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni</p>	<p>PB0031_F0</p>
---	---	-------------------------

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

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

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>0</i>	<i>Data</i> <i>13-04-2011</i>	

INDICE

1	Relazione di sintesi	5
2	Introduzione	6
3	Moto di input	6
4	Analisi della risposta sismica	9
4.1	Metodologia.....	9
4.2	Profilo del suolo e proprietà meccaniche	10
4.3	Risultati dell'analisi della propagazione	10
5	Impedenza dinamica della fondazione della torre	11
5.1	Informazioni di base	11
5.2	Valutazione dell'impedenza dinamica	13
5.3	Verifica delle soluzioni elastiche	14
6	Matrici di rigidezza e di smorzamento	15
6.1	Intervalli di confidenza.....	15
	Bibliografia	24
	APPENDICE A.....	41
	APPENDICE B.....	48

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

1 Relazione di sintesi

Il presente rapporto valuta le matrici di rigidezza equivalente e di smorzamento che dovrebbero essere incluse nel modello strutturale al fine di rappresentare la deformabilità e lo smorzamento del sistema suolo-fondazioni in un'analisi dinamica della struttura del ponte.

I coefficienti di rigidità e di smorzamento vengono valutati utilizzando le soluzioni fornite da Gazetas (1991) per fondamenti rigidi parzialmente o completamente incassati in un continuum viscoso-elastico di profondità finita, con carico di forze armoniche.

Siccome la risposta del suolo al carico sismico non è lineare, la rigidità di intersezione e lo smorzamento devono essere scelti tenendo conto del livello di deformazione raggiunto durante la scossa sismica. A tale scopo, sono state eseguite analisi monodimensionali della risposta sismica sui siti delle fondazioni delle torri e dei blocchi di ancoraggio del ponte di Messina.

L'input sismico comprendeva le time histories delle accelerazioni presentate nel documento DT/ISP/S/E/R1/001 redatto da S.G.I. (2004), che hanno dovuto subire una deconvoluzione alla profondità del bedrock e poi essere ripropagate attraverso tutti gli strati di suolo delle fondazioni.

Tale analisi ha fornito i livelli medi di deformazione all'interno del suolo che interagiscono con ciascuna delle fondazioni, ed ha permesso di scegliere i valori rilevanti della rigidezza di taglio e del rapporto di smorzamento da utilizzare nella valutazione delle matrici della rigidezza e dello smorzamento.

La rigidezza dinamica ed i coefficienti di smorzamento dipendono dalla frequenza del carico. In cooperazione con i progettisti del ponte, la frequenza di carico predominante per ogni punto di contatto è stata messa in relazione con le armoniche fondamentali dell'elemento strutturale.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>		<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>

2 Introduzione

Il presente rapporto riassume i risultati di alcune analisi della risposta sismica eseguite sui siti delle fondazioni delle torri e dei blocchi di ancoraggio del ponte di Messina. Le analisi della risposta sismica sono state eseguite in condizioni monodimensionali in campo libero, allo scopo di valutare i valori equivalenti della rigidezza e dello smorzamento del suolo che vengono mobilitati durante il terremoto preso in considerazione nel progetto. I risultati di tali analisi sono stati utilizzati per valutare le matrici di impedenza dinamica in ciascuno dei punto di contatto del modello strutturale con il suolo.

3 Moto di input

L'input sismico di riferimento utilizzato in questo studio includeva le time-histories delle accelerazioni presentate nel DT/ISP/S/E/R1/001 redatto da S.G.I. (2004). Questo documento contiene due diverse serie di time histories delle accelerazioni sintetiche sulle coste della Sicilia e della Calabria, ognuna composta da 20 record. Questo input sismico è stato generato utilizzando un modello matematico della sorgente sismogenetica ed è stato poi propagato alla superficie del suolo della Sicilia e della Calabria utilizzando un modello di suolo viscoso-elastico lineare. Si deve notare che la non linearità del suolo non era stata presa in considerazione quando questo input sismico è stato generato.

Ai fini della presente analisi, le componenti orizzontali NS e EO degli accelerogrammi sono state composte nella direzione longitudinale del ponte e poi deconvolute ad una specifica profondità che rappresenta il bedrock per le successive analisi della propagazione. La deconvoluzione è stata eseguita ipotizzando fundamentalmente le stesse proprietà del suolo adottate dagli autori del Documento DT/ISP/S/E/R1/001, e specificamente un comportamento del suolo viscoso-elastico lineare. I parametri utilizzati nell'analisi sono riportati alle Tabelle da 1 a 4: essi sono compatibili con quelli utilizzati per propagare i segnali nei depositi costieri, come riportato nel Documento DT/ISP/S/E/R1/001.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

Si deve notare che, nell'analisi della propagazione, lo smorzamento è dipendente dalla frequenza ed è espresso in termini di fattore qualità $Q = 1/(2D)$, dove:

$$Q = Q_0 f$$

mentre, nella deconvoluzione, è stato utilizzato un coefficiente di smorzamento costante $D = 2,5\%$ che corrisponde, per $Q_0 = 20$ s, ad una frequenza di 1 Hz. Per i depositi con $V_s > 800$ m/s, è stato scelto un rapporto di smorzamento minore, pari all'1%.

Tabella 1 – Parametri del suolo utilizzati per la deconvoluzione nel sito della torre in Sicilia.

Spessore (m)	V_s (m/s)	D (%)
62,5	200	2,5
21,5	300	2,5

Tabella 2 – Parametri del suolo utilizzati per la deconvoluzione nel sito del blocco di ancoraggio in Sicilia.

Spessore (m)	V_s (m/s)	D (%)
62,5	200	2,5
21,5	300	2,5
12,5	1000	1,0

Tabella 3 – Parametri del suolo utilizzati per la deconvoluzione nel sito della torre in Calabria.

Spessore (m)	V_s (m/s)	D (%)
12,5	200	2,5
25,0	300	2,5
75,5	650	2,5

Tabella 4 – Parametri del suolo utilizzati per la deconvoluzione nel sito del blocco di ancoraggio in Calabria.

Spessore (m)	V_s (m/s)	D (%)
12,5	200	2,5
25,0	300	2,5
75,5	650	2,5

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

50,0 1000 1,0
17,5 1700 1,0

Le Tabelle 5 e 6 riassumono le caratteristiche principali degli accelerogrammi deconvolti. In queste tabelle a_{max} è l'accelerazione massima, T_m il tempo medio come definito da Rathje et al (1997), D_s è la durata significativa (tra il 5 % e il 95 % di I_A), e I_A è l'intensità di Arias.

Tabella 5 – Proprietà degli accelerogrammi del bedrock in Sicilia

N.	Torre					Blocco di ancoraggio				
	a_{max} (g)	T_m (s)	T_P (s)	D_B (s)	I_A (m/s)	a_{max} (g)	T_m (s)	T_P (s)	D_B (s)	I_A (m/s)
1	0,078	0,93	0,18	11,09	0,098	0,070	1,03	0,18	11,12	0,085
2	0,096	1,17	0,20	11,48	0,162	0,087	1,25	0,28	11,47	0,147
3	0,084	0,64	0,16	12,36	0,107	0,076	0,73	0,26	12,51	0,090
4	0,209	0,37	0,20	12,12	0,543	0,159	0,43	0,20	12,25	0,437
5	0,097	0,83	0,20	12,03	0,165	0,087	0,91	0,20	12,23	0,145
6	0,077	1,03	0,20	10,39	0,099	0,069	1,11	0,20	10,27	0,090
7	0,063	1,40	0,20	9,82	0,072	0,058	1,49	0,20	9,68	0,067
8	0,087	1,03	0,20	10,94	0,132	0,087	1,16	0,20	10,85	0,116
9	0,070	1,24	0,28	11,18	0,095	0,064	1,33	0,28	11,23	0,086
10	0,104	0,78	0,20	12,00	0,193	0,097	0,87	0,20	12,04	0,164
11	0,121	0,60	0,16	12,06	0,184	0,108	0,67	0,16	12,15	0,156
12	0,076	0,82	0,20	10,99	0,068	0,075	0,91	0,20	10,76	0,062
13	0,093	0,76	0,14	12,15	0,180	0,084	0,85	0,16	12,18	0,154
14	0,117	0,61	0,18	11,37	0,194	0,107	0,70	0,18	11,39	0,162
15	0,104	0,99	0,20	11,27	0,144	0,096	1,07	0,20	11,21	0,130
16	0,076	0,73	0,16	12,72	0,098	0,069	0,82	0,16	12,97	0,085
17	0,164	0,53	0,15	12,69	0,305	0,140	0,60	0,16	12,78	0,253
18	0,083	1,28	0,20	9,24	0,094	0,072	1,39	0,20	8,61	0,085
19	0,043	0,89	0,12	12,21	0,033	0,039	1,00	0,20	12,32	0,029
20	0,073	0,99	0,58	10,89	0,104	0,062	1,10	0,58	10,84	0,091

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

Tabella 6 – Proprietà degli accelerogrammi relativi al bedrock in Calabria

N.	Torre					Blocco di ancoraggio				
	a_{max} (g)	T_m (s)	T_P (s)	D_B (s)	I_a (m/s)	a_{max} (g)	T_m (s)	T_P (s)	D_B (s)	I_a (m/s)
1	0,127	0,66	0,24	11,25	0,275	0,105	0,76	0,30	10,26	0,179
2	0,117	0,81	0,42	11,11	0,242	0,098	0,98	0,56	10,77	0,142
3	0,136	0,64	0,24	12,12	0,300	0,096	0,76	0,12	12,17	0,181
4	0,208	0,68	0,06	11,29	0,464	0,143	0,76	0,06	11,71	0,247
5	0,097	0,59	0,18	12,17	0,162	0,082	0,65	0,32	13,00	0,115
6	0,129	0,66	0,16	11,38	0,224	0,104	0,84	0,16	11,13	0,116
7	0,080	0,86	0,24	11,17	0,136	0,076	1,00	0,36	11,65	0,088
8	0,125	0,86	0,40	12,00	0,213	0,122	0,96	0,62	12,49	0,133
9	0,142	0,67	0,10	11,81	0,277	0,121	0,74	0,62	11,39	0,196
10	0,144	0,86	0,24	11,91	0,318	0,124	0,93	0,30	12,20	0,214
11	0,063	0,59	0,22	11,95	0,062	0,049	0,70	0,54	12,17	0,037
12	0,126	0,53	0,22	11,64	0,229	0,105	0,64	0,16	11,64	0,131
13	0,101	0,83	0,16	11,29	0,194	0,106	0,92	0,16	11,37	0,125
14	0,115	0,63	0,18	11,57	0,209	0,084	0,72	0,18	11,88	0,109
15	0,140	0,95	0,16	10,21	0,172	0,105	1,11	0,50	9,39	0,107
16	0,086	1,26	0,16	10,20	0,143	0,071	1,41	0,12	10,56	0,099
17	0,156	0,90	0,10	10,75	0,269	0,116	0,98	0,32	10,59	0,183
18	0,158	0,79	0,10	11,05	0,269	0,120	0,95	0,10	11,41	0,161
19	0,100	0,61	0,16	11,92	0,097	0,090	0,72	0,16	11,22	0,071
20	0,130	0,71	0,50	11,62	0,218	0,096	0,80	0,34	11,92	0,140

4 Analisi della risposta sismica

4.1 Metodologia

Le analisi monodimensionali della risposta sismica sui siti sono state eseguite con il modello equivalente non lineare viscoso-elastico, utilizzando il codice EERA (Bardet et al 2000). È stato eseguito un totale di 80 analisi, una per ciascuna time history delle accelerazioni nei quattro siti degli elementi di fondazione.

Il deposito di suolo è stato suddiviso in piccoli strati, a ciascuno dei quali sono state assegnate le proprietà di materiale viscoso-elastico non lineare, ossia: il modulo di taglio a piccola deformazione G_0 , una curva di decadimento del modulo, e una curva di smorzamento che descrive l'incremento dello smorzamento equivalente D con deformazione di taglio.

Le time histories deconvolute delle accelerazioni sono state applicate direttamente al bedrock situato alla stessa profondità di bedrock ipotizzata nell'analisi della

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

deconvoluzione (opzione “inside” o “within”). L’effetto della deformabilità del bedrock a maggiori profondità è stato implicitamente preso in considerazione dalla procedura utilizzata per ottenere l’input sismico.

4.2 Profilo del suolo e proprietà meccaniche

Il modulo di taglio a piccola deformazione è stato valutato direttamente dai risultati delle prove cross-hole eseguite in ciascun sito degli elementi di fondazione durante la fase preliminare di progetto. La figura 1 mostra la distribuzione con la profondità del modulo di taglio a piccola deformazione G_0 , valutato ipotizzando una densità del suolo $\rho = 2 \text{ Mg/m}^3$, congiuntamente all’approssimazione graduale utilizzata nelle analisi delle risposte dei siti.

Un’osservazione sperimentale delle curve di decadimento e smorzamento del modulo non sono disponibili allo stato attuale. Pertanto, il presente studio utilizza curve tratte dalla letteratura scientifica per descrivere la variazione della rigidezza di taglio di intersezione e del rapporto di smorzamento D con la deformazione di taglio. La Figura 2 mostra le curve di decadimento e di smorzamento del modulo ipotizzate per i depositi ghiaiosi della costa e gli strati di transizione (Fig. 2a) nonché per il sottostante deposito di ghiaia rigida e/o per il pezzo conglomerate (Fig. 2b). La prima è stata tratta dai dati pubblicati da Tanaka et al. (1987), mentre la seconda, relativa ai suoli rocciosi o simili è dovuta a Idriss (1990).

4.3 Risultati dell’analisi della propagazione

La Figura 3 mostra i profili dell’accelerazione massima calcolati nell’analisi della risposta del sito per ciascuno dei quattro siti analizzati. Sia per il lato Sicilia sia per il lato Calabria, le accelerazioni maggiori sono prodotte dal time history delle accelerazioni N. 4, che presenta intensità di Arias e accelerazioni massime maggiori dei restanti record di input (si vedano anche le Tabelle 5 e 6). Alla profondità di ciascun centro di sottostrato, si è eseguita la media dei valori del modello equivalente di taglio d’intersezione G e del rapporto di smorzamento equivalente D , ricavati dai diversi accelerogrammi, ottenendo così i profili mostrati alle Figure da 4 a 7. Dato che le soluzioni analitiche utilizzate per derivare l’impedenza dinamica si riferiscono alle fondazioni che poggiano su uno strato di suolo omogeneo, si è calcolata a sua volta la

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

media di G e D per tutta la profondità del suolo che interagisce direttamente con le fondazioni, ponderando la media secondo la distribuzione della sollecitazione verticale indotta da una fondazione rigida su un continuum elastico. I valori medi di G e D ottenuti utilizzando questa procedura sono mostrati alle Figure 4-7 con linee continue e riepilogati alla Tabella 7.

Tabella 7 – Valori medi di G e D ottenuti dalle analisi della risposta del sito.

Sito	G (MPa)	D (%)
Torre in Sicilia	110	8,3
Blocco di ancoraggio in Sicilia	158	5,0
Torre in Calabria	645	2,3
Blocco di ancoraggio in Calabria	1214	1,5

5 Impedenza dinamica della fondazione della torre

5.1 Informazioni di base

Gazetas (1991) ha pubblicato alcune soluzioni per la valutazione dell'impedenza dinamica delle fondazioni soggette a carichi dinamici. In queste soluzioni il sottosuolo è considerato come un fluido viscoso-elastico lineare.

Per una data armonica di vibrazione e per carichi armonici di frequenza circolare ω , l'impedenza dinamica \mathcal{H} è definita come rapporto del carico dinamico $P(t)$ con il corrispondente spostamento $u(t)$. Dato che le funzioni $P(t)$ e $u(t)$ sono generalmente fuori fase, l'impedenza dinamica \mathcal{H} assume valori complessi; il che può essere espresso come:

$$\mathcal{H}(\omega) = K_d(\omega) + i \omega C_d(\omega)$$

dove i è l'unità immaginaria. Sia K_d sia C_d sono funzioni di ω . La parte reale di \mathcal{H} , K_d , è definita *rigidezza dinamica*, mentre C_d è un *coefficiente di smorzamento*, che riflette lo smorzamento sia geometrico sia isteretico.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

Mentre le soluzioni pubblicate da Gazetas (1991) si riferiscono rigorosamente ad una fondazione soggetta ad un carico armonico, prodotto ad esempio da una macchina vibrante, esse possono anche essere utilizzate per il carico sismico, se le forze inerziali trasmesse dalla struttura alla fondazione possono essere avvicinate ad un carico che varia armonicamente nel tempo.

A tale scopo, è stato ipotizzato che gli elementi delle fondazioni trasferiscono il carico sismico alle fondazioni stesse con una frequenza derivata dall'analisi modale degli elementi strutturali. I valori di questa frequenza per i diversi elementi delle fondazioni sono stati derivati dai valori forniti dal progettista (COWI A/S). Per le fondazioni delle torri e per le strutture terminali, è stata calcolata la media delle frequenze corrispondenti alle armoniche longitudinali e trasversali. Per i blocchi di ancoraggio, la frequenza corrisponde al comportamento inerziale dei blocchi stessi ed è compatibile con i moduli di taglio di intersezione mostrati alle Figure 5 e 7.

L'impedenza dinamica è stata valutata per le fondazioni delle torri, per i blocchi di ancoraggio e per le fondazioni delle strutture terminali. Per queste ultime strutture, situate in prossimità delle torri, sono stati utilizzati lo stesso profilo del suolo e le stesse proprietà meccaniche che sono stati utilizzati per l'analisi delle fondazioni delle torri.

Tabella 8 – Frequenza di carico f per le fondazioni delle torri, i blocchi di ancoraggio e le strutture terminali.

	f (Hz)
Torre in Sicilia	0,4
Blocco di ancoraggio in Sicilia	2,0
Struttura terminale in Sicilia	1,8
Torre in Calabria	0,4
Blocco di ancoraggio in Calabria	5,5
Struttura terminale in Calabria	7,7

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

5.2 Valutazione dell'impedenza dinamica

Nelle soluzioni pubblicate da Gazetas (1991), la rigidezza dinamica K_d è ottenuta per ciascuna delle sei armoniche di vibrazione (tre traslazioni e tre rotazioni) come:

$$K_d = K \cdot k(\omega)$$

dove K è la rigidezza statica e $k(\omega)$ è un coefficiente di rigidezza dinamica. Il coefficiente di smorzamento C_d è valutato come:

$$C_d = C_r + C_h = C_r + 2 K_d D / \omega$$

dove C_r è il coefficiente di smorzamento associato allo smorzamento di radiazione e $C_h = 2 K_d D / \omega$ è il coefficiente di smorzamento associato allo smorzamento isteretico.

L'analisi utilizza un sistema di riferimento (x, y, z) in cui l'asse z è verticale e orientato verso il basso; l'asse y è orizzontale, parallelo alla direzione longitudinale del ponte e orientato verso sud (dalla Sicilia alla Calabria); l'asse x è orizzontale e orientato verso est. Le rotazioni e i momenti sono rappresentati dall'asse di rotazione; si noti che le rotazioni in senso orario e i momenti intorno all'asse x (rx) sono positivi (si veda la Fig. 8).

Le matrici di rigidezza e smorzamento sono state in un primo tempo valutate al fondo della fondazione equivalente, lungo il suo asse (punti denominati A), e poi trasformate per fornire il rapporto forza-spostamento per i punti di riferimento (denominati G) posizionati dall'analista strutturale (Cowi A/C).

La Figura 9 mostra un layout di una fondazione rettangolare incassata, con i simboli utilizzati per denotare la geometria. Le Figure 10 e 11 mostrano le fondazioni idealizzate per le torri in Sicilia e Calabria. La fondazione equivalente include i basamenti circolari e il volume di suolo trattato con malta da iniezione sotto i basamenti stessi, mentre non include il suolo laterale trattato con una malta da iniezione più rada. Nelle Figure 10 e 11, i cerchi aperti indicano i punti (A) in cui la matrice d'impedenza è stata valutata originariamente, mentre i cerchi completi designano i punti (G), ossia, la posizione degli elementi elastici che rappresenta la rigidezza del sistema suolo-fondazioni. Questi punti di riferimento corrispondono all'intersezione degli assi delle torri con il fondo dei basamenti circolari.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

Le Figure 12 e 13 mostrano gli schemi utilizzati per i blocchi di ancoraggio: questi ultimi sono stati considerati come fondazioni rettangolari incassate in uno strato elastico. Il punto di riferimento (G) per i blocchi di ancoraggio è il baricentro.

Le figure 14 e 15 mostrano le fondazioni idealizzate delle strutture terminali sulle coste di Sicilia e Calabria. Ciascun viadotto ha due fondazioni indipendenti che sono state provviste di due identiche matrici di impedenza. La matrice di impedenza di ciascuna di queste fondazioni ha una struttura simile a quella delle fondazioni delle torri.

Per tutti gli elementi delle fondazioni, si verifica un accoppiamento tra le rotazioni r_x , r_y e le forze orizzontali lungo x e y (e, in maniera equivalente, tra gli spostamenti lungo x e y e i momenti r_y e r_x). Questi termini di coppia sono indicati con gli indici in basso $y-r_x$ e $x-r_y$.

I dettagli del calcolo sono riportati nell'Appendice A, mentre il gruppo completo di soluzioni ottenute da Gazetas (1991) è riprodotto nell'Appendice B.

5.3 Verifica delle soluzioni elastiche

Un controllo indipendente della validità delle soluzioni elastiche fornite da Gazetas (1991) è stato eseguito con specifico riferimento allo spostamento verticale di una delle fondazioni incassate della torre in Sicilia. A questo scopo, le analisi numeriche degli elementi finiti sono state eseguite con il codice Plaxis v.8, in cui una fondazione cilindrica è caricata da una pressione verticale uniforme che è una funzione armonica del tempo con un'ampiezza di 100 kPa.

La mesh di elementi finiti Plaxis simmetrici all'asse, utilizzata nei calcoli, è mostrata alla Figura 16. Il suolo di fondazione è uno strato viscoso-elastico omogeneo con $G = 110$ MPa, $\nu = 0,2$ e un rapporto di smorzamento $D = 5 \%$, poggiante su un contorno infinitamente rigido che agisce come superficie perfettamente riflettente. Le facce laterali della mesh hanno contorni assorbenti, del tipo sviluppato da Lysmer e Kuhlemeyer (1969). Allo scopo di non generare alcuno smorzamento numerico, le analisi utilizzano un modello di Newmark per l'integrazione rispetto al tempo, con i parametri di Newmark pari a 0,25 e 0,5.

Le analisi sono state ripetute per due diverse frequenze di carico f_L , pari a 0,4 e 1,0 Hz. I parametri di smorzamento di Rayleigh nell'analisi sono stati calibrati allo scopo di

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

produrre un rapporto di smorzamento del 5 % per $f = f_L$. I risultanti parametri di Rayleigh α e β sono elencati alla Tabella 9.

La Figura 17 mostra una comparazione tra i risultati ottenuti dalle analisi numeriche e quelli previsti da Gazetas (1991) utilizzando le stesse proprietà elastiche e di smorzamento: la relazione ciclica tra la risultante forza verticale sulla fondazione F_z e il corrispondente spostamento verticale w , ottenuta utilizzando i due metodi, sono ragionevolmente concordi, validando l'utilizzo delle equazioni approssimative di Gazetas (1991); tali equazioni sono quindi state utilizzate per ottenere i risultati presentati nei capitoli successivi.

Tabella 9 Parametri di smorzamento di Rayleigh

f_L (Hz)	α	β
0,4	0,105	0,327
1,0	0,024	0,008

6 Matrici di rigidezza e di smorzamento

La Tabella 10 riporta le matrici della rigidezza dinamica per i punti di riferimento forniti dall'analista strutturale per le fondazioni delle torri, i blocchi di fondazione e le fondazioni dei viadotti terminali. Le corrispondenti matrici dei coefficienti di smorzamento sono riportate alla Tabella 11, le unità sono kN e m.

6.1 Intervalli di confidenza

I valori di limite inferiore per le impedenze dinamiche possono essere ottenuti utilizzando il rapporto tra la rigidezza di taglio a piccola deformazione e lo smorzamento. Per contro, i parametri di rigidezza ottenuti dalla verifica dell'analisi statica degli elementi finiti tridimensionali (si veda il Rapporto CG1003-P-CL-D-P-CG-S4-00-00-00-01_A Matrici di rigidezza equivalente per il sistema suolo-fondazioni) sono considerati una stima ragionevole dei coefficienti di rigidezza al limite inferiore. Con questi coefficienti di rigidezza statica, un corrispondente rapporto di smorzamento può facilmente essere stimato a partire dalle curve di decadimento della rigidezza e

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>		<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>

dalle curve di aumento del rapporto di smorzamento di cui alla Figura 2, corrispondentemente agli appropriati livelli di deformazione. La Tabella 12 presenta un riepilogo dei valori della rigidezza elastica equivalente ottenuti per questo limite superiore e inferiore. Utilizzando i valori riportati alla Tabella 12, le matrici di rigidezza e smorzamento sono stati ricalcolati: essi sono riportati alle Tabelle da 13 a 16.

Tabella 10 – Matrici di rigidezza dinamica

Table 10. Dynamic stiffness matrices

Sicily Tower

	x	y	z	rx	ry	rz
x	5.5E+07	0	0	0	-5.7E+08	0
y	0	5.5E+07	0	-5.7E+08	0	0
z	0	0	5.3E+07	0	0	0
rx	0	-5.7E+08	0	3.3E+10	0	0
ry	-5.7E+08	0	0	0	3.3E+10	0
rz	0	0	0	0	0	5.5E+10

Units

x x	kN/m
y y	kN/m
z z	kN/m
rx rx	kN m
ry ry	kN m
rz rz	kN m

Calabria Tower

	x	y	z	rx	ry	rz
x	2.7E+08	0	0	0	-1.0E+09	0
y	0	2.7E+08	0	-1.0E+09	0	0
z	0	0	1.3E+08	0	0	0
rx	0	-1.0E+09	0	1.1E+11	0	0
ry	-1.0E+09	0	0	0	1.1E+11	0
rz	0	0	0	0	0	2.2E+11

x ry	kN
y rx	kN

Sicily Anchor

	x	y	z	rx	ry	rz
x	7.8E+07	0	0	0	8.7E+08	0
y	0	8.0E+07	0	8.9E+08	0	0
z	0	0	1.0E+08	0	0	0
rx	0	8.9E+08	0	9.8E+10	0	0
ry	8.7E+08	0	0	0	1.4E+11	0
rz	0	0	0	0	0	3.6E+11

Calabria Anchor

	x	y	z	rx	ry	rz
x	4.9E+08	0	0	0	3.3E+09	0
y	0	4.9E+08	0	3.3E+09	0	0
z	0	0	5.7E+08	0	0	0
rx	0	3.3E+09	0	6.9E+11	0	0
ry	3.3E+09	0	0	0	9.9E+11	0
rz	0	0	0	0	0	2.8E+12

Sicily terminal structure

	x	y	z	rx	ry	rz
x	2.3E+07	0	0	0	-7.7E+07	0
y	0	2.4E+07	0	-8.1E+07	0	0
z	0	0	1.8E+07	0	0	0
rx	0	-8.1E+07	0	1.5E+11	0	0
ry	-7.7E+07	0	0	0	1.9E+11	0
rz	0	0	0	0	0	2.7E+11

Calabria terminal structure

	x	y	z	rx	ry	rz
x	8.5E+07	0	0	0	3.6E+08	0
y	0	9.1E+07	0	3.9E+08	0	0
z	0	0	1.0E+08	0	0	0
rx	0	3.9E+08	0	4.8E+11	0	0
ry	3.6E+08	0	0	0	6.1E+11	0
rz	0	0	0	0	0	1.0E+12

Tabella 11 – Matrici di smorzamento

Table 11. Damping matrices

Sicily Tower

	x	y	z	rx	ry	rz
x	4.1E+06	0	0	0	-4.3E+07	0
y	0	4.1E+06	0	-4.3E+07	0	0
z	0	0	4.0E+06	0	0	0
rx	0	-4.3E+07	0	2.5E+09	0	0
ry	-4.3E+07	0	0	0	2.5E+09	0
rz	0	0	0	0	0	4.1E+09

Units

x x Mg/s

y y Mg/s

z z Mg/s

rx rx Mg m²/s

ry ry Mg m²/s

rz rz Mg m²/s

Calabria Tower

	x	y	z	rx	ry	rz
x	5.5E+06	0	0	0	-2.1E+07	0
y	0	5.5E+06	0	-2.1E+07	0	0
z	0	0	2.8E+06	0	0	0
rx	0	-2.1E+07	0	2.3E+09	0	0
ry	-2.1E+07	0	0	0	2.3E+09	0
rz	0	0	0	0	0	4.6E+09

x ry Mg m/s

y rx Mg m/s

Sicily Anchor

	x	y	z	rx	ry	rz
x	6.5E+05	0	0	0	7.0E+06	0
y	0	6.6E+05	0	7.2E+06	0	0
z	0	0	8.3E+05	0	0	0
rx	0	7.2E+06	0	2.7E+10	0	0
ry	7.0E+06	0	0	0	4.3E+10	0
rz	0	0	0	0	0	2.9E+09

Calabria Anchor

	x	y	z	rx	ry	rz
x	4.9E+05	0	0	0	2.7E+06	0
y	0	4.9E+05	0	2.7E+06	0	0
z	0	0	5.3E+05	0	0	0
rx	0	2.7E+06	0	5.6E+10	0	0
ry	2.7E+06	0	0	0	6.4E+10	0
rz	0	0	0	0	0	2.5E+09

Sicily terminal structure

	x	y	z	rx	ry	rz
x	2.2E+06	0	0	0	-1.4E+07	0
y	0	2.2E+06	0	-1.4E+07	0	0
z	0	0	3.0E+05	0	0	0
rx	0	-1.4E+07	0	2.3E+09	0	0
ry	-1.4E+07	0	0	0	3.0E+09	0
rz	0	0	0	0	0	4.4E+09

Calabria terminal structure

	x	y	z	rx	ry	rz
x	8.3E+05	0	0	0	2.6E+06	0
y	0	8.3E+05	0	2.6E+06	0	0
z	0	0	9.7E+04	0	0	0
rx	0	2.6E+06	0	4.3E+08	0	0
ry	2.6E+06	0	0	0	5.6E+08	0
rz	0	0	0	0	0	9.5E+08

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

Tabella 12 – Limiti superiori e inferiori per *G* e *D*.

Sito	Limite superiore		Limite inferiore	
	<i>G</i> (MPa)	<i>D</i> (%)	<i>G</i> (MPa)	<i>D</i> (%)
Torre in Sicilia	200	2,5	60	12
Blocco di ancoraggio in Sicilia	300	1,0	120	9
Torre in Calabria	800	2,0	300	10
Blocco di ancoraggio in Calabria	1300	1,0	650	5

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidità e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni		<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>

Tabella 13 – Matrici di rigidità dinamica – Limite superiore

Table 13. Dynamic stiffness matrices - Upper bound

Sicily Tower

	x	y	z	rx	ry	rz	Units
x	1.0E+08	0	0	0	-1.0E+09	0	x x kN/m
y	0	1.0E+08	0	-1.0E+09	0	0	y y kN/m
z	0	0	9.7E+07	0	0	0	z z kN/m
rx	0	-1.0E+09	0	6.2E+10	0	0	rx rx kN m
ry	-1.0E+09	0	0	0	6.2E+10	0	ry ry kN m
rz	0	0	0	0	0	1.0E+11	rz rz kN m

Calabria Tower

	x	y	z	rx	ry	rz	Units
x	3.3E+08	0	0	0	-1.3E+09	0	x ry kN
y	0	3.3E+08	0	-1.3E+09	0	0	y rx kN
z	0	0	1.6E+08	0	0	0	
rx	0	-1.3E+09	0	1.4E+11	0	0	
ry	-1.3E+09	0	0	0	1.4E+11	0	
rz	0	0	0	0	0	2.8E+11	

Sicily Anchor

	x	y	z	rx	ry	rz
x	1.5E+08	0	0	0	1.7E+09	0
y	0	1.5E+08	0	1.7E+09	0	0
z	0	0	1.7E+08	0	0	0
rx	0	1.7E+09	0	2.4E+11	0	0
ry	1.7E+09	0	0	0	3.4E+11	0
rz	0	0	0	0	0	7.6E+11

Calabria Anchor

	x	y	z	rx	ry	rz
x	5.2E+08	0	0	0	3.5E+09	0
y	0	5.3E+08	0	3.5E+09	0	0
z	0	0	6.0E+08	0	0	0
rx	0	3.5E+09	0	7.7E+11	0	0
ry	3.5E+09	0	0	0	1.1E+12	0
rz	0	0	0	0	0	3.0E+12

Sicily terminal structure

	x	y	z	rx	ry	rz
x	4.1E+07	0	0	0	-1.4E+08	0
y	0	4.3E+07	0	-1.5E+08	0	0
z	0	0	3.2E+07	0	0	0
rx	0	-1.5E+08	0	2.7E+11	0	0
ry	-1.4E+08	0	0	0	3.5E+11	0
rz	0	0	0	0	0	5.0E+11

Calabria terminal structure

	x	y	z	rx	ry	rz
x	1.0E+08	0	0	0	4.5E+08	0
y	0	1.1E+08	0	4.8E+08	0	0
z	0	0	1.0E+08	0	0	0
rx	0	4.8E+08	0	7.8E+11	0	0
ry	4.5E+08	0	0	0	1.0E+12	0
rz	0	0	0	0	0	1.5E+12

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni		Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

Tabella 14 – Matrici di smorzamento – Limite superiore

Table 14. Damping matrices - Upper bound

Sicily Tower

	x	y	z	rx	ry	rz	Units
x	2.3E+06	0	0	0	-2.3E+07	0	x x Mg/s
y	0	2.3E+06	0	-2.3E+07	0	0	y y Mg/s
z	0	0	2.2E+06	0	0	0	z z Mg/s
rx	0	-2.3E+07	0	1.4E+09	0	0	rx rx Mg m ² /s
ry	-2.3E+07	0	0	0	1.4E+09	0	ry ry Mg m ² /s
rz	0	0	0	0	0	2.3E+09	rz rz Mg m ² /s

Calabria Tower

	x	y	z	rx	ry	rz	Units
x	1.5E+07	0	0	0	-5.8E+07	0	x ry Mg m /s
y	0	1.5E+07	0	-5.8E+07	0	0	y rx Mg m /s
z	0	0	7.4E+06	0	0	0	
rx	0	-5.8E+07	0	6.3E+09	0	0	
ry	-5.8E+07	0	0	0	6.3E+09	0	
rz	0	0	0	0	0	1.2E+10	

Sicily Anchor

	x	y	z	rx	ry	rz
x	2.7E+05	0	0	0	2.7E+06	0
y	0	2.8E+05	0	2.8E+06	0	0
z	0	0	2.9E+05	0	0	0
rx	0	2.8E+06	0	3.1E+10	0	0
ry	2.7E+06	0	0	0	5.0E+10	0
rz	0	0	0	0	0	1.3E+09

Calabria Anchor

	x	y	z	rx	ry	rz
x	3.7E+05	0	0	0	1.9E+06	0
y	0	3.7E+05	0	1.9E+06	0	0
z	0	0	3.9E+05	0	0	0
rx	0	1.9E+06	0	5.7E+10	0	0
ry	1.9E+06	0	0	0	6.5E+10	0
rz	0	0	0	0	0	1.8E+09

Sicily terminal structure

	x	y	z	rx	ry	rz
x	2.8E+06	0	0	0	-1.9E+07	0
y	0	2.8E+06	0	-1.9E+07	0	0
z	0	0	1.8E+05	0	0	0
rx	0	-1.9E+07	0	1.4E+09	0	0
ry	-1.9E+07	0	0	0	1.8E+09	0
rz	0	0	0	0	0	2.7E+09

Calabria terminal structure

	x	y	z	rx	ry	rz
x	2.0E+06	0	0	0	6.2E+06	0
y	0	2.0E+06	0	6.2E+06	0	0
z	0	0	8.8E+04	0	0	0
rx	0	6.2E+06	0	6.4E+08	0	0
ry	6.2E+06	0	0	0	8.3E+08	0
rz	0	0	0	0	0	1.3E+09

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidità e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011	

Tabella 15 – Matrici di rigidità dinamica – Limite inferiore

Table 15. Dynamic stiffness matrices - Lower bound

Sicily Tower

	x	y	z	rx	ry	rz	Units
x	3.0E+07	0	0	0	-3.1E+08	0	x x kN/m
y	0	3.0E+07	0	-3.1E+08	0	0	y y kN/m
z	0	0	2.9E+07	0	0	0	z z kN/m
rx	0	-3.1E+08	0	1.8E+10	0	0	rx rx kN m
ry	-3.1E+08	0	0	0	1.8E+10	0	ry ry kN m
rz	0	0	0	0	0	3.0E+10	rz rz kN m

Calabria Tower

	x	y	z	rx	ry	rz	Units
x	1.2E+08	0	0	0	-4.8E+08	0	x ry kN
y	0	1.2E+08	0	-4.8E+08	0	0	y rx kN
z	0	0	6.2E+07	0	0	0	
rx	0	-4.8E+08	0	5.2E+10	0	0	
ry	-4.8E+08	0	0	0	5.2E+10	0	
rz	0	0	0	0	0	1.0E+11	

Sicily Anchor

	x	y	z	rx	ry	rz
x	5.9E+07	0	0	0	6.6E+08	0
y	0	6.1E+07	0	6.8E+08	0	0
z	0	0	8.4E+07	0	0	0
rx	0	6.8E+08	0	6.3E+10	0	0
ry	6.6E+08	0	0	0	9.4E+10	0
rz	0	0	0	0	0	2.6E+11

Calabria Anchor

	x	y	z	rx	ry	rz
x	2.6E+08	0	0	0	1.8E+09	0
y	0	2.6E+08	0	1.8E+09	0	0
z	0	0	3.7E+08	0	0	0
rx	0	1.8E+09	0	2.2E+11	0	0
ry	1.8E+09	0	0	0	3.4E+11	0
rz	0	0	0	0	0	1.3E+12

Sicily terminal structure

	x	y	z	rx	ry	rz
x	1.4E+07	0	0	0	-4.7E+07	0
y	0	1.5E+07	0	-5.0E+07	0	0
z	0	0	1.1E+07	0	0	0
rx	0	-5.0E+07	0	8.8E+10	0	0
ry	-4.7E+07	0	0	0	1.1E+11	0
rz	0	0	0	0	0	1.6E+11

Calabria terminal structure

	x	y	z	rx	ry	rz
x	3.6E+07	0	0	0	1.5E+08	0
y	0	3.9E+07	0	1.7E+08	0	0
z	0	0	3.8E+07	0	0	0
rx	0	1.7E+08	0	2.4E+11	0	0
ry	1.5E+08	0	0	0	3.1E+11	0
rz	0	0	0	0	0	4.9E+11

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011	

Tabella 16 – Matrici di smorzamento – Limite inferiore

Table 16. Damping matrices - Lower bound

Sicily Tower

	x	y	z	rx	ry	rz	Units
x	3.3E+06	0	0	0	-3.4E+07	0	x x Mg/s
y	0	3.3E+06	0	-3.4E+07	0	0	y y Mg/s
z	0	0	3.2E+06	0	0	0	z z Mg/s
rx	0	-3.4E+07	0	1.9E+09	0	0	rx rx Mg m ² /s
ry	-3.4E+07	0	0	0	1.9E+09	0	ry ry Mg m ² /s
rz	0	0	0	0	0	3.2E+09	rz rz Mg m ² /s

Calabria Tower

	x	y	z	rx	ry	rz	Units
x	1.1E+07	0	0	0	-4.3E+07	0	x ry Mg m /s
y	0	1.1E+07	0	-4.3E+07	0	0	y rx Mg m /s
z	0	0	5.6E+06	0	0	0	
rx	0	-4.3E+07	0	4.7E+09	0	0	
ry	-4.3E+07	0	0	0	4.7E+09	0	
rz	0	0	0	0	0	9.3E+09	

Sicily Anchor

	x	y	z	rx	ry	rz
x	9.1E+05	0	0	0	1.0E+07	0
y	0	9.3E+05	0	1.0E+07	0	0
z	0	0	1.3E+06	0	0	0
rx	0	1.0E+07	0	2.5E+10	0	0
ry	1.0E+07	0	0	0	4.0E+10	0
rz	0	0	0	0	0	3.9E+09

Calabria Anchor

	x	y	z	rx	ry	rz
x	7.3E+05	0	0	0	4.5E+06	0
y	0	7.4E+05	0	4.5E+06	0	0
z	0	0	9.9E+05	0	0	0
rx	0	4.5E+06	0	4.6E+10	0	0
ry	4.5E+06	0	0	0	5.2E+10	0
rz	0	0	0	0	0	3.4E+09

Sicily terminal structure

	x	y	z	rx	ry	rz
x	1.8E+06	0	0	0	-1.2E+07	0
y	0	1.8E+06	0	-1.2E+07	0	0
z	0	0	2.7E+05	0	0	0
rx	0	-1.2E+07	0	2.0E+09	0	0
ry	-1.2E+07	0	0	0	2.6E+09	0
rz	0	0	0	0	0	3.8E+09

Calabria terminal structure

	x	y	z	rx	ry	rz
x	1.3E+06	0	0	0	4.0E+06	0
y	0	1.3E+06	0	4.1E+06	0	0
z	0	0	1.6E+05	0	0	0
rx	0	4.1E+06	0	9.8E+08	0	0
ry	4.0E+06	0	0	0	1.3E+09	0
rz	0	0	0	0	0	2.0E+09

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> PB0031_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

Bibliografia

Bardet J.P., Ichii K. & Lin C.H. (2000). EERA. *A computer program for equivalent linear earthquake site response analysis of layered soil deposits*. Dept. of Civil Engineering, University of southern California.

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

Hudson M., Idriss I.M. & Beikae M. (1994). QUAD4M. A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base. Center for Geotechnical Modeling, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis.

Idriss I. M. (1990). Response of Soft Soil Sites during Earthquakes. *Proceedings, Memorial Symposium to honor Professor Harry Bolton Seed*, Berkeley, California, Vol. II.

Khran J. (2004). *Dynamic modelling with QUAKE/W*. GEO-SLOPE International Ltd.

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

ProShake (1999) Edu Pro Civil Systems Inc.

Rathje E.M., Abrahamson N.A. & Bray J.D. (1998). Simplified frequency content estimates of earthquake ground motion. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No.2: 150-159.

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.

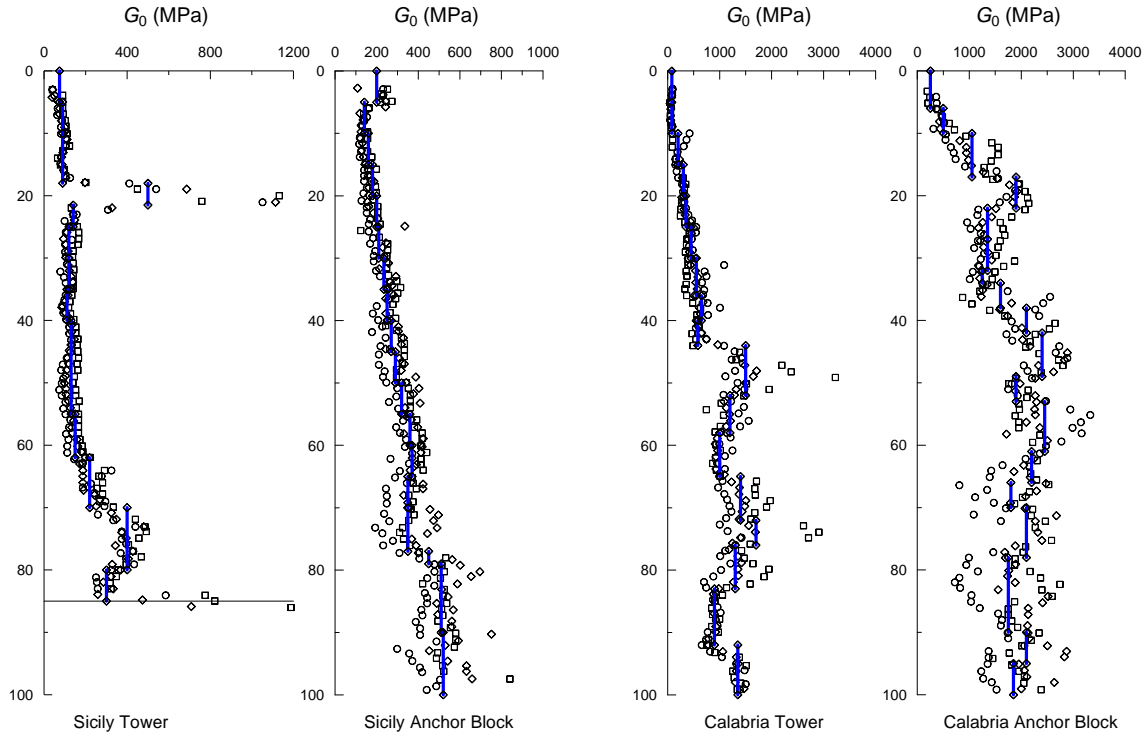


Figura 1 – Profili della rigidezza a piccola deformazione ottenuti dalle prove cross-hole e adottati nell'analisi.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>

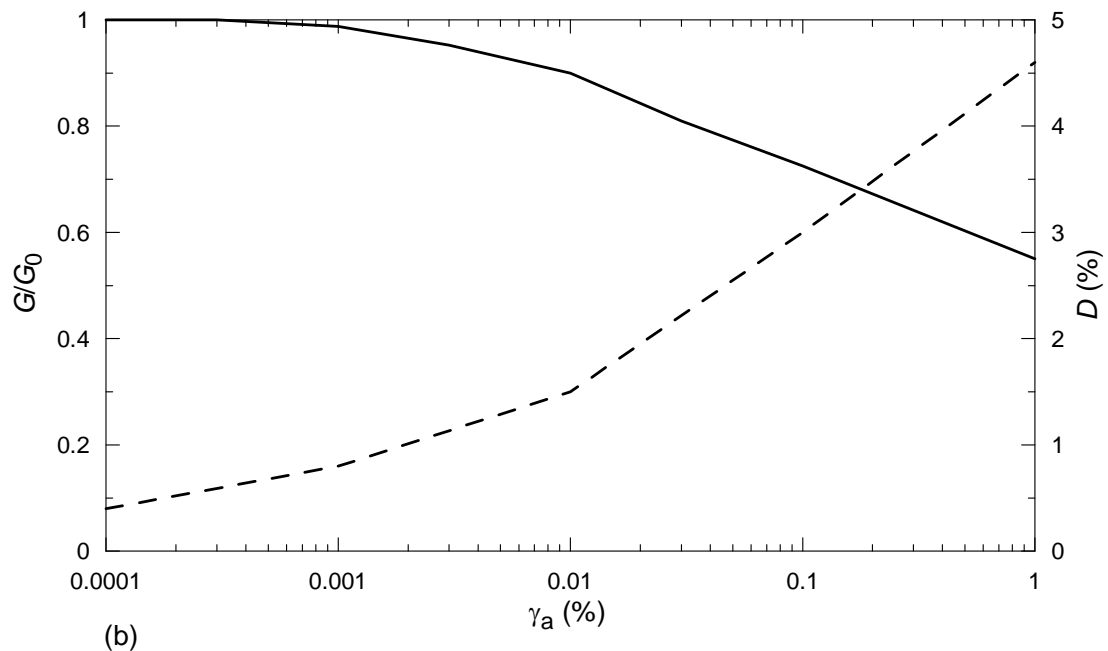
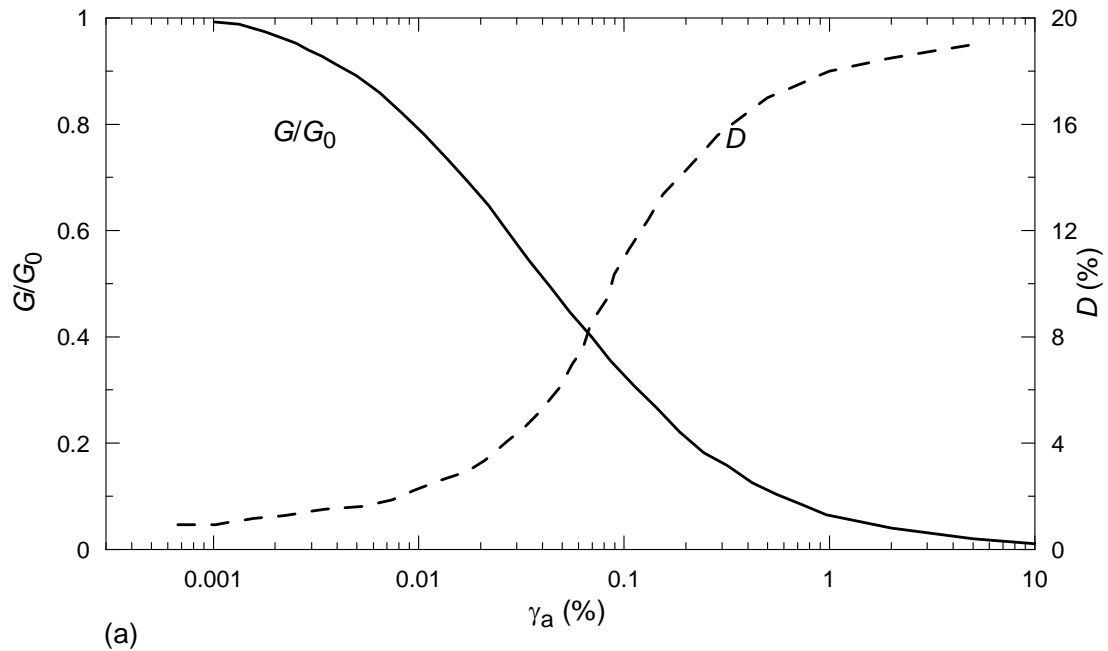


Figura 2 – Curve di decadimento e smorzamento del modulo utilizzate nell’analisi della risposta del sito nel punto di ubicazione della torre in Sicilia: a) depositi costieri; b) (bedrock).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni		<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<table border="1"> <tr> <td><i>Rev</i></td> <td><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

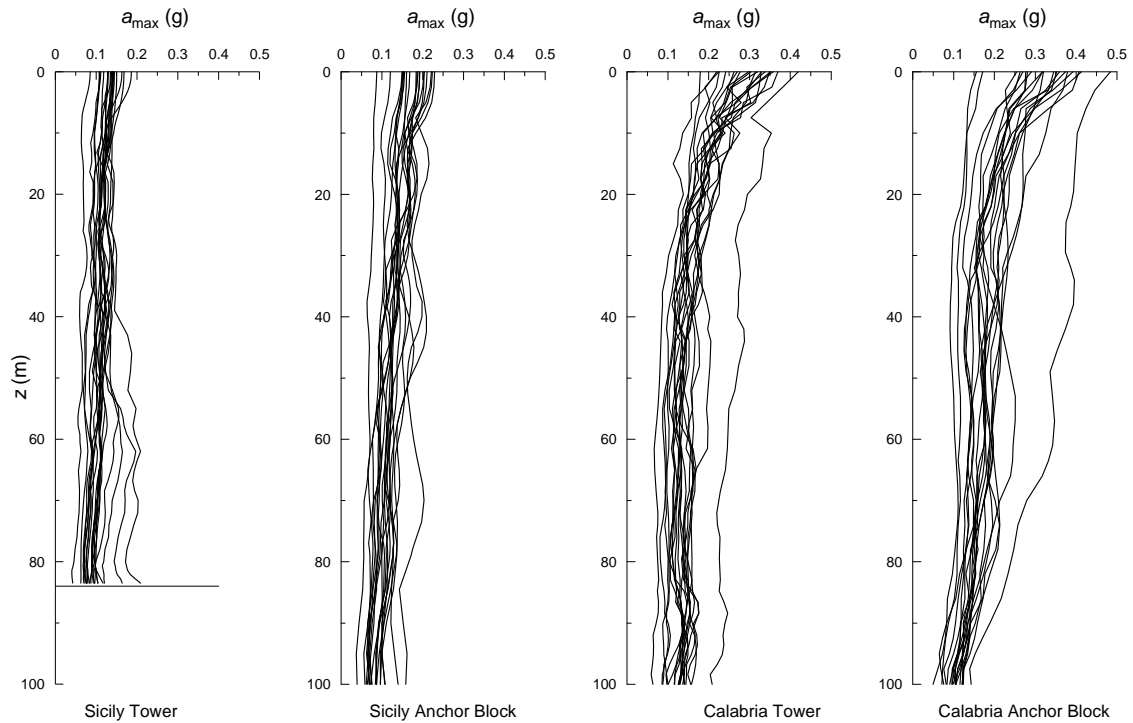


Figura 3- Profili dell'accelerazione massima calcolata nelle analisi della risposta del sito.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

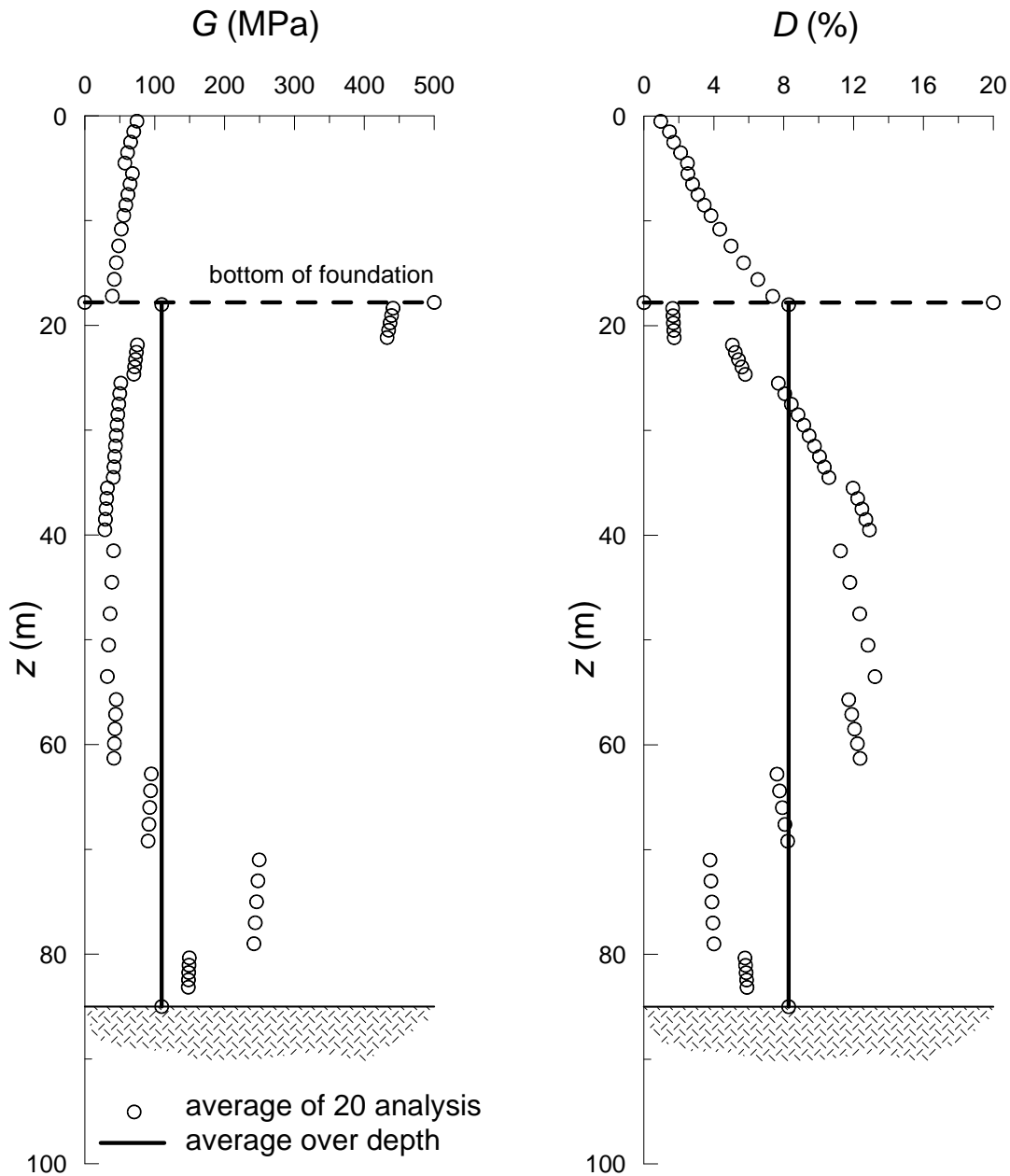


Figura 4 – Valori medi della rigidezza di intersezione G e del rapporto di smorzamento D per la torre in Sicilia.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

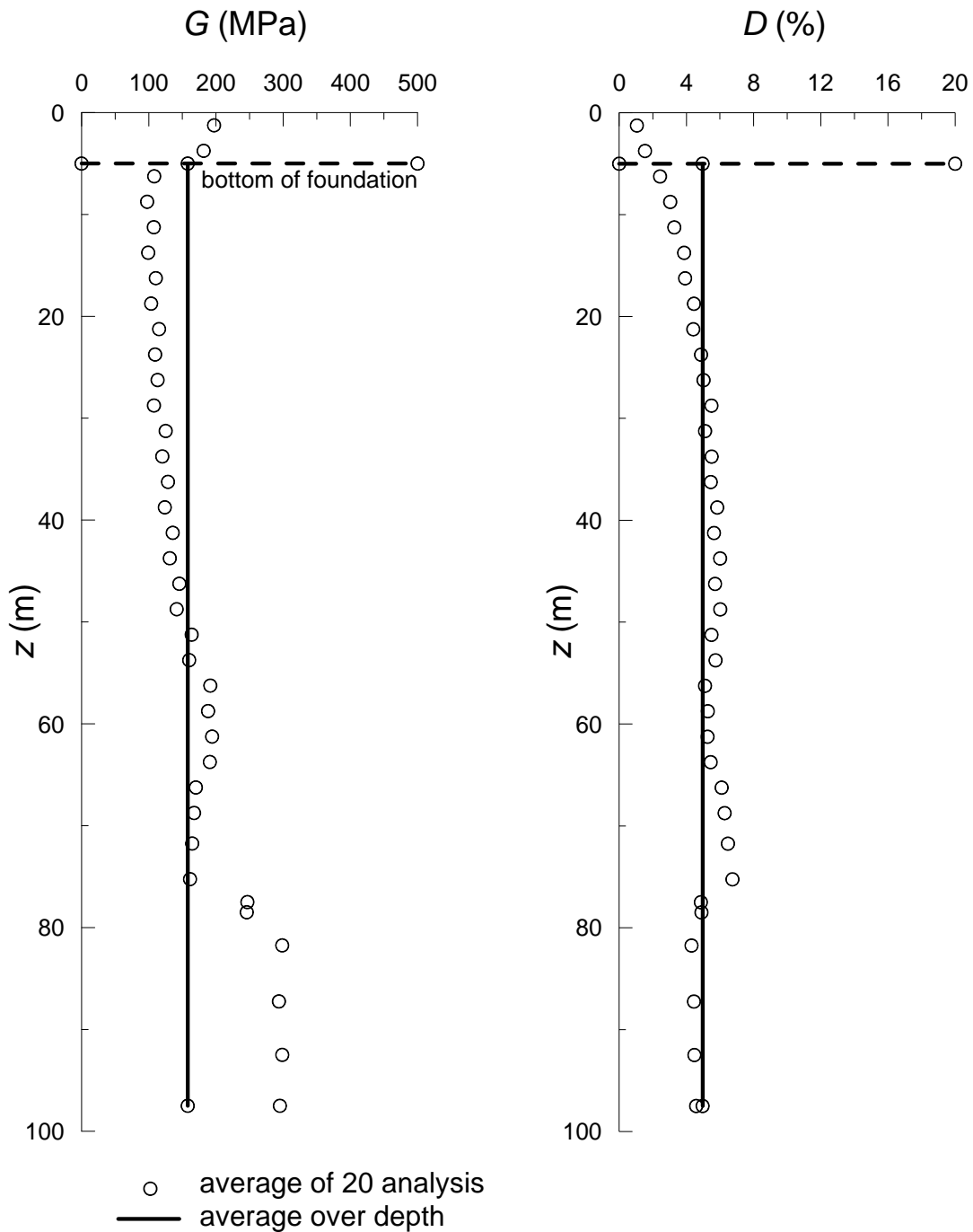


Figura 5 – Valori medi della rigidezza di intersezione G e del rapporto di smorzamento D per il blocco di ancoraggio in Sicilia.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

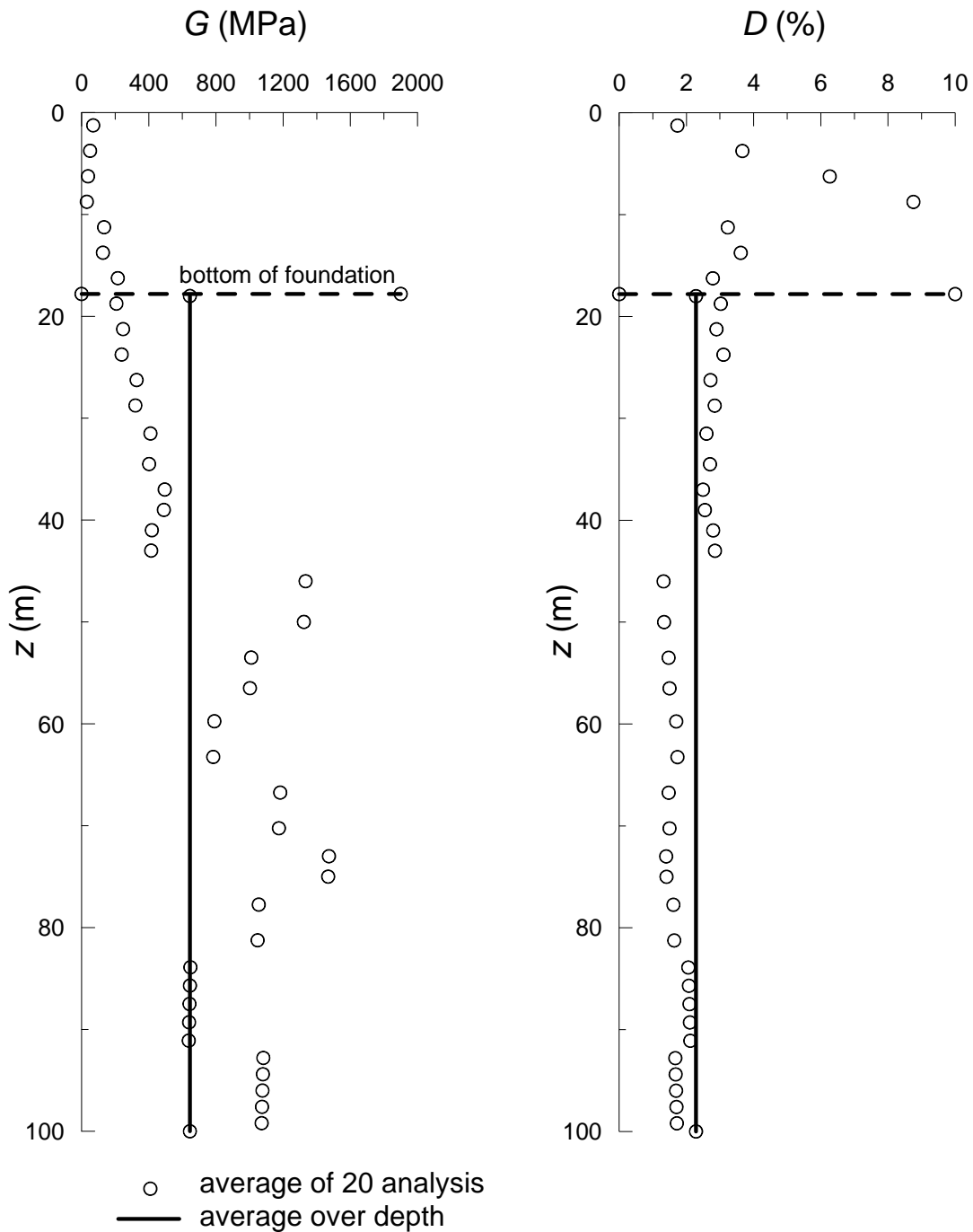


Figura 6 – Valori medi della rigidezza di intersezione G e del rapporto di smorzamento D per la torre in Calabria.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidità e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>	

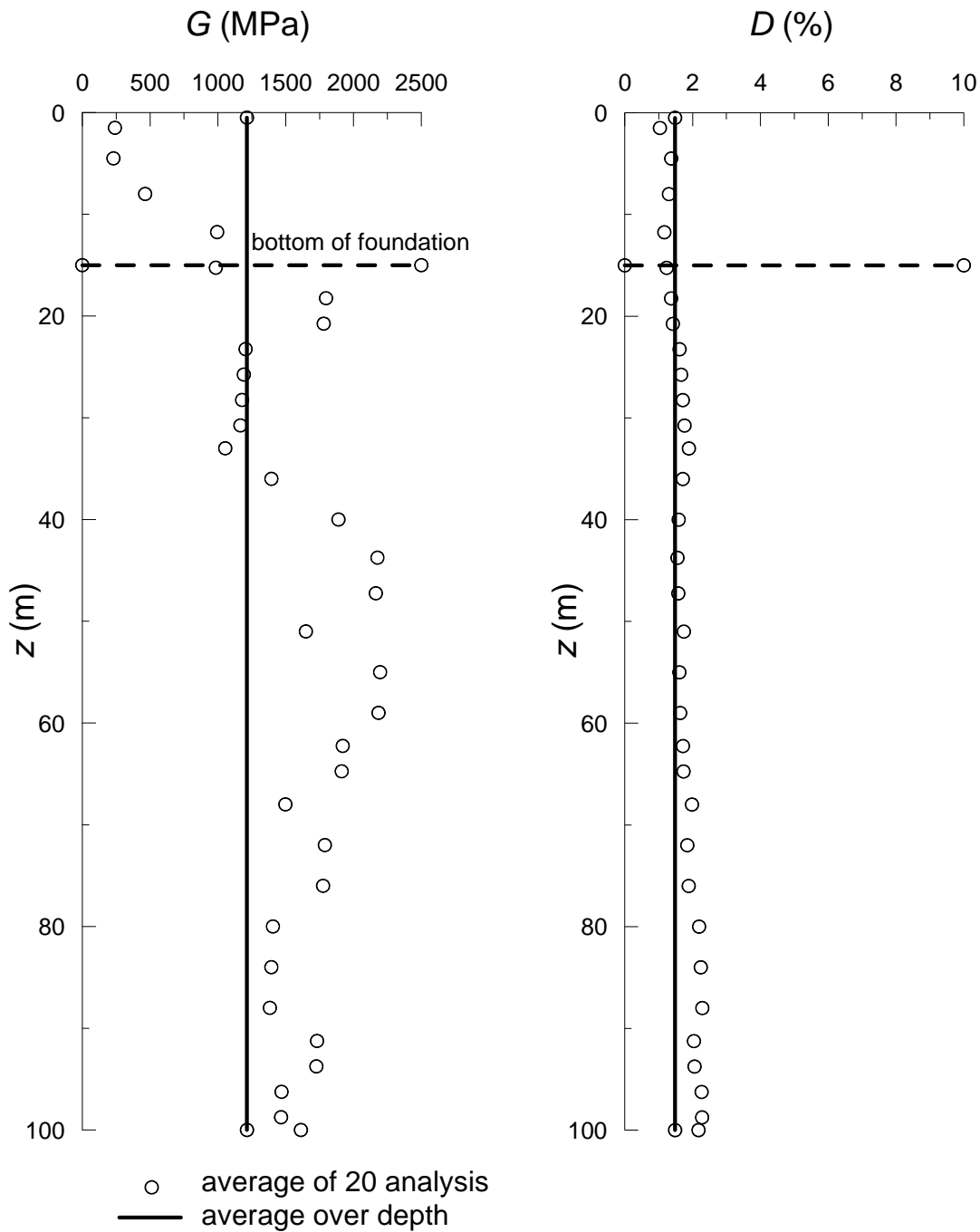


Figura 7 – Valori medi della rigidità di intersezione G e del rapporto di smorzamento D il blocco di ancoraggio in Calabria.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>	

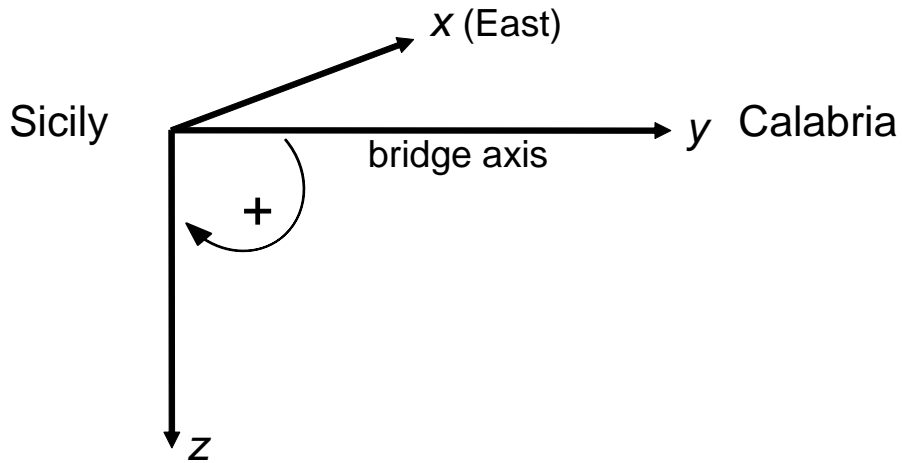


Figura 8 – Sistema di riferimento utilizzato nei calcoli.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Matrici equivalenti di rigidità e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

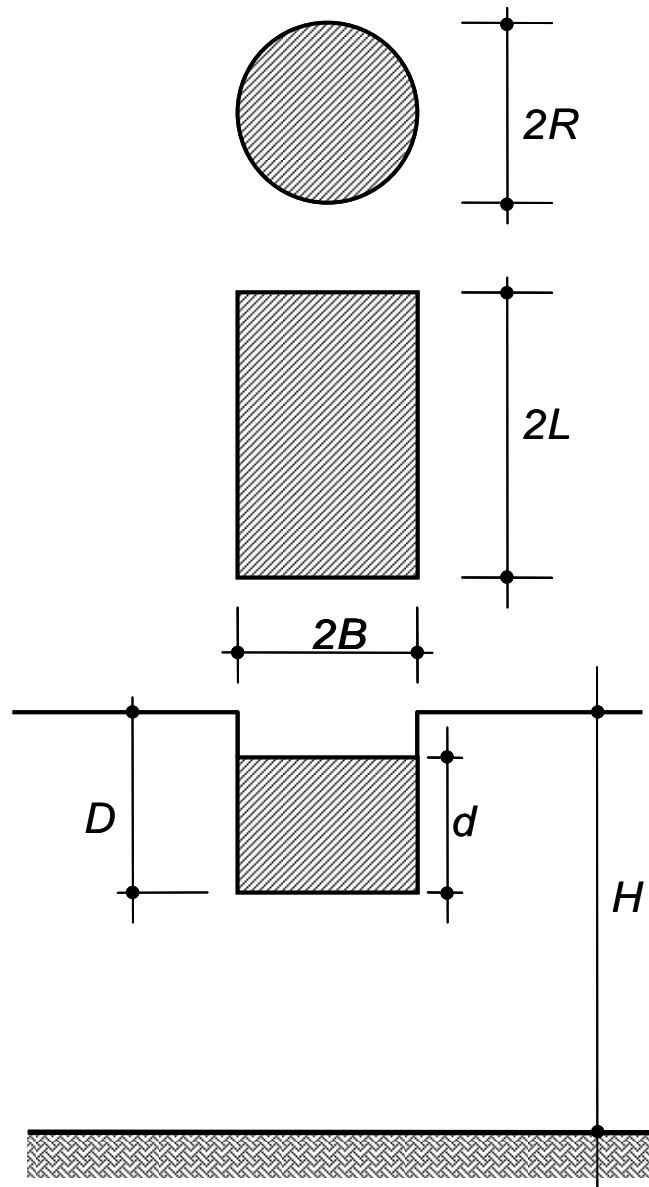


Figura 9 – Schema di layout di una fondazione rettangolare incassata in un semispazio elastico.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

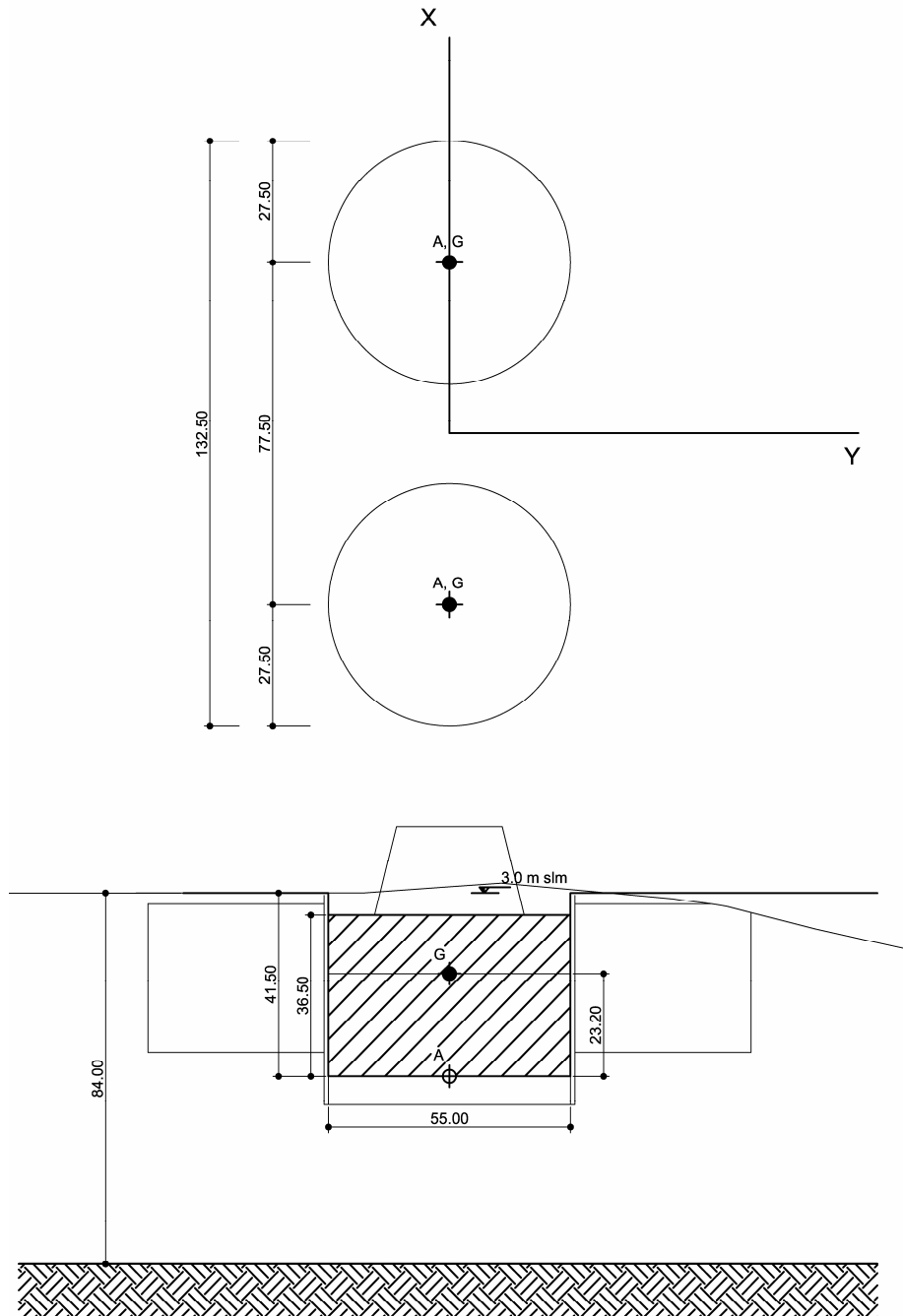


Figura 10 – Fondazione della torre in Sicilia.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Matrici equivalenti di rigidità e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> PB0031_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

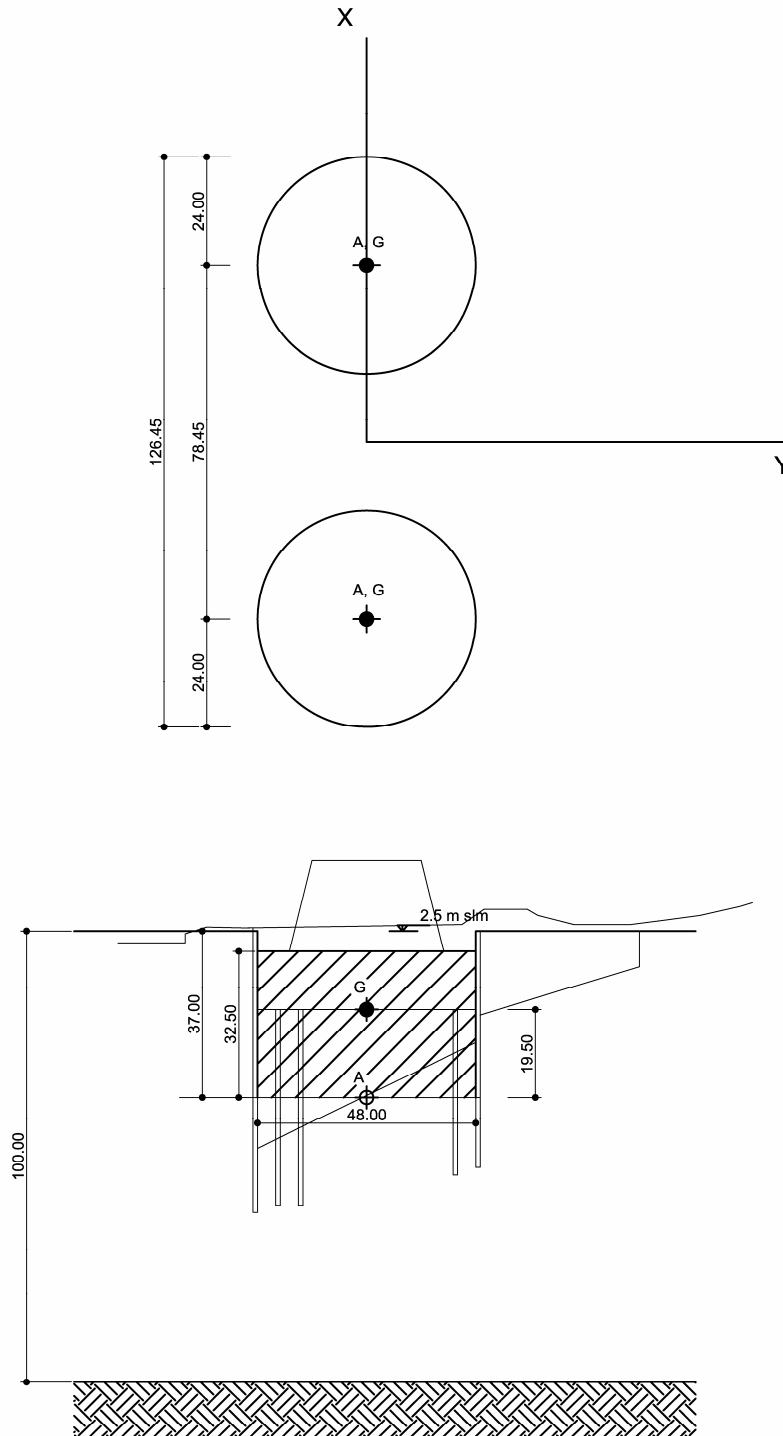


Figura 11 – Fondazione della torre in Calabria.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

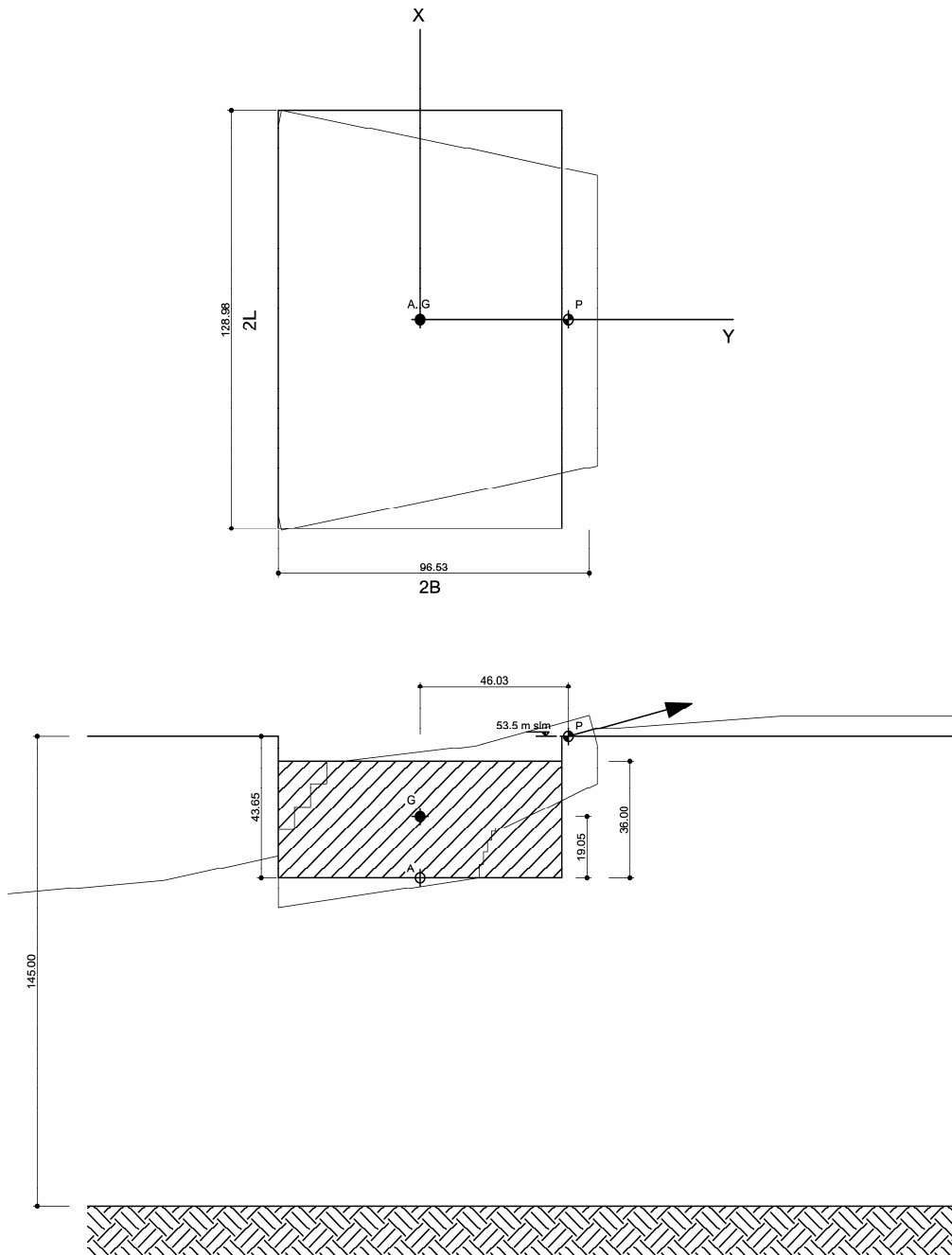


Figura 12 – Fondazione del blocco di ancoraggio in Sicilia.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Matrici equivalenti di rigidità e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

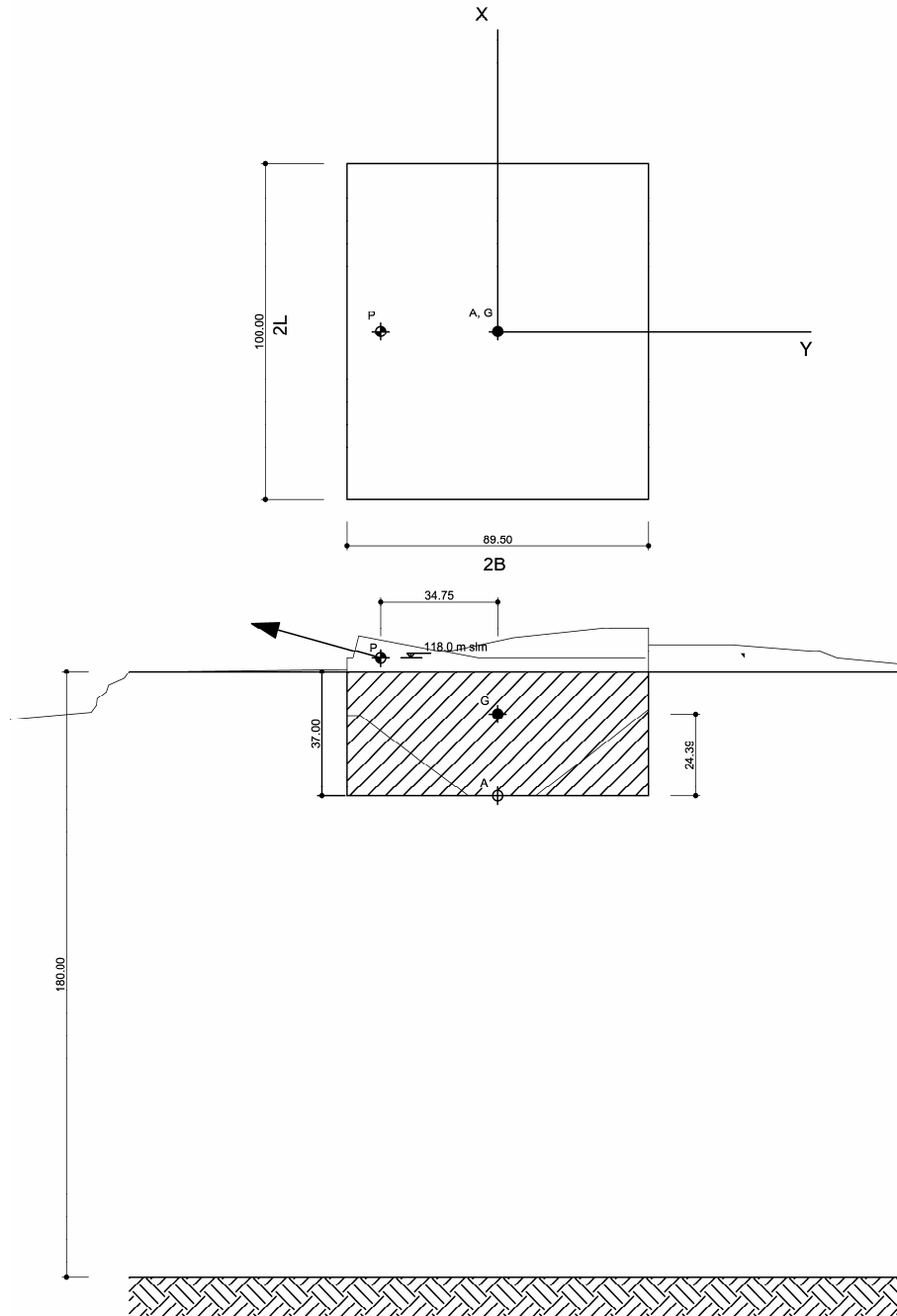


Figura 13 – Fondazione del blocco di ancoraggio in Calabria.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

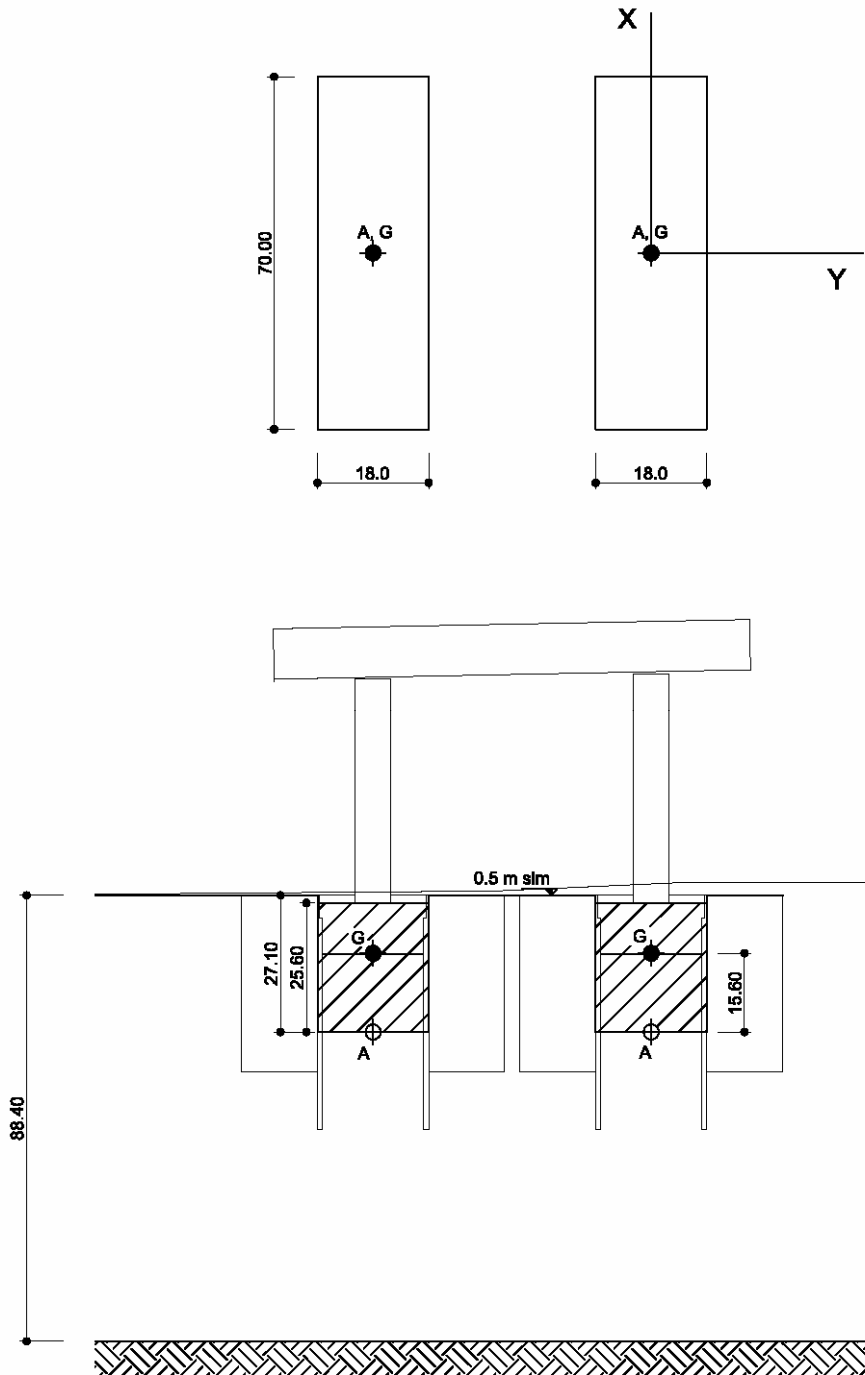


Figura 14 – Fondazione della struttura terminale in Sicilia.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Matrici equivalenti di rigidità e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

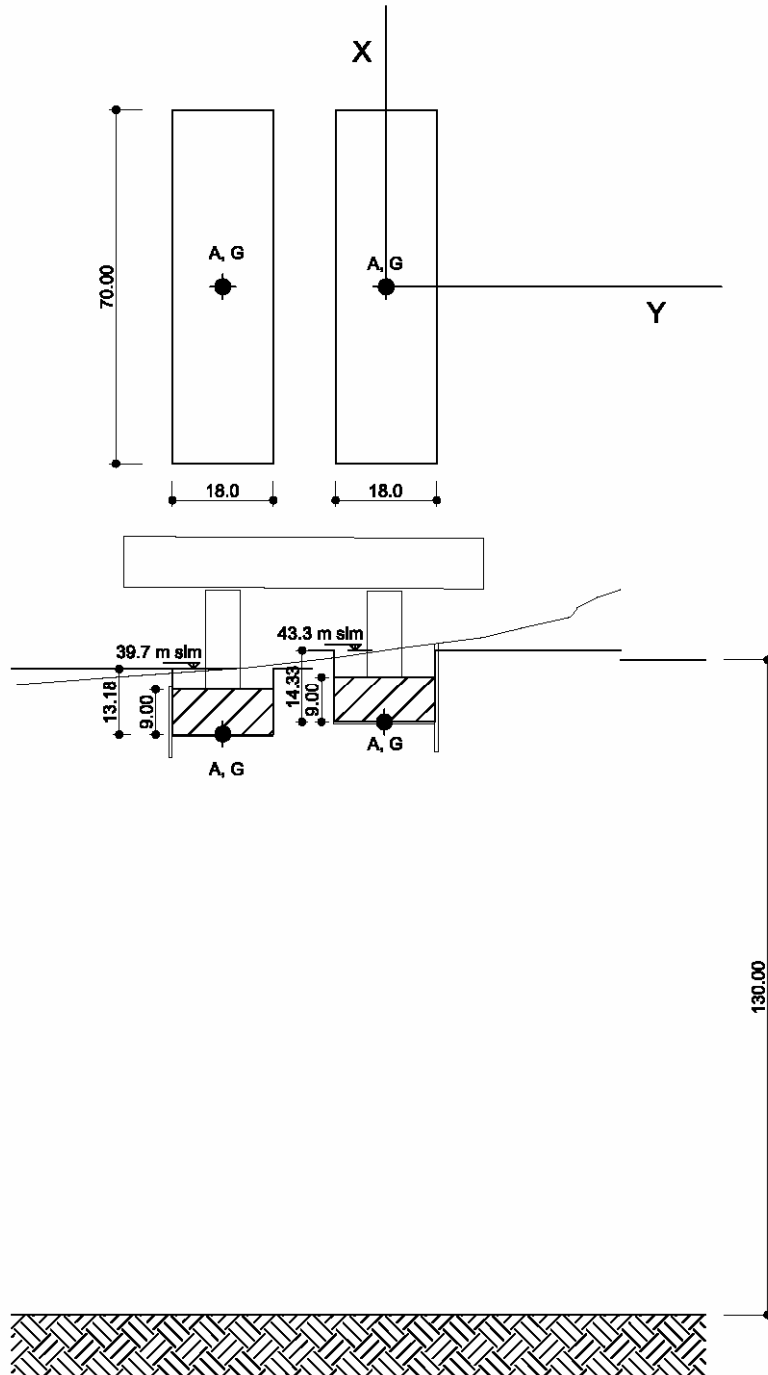


Figura 15 – Fondazione della struttura terminale in Calabria.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Matrici equivalenti di rigidità e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	Codice documento <i>PB0031_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

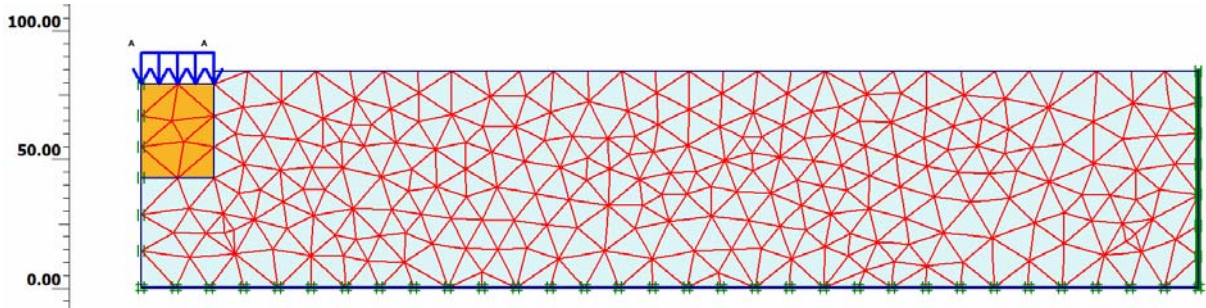


Figura 16 – Mesh di elementi finiti utilizzata per la verifica delle soluzioni elastiche

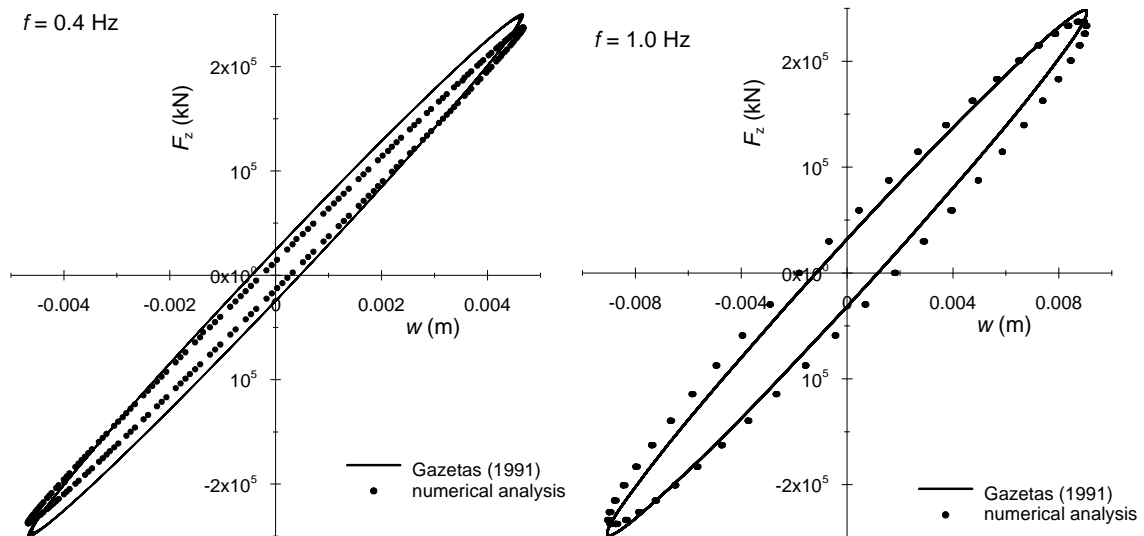


Figura 17 – Comparazione tra la risposta ciclica delle fondazioni ottenuta dalle soluzioni semplificate di Gazetas (1991) e quelle risultanti dalle analisi numeriche dinamiche.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> PB0031_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

APPENDICE A

Dettagli del calcolo delle matrici di impedenza dinamica

**Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento
per il sistema suolo-fondazioni**

Codice documento
PB0031_F0_ITA.doc

Rev
F0

Data
20/06/2011

SICILY TOWER

single footing

radius	R	27.5 m	Soil density	0.002 Gg/m ³
total area	Ab	m ²		
distance	i	77.5 m		
embedment	D	41.5 m	loading frequency	0.35 Hz
	d	36.5 m	loading period	2.8 s
			ω	2.22 rad/s
thickness of layer	H	84 m	Vs	234.52 m/s
			$a_0 = \omega R/Vs$	0.26
hysteretic damping	ξ	8.3 %	H/R	3.1
shear modulus	G	110 MPa	VLa	317.2637 m/s
Poisson's ratio	ν	0.2		
Young's modulus	E	264.0 MPa	fc	0.94 Hz
			fs	0.53 Hz

vertical displacement (z)

shallow circular found. on elastic layer	Kz(shallow-c)	21562.1 MN m		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	1		
radiation dashpot	$C(\omega)$	0	$f < f_c$	true
embedded foundation dynamic coefficient	Kz(emb-c)	5.29E+04 MN/m		
	$k(\omega)$	1.01		
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
dynamic stiffness	Kz	5.33E+04 MN/m	5.33E+07 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
hysteretic dashpot	Ch	3993 Gg/s		
Total dashpot	C z	3993 Gg/s	3.99E+06 Mg/s	

torsion (rz)

shallow circular found. on elastic layer	Krz(shallow-c)	12600265.4 MN m		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	0.96		
radiation dashpot	$C(\omega)$	---		
embedded circular found. dynamic coefficient	Krz(emb-c)	5.73E+07 MN m		
	$k(\omega)$	0.96		
radiation dashpot	$C(\omega)$	5.60E+02 Gg m ² /s		
dynamic stiffness	Kz	5.52E+07 MN m	5.52E+10 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	5.60E+02 Gg m ² /s		
hysteretic dashpot	Ch	4.13E+06 Gg m ² /s		
Total dashpot	C rz	4.13E+06 Gg m²/s	4.13E+09 Mg m²/s	

**horizontal displacement (y)
(longitudinal direction)**

shallow circular found. on elastic layer	Ky(shallow-c)	15645.172 MN/m		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	---		
radiation dashpot	$C(\omega)$	0	c_y	0.9
			$f < 0.75 f_s$	true
			$f > 1.33 f_s$	false
embedded foundation dynamic coefficient	Ky(emb-c)	5.89E+04 MN/m		
	$k(\omega)$	0.94		
dynamic stiffness	Ky	5.54E+04 MN/m	5.54E+07 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
hysteretic dashpot	Ch	4147 Gg/s		
Total dashpot	C x	4147 Gg/s	4.15E+06 Mg/s	

**horizontal displacement (x)
(transversal direction)**

shallow circular found. on elastic layer	Kx(shallow-c)	15645.172		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	---		
radiation dashpot	$C(\omega)$	0	c_x	0.9
			$f < 0.75 f_s$	true
			$f > 1.33 f_s$	false
embedded foundation dynamic coefficient	Kx(emb-c)	5.89E+04 MN/m		
	$k(\omega)$	0.94		
dynamic stiffness	Kx	5.54E+04 MN/m	5.54E+07 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
hysteretic dashpot	Ch	4147 Gg/s		
Total dashpot	C y	4147 Gg/s	4.15E+06 Mg/s	

rotation around x (rx)

shallow circular found. on elastic layer	Krx(shallow-c)	8049917.38 MN m		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	0.95		
radiation dashpot	$C(\omega)$	0	$f < f_c$	true
embedded circular found. dynamic coefficient	Krx(emb-c)	3.89E+07 MN m		
	$k(\omega)$	0.95		
dynamic stiffness	K rx	3.68E+07 MN m	3.68E+10 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
hysteretic dashpot	Ch	2759758 Gg m ² /s		
Total dashpot	C rx	2759758 Gg m²/s	2.76E+09 Mg m²/s	

rotation around y (ry)

shallow circular found. on elastic layer	Kry(shallow-c)	8049917.38		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	0.95		
radiation dashpot	$C(\omega)$	0	$f < f_c$	true
embedded circular found. dynamic coefficient	Kry(emb-c)	3.89E+07 MN m		
	$k(\omega)$	0.95		
dynamic stiffness	K ry	3.68E+07 MN m	3.68E+10 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
hysteretic dashpot	Ch	2759758 Gg m ² /s		
Total dashpot	C ry	2759758 Gg m²/s	2.76E+09 Mg m²/s	

mixed mode

circular y-rx	Ky-rx	7.17E+05 MN		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	1		
dynamic stiffness	K y-rx	7.17E+05 MN/m	7.17E+08 kN	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
hysteretic dashpot	Ch	5.37E+04		
Total dashpot	C y-rx	53671 Gg m/s	5.37E+07 Mg m/s	

mixed mode

circular x-ry	Kx-ry	7.17E+05 MN		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	1		
dynamic stiffness	K x-ry	7.17E+05 MN/m	7.17E+08 kN	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
hysteretic dashpot	Ch	5.37E+04		
Total dashpot	C x-ry	53671 Gg m/s	5.37E+07 Mg m/s	

Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento
per il sistema suolo-fondazioni

Codice documento
PB0031_F0_ITA.doc

Rev
F0

Data
20/06/2011

CALABRIA TOWER		single footing			
radius	R	24 m	Soil density	0.002 Gg/m ³	
distance	i	78.45 m			
embedment	D	37 m	loading frequency	0.35 Hz	
	d	32.5 m	loading period	2.8 s	
			ω	2.22 rad/s	
thickness of layer	H	100 m	Vs	567.89 m/s	
			$a_0 = \omega R/Vs$	0.1	
hysteretic damping	ξ	2.3 %	H/R	4.2	
shear modulus	G	645 MPa	VLa	768.2524 m/s	
Poisson's ratio	ν	0.2			
Young's modulus	E	1548.0 MPa	f_c	1.92 Hz	
			f_s	0.22 Hz	

vertical displacement (z)

shallow circular found. on elastic layer	Kz(shallow-c)	101548.8 MN m		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	0.6		
radiation dashpot	$C(\omega)$	0	$f < f_c$	true
embedded foundation	Kz(emb-c)	2.21E+05 MN/m		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	0.60		
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
dynamic stiffness	Kz	1.33E+05 MN/m	1.33E+08 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
hysteretic dashpot	Ch	2752 Gg/s		
Total dashpot	C z	2752 Gg/s	2.75E+06 Mg/s	

torsion (rz)

shallow circular found. on elastic layer	Krz(shallow-c)	48695869.4 MN m		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	0.99		
radiation dashpot	$C(\omega)$	---		
embedded circular found.	Krz(emb-c)	2.25E+08 MN m		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	0.99	ct	0.05
radiation dashpot	$C(\omega)$	1.59E+02 Gg m ² /s	c2	0.02
dynamic stiffness	Kz	2.22E+08 MN m	2.22E+11 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	1.59E+02 Gg m ² /s		
hysteretic dashpot	Ch	4.60E+06 Gg m ² /s		
Total dashpot	C rz	4.60E+06 Gg m²/s	4.60E+09 Mg m²/s	

horizontal displacement (y)
(longitudinal direction)

shallow circular found. on elastic layer	Ky(shallow-c)	77056 MN/m		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	---		
radiation dashpot	$C(\omega)_{\infty}$	10.69 Gg/s	c_y	0.9
			$f < 0.75 f_s$	false
			$f > 1.33 f_s$	true
embedded foundation	Ky(emb-c)	2.65E+05 MN/m		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	1.0		
dynamic stiffness	Ky	2.65E+05 MN/m	2.65E+08 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	10.693		
hysteretic dashpot	Ch	5506 Gg/s		
Total dashpot	C x	5.52E+03 Gg/s	5.52E+06 Mg/s	

horizontal displacement (x)
(transversal direction)

shallow circular found. on elastic layer	Kx(shallow-c)	77056		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	---		
radiation dashpot	$C(\omega)_{\infty}$	10.69 Gg/s	c_x	0.9
			$f < 0.75 f_s$	false
			$f > 1.33 f_s$	true
embedded foundation	Kx(emb-c)	2.65E+05 MN/m		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	1.0		
dynamic stiffness	Kx	2.65E+05 MN/m	2.65E+08 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	10.693		
hysteretic dashpot	Ch	5506 Gg/s		
Total dashpot	C y	5517 Gg/s	5.52E+06 Mg/s	

rotation around x (rx)

shallow circular found. on elastic layer	Ibx	521152.522 m ⁴		
dynamic coefficient	Krx(shallow-c)	30934241.3 MN m		
radiation dashpot	$k(\omega)$	0.98		
	$C(\omega)$	0	$f < f_c$	true
embedded circular found.	Krx(emb-c)	1.42E+08 MN m		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	0.98		
dynamic stiffness	K rx	1.40E+08 MN m	1.40E+11 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
hysteretic dashpot	Ch	2898233 Gg m ² /s		
Total dashpot	C rx	2898233 Gg m²/s	2.90E+09 Mg m²/s	

rotation around y (ry)

shallow circular found. on elastic layer	Iby	521152.522 m ⁴		
dynamic coefficient	Kry(shallow-c)	30934241.3		
radiation dashpot	$k(\omega)$	0.98		
	$C(\omega)$	0	$f < f_c$	true
embedded circular found.	Kry(emb-c)	1.42E+08 MN m		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	0.98		
dynamic stiffness	K ry	1.40E+08 MN m	1.40E+11 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
hysteretic dashpot	Ch	2898233 Gg m ² /s		
Total dashpot	C ry	2898233 Gg m²/s	2.90E+09 Mg m²/s	

mixed mode

circular y-rx	Ky-rx	2.87E+06 MN		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	1		
dynamic stiffness	K y-rx	2.87E+06 MN/m	2.87E+09 kN	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
hysteretic dashpot	Ch	5.97E+04		
Total dashpot	C y-rx	59653 Gg m /s	5.97E+07 Mg m /s	

mixed mode

circular x-ry	Kx-ry	2.87E+06 MN		
dynamic coefficient	$k(\omega)$	1		
dynamic stiffness	K x-ry	2.87E+06 MN/m	2.87E+09 kN	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0		
hysteretic dashpot	Ch	5.97E+04		
Total dashpot	C x-ry	59653 Gg m /s	5.97E+07 Mg m /s	

Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento
per il sistema suolo-fondazioni

Codice documento
PB0031_F0_ITA.doc

Rev
F0
Data
20/06/2011

SICILY ANCHOR BLOCK

total area	Ab	11352 m2		
equivalent rectangle				
half-width	B	44 m		
half-length	L	64.5 m	loading frequency	2.00 Hz
	χ	0.682	loading period	0.5 s
			ω	12.57 rad/s
embedment	D	43.65 m		
	d	36 m	Vs	281.07 m/s
	Aw	15624 m2	$a_0 = \omega B/Vs$	2.0
			H/R	0.0
thickness of layer	H	145 m	VLa	380.2354 m/s
	B/H	0.303		
hysteretic damping	ξ	5 %	fc	0.66 Hz
shear modulus	G	158 MPa	fs	0.48 Hz
Poisson's ratio	ν	0.2		
Young's modulus	E	379.2 MPa	Soil density	0.002 Gg/m3

vertical displacement (z)

shallow rectangular found. on elastic half-space	Kz (shallow-r)	60383.1 MN/m		
	$k(\omega)$	0.6	cz	1
	$C(\omega)_{\infty}$	9 Gg/s	f < fc	false
	$C(\omega)$	7 Gg/s	f > 1.5 fc	true
radiation dashpot				
equivalent radius	Req(z)	60.8 m		
shallow circular found. on elastic layer	Kz(shallow-c)	74250.8 MN m		
embedded circular found. dynamic coefficient	Kz (emb-c)	1.26E+05 MN/m		
	$k(\omega)$	0.80772579		
dynamic stiffness	Kz	1.02E+05 MN/m	1.02E+08 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	16 Gg/s		
hysteretic dashpot	Ch	809 Gg/s		
Total dashpot	C z	8.25E+02 Gg/s	8.25E+05 Mg/s	

torsion (rz)

polar moment of inertia	lb=lbx+lby	19356817 m4		
shallow foundation dynamic coefficient	Krz(shallow-r)	184439994 MN m		
	$k(\omega)$	0.72		
radiation dashpot	$C(\omega)$	---		
equivalent radius	Req(rz)	60.3 m		
shallow circular found. on elastic layer	Krz(shallow-c)	1.92E+08 MN m	ct	0.7
			c2	1.03
embedded circular found. dynamic coefficient	Krz(emb-c)	4.99E+08 MN m		4.99E+11 kN m
	$k(\omega)$	0.72		
dynamic stiffness	Kz	3.61E+08 MN m	3.61E+11 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	4.79E+04 Gg m ² /s		
hysteretic dashpot	Ch	2.87E+06 Gg m ² /s		
Total dashpot	C rz	2.92E+06 Gg m²/s	2.92E+09 Mg m²/s	

horizontal displacement (y)

(longitudinal direction)

shallow rectangular found. on elastic half-space	Ky(shallow-r)	43098.0796 MN/m		
	$k(\omega)$	---	cy	1
	$C(\omega)_{\infty}$	17 Gg/s	f < 0.75 fs	false
	$C(\omega)$	---	f > 1.33 fs	true
radiation dashpot				
equivalent radius	Req(y)	61.4 m		
shallow circular found. on elastic layer	Ky(shallow-c)	52219.0968 MN/m		
embedded circular found. dynamic coefficient	Ky(emb-c)	1.14E+05 MN/m		
	$k(\omega)$	0.7		
dynamic stiffness	Ky	7.98E+04 MN/m	7.98E+07 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	28 Gg/s		
hysteretic dashpot	Ch	635 Gg/s		
Total dashpot	C x	6.63E+02 Gg/s	6.63E+05 Mg/s	

horizontal displacement (x)

(transversal direction)

shallow rectangular found. on elastic half-space	Kx(shallow-r)	41920.2615		
	$k(\omega)$	---	cx	1
	$C(\omega)_{\infty}$	16 Gg/s	f < 0.75 fs	false
	$C(\omega)$	---	f > 1.33 fs	true
radiation dashpot				
equivalent radius	Req(x)	59.7 m		
shallow circular found. on elastic layer	Kx(shallow-c)	50549.5581		
embedded circular found. dynamic coefficient	Kx(emb-c)	1.12E+05 MN/m		
	$k(\omega)$	0.7		
dynamic stiffness	Kx	7.81E+04 MN/m	7.81E+07 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	28 Gg/s		
hysteretic dashpot	Ch	621 Gg/s		
Total dashpot	C x	649 Gg/s	6.49E+05 Mg/s	

rotation around x (rx)

moment of inertia	lbx	8186419 m4		
shallow foundation dynamic coefficient	Krx(shallow-r)	9.12E+07 MN m		
	$k(\omega)$	0.61	crx	0.5
	$C(\omega)_{\infty}$	---	f < fc	false
	$C(\omega)$	---		
radiation dashpot				
equivalent radius	Req(rx)	55.7 m		
shallow circular found. dynamic coefficient	Krx(shallow-c)	9.71E+07 MN m		
	$k(\omega)$	0.61		
embedded circular found. dynamic coefficient	Krx(emb-c)	2.66E+08 MN m		
	$k(\omega)$	0.61		
dynamic stiffness	K rx	1.61E+08 MN m	1.61E+11 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	2.58E+07 Gg m ² /s		
hysteretic dashpot	Ch	1.28E+06 Gg m ² /s		
Total dashpot	C rx	2.70E+07 Gg m²/s	2.70E+10 Mg m²/s	

rotation around y (ry)

moment of inertia	lby	11170398 m4		
shallow foundation dynamic coefficient	Kry(shallow-r)	1.21E+08 MN m		
	$k(\omega)$	0.61	cry	0.5
	$C(\omega)_{\infty}$	---	f < fc	false
	$C(\omega)$	---	c1	1.351913
radiation dashpot				
equivalent radius	Req(ry)	61.3 m		
shallow circular found. on elastic layer	Kry(shallow-c)	129954628 MN m		
	$k(\omega)$	0.61		
embedded circular found. dynamic coefficient	Kry(emb-c)	3.38E+08 MN m		
	$k(\omega)$	0.61		
dynamic stiffness	K ry	2.05E+08 MN m	2.05E+11 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	4.17E+07 Gg m ² /s		
hysteretic dashpot	Ch	1.63E+06 Gg m ² /s		
Total dashpot	C ry	4.33E+07 Gg m²/s	4.33E+10 Mg m²/s	

mixed mode

circular y-rx dynamic coefficient	Ky-rx	2.41E+06 MN		
	$k(\omega)$	1		
dynamic stiffness	K y-rx	2.41E+06 MN/m	2.41E+09 kN	
radiation dashpot	$C(\omega)$	5.85E+02		
hysteretic dashpot	Ch	1.92E+04		
Total dashpot	C y-rx	1.98E+04 Gg m/s	1.98E+07 Mg m/s	

mixed mode

circular x-ry dynamic coefficient	Kx-ry	2.36E+06 MN		
	$k(\omega)$	1		
dynamic stiffness	K x-ry	2.36E+06 MN/m	2.36E+09 kN	
radiation dashpot	$C(\omega)$	5.85E+02		
hysteretic dashpot	Ch	1.88E+04		
Total dashpot	C x-ry	1.94E+04 Gg m/s	1.94E+07 Mg m/s	

Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento
per il sistema suolo-fondazioni

Codice documento
PB0031_F0_ITA.doc

Rev
F0

Data
20/06/2011

CALABRIA ANCHOR BLOCK

total area	Ab	8950 m2		
equivalent rectangle				
half-width	B	44.75 m		
half-length	L	50 m	loading frequency	5.50 Hz
	χ	0.895	loading period	0.2 s
			ω	34.56 rad/s
embedment	D	37 m	Vs	779.10 m/s
	d	37 m	$a_0 = \omega B/Vs$	2.0
	Aw	14023 m2	H/R	0.0
			VLa	1053.983 m/s
thickness of layer	H	180 m		
	B/H	0.249		
hysteretic damping	ξ	1.5 %	fc	1.46 Hz
shear modulus	G	1214 MPa	fs	1.08 Hz
Poisson's ratio	ν	0.2		
Young's modulus	E	2913.6 MPa	Soil density	0.002 Gg/m3

vertical displacement (z)

shallow rectangular found. on elastic half-space	Kz (shallow-r)	383881.9 MN/m		
	$k(\omega)$	0.6	cz	1
	$C(\omega)^\infty$	19 Gg/s	f < fc	false
	$C(\omega)$	15 Gg/s	f > 1.5 fc	true
radiation dashpot				
equivalent radius	Req(z)	53.7 m		
shallow circular found. on elastic layer	Kz(shallow-c)	452123.3 MN m		
embedded circular found. dynamic coefficient	Kz (emb-c)	7.30E+05 MN/m		
	$k(\omega)$	0.78447299		
dynamic stiffness	Kz	5.72E+05 MN/m	5.72E+08 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	37 Gg/s		
hysteretic dashpot	Ch	497 Gg/s		
Total dashpot	C z	5.34E+02 Gg/s	5.34E+05 Mg/s	

torsion (rz)

polar moment of inertia	Ib=Ibx+Iby	19356817 m4		
shallow foundation dynamic coefficient	Krz(shallow-r)	1417111872 MN m		
	$k(\omega)$	0.72		
radiation dashpot	$C(\omega)$	---		
equivalent radius	Req(rz)	60.3 m		
shallow circular found. on elastic layer	Krz(shallow-c)	1.46E+09 MN m	ct	0.7
			c2	0.90
embedded circular found. dynamic coefficient	Krz(emb-c)	3.87E+09 MN m		
	$k(\omega)$	0.72		
dynamic stiffness	Kz	2.79E+09 MN m	2.79E+12 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	7.90E+04 Gg m ² /s		
hysteretic dashpot	Ch	2.42E+06 Gg m ² /s		
Total dashpot	C rz	2.50E+06 Gg m²/s	2.50E+09 Mg m²/s	

horizontal displacement (y)
(longitudinal direction)

shallow rectangular found. on elastic half-space	Ky(shallow-r)	288327.893 MN/m		
	$k(\omega)$	---	cy	1
	$C(\omega)^\infty$	40 Gg/s	f < 0.75 fs	false
	$C(\omega)$	---	f > 1.33 fs	true
radiation dashpot				
equivalent radius	Req(y)	53.4 m		
shallow circular found. on elastic layer	Ky(shallow-c)	331126.994 MN/m		
embedded circular found. dynamic coefficient	Ky(emb-c)	7.04E+05 MN/m		
	$k(\omega)$	0.7		
dynamic stiffness	Ky	4.93E+05 MN/m	4.93E+08 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	66 Gg/s		
hysteretic dashpot	Ch	428 Gg/s		
Total dashpot	C x	4.94E+02 Gg/s	4.94E+05 Mg/s	

horizontal displacement (x)
(transversal direction)

shallow rectangular found. on elastic half-space	Kx(shallow-r)	286010.256		
	$k(\omega)$	---	cx	1
	$C(\omega)^\infty$	39 Gg/s	f < 0.75 fs	false
	$C(\omega)$	---	f > 1.33 fs	true
radiation dashpot				
equivalent radius	Req(x)	53.0 m		
shallow circular found. on elastic layer	Kx(shallow-c)	328124.068		
embedded circular found. dynamic coefficient	Kx(emb-c)	7.00E+05 MN/m		
	$k(\omega)$	0.7		
dynamic stiffness	Kx	4.90E+05 MN/m	4.90E+08 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	66 Gg/s		
hysteretic dashpot	Ch	426 Gg/s		
Total dashpot	C x	491 Gg/s	4.91E+05 Mg/s	

rotation around x (rx)

moment of inertia	Ibx	8186419 m4		
shallow foundation dynamic coefficient	Krx(shallow-r)	6.80E+08 MN m		
	$k(\omega)$	0.60	crx	0.5
	$C(\omega)^\infty$	---	f < fc	false
	$C(\omega)$	---		
radiation dashpot				
equivalent radius	Req(rx)	55.2 m		
shallow circular found. dynamic coefficient	Krx(shallow-c)	7.15E+08 MN m		
	$k(\omega)$	0.60		
embedded circular found. dynamic coefficient	Krx(emb-c)	1.90E+09 MN m		
	$k(\omega)$	0.60		
dynamic stiffness	K rx	1.14E+09 MN m	1.14E+12 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	5.50E+07 Gg m ² /s		
hysteretic dashpot	Ch	9.94E+05 Gg m ² /s		
Total dashpot	C rx	5.60E+07 Gg m²/s	5.60E+10 Mg m²/s	

rotation around y (ry)

moment of inertia	Iby	11170398 m4		
shallow foundation dynamic coefficient	Kry(shallow-r)	8.94E+08 MN m		
	$k(\omega)$	0.60	cry	0.5
	$C(\omega)^\infty$	---	f < fc	false
	$C(\omega)$	---	c1	1.165765
radiation dashpot				
equivalent radius	Req(ry)	60.5 m		
shallow circular found. on elastic layer	Kry(shallow-c)	945463972 MN m		
	$k(\omega)$	0.60		
embedded circular found. dynamic coefficient	Kry(emb-c)	2.38E+09 MN m		
	$k(\omega)$	0.60		
dynamic stiffness	K ry	1.44E+09 MN m	1.44E+12 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	6.27E+07 Gg m ² /s		
hysteretic dashpot	Ch	1.25E+06 Gg m ² /s		
Total dashpot	C ry	6.39E+07 Gg m²/s	6.39E+10 Mg m²/s	

Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento
per il sistema suolo-fondazioni

Codice documento
PB0031_F0_ITA.doc

Rev
F0

Data
20/06/2011

SICILY TERMINAL STRUCTURE

total area	Ab	1260 m2			
equivalent rectangle					
half-width	B	9 m			
half-length	L	35 m	loading frequency	1.78 Hz	
	χ	0.257	loading period	0.6 s	
			ω	11.18 rad/s	
embedment	D	27.1 m			
	d	25.6 m	Vs	220 m/s	
	Aw	10624 m2	ao = $\omega B/Vs$	0.5	
			H/R	0.0	
thickness of layer	H	88.4 m	VLa	253 m/s	
	B/H	0.102			
hysteretic damping	ξ	9 %	fc	2.47 Hz	
shear modulus	G	97 MPa			
Poisson's ratio	ν	0.2			
Young's modulus	E	233.0 MPa	Soil density	0.002 Gg/m3	

vertical displacement (z)

shallow rectangular found. on elastic half-space	Kz (shallow-r)	12396.3 MN/m			
	$k(\omega)$	0.6	cz	1	
	$C(\omega)^\infty$	0 Gg/s	f < fc	true	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0 Gg/s	f > 1.5 fc	false	
equivalent radius	Req(z)	22.5 m			
shallow circular found. on elastic layer	Kz(shallow-c)	14543.6 MN m			
embedded circular found. dynamic coefficient	Kz (emb-c)	2.90E+04 MN/m			
	$k(\omega)$	0.62829446			
dynamic stiffness	Kz	1.82E+04 MN/m	1.82E+07 kN/m		
radiation dashpot	$C(\omega)$	4 Gg/s			
hysteretic dashpot	Ch	297 Gg/s			
Total dashpot	Cz	3.01E+02 Gg/s	3.01E+05 Mg/s		

torsion (rz)

polar moment of inertia	lb=lbx+lby	19356817 m4			
shallow foundation dynamic coefficient	Krz(shallow-r)	129296695 MN m			
	$k(\omega)$	0.93			
radiation dashpot	$C(\omega)$	---			
equivalent radius	Req(rz)	63.0 m			
shallow circular found. on elastic layer	Krz(shallow-c)	1.39E+08 MN m			
			ct	0.5	
			c2	0.80	
embedded circular found. dynamic coefficient	Krz(emb-c)	2.89E+08 MN m			
	$k(\omega)$	0.93			
dynamic stiffness	Kz	2.69E+08 MN/m	2.69E+11 kN m		
radiation dashpot	$C(\omega)$	1.20E+03 Gg m ² /s			
hysteretic dashpot	Ch	4.39E+06 Gg m ² /s			
Total dashpot	Crz	4.39E+06 Gg m²/s	4.39E+09 Mg m²/s		

horizontal displacement (y)
(longitudinal direction)

shallow rectangular found. on elastic half-space	Ky(shallow-r)	10528.2232 MN/m			
	$k(\omega)$	---	cy	1	
			f < 0.75 fs	false	
radiation dashpot	$C(\omega)^\infty$	3 Gg/s	f > 1.33 fs	true	
equivalent radius	Req(y)	24.4 m			
shallow circular found. on elastic layer	Ky(shallow-c)	11980.9742 MN/m			
embedded circular found. dynamic coefficient	Ky(emb-c)	3.40E+04 MN/m			
	$k(\omega)$	0.7			
dynamic stiffness	Ky	2.38E+04 MN/m	2.38E+07 kN/m		
radiation dashpot	$C(\omega)$	1819 Gg/s			
hysteretic dashpot	Ch	387 Gg/s			
Total dashpot	Cx	2.21E+03 Gg/s	2.21E+06 Mg/s		

horizontal displacement (x)
(transversal direction)

shallow rectangular found. on elastic half-space	Kx(shallow-r)	9610.18683			
	$k(\omega)$	---	cx	1	
			f < 0.75 fs	false	
radiation dashpot	$C(\omega)^\infty$	3 Gg/s	f > 1.33 fs	true	
equivalent radius	Req(x)	22.3 m			
shallow circular found. on elastic layer	Kx(shallow-c)	10820.6308			
embedded circular found. dynamic coefficient	Kx(emb-c)	3.22E+04 MN/m			
	$k(\omega)$	0.7			
dynamic stiffness	Kx	2.25E+04 MN m	2.25E+07 kN/m		
radiation dashpot	$C(\omega)$	1819 Gg/s			
hysteretic dashpot	Ch	366 Gg/s			
Total dashpot	Cx	2.185 Gg/s	2.19E+06 Mg/s		

rotation around x (rx)

moment of inertia	lbx	8186419 m4			
shallow foundation dynamic coefficient	Krx(shallow-r)	6.60E+07 MN m			
	$k(\omega)$	0.90	crx	0.25	
	$C(\omega)^\infty$	---	f < fc	true	
radiation dashpot	$C(\omega)$	---			
equivalent radius	Req(rx)	58.8 m			
shallow circular found. dynamic coefficient	Krx(shallow-c)	7.34E+07 MN m			
	$k(\omega)$	0.90			
embedded circular found. dynamic coefficient	Krx(emb-c)	1.65E+08 MN m			
	$k(\omega)$	0.90			
dynamic stiffness	Krx	1.49E+08 MN m	1.49E+11 kN m		
radiation dashpot	$C(\omega)$	0 Gg m ² /s			
hysteretic dashpot	Ch	2.42E+06 Gg m ² /s			
Total dashpot	Crx	2.42E+06 Gg m²/s	2.42E+09 Mg m²/s		

rotation around y (ry)

moment of inertia	lby	11170398 m4			
shallow foundation dynamic coefficient	Kry(shallow-r)	8.63E+07 MN m			
	$k(\omega)$	0.90	cry	0.5	
	$C(\omega)^\infty$	---	f < fc	true	
radiation dashpot	$C(\omega)$	---	c1	0.705931	
equivalent radius	Req(ry)	64.4 m			
shallow circular found. on elastic layer	Kry(shallow-c)	96927430.4 MN m			
	$k(\omega)$	0.90			
embedded circular found. dynamic coefficient	Kry(emb-c)	2.09E+08 MN m			
	$k(\omega)$	0.90			
dynamic stiffness	Kry	1.89E+08 MN m	1.89E+11 kN m		
radiation dashpot	$C(\omega)$	0 Gg m ² /s			
hysteretic dashpot	Ch	3.07E+06 Gg m ² /s			
Total dashpot	Crly	3.07E+06 Gg m²/s	3.07E+09 Mg m²/s		

mixed mode

circular y-rx dynamic coefficient	Ky-rx	2.90E+05 MN			
	$k(\omega)$	1			
dynamic stiffness	Ky-rx	2.90E+05 MN/m	2.90E+08 kN		
radiation dashpot	$C(\omega)$	1.55E+04			
hysteretic dashpot	Ch	4.72E+03			
Total dashpot	Cy-rx	2.02E+04 Gg m/s	2.02E+07 Mg m/s		

mixed mode

circular x-ry dynamic coefficient	Kx-ry	2.75E+05 MN			
	$k(\omega)$	1			
dynamic stiffness	Kx-ry	2.75E+05 MN/m	2.75E+08 kN		
radiation dashpot	$C(\omega)$	1.55E+04			
hysteretic dashpot	Ch	4.47E+03			
Total dashpot	Cx-ry	2.00E+04 Gg m/s	2.00E+07 Mg m/s		

Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento
per il sistema suolo-fondazioni

Codice documento
PB0031_F0_ITA.doc

Rev
F0

Data
20/06/2011

CALABRIA TERMINAL STRUCTURE

total area	Ab	1260 m2			
equivalent rectangle					
half-width	B	9 m			
half-length	L	35 m	loading frequency	7.69 Hz	
	χ	0.257	loading period	0.1 s	
			ω	48.32 rad/s	
embedment	D	13.75 m			
	d	9 m	Vs	595 m/s	
	Aw	3735 m2	ao = $\omega B/Vs$	1.7	
			H/R	0.0	
thickness of layer	H	130 m	VLa	296 m/s	
	B/H	0.069			
hysteretic damping	ξ	2.2 %	fc	8.23 Hz	
shear modulus	G	707 MPa			
Poisson's ratio	ν	0.2			
Young's modulus	E	1696.8 MPa	Soil density	0.002 Gg/m3	

vertical displacement (z)

shallow rectangular found. on elastic half-space	Kz (shallow-r)	86836.1 MN/m			
	$k(\omega)$	0.6	cz	1	
	$C(\omega)^\infty$	0 Gg/s	f < fc	true	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0 Gg/s	f > 1.5 fc	false	
equivalent radius	Req(z)	22.5 m			
shallow circular found. on elastic layer	Kz(shallow-c)	97467.9 MN m			
embedded circular found. dynamic coefficient	Kz (emb-c)	1.28E+05 MN/m			
	$k(\omega)$	0.81588525			
dynamic stiffness	Kz	1.05E+05 MN/m		1.05E+08 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	2 Gg/s			
hysteretic dashpot	Ch	95 Gg/s			
Total dashpot	C z	9.73E+01 Gg/s		9.73E+04 Mg/s	

torsion (rz)

polar moment of inertia	lb=lbx+lby	19356817 m4			
shallow foundation dynamic coefficient	Krz(shallow-r)	941429078 MN m			
	$k(\omega)$	0.76			
radiation dashpot	$C(\omega)$	---			
equivalent radius	Req(rz)	63.0 m			
shallow circular found. on elastic layer	Krz(shallow-c)	9.87E+08 MN m	ct	0.8	
			c2	1.21	
embedded circular found. dynamic coefficient	Krz(emb-c)	1.36E+09 MN m			
	$k(\omega)$	0.76			
dynamic stiffness	Kz	1.04E+09 MN/m		1.04E+12 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	906.38 Gg m ² /s			
hysteretic dashpot	Ch	9.45E+05 Gg m ² /s			
Total dashpot	C rz	9.46E+05 Gg m²/s		9.46E+08 Mg m²/s	

horizontal displacement (y)

(longitudinal direction)

shallow rectangular found. on elastic half-space	Ky(shallow-r)	76657.6086 MN/m			
	$k(\omega)$	---	cy	1	
	$C(\omega)^\infty$	2 Gg/s	f < 0.75 fs	false	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0 Gg/s	f > 1.33 fs	true	
equivalent radius	Req(y)	24.4 m			
shallow circular found. on elastic layer	Ky(shallow-c)	83850.4468 MN/m			
embedded circular found. dynamic coefficient	Ky(emb-c)	1.30E+05 MN/m			
	$k(\omega)$	0.7			
dynamic stiffness	Ky	9.10E+04 MN/m		9.10E+07 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	749 Gg/s			
hysteretic dashpot	Ch	83 Gg/s			
Total dashpot	C x	8.32E+02 Gg/s		8.32E+05 Mg/s	

horizontal displacement (x)

(transversal direction)

shallow rectangular found. on elastic half-space	Kx(shallow-r)	69973.245			
	$k(\omega)$	---	cx	1	
	$C(\omega)^\infty$	1 Gg/s	f < 0.75 fs	false	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0 Gg/s	f > 1.33 fs	true	
equivalent radius	Req(x)	22.3 m			
shallow circular found. on elastic layer	Kx(shallow-c)	75966.3762			
embedded circular found. dynamic coefficient	Kx(emb-c)	1.21E+05 MN/m			
	$k(\omega)$	0.7			
dynamic stiffness	Kx	8.45E+04 MN/m		8.45E+07 kN/m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	749 Gg/s			
hysteretic dashpot	Ch	77 Gg/s			
Total dashpot	C x	826 Gg/s		8.26E+05 Mg/s	

rotation around x (rx)

moment of inertia	lbx	8186419 m4			
shallow foundation dynamic coefficient	Krx(shallow-r)	4.80E+08 MN m			
	$k(\omega)$	0.66	crx	0.5	
radiation dashpot	$C(\omega)^\infty$	---	f < fc	true	
	$C(\omega)$	---			
equivalent radius	Req(rx)	58.8 m			
shallow circular found. on elastic layer	Krx(shallow-c)	5.17E+08 MN m			
	$k(\omega)$	0.66			
embedded circular found. dynamic coefficient	Krx(emb-c)	7.22E+08 MN m			
	$k(\omega)$	0.66			
dynamic stiffness	K rx	4.76E+08 MN/m		4.76E+11 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0 Gg m ² /s			
hysteretic dashpot	Ch	4.33E+05 Gg m ² /s			
Total dashpot	C rx	4.33E+05 Gg m²/s		4.33E+08 Mg m²/s	

rotation around y (ry)

moment of inertia	lby	11170398 m4			
shallow foundation dynamic coefficient	Kry(shallow-r)	6.28E+08 MN m			
	$k(\omega)$	0.66	cry	0.75	
radiation dashpot	$C(\omega)^\infty$	---	f < fc	true	
	$C(\omega)$	---	c1	1.468516	
equivalent radius	Req(ry)	64.4 m			
shallow circular found. on elastic layer	Kry(shallow-c)	680873143 MN m			
	$k(\omega)$	0.66			
embedded circular found. dynamic coefficient	Kry(emb-c)	9.31E+08 MN m			
	$k(\omega)$	0.66			
dynamic stiffness	K ry	6.14E+08 MN/m		6.14E+11 kN m	
radiation dashpot	$C(\omega)$	0 Gg m ² /s			
hysteretic dashpot	Ch	5.59E+05 Gg m ² /s			
Total dashpot	C ry	5.59E+05 Gg m²/s		5.59E+08 Mg m²/s	

mixed mode

circular y-rx dynamic coefficient	Ky-rx	3.90E+05 MN			
	$k(\omega)$	1			
dynamic stiffness	K y-rx	3.90E+05 MN/m		3.90E+08 kN	
radiation dashpot	$C(\omega)$	2.25E+03			
hysteretic dashpot	Ch	3.55E+02			
Total dashpot	C y-rx	2.60E+03 Gg m/s		2.60E+06 Mg m/s	

mixed mode

circular x-ry dynamic coefficient	Kx-ry	3.62E+05 MN			
	$k(\omega)$	1			
dynamic stiffness	K x-ry	3.62E+05 MN/m		3.62E+08 kN	
radiation dashpot	$C(\omega)$	2.25E+03			
hysteretic dashpot	Ch	3.30E+02			
Total dashpot	C x-ry	2.58E+03 Gg m/s		2.58E+06 Mg m/s	

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento per il sistema suolo-fondazioni	<i>Codice documento</i> PB0031_F0_ITA.doc		<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

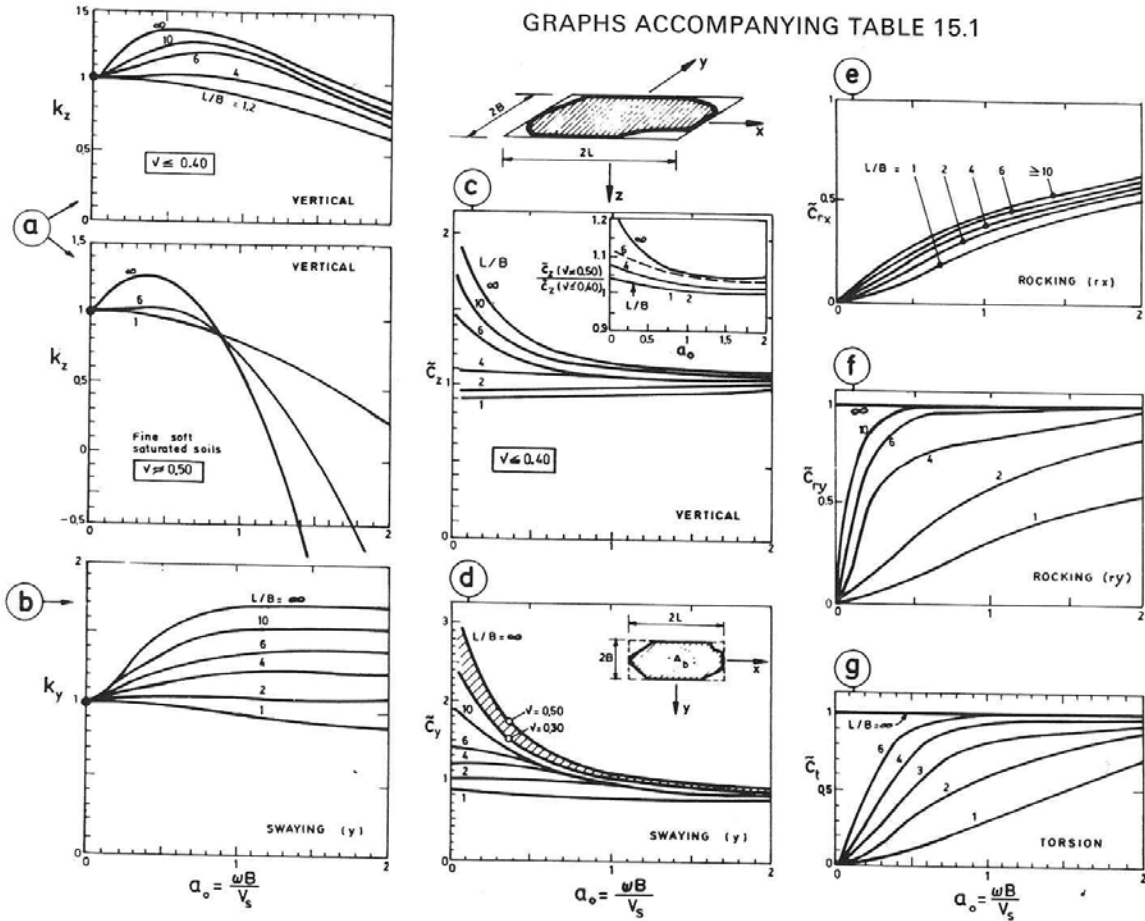
APPENDICE B

Soluzioni di impedenza (Gazetas 1991)

TABLE 15.1 DYNAMIC STIFFNESSES AND DASHPOT COEFFICIENTS FOR ARBITRARILY SHAPED FOUNDATIONS ON THE SURFACE OF A HOMOGENEOUS HALFSPACE.

Vibration Mode	Dynamic Stiffness $\bar{K} = K \cdot k(\omega)$			Radiation Dashpot Coefficient C (General Shapes)
	Static Stiffness K		Dynamic Stiffness Coefficient k (General shape; $0 \leq a_0 \leq 2$) [†]	
	General Shape (foundation-soil contact surface is of area A_f and has a circumscribed rectangle $2L$ by $2B$; $L > B$) [*]	Square $L = B$		
Vertical, z	$K_z = \frac{2GL}{1-\nu} (0.73 + 1.54\chi^{0.75})$ with $\chi = \frac{A_b}{4L^2}$	$K_z = \frac{4.54GB}{1-\nu}$	$k_z = k_x \left(\frac{L}{B}, \nu; a_0 \right)$ is plotted in Graph a	$C_z = (\rho V_s A_b) \cdot \tilde{c}_z$ $\tilde{c}_z = \tilde{c}_z(L/B, \nu; a_0)$ is plotted in Graph c
Horizontal, y (in the lateral direction)	$K_y = \frac{2GL}{2-\nu} (2 + 2.50\chi^{0.85})$	$K_y = \frac{9GB}{2-\nu}$	$k_y = k_y \left(\frac{L}{B}; a_0 \right)$ is plotted in Graph b	$C_y = (\rho V_s A_b) \cdot \tilde{c}_y$ $\tilde{c}_y = \tilde{c}_y(L/B; a_0)$ is plotted in Graph d
Horizontal, x (in the longitudinal direction)	$K_x = K_y - \frac{0.2}{0.75-\nu} GL \left(1 - \frac{B}{L} \right)$	$K_x = K_y$	$k_x \approx 1$	$C_x \approx \rho V_s A_b$
Rocking, rx (around longitudinal x axis)	$K_{rx} = \frac{G}{1-\nu} I_{bx}^{0.75} \left(\frac{L}{B} \right)^{0.25} \left(2.4 + 0.5 \frac{B}{L} \right)$ with $I_{bx} (I_{by})$ area moment of inertia of the foundation-soil contact surface around the x(y) axis	$K_{rx} = \frac{3.6GB^3}{1-\nu}$	$k_{rx} \approx 1 - 0.20a_0$	$C_{rx} = (\rho V_s I_{bx}) \cdot \tilde{c}_{rx}$ $\tilde{c}_{rx} = \tilde{c}_{rx}(L/B; a_0)$ is plotted in Graphs e and f
Rocking, ry (around lateral axis)	$K_{ry} = \frac{G}{1-\nu} I_{by}^{0.75} \left[3 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.15} \right]$	$K_{ry} = K_{rx}$	$\begin{cases} \nu < 0.45: \\ k_{ry} \approx 1 - 0.30a_0 \\ \nu \approx 0.50: \\ k_{ry} \approx 1 - 0.25a_0 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.30} \end{cases}$	$C_{ry} = (\rho V_s I_{by}) \cdot \tilde{c}_{ry}$ $\tilde{c}_{ry} = \tilde{c}_{ry}(L/B; a_0)$ is plotted in Graph g
Torsional	$K_t = G J_b^{0.75} \left[4 + 11 \left(1 - \frac{B}{L} \right)^{1.0} \right]$ with $J_b = I_{bx} + I_{by}$ being the polar moment of the soil-foundation contact surface	$K_t = 8.3GB^3$	$k_t \approx 1 - 0.14a_0$	$C_t = (\rho V_s J_b) \cdot \tilde{c}_t$ $\tilde{c}_t = \tilde{c}_t(L/B; a_0)$ Graph h

* Note that as $L/B \rightarrow \infty$ (strip footing) the theoretical values of K_x and $K_y \rightarrow 0$; the values computed from the two given formulas correspond to a footing with $L/B \approx 20$.
† $a_0 = \omega B / V_s$.



Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento
per il sistema suolo-fondazioni

Codice documento
PB0031_F0_ITA.doc

Rev
F0

Data
20/06/2011

TABLE 15.2 DYNAMIC STIFFNESSES AND DASHPOT COEFFICIENTS FOR ARBITRARILY SHAPED PARTIALLY OR FULLY EMBEDDED IN A HOMOGENEOUS HALFSPACE.

Vibration Mode	Dynamic Stiffness $\bar{K}_{emb} = K_{emb} \cdot k_{emb}(\omega)$		Radiation Dashpot Coefficient $C_{emb}(\omega)$	
	Static Stiffness K_{emb} For foundations with arbitrarily-shaped basemat A_b of circumscribed rectangle $2L$ by $2B$; total sidewall-soil contact area A_w (or constant sidewall-soil contact height d)	Dynamic Stiffness Coefficient $k_{emb}(\omega)$ $0 < a_0 \leq 2$	General Foundation Shape	Rectangular Foundation $2L$ by $2B$ by d
Vertical, z	$K_{z,emb} = K_{z,sur} \left[1 + \frac{1}{21} \frac{D}{B} (1 + 1.3\chi) \right]$ $\times \left[1 + 0.2 \left(\frac{A_w}{A_b} \right)^{2/3} \right]$ <p>$K_{z,sur}$ obtained from Table 15.1 A_w = actual sidewall-soil contact area; for constant effective contact height d along the perimeter $A_w = (d) \times (\text{Perimeter})$, $\chi = A_b/4L^2$</p>	<p>Fully embedded:</p> $k_{z,emb} \approx k_{z,sur} \left[1 - 0.09 \left(\frac{D}{B} \right)^{3/4} a_0^2 \right]$ <p>In a trench:</p> $k_{z,emb} \approx k_{z,sur} \left[1 + 0.09 \left(\frac{D}{B} \right)^{3/4} a_0^2 \right]$ <p>Partially embedded: estimate by interpolating between the two</p> <p>Fully embedded, $L/B = 1-2$ $k_{z,emb} \approx 1 - 0.09 (D/B)^{3/4} a_0^2$ Fully embedded, $L/B > 3$ $k_{z,emb} \approx 1 - 0.35 (D/B)^{1/2} a_0^{3.5}$</p>	$C_{z,emb} = C_{z,sur} + \rho V_s A_w$ <p>with $C_{z,sur}$ and \bar{c}_z according to Table 15.1</p>	$C_{z,emb} = 4\rho V_s B L \bar{c}_z + 4\rho V_s (B + L) d$
Horizontal, y or x	$K_{y,emb} = K_{y,sur} \left(1 + 0.15 \sqrt{\frac{D}{B}} \right)$ $\times \left[1 + 0.52 \left(\frac{A_w}{B L^2} \right)^{0.4} \right]$ <p>$K_{y,sur}$ obtained from Table 15.1 $K_{z,emb}$ similarly computed from $K_{z,sur}$</p>	<p>$K_{y,emb}$ and $k_{y,emb}$ can be estimated in terms of L/B, D/B and d/B for each value of a_0 from the graphs accompanying this table</p>	$C_{y,emb} = C_{y,sur} + \rho V_s A_{wye} + \rho V_s A_{wce}$ <p>$A_{wye} = \sum (A_{wy} \sin \delta_y)$ = total effective sidewall area shearing the soil $A_{wce} = \sum (A_{wy} \cos \delta_y)$ = total effective sidewall area compressing the soil δ_y = angle of inclination of surface A_{wy} from loading direction $C_{y,sur}$ obtained from Table 15.1 $C_{z,emb}$ similarly computed from $C_{z,sur}$</p>	$C_{y,emb} = 4\rho V_s B L \bar{c}_y + 4\rho V_s B d + 4\rho V_s L d$ <p>\bar{c}_y according to Table 15.1</p>

Matrici equivalenti di rigidezza e smorzamento
per il sistema suolo-fondazioni

Codice documento
PB0031_F0_ITA.doc

Rev
F0

Data
20/06/2011

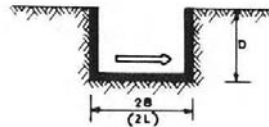
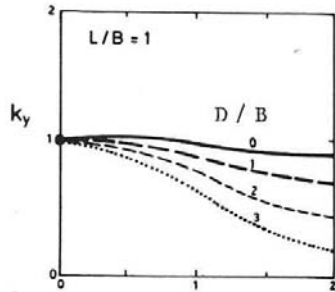
<p>Rocking, r_x (around the longitudinal axis)</p>	<p>Expressions valid for any basemat shape but constant effective contact height d along the perimeter</p> $K_{rx,emb} = K_{rx,sur} \cdot \left\{ 1 + 1.26 \frac{d}{B} \left[1 + \frac{d}{B} \left(\frac{d}{B} \right)^{-0.2} \frac{B}{\sqrt{L}} \right] \right\}$ $K_{ry,emb} = K_{ry,sur} \cdot \left\{ 1 + 0.92 \left(\frac{d}{L} \right)^{0.6} \left[1.5 + \left(\frac{d}{L} \right)^{1.9} \times \left(\frac{d}{B} \right)^{-0.6} \right] \right\}$	$C_{rx,emb} = C_{rx,sur} + \rho V_{Ls} J_{wz} \tilde{c}_1$ $+ \rho V_x \left(J_{wz} + \sum_y [A_{wz} \Delta^2] \right) \tilde{c}_1$ $\tilde{c}_1 = 0.25 + 0.65 \sqrt{\frac{d}{B_0}} \left(\frac{d}{B} \right)^{-0.2}$ $\times \left(\frac{d}{B} \right)^{-1/4}$ <p>J_{wz} = total moment of inertia about their base axes parallel to x of all sidewall surfaces effectively compressing the soil</p> <p>Δ_1 = distance of surface A_{wz} from the x axis</p> <p>J_{wz} = polar moment of inertia about their base axes parallel to x of all sidewall surfaces effectively shearing the soil</p> <p>$C_{rx,emb}$ is similarly evaluated from $C_{rx,sur}$ with y replacing x and, in the equation for c_1, L replacing B</p>	$C_{rx,emb} = \frac{2}{3} \rho V_{Ls} B^2 L \tilde{c}_1$ $+ \frac{2}{3} \rho V_x d^3 L \tilde{c}_1$ $+ \frac{2}{3} \rho V_x B d (B^2 + d^2) \tilde{c}_1$ $+ 4 \rho V_x B^2 d L \tilde{c}_1$ <p>with \tilde{c}_1 as in the preceding column and \tilde{c}_1 according to Table 15.1</p>
<p>Rocking, r_y (around the lateral axis)</p>	<p>$K_{rx,emb} \approx K_{rx,sur}$</p> <p>$K_{ry,emb} \approx K_{ry,sur}$</p>	<p>as in the previous column</p>	<p>as in the previous column</p>
<p>Coupling term Swaying-rocking (x, ry) Swaying-rocking (y, rx)</p>	<p>$K_{xy,emb} \approx \frac{2}{3} d K_{x,emb}$</p> <p>$K_{yx,emb} \approx \frac{2}{3} d K_{y,emb}$</p>	<p>$K_{xy,emb} \approx \frac{2}{3} d C_{x,emb}$</p> <p>$C_{yx,emb} \approx \frac{2}{3} d C_{y,emb}$</p>	<p>as in the previous column</p>
<p>Torsional</p>	<p>$K_{z,emb} = K_{z,sur} \times \left[1 + 1.4 \left(1 + \frac{B}{L} \right) \left(\frac{d}{B} \right)^{0.9} \right]$</p>	<p>$C_{z,emb} = C_{z,sur} + \rho V_{Ls} J_{wz} \tilde{c}_2$</p> $+ \rho V_x \sum_y [A_{wz} \Delta^2] \tilde{c}_2$ $\tilde{c}_2 \approx \left(\frac{d}{B} \right)^{-0.5} \frac{d^2}{d_0^2 + \frac{1}{3} (L/B) - 1.5}$ <p>J_{wz} = total moment of inertia of all sidewall surfaces effectively compressing the soil about the projection of the z axis onto their plane</p> <p>Δ_{zj} = distance of surface A_{wz} from the z axis</p>	<p>$C_{z,emb} = \frac{2}{3} \rho V_x B L (B^2 + L^2) \tilde{c}_2$</p> $+ \frac{2}{3} \rho V_x d (L^3 + B^3) \tilde{c}_2$ $+ 4 \rho V_x d B L (B + L) \tilde{c}_2$ <p>with \tilde{c}_2 as in the preceding column and \tilde{c}_2 according to Table 15.1</p>

NOTE: $V_{Ls} = \frac{3.4}{\pi(1-\nu)}$ V_s is the apparent propagation velocity of compression-extension waves.

Matrici equivalenti di rigidità e smorzamento
per il sistema suolo-fondazioni

Codice documento
PB0031_F0_ITA.doc

Rev F0
Data 20/06/2011



GRAPHS ACCOMPANYING
TABLE 15.2

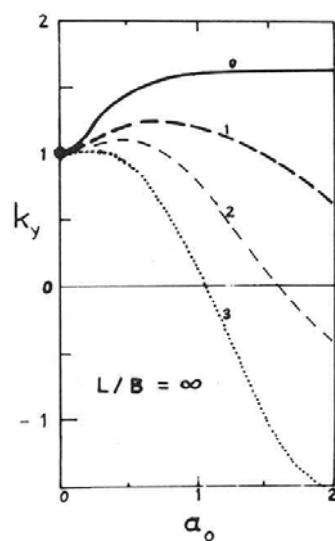
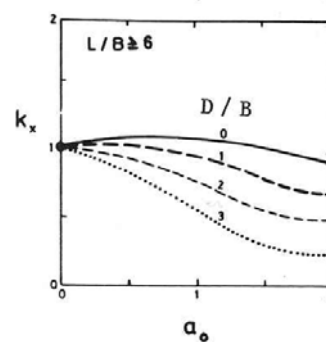
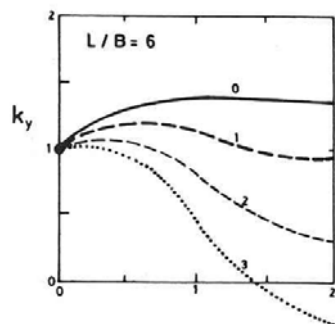
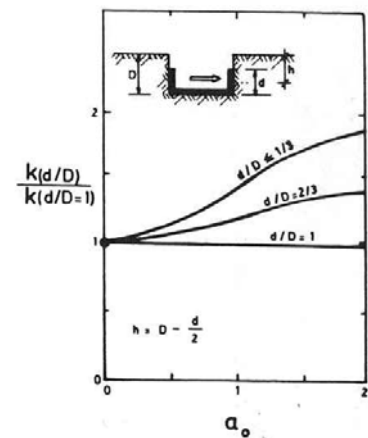
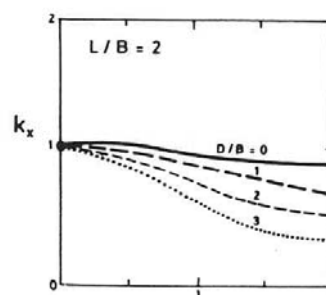
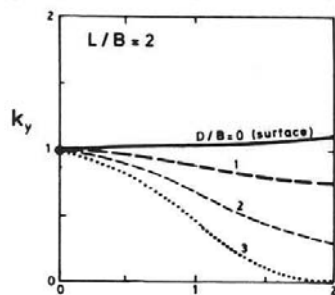


TABLE 15.3 DYNAMIC STIFFNESSES AND DASHPOT COEFFICIENTS FOR SURFACE FOUNDATIONS ON HOMOGENEOUS STRATUM OVER BEDROCK (sources are listed in the text).

Foundation Shape	Circular Foundation of Radius $B = R$	Rectangular Foundation $2B$ by $2L$ ($L > B$)	Strip Foundation $2L \rightarrow \infty$
Static stiffnesses, K	Vertical, z	$K_z = \frac{2GL}{1-\nu} \left[0.73 + 1.54 \left(\frac{B}{L} \right)^{3/4} \right] \left(1 + \frac{\frac{B}{H}}{0.5 + \frac{B}{L}} \right)$	$\frac{K_z}{2L} \approx \frac{0.73G}{1-\nu} \left(1 + 3.5 \frac{B}{H} \right)$
	Lateral, y	$K_y = \frac{4GR}{1-\nu} \left(1 + 1.3 \frac{R}{H} \right)$	$\frac{K_y}{2L} \approx \frac{2G}{2-\nu} \left(1 + 2 \frac{B}{H} \right)$
	Lateral, x	$K_x = \frac{8GR}{2-\nu} \left(1 + 0.5 \frac{R}{H} \right)$	$\frac{K_x}{2L} \approx \frac{\pi GB^2}{2(1-\nu)} \left(1 + 0.2 \frac{B}{H} \right)$
	Rocking, rx	$K_{rx} = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \left(1 + 0.17 \frac{R}{H} \right)$	—
	Rocking, ry	$K_{ry} = K_{rx}$	—
Torsional, t	$K_t = \frac{16}{3} GR^3 \left(1 + 0.10 \frac{R}{H} \right)$	—	—
Dynamic stiffness coefficients, $k(\omega)$	Vertical, z	$k_z = k_z(H/B, L/B, a_0)$ is plotted in Graph III-2 for rectangles and strip	
	Horizontal, y or x	$k_y = k_y(H/R, a_0)$ is obtained from Graph III-1	
	Rocking, rx or ry Torsional	$k_{rx}(H/R) \approx k_{rx}(\infty)$ $\alpha = rx, ry, t$	
Radiation dashpot coefficients, $C(\omega)$	Vertical, z	$C_z(H/B) \approx 0$ at frequencies $f < f_c$, regardless of foundation shape $C_z(H/B) \approx 0.8C_z(\infty)$ at $f \geq 1.5f_c$ At intermediate frequencies: interpolate linearly. $f_c = \frac{V_{Lp}}{4H}$, $V_{Lp} = \frac{3.4V_s}{\pi(1-\nu)}$	
	Lateral, y or x	$C_y(H/B) \approx 0$ at $f < \frac{2}{3}f_c$; $C_y(H/B) \approx C_y(\infty)$ at $f > \frac{4}{3}f_c$ At intermediate frequencies: interpolate linearly. $f_c = V_s/4H$. Similarly for C_x	
	Rocking, rx or ry Torsional, t	$C_{rx}(H/B) \approx 0$ at $f < f_c$; $C_{rx}(H/B) \approx C_{rx}(\infty)$ at $f > f_c$. Similarly for C_{ry} $C_t(H/B) \approx C_t(\infty)$	

* Not available.

GRAPHS ACCOMPANYING TABLE 15.3

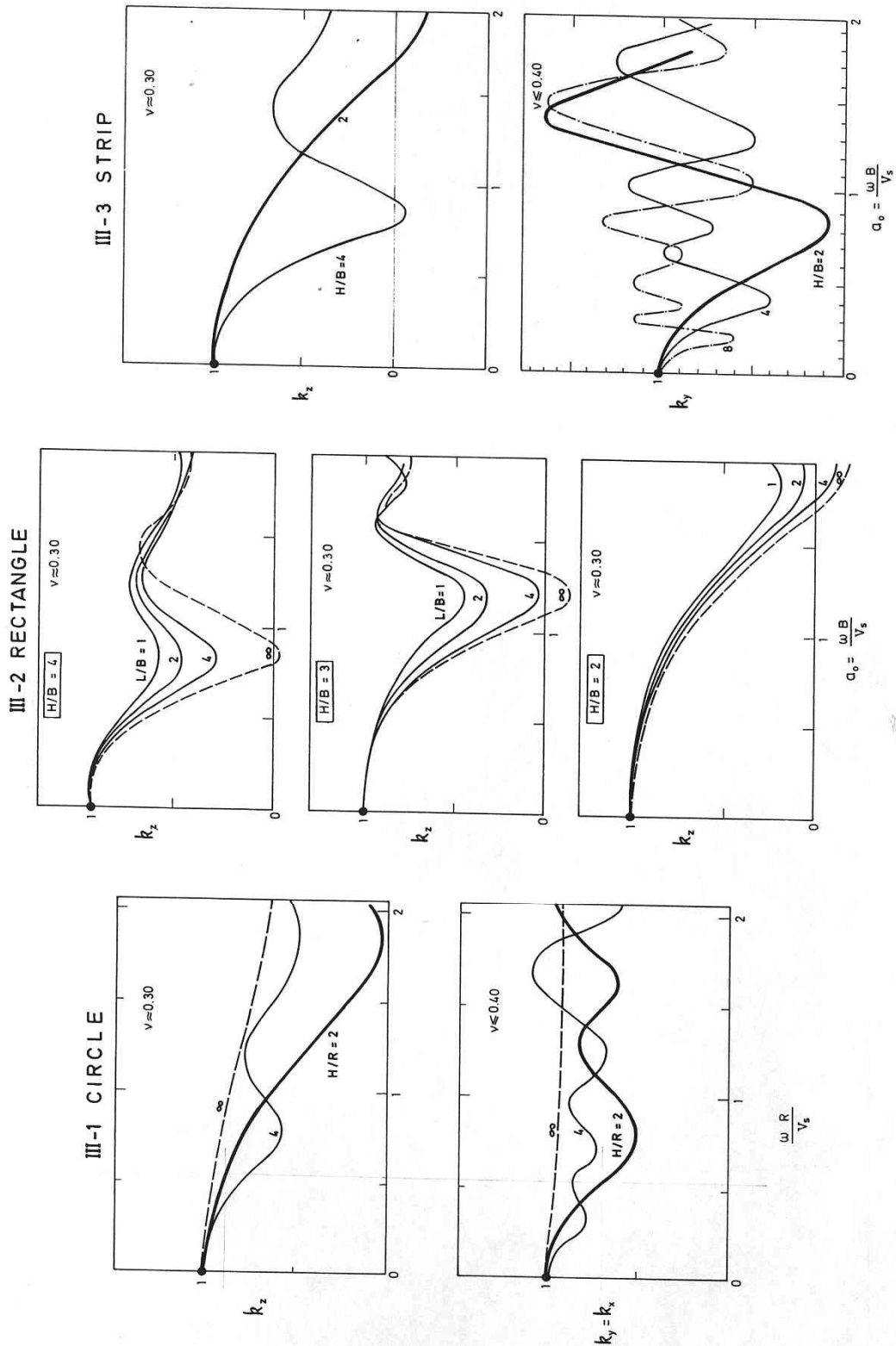


TABLE 15.4 DYNAMIC STIFFNESSES AND DASHPOT COEFFICIENTS FOR FOUNDATIONS EMBEDDED IN HOMOGENEOUS STRATUM OVER BEDROCK.*

Foundation Shape		Circular Foundation of Radius R	Strip Foundation
Static stiffnesses, K	Vertical	$K_{z,emb} \approx K_{z,sur} \left(1 + 0.55 \frac{d}{R} \right) \left[1 + \left(0.85 - 0.28 \frac{D}{R} \right) \frac{D}{H-D} \right]^{\dagger}$	$K_{z,emb} \approx K_{z,sur} \left[1 + 0.2 \left(\frac{d}{B} \right)^{2/3} \right] \left(1 + 3.5 \frac{B}{H-D} \right)$
	Horizontal, y or x	$K_{y,emb} \approx K_{y,sur} \left(1 + \frac{d}{R} \right) \left(1 + 1.25 \frac{D}{H} \right)^{\dagger}$	$K_{y,emb} \approx K_{y,sur} \left(1 + 0.5 \frac{d}{B} \right) \left(1 + 1.5 \frac{D}{H} \right)$
	Rocking, rx or ry	$K_{rx,emb} \approx K_{rx,sur} \left(1 + 2 \frac{d}{R} \right) \left(1 + 0.65 \frac{D}{H} \right)$	$K_{rx,emb} \approx K_{rx,sur} \left(1 + \frac{d}{B} \right) \left(1 + 0.65 \frac{D}{H} \right)$
	Coupled swaying-rocking	$K_{yrx,emb} \approx \frac{1}{3} d K_{y,emb}$	$K_{yrx,emb} \approx \frac{1}{3} d K_{y,emb}$
	Torsional	$K_{t,emb} \approx K_{t,sur} \left(1 + 2.67 \frac{d}{R} \right)$	—
Dynamic stiffness coefficients,	The relationships between K_{emb} and K_{sur} follow approximately the same pattern as those between embedded and surface foundation on a homogeneous halfspace. Therefore, use the results of Table 15.2 as a first approximation.		
Radiation dashpot coefficients,	C_{emb} exceeds C_{sur} by an amount that depends on the geometry of the sidewall-soil contact surface and is practically independent of the presence or absence of a rigid base at shallow depths. Therefore, use the results of Table 15.2, but with C_{sur} corresponding to the layered profile and thus obtained according to Table 15.3 (approximate guideline).		

* Sources are listed in the text.

† $K_{z,sur}, K_{y,sur}, \dots$ are the stiffnesses for the corresponding surface foundations, and can be obtained from Table 15.3.

