

# 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<br/> <br/>                 Ing. E.M. Veje<br/>                 Dott. Ing. E. Pagani<br/>                 Ordine Ingegneri Milano<br/>                 n° 15408<br/> </p> | <p>IL CONTRAENTE GENERALE<br/>                 Project Manager<br/>                 (Ing. P.P. Marcheselli)</p> | <p>STRETTO DI MESSINA<br/>                 Direttore Generale e<br/>                 RUP Validazione<br/>                 (Ing. G. Fiammenghi)</p> | <p>STRETTO DI MESSINA<br/>                 Amministratore Delegato<br/>                 (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>STUDI DI BASE</p> <p>ANALISI GLOBALI</p> <p>Generale</p> <p>Matrici equivalenti di rigidità per il sistema suolo-fondazioni</p> | <p><b>PB0030_F0</b></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 1 F0 |
|--------|--|

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



|   |   |   |                           |  |
|---|---|---|---------------------------|--|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                           |  |
| Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema<br>suolo-fondazioni               | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                                      | <i>Rev</i><br>F0  | <i>Data</i><br>20/06/2011 |  |

## SOMMARIO

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | Relazione di sintesi.....                     | 5  |
| 2 | Premessa.....                                 | 6  |
| 3 | Valutazione dei coefficienti di rigidità..... | 6  |
| 4 | Matrici di rigidità e di conformità .....     | 10 |
|   | Riferimenti.....                              | 10 |
|   | APPENDICE A.....                              | 21 |
|   | APPENDICE B.....                              | 29 |



|   |   |   |                           |  |
|---|---|---|---------------------------|--|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                           |  |
| <b>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema suolo-fondazioni</b>           | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                                      | <i>Rev</i><br>F0  | <i>Data</i><br>20/06/2011 |  |

## 1 Relazione di sintesi

Per fornire una modellazione accurata della risposta strutturale del ponte è necessario prendere in considerazione la deformabilità del sistema suolo-fondazione. Nello specifico si esprime la deformabilità a ogni punto di contatto del modello strutturale con il suolo tramite una matrice di rigidezza che mette in relazione lo spostamento generalizzato del punto di contatto alla forza generalizzata corrispondente.

I punti di contatto considerati nel presente studio sono le fondazioni delle torri (due punti per ciascuna torre), i blocchi di ancoraggio e le fondazioni delle strutture terminali.

I coefficienti di rigidezza sono valutati utilizzando soluzioni sviluppate per fondazioni rigide parzialmente o totalmente incassate in un continuo elastico di profondità limitata.

In una prima fase, le proprietà meccaniche del continuo elastico sono stimate accoppiando gli spostamenti forniti dalle soluzioni elastiche con quelli ottenuti dal calcolo non lineare agli elementi finiti, per un numero limitato di gradi di libertà di ciascun punto di contatto. Successivamente le stesse proprietà elastiche sono utilizzate per valutare i coefficienti di rigidezza relativi ai restanti gradi di libertà.

La matrice di rigidezza ad ogni punto di contatto non è diagonale poiché l'incasso della fondazione è causa di un certo accoppiamento fra diversi gradi di libertà.

|   |   |   |                                  |  |
|---|---|---|----------------------------------|--|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                                  |  |
| <b>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema suolo-fondazioni</b>           | <i>Codice documento</i><br><i>PB0030_F0_ITA.doc</i>                               | <i>Rev</i><br><i>F0</i>   | <i>Data</i><br><i>20/06/2011</i> |  |

## 2 Premessa

Il presente rapporto illustra la valutazione dei coefficienti di rigidità elastica che rappresentano il comportamento generale del sistema suolo-fondazioni per i punti di contatto del ponte con la superficie del terreno.

Ad ogni punto di contatto è associato uno specifico coefficiente di matrice, che contiene i coefficienti di rigidità che collegano le forze e i momenti agli spostamenti e alle rotazioni corrispondenti

I punti di contatto presi in considerazione dal presente studio sono le fondazioni delle torri (due punti per ciascuna torre), i bulloni di fondazione, e le fondazioni dei viadotti terminali.

I coefficienti di rigidità sono stati valutati mediante soluzioni sviluppate per le fondazioni rigide incassate in uno strato elastico di profondità limitata. Le proprietà elastiche dello strato elastico sono state calibrate, ove possibile, mettendo in corrispondenza gli spostamenti forniti dalle soluzioni elastiche con quelli ottenuti nelle analisi statiche a tre dimensioni non lineari ad elementi finiti.

Tali coefficienti di rigidità, calibrati sui risultati delle analisi numeriche statiche, rappresentano strettamente il comportamento della fondazione sottoposta a carico statico. Per quanto riguarda i carichi sismici, questi debbono essere visti come un vincolo inferiore della rigidità della fondazione reale messa in movimento durante un terremoto. Ciò viene ulteriormente discusso nel rapporto CG1003-P-CL-D-P-CG-S4-00-00-00-02\_A “matrici di smorzamento e rigidità equivalente per il sistema suolo-fondazioni”, in cui sono valutati anche i coefficienti di smorzamento che corrispondono a questi coefficienti di rigidità del vincolo inferiore.

## 3 Valutazione dei coefficienti di rigidità

Gazetas (1991) fornisce espressioni per le impedenze dinamiche di una fondazione integrata in uno strato elastico. La rigidità statica può essere valutata utilizzando queste soluzioni, impostando i fattori di amplificazione dinamica su uno e i coefficienti di smorzamento su zero.

|   |   |   |                                  |  |
|---|---|---|----------------------------------|--|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                                  |  |
| <b>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema suolo-fondazioni</b>           | <i>Codice documento</i><br><i>PB0030_F0_ITA.doc</i>                               | <i>Rev</i><br><i>F0</i>   | <i>Data</i><br><i>20/06/2011</i> |  |

Le soluzioni per una fondazione integrata in uno strato elastico sono date solamente per forme circolari e per fondazioni a nastro. Le fondazioni della torre hanno forma circolare; per i restanti elementi della fondazione, che hanno forme diverse, per il calcolo dei coefficienti di rigidità elastica sono stati seguiti i seguenti passi:

- a. Approssimazione della fondazione reale con un rettangolo circoscritto;
- b. Valutazione del coefficiente di rigidità  $k_{(shallow-r)}$  per la fondazione rettangolare equivalente che appoggia sulla superficie di un semispazio elastico;
- c. Valutazione del raggio  $R_{eq}$  di una fondazione circolare equivalente posata su un semispazio elastico;
- d. Calcolo del coefficiente di rigidità  $k_{(shallow-c)}$  della fondazione circolare equivalente che appoggia sulla superficie di uno strato elastico;
- e. Modifica del coefficiente di rigidità di cui sopra per tener conto dell'integrazione della fondazione, in modo da valutare il coefficiente di rigidità finale  $k_{(emb-c)}$ ;
- f. Per confronto, modifica del coefficiente di rigidità valutato in (a) per prendere in considerazione l'annegamento e valutare il coefficiente di rigidità  $k_{(emb-r)}$  per una fondazione rettangolare incassata in un semispazio elastico.

I calcoli sopra descritti debbono essere eseguiti per ognuno dei sei gradi di libertà di una fondazione rigida. Da notare che il valore del raggio equivalente valutato in (c) dipende dal grado di libertà preso in considerazione al momento.

Le espressioni analitiche usate per i sei gradi di libertà sono riportate all'Appendice A. Esse usano uno schema di riferimento (x, y, z) in cui l'asse z è verticale ed orientato verso il basso; l'asse y è orizzontale, parallelo alla direzione longitudinale del ponte ed orientato verso sud (dalla Sicilia alla Calabria); l'asse x è orizzontale ed orientato verso est. Le rotazioni ed i momenti sono denotati dall'asse di rotazione; notare che le rotazioni in senso orario ed i momenti attorno all'asse x ( $r_x$ ) sono positivi (vedi figura 1).

Le matrici di rigidità sono state valutate inizialmente sul fondo della fondazione equivalente, lungo la linea mediana della stessa (punti contrassegnati da A), e sono state successivamente trasformate per fornire le relazioni forza-spostamento per i punti

|   |   |   |                                  |  |
|---|---|---|----------------------------------|--|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                                  |  |
| <b>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema suolo-fondazioni</b>           | <i>Codice documento</i><br><i>PB0030_F0_ITA.doc</i>                               | <i>Rev</i><br><i>F0</i>   | <i>Data</i><br><i>20/06/2011</i> |  |

di riferimento (contrassegnati da G) individuati dall'analista delle strutture (Consulenti Cowi ).

La figura 2 mostra un layout di una fondazione incassata rettangolare, con i simboli utilizzati per denotarne la geometria. Le figure 3 e 4 indicano le fondazioni ideali per le torri Sicilia e Calabria. Le fondazioni equivalenti includono le solette di fondazione circolari e il volume del suolo trattato con iniezioni di cemento al di sotto delle solette, mentre non considera il suolo laterale trattato con iniezioni di cemento più rade. Alle figure 3 e 4, i circoletti aperti indicano i punti (A) sui quali è stata valutata originariamente la matrice di rigidità, mentre i circoletti pieni indicano i punti (G) vale a dire, la posizione degli elementi elastici che rappresentano la rigidità suolo-fondazioni. Tali punti di riferimento corrispondono all'intersezione degli assi della torre con il fondo delle solette di fondazione circolari.

Le figure 5 e 6 mostrano gli schemi utilizzati per i blocchi di ancoraggio. Questi sono stati considerati come fondazioni rettangolari incassate in uno strato elastico. Per i blocchi di ancoraggio, il punto di riferimento (G) è il baricentro

Le figure 7 e 8 mostrano le fondazioni idealizzate dei viadotti terminali sulle rive siciliana e calabrese. Ogni viadotto ha due fondazioni indipendenti alle quali sono state attribuite due matrici di rigidità identiche. La matrice di rigidità di ognuna di queste fondazioni ha una struttura simile a quella delle fondazioni delle torri.

Per tutti gli elementi di fondazione, l'accoppiamento si verifica fra le rotazioni  $r_x$ ,  $r_y$  e le forze orizzontali lungo  $x$  e  $y$  (e, in modo equivalente, fra gli spostamenti lungo  $x$  ed  $y$  ed i momenti  $r_y$  e  $r_x$ ). Tali termini di rigidità accoppiati sono indicati come  $k_{y-rx}$  e  $k_{x-ry}$ .

La taratura dei coefficienti di rigidità è stata eseguita utilizzando come riferimento il risultato dei calcoli preliminari ad elementi finiti del comportamento statico delle fondazioni della torre e dei blocchi di ancoraggio.

Per le fondazioni della torre, sono state eseguite analisi complete tridimensionali ad elementi finiti, nelle quali la fondazione era disposta verticalmente e sul piano longitudinale. In tali analisi numeriche, il comportamento meccanico del suolo è stato modellizzato mediante un modello costitutivo elastico-plastico con doppio irrigidimento

|   |   |   |                                  |  |
|---|---|---|----------------------------------|--|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                                  |  |
| <b>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema suolo-fondazioni</b>           | <i>Codice documento</i><br><i>PB0030_F0_ITA.doc</i>                               | <i>Rev</i><br><i>F0</i>   | <i>Data</i><br><i>20/06/2011</i> |  |

isotropico ed un criterio di rottura di Mohr-Coulomb. I carichi sono stati applicati per gradi, per acquisire il comportamento non lineare del sistema suolo-fondazioni.

Le espressioni fornite all'appendice A, basate sulla teoria dell'elasticità, sono state utilizzate per calcolare la matrice di rigidità che riproduceva le relazioni fra gli spostamenti/le rotazioni  $y$ ,  $z$ ,  $rx$  e le forze/i momenti calcolati con il metodo degli elementi finiti. Tale ottimizzazione è stata eseguita variando il modulo di deformazione  $G$  (il coefficiente di Poisson è stato impostato su 0.2.) e i termini accoppiati di rigidità  $k_{y-rx}$  e  $k_{x-ry}$  fino ad ottenere un buon accordo fra il set di forze calcolate e quello ad elementi finiti oppure, in modo equivalente, fra gli spostamenti ad elementi finiti e gli spostamenti calcolati mediante l'inversione della matrice di rigidità. Per le fondazioni della torre, l'attenzione si è incentrata primariamente sull'accoppiamento delle forze e degli spostamenti in direzione  $z$ .

A calibrazione ultimata, lo stesso modulo di deformazione è stato utilizzato per calcolare i coefficienti di rigidità per i restanti gradi di libertà, e per le matrici di rigidità delle fondazioni dei viadotti terminali, che hanno suoli di fondazione simili.

I dettagli di questi calcoli sono riportati all'Appendice B. L'ispezione dei dettagli del calcolo per la torre Calabria rivela che, dopo aver scelto il modulo di deformazione per la corrispondenza con gli spostamenti verticali, gli accordi fra il FEM e i calcoli elastici per gli spostamenti orizzontali e per la rotazione non è confacente. Ciò è dovuto al contatto in pendenza fra il Conglomerato di Pezzo e i depositi superiori, che rende un modello basato su un continuum elastico difficilmente rappresentativo del comportamento reale della fondazione.

Per i blocchi di ancoraggio, le analisi ad elementi finiti sono state eseguite in condizioni di deformazione piane, utilizzando lo stesso modello non lineare del suolo utilizzato per le fondazioni della torre. In questo caso, è stata necessaria un'equivalenza per la conversione degli spostamenti calcolati di deformazione piana in spostamenti più realistici in 3D. Questa procedura, riportata in A-7, consiste essenzialmente nell'utilizzare la teoria dell'elasticità per trovare la relazione fra gli spostamenti orizzontali di un nastro incassato e quelli di una fondazione circolare incassata.

Quindi, è stata impiegata una procedura simile a quella illustrata per la fondazione della torre, nella quale è stata effettuata l'ottimizzazione variando  $G$  e il sistema dei termini

|   |   |   |                           |  |
|---|---|---|---------------------------|--|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                           |  |
| <b>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema suolo-fondazioni</b>           | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                                      | <i>Rev</i><br>F0  | <i>Data</i><br>20/06/2011 |  |

accoppiati di rigidità  $k_{y-rx}$ ,  $k_{x-ry}$  per accoppiare il set di forze/spostamento calcolato con il FEM. Per i blocchi di ancoraggio, è stata data la priorità alla corrispondenza di forze/spostamenti in direzione  $y$ .

## 4 Matrici di rigidità e di conformità

La tabella 1 riporta le matrici di rigidità per i punti di riferimento forniti dall'analista delle strutture per le fondazioni delle torri, i blocchi di ancoraggio e le fondazioni dei viadotti terminali. Le unità di misura sono kN e M. La Tabella 2 riporta le corrispondenti matrici di conformità, ottenute dall'inversione delle matrici di rigidità.

### Riferimenti

Gazetas G. (1991). Foundation vibrations. (vibrazioni delle fondazioni) In: *Foundation Engineering Handbook, 2<sup>nd</sup> edition (manuale dell'ingegneria delle fondazioni, 2<sup>a</sup> edizione)*, H.-Y. Fang, ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 553-593.

**Table 1. Stiffness matrices**

**Sicily Tower**

|    | x        | y        | z       | rx       | ry       | rz      |
|----|----------|----------|---------|----------|----------|---------|
| x  | 3.2E+07  | 0        | 0       | 0        | -3.5E+08 | 0       |
| y  | 0        | 3.2E+07  | 0       | -3.5E+08 | 0        | 0       |
| z  | 0        | 0        | 2.9E+07 | 0        | 0        | 0       |
| rx | 0        | -3.5E+08 | 0       | 2.0E+10  | 0        | 0       |
| ry | -3.5E+08 | 0        | 0       | 0        | 2.0E+10  | 0       |
| rz | 0        | 0        | 0       | 0        | 0        | 3.1E+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  | 1.2E+08  | 0        | 0       | 0        | -4.8E+08 | 0       |
| y  | 0        | 1.2E+08  | 0       | -4.8E+08 | 0        | 0       |
| z  | 0        | 0        | 1.0E+08 | 0        | 0        | 0       |
| rx | 0        | -4.8E+08 | 0       | 5.4E+10  | 0        | 0       |
| ry | -4.8E+08 | 0        | 0       | 0        | 5.4E+10  | 0       |
| rz | 0        | 0        | 0       | 0        | 0        | 1.0E+11 |

|      |    |
|------|----|
| x ry | kN |
| y rx | kN |

**Sicily Anchor**

|    | x       | y       | z       | rx      | ry      | rz      |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| x  | 8.3E+07 | 0       | 0       | 0       | 1.8E+08 | 0       |
| y  | 0       | 8.5E+07 | 0       | 1.8E+08 | 0       | 0       |
| z  | 0       | 0       | 9.3E+07 | 0       | 0       | 0       |
| rx | 0       | 1.8E+08 | 0       | 1.6E+11 | 0       | 0       |
| ry | 1.8E+08 | 0       | 0       | 0       | 2.2E+11 | 0       |
| rz | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 3.8E+11 |

**Calabria Anchor**

|    | x        | y        | z       | rx       | ry       | rz      |
|----|----------|----------|---------|----------|----------|---------|
| x  | 3.7E+08  | 0        | 0       | 0        | -9.8E+08 | 0       |
| y  | 0        | 3.8E+08  | 0       | -9.9E+08 | 0        | 0       |
| z  | 0        | 0        | 3.9E+08 | 0        | 0        | 0       |
| rx | 0        | -9.9E+08 | 0       | 8.4E+11  | 0        | 0       |
| ry | -9.8E+08 | 0        | 0       | 0        | 1.1E+12  | 0       |
| rz | 0        | 0        | 0       | 0        | 0        | 2.1E+12 |

**Sicily terminal structure**

|    | x        | y        | z       | rx       | ry       | rz      |
|----|----------|----------|---------|----------|----------|---------|
| x  | 2.1E+07  | 0        | 0       | 0        | -1.5E+08 | 0       |
| y  | 0        | 2.2E+07  | 0       | -1.5E+08 | 0        | 0       |
| z  | 0        | 0        | 1.9E+07 | 0        | 0        | 0       |
| rx | 0        | -1.5E+08 | 0       | 9.8E+10  | 0        | 0       |
| ry | -1.5E+08 | 0        | 0       | 0        | 1.3E+11  | 0       |
| rz | 0        | 0        | 0       | 0        | 0        | 1.7E+11 |

**Calabria terminal structure**

|    | x       | y       | z       | rx      | ry      | rz      |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| x  | 5.3E+07 | 0       | 0       | 0       | 1.6E+08 | 0       |
| y  | 0       | 5.6E+07 | 0       | 1.7E+08 | 0       | 0       |
| z  | 0       | 0       | 5.6E+07 | 0       | 0       | 0       |
| rx | 0       | 1.7E+08 | 0       | 3.0E+11 | 0       | 0       |
| ry | 1.6E+08 | 0       | 0       | 0       | 3.9E+11 | 0       |
| rz | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 5.6E+11 |

**Table 2. Compliance matrices**

**Sicily Tower**

|    | x       | y       | z       | rx      | ry      | rz      |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| x  | 3.9E-08 | 0       | 0       | 0       | 6.7E-10 | 0       |
| y  | 0       | 3.9E-08 | 0       | 6.7E-10 | 0       | 0       |
| z  | 0       | 0       | 3.5E-08 | 0       | 0       | 0       |
| rx | 0       | 6.7E-10 | 0       | 6.1E-11 | 0       | 0       |
| ry | 6.7E-10 | 0       | 0       | 0       | 6.1E-11 | 0       |
| rz | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 3.2E-11 |

Units

x x m/kN

y y m/kN

z z m/kN

rx rx 1/(kN m)

ry ry 1/(kN m)

rz rz 1/(kN m)

**Calabria Tower**

|    | x       | y       | z       | rx      | ry      | rz      |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| x  | 8.4E-09 | 0       | 0       | 0       | 7.5E-11 | 0       |
| y  | 0       | 8.4E-09 | 0       | 7.5E-11 | 0       | 0       |
| z  | 0       | 0       | 9.7E-09 | 0       | 0       | 0       |
| rx | 0       | 7.5E-11 | 0       | 1.9E-11 | 0       | 0       |
| ry | 7.5E-11 | 0       | 0       | 0       | 1.9E-11 | 0       |
| rz | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 9.6E-12 |

x ry 1/kN

y rx 1/kN

**Sicily Anchor**

|    | x        | y        | z       | rx       | ry       | rz      |
|----|----------|----------|---------|----------|----------|---------|
| x  | 1.2E-08  | 0        | 0       | 0        | -9.7E-12 | 0       |
| y  | 0        | 1.2E-08  | 0       | -1.3E-11 | 0        | 0       |
| z  | 0        | 0        | 1.1E-08 | 0        | 0        | 0       |
| rx | 0        | -1.3E-11 | 0       | 6.1E-12  | 0        | 0       |
| ry | -9.7E-12 | 0        | 0       | 0        | 4.6E-12  | 0       |
| rz | 0        | 0        | 0       | 0        | 0        | 2.6E-12 |

**Calabria Anchor**

|    | x       | y       | z       | rx      | ry      | rz      |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| x  | 2.7E-09 | 0       | 0       | 0       | 2.4E-12 | 0       |
| y  | 0       | 2.7E-09 | 0       | 3.1E-12 | 0       | 0       |
| z  | 0       | 0       | 2.6E-09 | 0       | 0       | 0       |
| rx | 0       | 3.1E-12 | 0       | 1.2E-12 | 0       | 0       |
| ry | 2.4E-12 | 0       | 0       | 0       | 9.1E-13 | 0       |
| rz | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 4.8E-13 |

**Sicily terminal structure**

|    | x       | y       | z       | rx      | ry      | rz      |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| x  | 4.9E-08 | 0       | 0       | 0       | 5.7E-11 | 0       |
| y  | 0       | 4.7E-08 | 0       | 7.3E-11 | 0       | 0       |
| z  | 0       | 0       | 5.2E-08 | 0       | 0       | 0       |
| rx | 0       | 7.3E-11 | 0       | 1.0E-11 | 0       | 0       |
| ry | 5.7E-11 | 0       | 0       | 0       | 8.1E-12 | 0       |
| rz | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 5.9E-12 |

**Calabria terminal structure**

|    | x        | y        | z       | rx       | ry       | rz      |
|----|----------|----------|---------|----------|----------|---------|
| x  | 1.9E-08  | 0        | 0       | 0        | -7.7E-12 | 0       |
| y  | 0        | 1.8E-08  | 0       | -1.0E-11 | 0        | 0       |
| z  | 0        | 0        | 1.8E-08 | 0        | 0        | 0       |
| rx | 0        | -1.0E-11 | 0       | 3.3E-12  | 0        | 0       |
| ry | -7.7E-12 | 0        | 0       | 0        | 2.6E-12  | 0       |
| rz | 0        | 0        | 0       | 0        | 0        | 1.8E-12 |

|   |   |   |                           |  |
|---|---|---|---------------------------|--|
|  <b>Stretto<br/>di Messina</b> |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                           |  |
| Matrici equivalenti di rigidità per il sistema<br>suolo-fondazioni  | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                                      | <i>Rev</i><br>F0  | <i>Data</i><br>20/06/2011 |  |

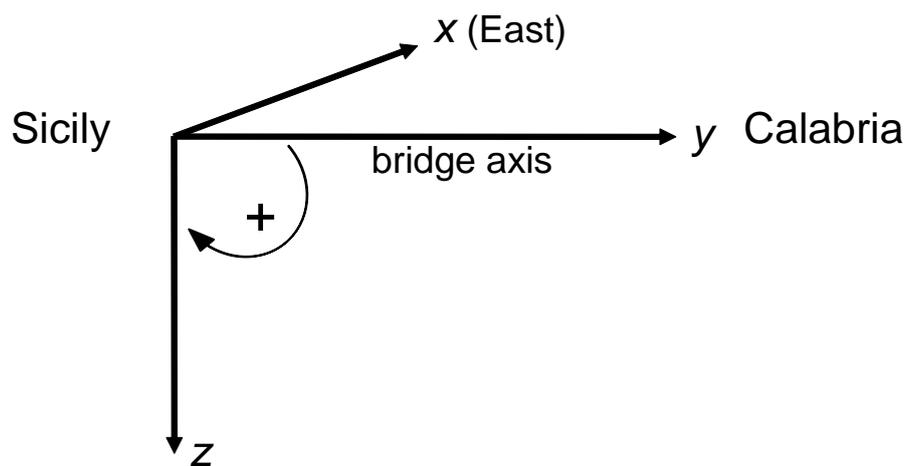


Figura 1. Sistema di riferimento utilizzato nei calcoli.

|   |   |   |                    |
|---|---|---|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                    |
| Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema<br>suolo-fondazioni               | Codice documento<br>PB0030_F0_ITA.doc   | Rev<br>F0   | Data<br>20/06/2011 |

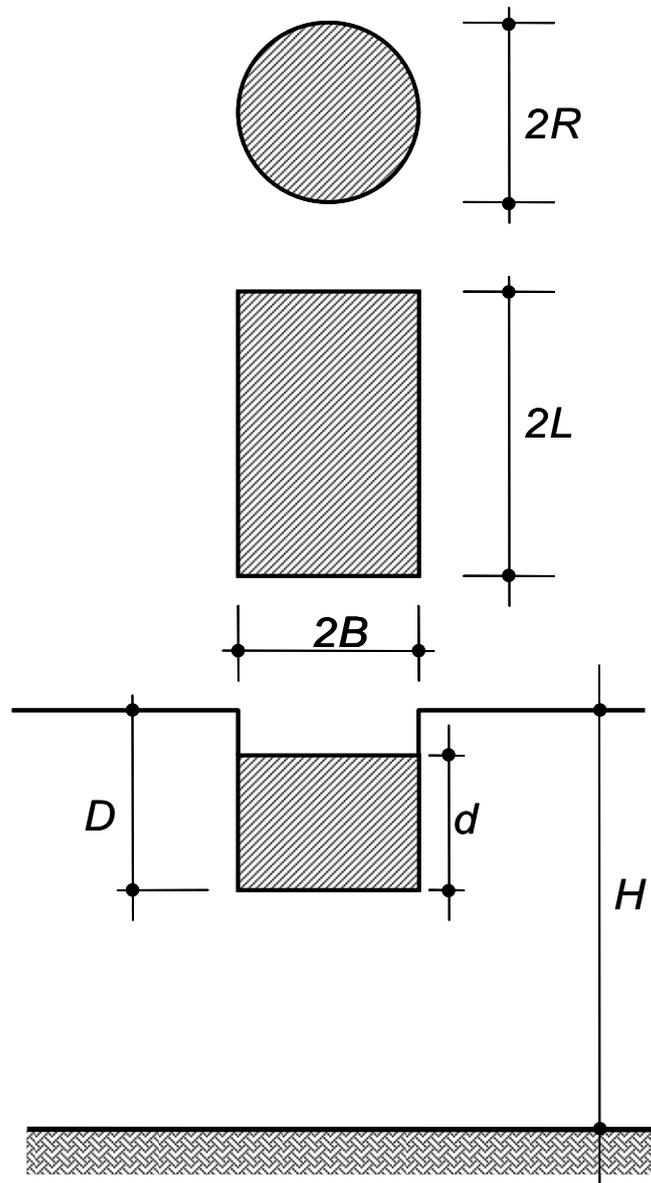


Figura 2. Layout schematico di una fondazione rettangolare incassata e semi spazio elastico.

|   |   |   |                           |
|---|---|---|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                           |
| Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema<br>suolo-fondazioni               | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                                      | <i>Rev</i><br>F0  | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

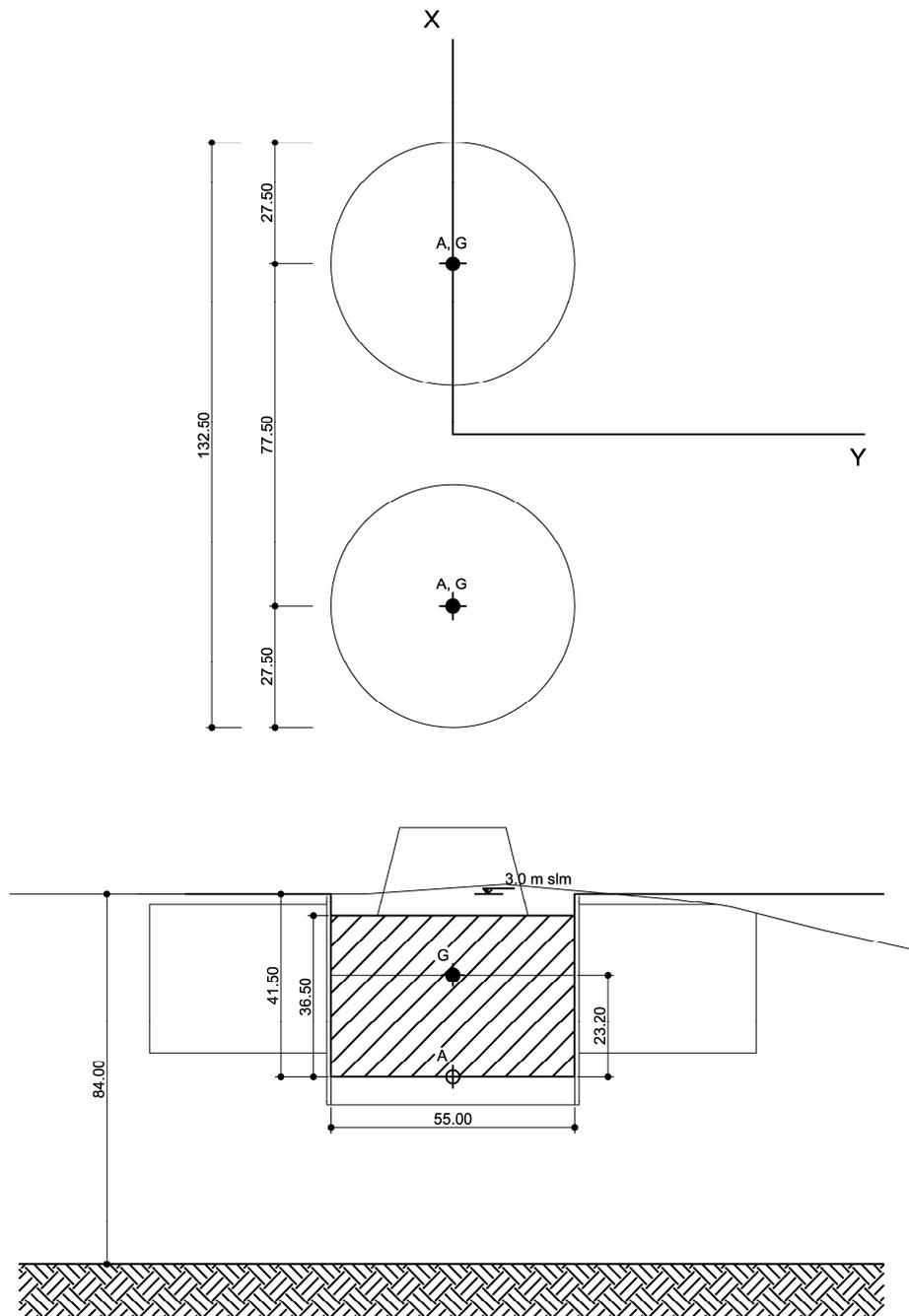


Figura 3. Fondazione della torre Sicilia.

|   |   |   |                           |
|---|---|---|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                           |
| Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema<br>suolo-fondazioni               | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                                      | <i>Rev</i><br>F0  | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

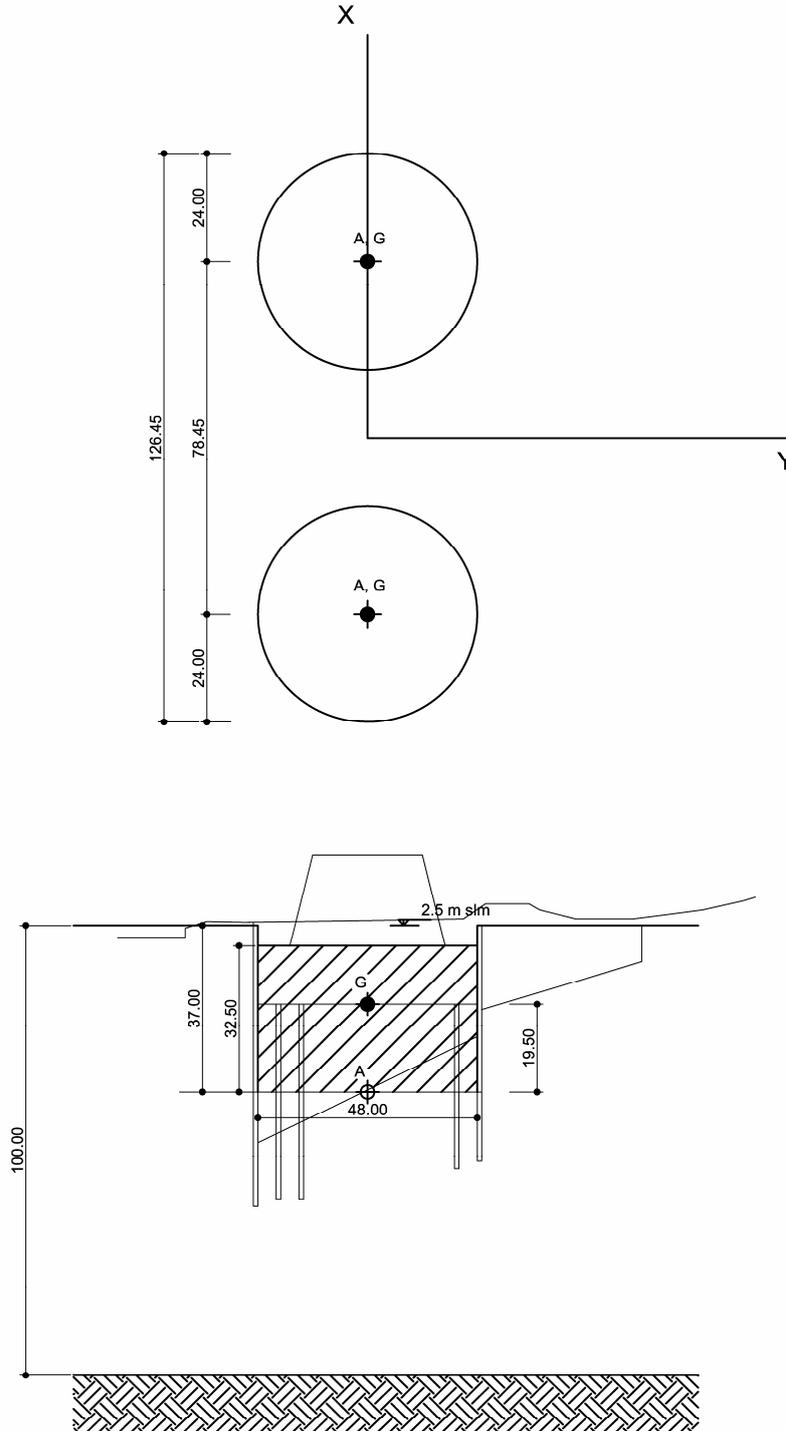


Figure 4. Fondazione della torre Calabria

|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |  |            |             |    |            |
|---|---|---|--|------------|-------------|----|------------|
| Matrici equivalenti di rigidità per il sistema<br>suolo-fondazioni                |   | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                        | <table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table> | <i>Rev</i> | <i>Data</i> | F0 | 20/06/2011 |
| <i>Rev</i>  | <i>Data</i>   |   |  |            |             |    |            |
| F0  | 20/06/2011  |   |  |            |             |    |            |

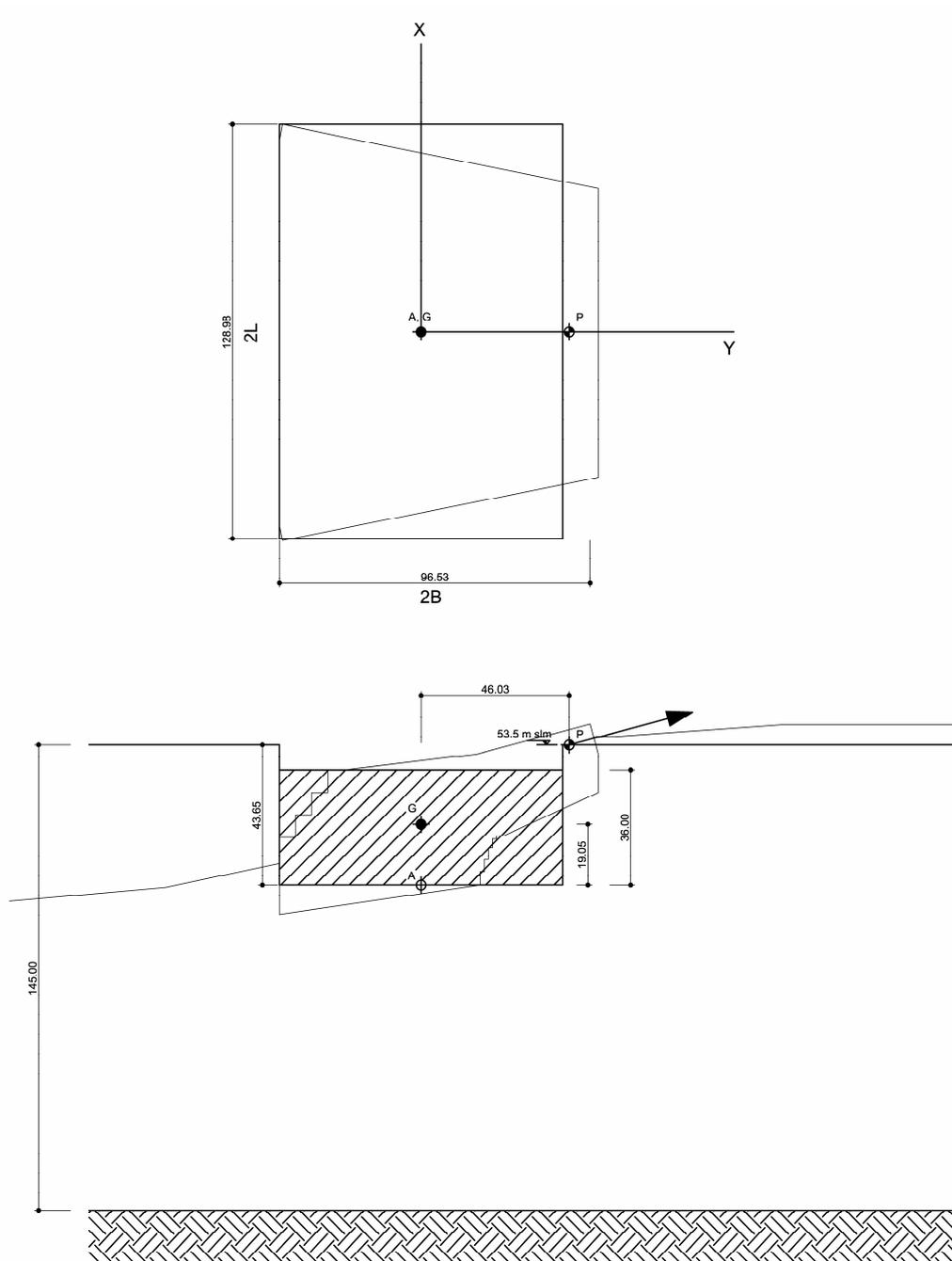


Figura 5. Fondazione del blocco di ancoraggio Sicilia.

|   |   |   |                    |
|---|---|---|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                    |
| Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema<br>suolo-fondazioni               | Codice documento<br><i>PB0030_F0_ITA.doc</i>                                      | Rev<br>F0   | Data<br>20/06/2011 |

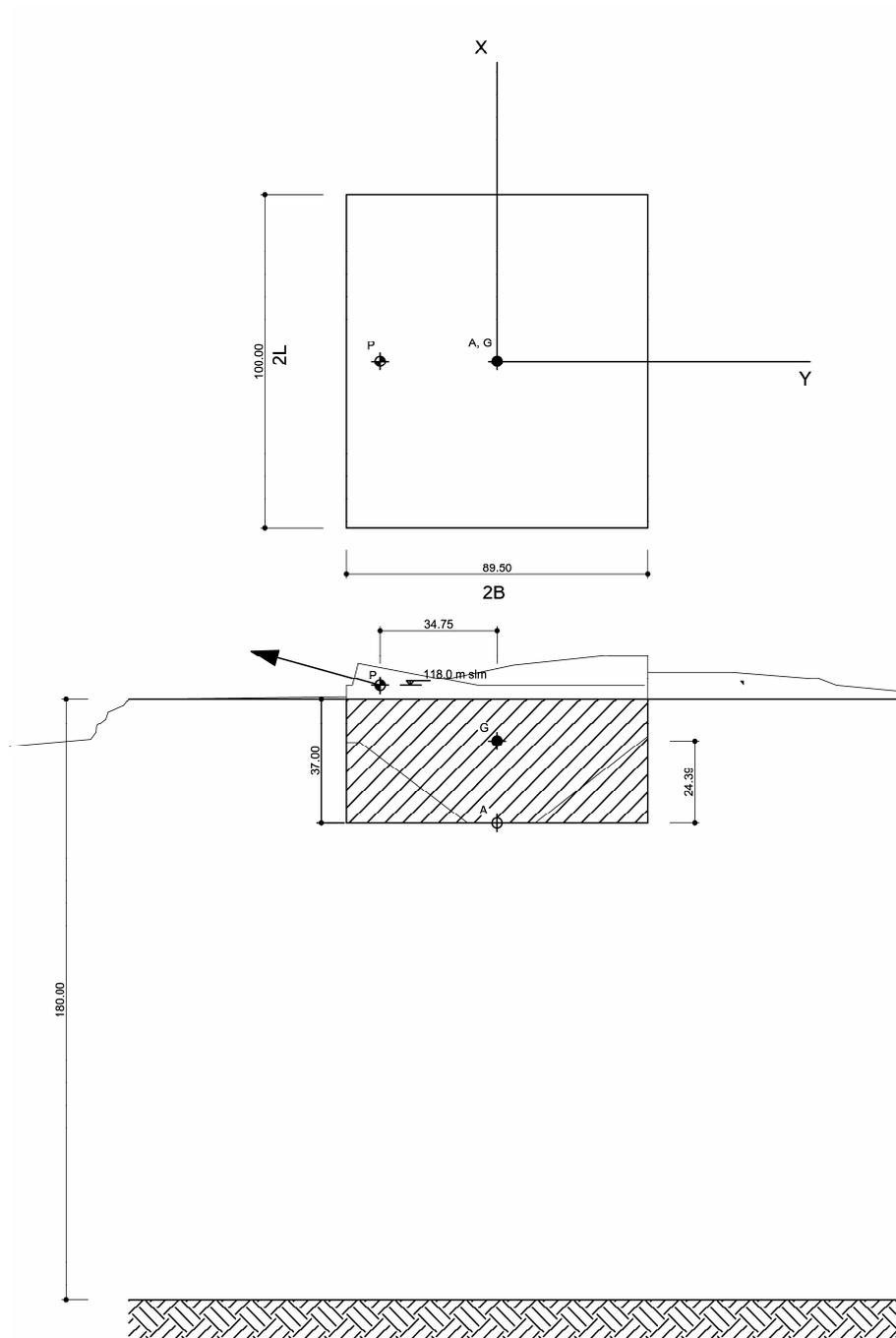


Figura 6. Fondazione del blocco di ancoraggio Calabria.

|   |   |   |                    |
|---|---|---|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                    |
| Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema<br>suolo-fondazioni               | Codice documento<br><i>PB0030_F0_ITA.doc</i>                                      | Rev<br>F0   | Data<br>20/06/2011 |

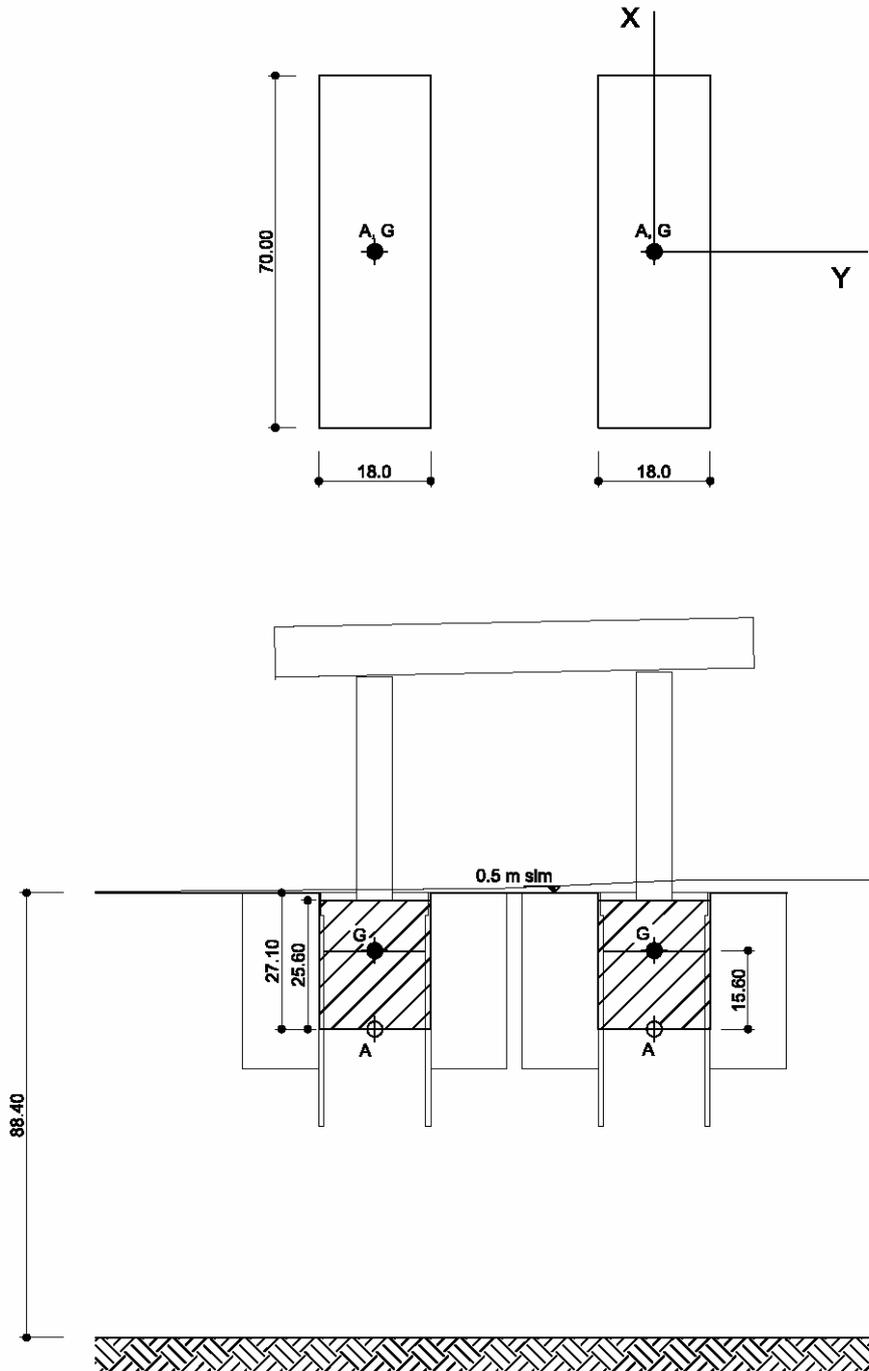


Figura 7. Fondazione del viadotto terminale Sicilia.

|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |  |     |      |    |            |
|---|---|---|--|-----|------|----|------------|
| Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema<br>suolo-fondazioni               |   | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                        | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Rev</th> <th>Data</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table> | Rev | Data | F0 | 20/06/2011 |
| Rev   | Data  |   |  |     |      |    |            |
| F0  | 20/06/2011  |   |  |     |      |    |            |

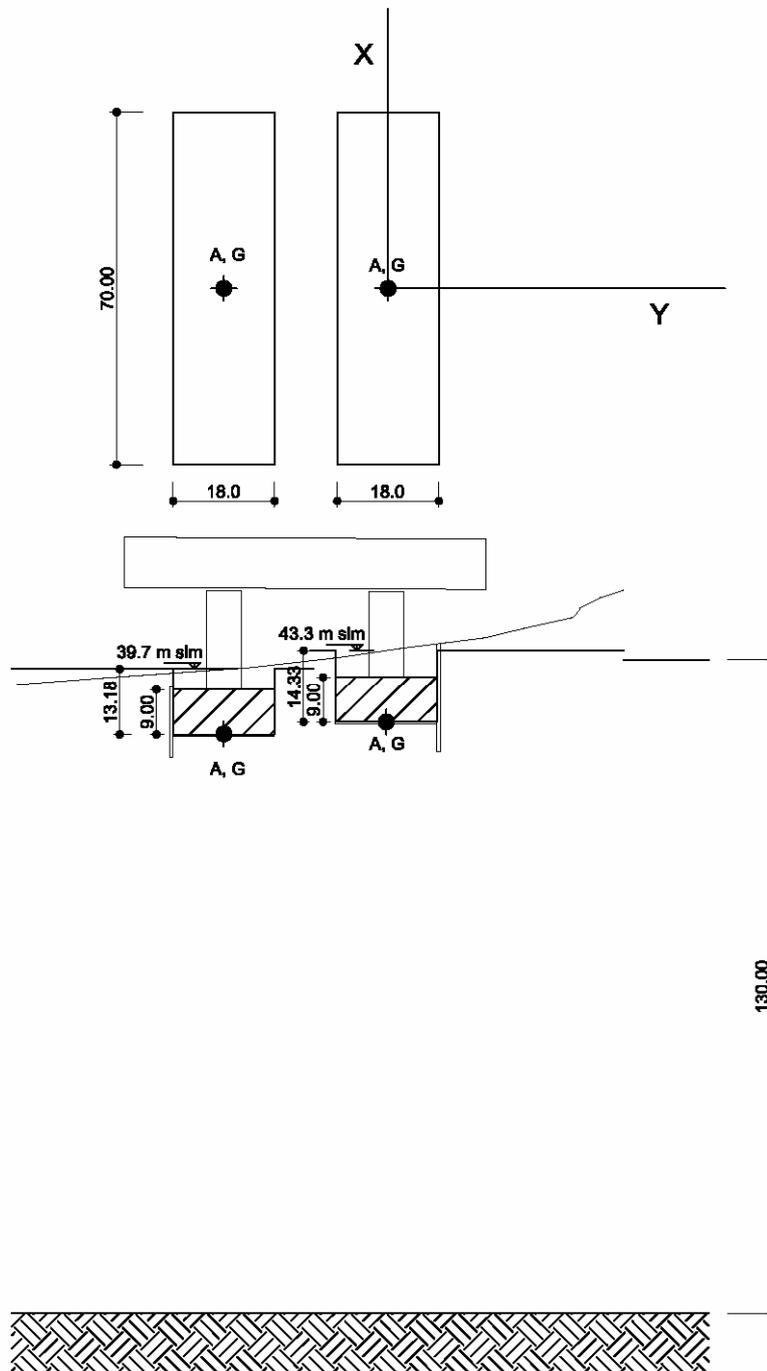


Figura 8. Fondazione del viadotto terminale Calabria.

|   |   |   |                           |  |
|---|---|---|---------------------------|--|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                           |  |
| Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema<br>suolo-fondazioni               | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                                      | <i>Rev</i><br>F0  | <i>Data</i><br>20/06/2011 |  |

## APPENDICE A

### Espressioni per i coefficienti di rigidità elastica

|   |   |   |                           |
|---|---|---|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                           |
| <b>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema suolo-fondazioni</b>           | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                                      | <i>Rev</i><br>F0  | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

## 1. Traslazione verticale: Direzione z

1. a) Fondazione rettangolare bassa su strato elastico

$$k_{z(\text{shallow-r})} = \frac{2GL}{1-\nu} \left[ 0.73 + 1.54(\chi)^{3/4} \right] \cdot \left( 1 + \frac{B/H}{0.5 + \chi} \right)$$

$$\chi = \frac{A_b}{4L^2}$$

1.b Fondazione circolare bassa su strato elastico

$$k_{z(\text{shallow-c})} = \frac{4GR}{1-\nu} \left( 1 + 1.3 \frac{R}{H} \right)$$

1.c Equivalenza per  $H \rightarrow \infty$

$$R_{\text{eq}(z)} = \frac{L}{2} \left[ 0.73 + 1.54(\chi)^{3/4} \right]$$

1.d Fondazione equivalente circolare bassa incassata su strato elastico

$$k_{z(\text{emb-c})} = k_{z(\text{shallow-c})} \left( 1 + 0.55 \frac{d}{R_{\text{eq}(z)}} \right) \cdot \left[ 1 + \left( 0.85 - 0.28 \frac{D}{R_{\text{eq}(z)}} \right) \cdot \frac{D}{H-D} \right]$$

1.e Fondazione rettangolare incassata su semispazio elastico (per confronto)

$$k_{z(\text{emb-r})} = k_{z(\text{shallow-r})} \left[ 1 + \frac{1}{21} \cdot \frac{D}{B} (1 + 1.3\chi) \right] \cdot \left[ 1 + 0.2 \left( \frac{A_w}{A_b} \right)^{2/3} \right]$$

$$A_w = \text{perimeter} \cdot d$$

|   |   |   |                  |                           |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| <b>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema suolo-fondazioni</b>           |   | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                        | <i>Rev</i><br>F0 | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

## 2. Traslazione orizzontale: Direzione y

2. a) Fondazione rettangolare bassa su semispazio elastico

$$k_{y(\text{shallow-r})} = \frac{2GL}{2-\nu} \left( 2 + 2.5\chi^{0.85} \right)$$

$$\chi = \frac{A_b}{4L^2}$$

2. b) Fondazione circolare bassa su strato elastico

$$k_{y(\text{shallow-c})} = \frac{8GR}{2-\nu} \left( 1 + 0.5 \frac{R}{H} \right)$$

2.c Equivalenza per  $H \rightarrow \infty$

$$R_{\text{eq}(y)} = \frac{L}{4} \left( 2 + 2.5\chi^{0.85} \right)$$

2.d Fondazione equivalente circolare bassa incassata su strato elastico

$$k_{y(\text{emb-c})} = k_{y(\text{shallow-c})} \left( 1 + \frac{d}{R_{\text{eq}(y)}} \right) \cdot \left( 1 + 1.25 \frac{D}{H} \right)$$

2.e Fondazione rettangolare incassata su semispazio elastico (per confronto)

$$k_{y(\text{emb-r})} = k_{y(\text{shallow-r})} \left( 1 + 0.15 \sqrt{\frac{D}{B}} \right) \cdot \left[ 1 + 0.52 \left( \frac{d}{B} \cdot \frac{A_w}{L^2} \right)^{0.4} \right]$$

$$A_w = \text{perimeter} \cdot d$$

|   |   |   |                           |
|---|---|---|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                           |
| <b>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema suolo-fondazioni</b>           | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                                      | <i>Rev</i><br>F0  | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

### 3. Traslazione orizzontale: Direzione x

3. a) Fondazione rettangolare bassa su semispazio elastico

$$k_{x(\text{shallow-r})} = k_{y(\text{shallow-r})} - \frac{0.2GL}{0.75 - \nu}(1 - \chi)$$

3. b) Fondazione circolare bassa su strato elastico

$$k_{x(\text{shallow-c})} = k_{y(\text{shallow-c})} = \frac{8GR}{2 - \nu} \left( 1 + 0.5 \frac{R}{H} \right)$$

3.c) Equivalenza per  $H \rightarrow \infty$

$$R_{\text{eq}(x)} = \frac{L}{8} \left[ 2 \cdot \left( 2 + 2.5\chi^{0.85} \right) - \frac{0.2 \cdot (2 - \nu)}{0.75 - \nu} (1 - \chi) \right]$$

3.d) Fondazione equivalente circolare bassa incassata su strato elastico

$$k_{x(\text{emb-c})} = k_{y(\text{emb-c})} = k_{y(\text{shallow-c})} \left( 1 + \frac{d}{R_{\text{eq}(x)}} \right) \cdot \left( 1 + 1.25 \frac{D}{H} \right)$$

3.e) Fondazione rettangolare incassata su semispazio elastico (per confronto)

$$k_{x(\text{emb-r})} = k_{x(\text{shallow-r})} \left( 1 + 0.15 \sqrt{\frac{D}{B}} \right) \cdot \left[ 1 + 0.52 \left( \frac{d}{B} \cdot \frac{A_w}{L^2} \right)^{0.4} \right]$$

$$A_w = \text{perimeter} \cdot d$$

|   |   |   |                           |  |
|---|---|---|---------------------------|--|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                           |  |
| <b>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema suolo-fondazioni</b>           | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                                      | <i>Rev</i><br>F0  | <i>Data</i><br>20/06/2011 |  |

#### 4. Rotazione attorno all'asse x

##### 4.a Fondazione rettangolare bassa su semispazio elastico

$$k_{rx(\text{shallow-r})} = \frac{G}{1-\nu} \cdot I_{bx}^{0.75} \left(\frac{L}{B}\right)^{0.25} \left(2.4 + 0.5 \frac{B}{L}\right)$$

$I_{bx}$  = Momento di inerzia dell'area della superficie di contatto fondazione- suolo attorno l'asse x

$$I_{bx} = 2 \frac{\pi R^4}{4} \text{ Per fondazioni della torre}$$

$$I_{bx} = 2L \frac{(2B)^3}{12} \text{ Per i blocchi di ancoraggio}$$

##### 4.b Fondazione circolare bassa su strato elastico

$$k_{rx(\text{shallow-c})} = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \cdot \left(1 + 0.17 \frac{R}{H}\right)$$

##### 4.c Equivalenza per $H \rightarrow \infty$

$$R_{eq(rx)} = \left[ \frac{3}{8} I_{bx}^{0.75} \left(\frac{L}{B}\right)^{0.25} \left(2.4 + 0.5 \frac{B}{L}\right) \right]^{1/3}$$

##### 4.d Fondazione equivalente circolare bassa incassata su strato elastico

$$k_{rx(\text{emb-c})} = k_{rx(\text{shallow-c})} \cdot \left(1 + 2 \frac{d}{R_{eq(rx)}}\right) \cdot \left(1 + 0.65 \frac{D}{H}\right)$$

##### 4.e Fondazione rettangolare incassata su semispazio elastico (per confronto)

$$k_{rx(\text{emb-r})} = k_{rx(\text{shallow-r})} \cdot \left\{ 1 + 1.26 \frac{d}{B} \left[ 1 + \frac{d}{B} \left(\frac{d}{B}\right)^{-0.2} \sqrt{\frac{B}{L}} \right] \right\}$$

|   |   |   |                           |  |
|---|---|---|---------------------------|--|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                           |  |
| <b>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema suolo-fondazioni</b>           | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                                      | <i>Rev</i><br>F0  | <i>Data</i><br>20/06/2011 |  |

## 5. Rotazione attorno all'asse y

### 5.a Fondazione rettangolare bassa su semispazio elastico

$$k_{ry(\text{shallow-r})} = \frac{G}{1-\nu} \cdot I_{by}^{0.75} 3 \left( \frac{L}{B} \right)^{0.15}$$

$I_{by}$  = Momento di inerzia dell'area della superficie di contatto fondazione- suolo attorno l'asse y

$$I_{by} = 2 \left[ \frac{\pi R^4}{4} + \pi R^2 \left( \frac{s}{2} \right)^2 \right] \text{ Per fondazioni di torre con } s = \text{spazio fra le solette}$$

$$I_{bx} = 2B \frac{(2L)^3}{12} \text{ Per i blocchi di ancoraggio}$$

### 5.b Fondazione circolare bassa su strato elastico

$$k_{ry(\text{shallow-c})} = k_{rx(\text{shallow-c})} = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \cdot \left( 1 + 0.17 \frac{R}{H} \right)$$

### 5.c Equivalenza per $H \rightarrow \infty$

$$R_{eq(ry)} = \left[ \frac{3}{8} I_{by}^{0.75} 3 \left( \frac{L}{B} \right)^{0.15} \right]^{1/3}$$

### 5.d Fondazione equivalente circolare bassa incassata su strato elastico

$$k_{ry(\text{emb-c})} = k_{ry(\text{shallow-c})} \cdot \left( 1 + 2 \frac{d}{R_{eq(ry)}} \right) \cdot \left( 1 + 0.65 \frac{D}{H} \right)$$

### 5.e Fondazione rettangolare incassata su semispazio elastico (per confronto)

$$k_{ry(\text{emb-r})} = k_{ry(\text{shallow-r})} \cdot \left\{ 1 + 0.92 \left( \frac{d}{L} \right)^{0.6} \left[ 1.5 + \left( \frac{d}{L} \right)^{1.9} \left( \frac{d}{D} \right)^{-0.6} \right] \right\}$$

|   |   |   |                           |
|---|---|---|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                           |
| <b>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema suolo-fondazioni</b>           | <i>Codice documento</i><br>PB0030_F0_ITA.doc                                      | <i>Rev</i><br>F0  | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

## 6. Rotazione attorno all'asse verticale z

### 6.a Fondazione rettangolare bassa su semispazio elastico

$$k_{rz(\text{shallow-r})} = G \cdot I_b^{0.75} \left[ 4 + 11 \left( 1 - \frac{B}{L} \right)^{10} \right]$$

$I_b = I_{bx} + I_{by} =$  *momento polare dell'inerzia della superficie di contatto suolo – fondazione*

### 6.b Fondazione circolare bassa su strato elastico

$$k_{rz(\text{shallow-c})} = \frac{16GR^3}{3} \cdot \left( 1 + 0.10 \frac{R}{H} \right)$$

### 6.c Equivalenza per $H \rightarrow \infty$

$$R_{\text{eq}(rz)} = \left\{ \frac{3}{16} I_b^{0.75} \left[ 4 + 11 \cdot \left( 1 - \frac{B}{L} \right)^{10} \right] \right\}^{1/3}$$

### 6.d Fondazione equivalente circolare bassa incassata su strato elastico

$$k_{rz(\text{emb-c})} = k_{rz(\text{shallow-c})} \cdot \left( 1 + 2.67 \frac{d}{R_{\text{eq}(rz)}} \right)$$

### 6.e Fondazione rettangolare incassata su semispazio elastico (per confronto)

$$k_{rz(\text{emb-r})} = k_{rz(\text{shallow-r})} \left[ 1 + 1.4 \cdot \left( 1 + \frac{B}{L} \right) \cdot \left( \frac{d}{B} \right)^{0.9} \right]$$

|   |   |   |                         |                                  |
|---|---|---|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema suolo-fondazioni</b>           |   | <i>Codice documento</i><br><i>PB0030_F0_ITA.doc</i>                 | <i>Rev</i><br><i>F0</i> | <i>Data</i><br><i>20/06/2011</i> |

## 7. Equivalenza 2D in opposizione a 3D (utilizzata per i blocchi di ancoraggio)

### 7.a Fondazione a nastro incassata su strato elastico

$$k_{y(\text{emb-strip})}^{2D} = \frac{0.73G}{1-\nu} \left(1 + 3.5 \frac{B}{H}\right) \cdot \left(1 + 0.5 \frac{d}{B}\right) \cdot \left(1 + 1.5 \frac{D}{H}\right)$$

$$\text{Spostamento: } u^{2D} = \frac{T^{2D}}{k_{y(\text{emb-strip})}^{2D}}$$

con  $T^{2D} = T^{3D}/L$  e  $L = 100$  m

### 7.b Fondazione equivalente circolare bassa incassata su strato elastico

$$k_{y(\text{emb-c})}^{3D} = k_{y(\text{shallow-c})} \left(1 + \frac{d}{R_{eq}}\right) \cdot \left(1 + 1.25 \frac{D}{H}\right)$$

$$\text{Spostamento: } u^{3D} = \frac{T^{3D}}{k_{y(\text{emb-c})}^{3D}}$$

### 7.c Fattore di correzione dello spostamento

$$\frac{u^{3D}}{u^{2D}} = \frac{T^{3D}}{T^{2D}} \cdot \frac{k_{y(\text{emb-strip})}^{2D}}{k_{y(\text{emb-c})}^{3D}} = L \cdot \frac{k_y^{2D}}{k_y^{3D}} = \mu$$

$$u^{3D} = \mu \cdot u^{2D}$$

|   |   |   |                                   |  |
|---|---|---|-----------------------------------|--|
|  |  | <p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br/>PROGETTO DEFINITIVO</p> |                                   |  |
| <p>Matrici equivalenti di rigidezza per il sistema<br/>suolo-fondazioni</p>       | <p><i>Codice documento</i><br/>PB0030_F0_ITA.doc</p>                              | <p><i>Rev</i><br/>F0</p>  | <p><i>Data</i><br/>20/06/2011</p> |  |

## APPENDICE B

### Tablelle di valutazione dei coefficienti di rigidità



**Matrici equivalenti di rigidità per il sistema  
suolo-fondazioni**

*Codice documento*  
*PB0030\_F0\_ITA.doc*

*Rev*     *Data*  
*F0*     *20/06/2011*

**SICILY TOWER**

single footing

**ELASTIC SOLUTIONS**

|                      |    |                |                   |                        |  |
|----------------------|----|----------------|-------------------|------------------------|--|
| single footing       |    |                |                   |                        |  |
| radius               | R  | 27.5 m         |                   |                        |  |
| total area           | Ab | m <sup>2</sup> |                   |                        |  |
| distance             | i  | 77.5 m         |                   |                        |  |
| equivalent rectangle |    |                | γ foundation      | 18.4 kN/m <sup>3</sup> |  |
|                      |    |                | Δh foundation     | 2.5 m                  |  |
|                      |    |                | AN @ 2.5 m o.d.   | 218.6 MN               |  |
|                      |    |                | AN @ -15.5 m o.d. | 2318.6 MN              |  |
| embedment            | D  | 41.5 m         | level, I          | 5 m o.d.               |  |
|                      | d  | 36.5 m         | ground level      | 2.5 m o.d.             |  |
|                      |    |                | base level        | -38.5 m o.d.           |  |
|                      |    |                | difference        | 43.5 m                 |  |
| thickness of layer   | H  | 84 m           |                   |                        |  |
| shear modulus        | G  | 60 MPa         |                   |                        |  |
| Poisson's ratio      | ν  | 0.2            |                   |                        |  |
| Young's modulus      | E  | 144.0 MPa      |                   |                        |  |

**FEM 3D**

(to calibrate elastic stiffness G)

|                      | N<br>z<br>MN | H<br>y<br>MN | M<br>rx<br>MN m |
|----------------------|--------------|--------------|-----------------|
| loads @ level I      | 1288.5       | 185          | 10973           |
| loads @ -15.5 m o.d. | 1507         | 185          | 19020.5         |
| FEM displacements    | 0.056        | -0.004       | 0.0008          |

|  |              |               |                |
|--|--------------|---------------|----------------|
| back-computed forces ratios (computed/FEM) | 1615<br>1.07 | 184<br>1.00   | 15396<br>0.81  |
| back-computed displ. ratios (computed/FEM) | 0.05<br>0.93 | -0.01<br>1.66 | 0.0010<br>1.27 |

**vertical displacement (z)**

**torsion (rz)**

|  |               |                      |                      |   |                |                      |                      |
|--|---------------|----------------------|----------------------|---|----------------|----------------------|----------------------|
| shallow circular found. on elastic layer | Kz(shallow-c) | 11761.2 MN m         |                      | shallow circular found. on elastic layer  | Krz(shallow-c) | 6872872.02 MN m      |                      |
| embedded foundation                      | Kz (emb-c)    | <b>2.88E+04 MN/m</b> | <b>2.88E+07 kN/m</b> | embedded circular found. on elastic layer | Krz(emb-c)     | <b>3.12E+07 MN m</b> | <b>3.12E+10 kN m</b> |

**horizontal displacement (y)**  
(along the bridge)

**horizontal displacement (x)**  
(orthogonal to the bridge)

|   |               |                        |                      |   |               |                        |                      |
|---|---------------|------------------------|----------------------|---|---------------|------------------------|----------------------|
| shallow circular found. on elastic layer  | Ky(shallow-c) | 8533.73016 MN/m        |                      | shallow circular found. on elastic layer  | Kx(shallow-c) | 8533.73016             |                      |
| embedded circular found. on elastic layer | Ky(emb-c)     | <b>32125.2457 MN/m</b> | <b>3.21E+07 kN/m</b> | embedded circular found. on elastic layer | Kx(emb-c)     | <b>32125.2457 MN/m</b> | <b>3.21E+07 kN/m</b> |

**rotation around x (rx)**

**rotation around y (ry)**

|   |                |                      |                      |   |                |                      |                      |
|---|----------------|----------------------|----------------------|---|----------------|----------------------|----------------------|
| shallow circular found. on elastic layer  | Krx(shallow-c) | 4390864.03 MN m      |                      | shallow circular found. on elastic layer  | Kry(shallow-c) | 4390864.03           |                      |
| embedded circular found. on elastic layer | Krx(emb-c)     | <b>21199676 MN m</b> | <b>2.12E+10 kN m</b> | embedded circular found. on elastic layer | Kry(emb-c)     | <b>21199676 MN m</b> | <b>2.12E+10 kN m</b> |

**mixed mode**

**mixed mode**

|               |       |                      |                    |               |       |                      |                    |
|---------------|-------|----------------------|--------------------|---------------|-------|----------------------|--------------------|
| circular y-rx | Ky-rx | <b>390857.155 MN</b> | <b>3.91E+08 kN</b> | circular x-ry | Kx-ry | <b>390857.155 MN</b> | <b>3.91E+08 kN</b> |
|---------------|-------|----------------------|--------------------|---------------|-------|----------------------|--------------------|

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

*Codice documento*  
*PB0030\_F0\_ITA.doc*

|            |             |
|------------|-------------|
| <i>Rev</i> | <i>Data</i> |
| F0         | 20/06/2011  |

**CALABRIA TOWER**

single footing

**ELASTIC SOLUTIONS**

|                      |                    |    |                       |                   |                        |
|----------------------|--------------------|----|-----------------------|-------------------|------------------------|
| single footing       | radius             | R  | 24 m                  |                   |                        |
|                      | total area         | Ab | 3619.1 m <sup>2</sup> |                   |                        |
|                      | distance           | i  | 78.45 m               |                   |                        |
| equivalent rectangle |                    |    |                       | γ foundation      | 18.7 kN/m <sup>3</sup> |
|                      |                    |    |                       | Δh foundation     | 15.5 m                 |
|                      |                    |    |                       | ΔN @ 5 m o.d.     | 1049 MN                |
|                      |                    |    |                       | ΔN @ -15.5 m o.d. | 2319 MN                |
|                      | embedment          | D  | 37 m                  | level, I          | 7 m o.d.               |
|                      |                    | d  | 32.5 m                | ground level      | 2.5 m o.d.             |
|                      |                    |    |                       | base level        | -29.7 m o.d.           |
|                      |                    |    |                       | difference        | 36.7 m                 |
|                      | thickness of layer | H  | 100 m                 |                   |                        |
|                      | shear modulus      | G  | 300 MPa               |                   | 350                    |
|                      | Poisson's ratio    | ν  | 0.2                   |                   |                        |
|                      | Young's modulus    | E  | 720.0 MPa             |                   |                        |

**FEM 3D**

(to calibrate elastic stiffness G)

|                      | N<br>z<br>MN | H<br>y<br>MN | M<br>rx<br>MN m |
|----------------------|--------------|--------------|-----------------|
| loads @ level I      | 1296.5       | -178         | -12761          |
| loads @ -15.5 m o.d. | 2346         | -178         | -6228.4         |
|                      | m            | m            | rad             |
| FEM displacements    | 0.0194       | -0.026       | -0.0006         |

|                       |      |       |         |
|-----------------------|------|-------|---------|
| back-computed forces  | 1992 | -4064 | -77117  |
| ratios (computed/FEM) | 0.85 | 22.83 | 12.38   |
| back-computed displ.  | 0.02 | 0.00  | -0.0001 |
| ratios (computed/FEM) | 1.18 | 0.02  | 0.13    |

**vertical displacement (z)**

**torsion (rz)**

|   |               |               |               |  |                |                 |               |
|---|---------------|---------------|---------------|--|----------------|-----------------|---------------|
| shallow circular found.<br>on elastic layer | Kz(shallow-c) | 47232.0 MN m  |               | shallow circular found.<br>on elastic layer  | Krz(shallow-c) | 22649241.6 MN m |               |
| embedded foundation<br>on elastic layer     | Kz(emb-c)     | 1.03E+05 MN/m | 1.03E+08 kN/m | embedded circular found.<br>on elastic layer | Krz(emb-c)     | 1.05E+08 MN m   | 1.05E+11 kN m |

**horizontal displacement (y)  
(along the bridge)**

**horizontal displacement (x)  
(orthogonal to the bridge)**

|  |               |             |               |  |               |             |               |
|--|---------------|-------------|---------------|--|---------------|-------------|---------------|
| shallow circular found.<br>on elastic layer  | Ky(shallow-c) | 35840 MN/m  |               | shallow circular found.<br>on elastic layer  | Kx(shallow-c) | 35840       |               |
| embedded circular found.<br>on elastic layer | Ky(emb-c)     | 123396 MN/m | 1.23E+08 kN/m | embedded circular found.<br>on elastic layer | Kx(emb-c)     | 123396 MN/m | 1.23E+08 kN/m |

**rotation around x (rx)**

**rotation around y (ry)**

|  |                |                 |               |  |                |                 |               |
|--|----------------|-----------------|---------------|--|----------------|-----------------|---------------|
| shallow circular found.<br>on elastic layer  | Krx(shallow-c) | 14388019.2 MN m |               | shallow circular found.<br>on elastic layer  | Kry(shallow-c) | 14388019.2      |               |
| embedded circular found.<br>on elastic layer | Krx(emb-c)     | 66187586.1 MN m | 6.62E+10 kN m | embedded circular found.<br>on elastic layer | Kry(emb-c)     | 66187586.1 MN m | 6.62E+10 kN m |

**mixed mode**

**mixed mode**

|      |       |            |             |      |       |            |             |
|------|-------|------------|-------------|------|-------|------------|-------------|
| y-rx | Ky-rx | 1336790 MN | 1.34E+09 kN | x-ry | Kx-ry | 1336790 MN | 1.34E+09 kN |
|------|-------|------------|-------------|------|-------|------------|-------------|

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

*Codice documento*  
PB0030\_F0\_ITA.doc

*Rev*  
F0

*Data*  
20/06/2011

**SICILY ANCHOR BLOCK**

**ELASTIC SOLUTIONS**

|                      |        |           |
|----------------------|--------|-----------|
| total area           | Ab     | 10685 m2  |
| equivalent rectangle |        |           |
| half-width           | B      | 44 m      |
| half-length          | L      | 64.5 m    |
|                      | $\chi$ | 0.642     |
|                      |        | 1.46591   |
| embedment            | D      | 43.65 m   |
|                      | d      | 36 m      |
|                      | Aw     | 14940 m2  |
| thickness of layer   | H      | 145 m     |
|                      | B/H    | 0.303     |
| shear modulus        | G      | 60 MPa    |
| Poisson's ratio      | $\nu$  | 0.2       |
| Young's modulus      | E      | 144.0 MPa |

| 2D/3D equivalence |      |
|-------------------|------|
| L (m)             | 100  |
| factor (see 7.a)  | 0.54 |

**FEM 2D**

(to calibrate elastic stiffness G)

|                             | N<br>z<br>MN  | H<br>y<br>MN | M<br>rx<br>MN m |
|-----------------------------|---------------|--------------|-----------------|
| Loads @ reference point     | -1026         | 3829         | 0               |
| Loads @ found. centre/bott  | -1026         | 3829         | 119909          |
|                             | m             | m            | rad             |
| 2D displacements            | <b>-0.042</b> | <b>0.167</b> | <b>0.0008</b>   |
| equivalent 3D displ.        | <b>-0.023</b> | <b>0.091</b> | <b>0.0004</b>   |
| ratios (computed/FEM)       | <b>1.03</b>   | <b>1.11</b>  | <b>1.05</b>     |
| comp. forces @ centre/bott. | -1057         | 4248         | 125624          |
| computed displacements      | -0.02         | 0.08         | 0.0005          |
| ratio (computed/FEM)        | <b>0.97</b>   | <b>0.88</b>  | <b>1.09</b>     |

**vertical displacement (z)**

|   |                |                      |
|---|----------------|----------------------|
| shallow rectangular found.<br>on elastic half-space | Kz (shallow-r) | 22466.2 MN/m         |
| equivalent radius                                   | Req(z)         | 59.2 m               |
| shallow circular found.<br>on elastic layer         | Kz(shallow-c)  | 27165.8 MN m         |
| embedded foundation                                 | Kz (emb-c)     | <b>4.63E+04 MN/m</b> |
| embedded rectang. found.<br>on elastic half-space   | Kz (emb-r)     | <b>3.05E+04 MN/m</b> |

**4.63E+07 kN/m**

**3.05E+07 kN/m**

**torsion (rz)**

|  |                             |                                |
|--|-----------------------------|--------------------------------|
| polar moment of inertia<br>shallow foundation<br>on elastic half-space | lb=lbx+lby<br>Kz(shallow-r) | 19356817 m4<br>70040503.9 MN m |
| equivalent radius  | Req(rz)                     | 60.3 m                         |
| shallow circular found.<br>on elastic layer                            | Krz(shallow-c)              | 72951540.6 MN m                |
| embedded circular found.<br>on elastic layer                           | Krz(emb-c)                  | <b>1.89E+08 MN m</b>           |
| embedded rectang. found.<br>on elastic half-space                      | Krz(emb-r)                  | <b>2.08E+08 MN m</b>           |

**1.89E+11 kN m**

**2.08E+11 kN m**

**horizontal displacement (y)  
(along the bridge)**

|   |                |                         |
|---|----------------|-------------------------|
| shallow rectangular found.<br>on elastic half-space | Ky(shallow-r)  | 15976.7371 MN/m         |
| equivalent radius                                   | Req(y)         | 59.9 m                  |
| shallow circular found.<br>on elastic layer         | Ky(shallow-c)  | 19277.4629 MN/m         |
| embedded circular found.<br>on elastic layer        | Ky(emb-c)      | <b>4.25E+04 MN/m</b>    |
| embedded rectang. found.<br>on elastic half-space   | Ky(emb-r)      | <b>3.31E+04 MN/m</b>    |
| embeddede strip foundation<br>on elastic layer      | Ky(emb-strip): | <b>230.918559 MN/m2</b> |

**4.25E+07 kN/m**

**3.31E+07 kN/m**

**horizontal displacement (x)  
(trasversale ponte)**

|   |               |                      |
|---|---------------|----------------------|
| shallow rectangular found.<br>on elastic half-space | Kx(shallow-r) | 15473.0584           |
| equivalent radius                                   | Req(x)        | 58.0 m               |
| shallow circular found.<br>on elastic layer         | Kx(shallow-c) | 18568.949            |
| embedded circular found.<br>on elastic layer        | Kx(emb-c)     | <b>4.14E+04 MN/m</b> |
| embedded rectang. found.<br>on elastic half-space   | Kx(emb-r)     | <b>3.20E+04 MN/m</b> |

**4.14E+07 kN/m**

**3.20E+07 kN/m**

**rotation around x (rx)**

|   |                 |                      |
|---|-----------------|----------------------|
| moment of inertia                                 | l <sub>bx</sub> | 8186419 m4           |
| shallow foundation<br>on elastic half-space       | Krx(shallow-r)  | 34620317.4 MN m      |
| equivalent radius                                 | Req(rx)         | 55.7 m               |
| shallow circular found.<br>on elastic layer       | Krx(shallow-c)  | 36882420.1 MN m      |
| embedded circular found.<br>on elastic layer      | Krx(emb-c)      | <b>1.01E+08 MN m</b> |
| embedded rectang. found.<br>on elastic half-space | Krx(emb-r)      | <b>1.06E+08 MN m</b> |

**1.01E+11 kN m**

**1.06E+11 kN m**

**rotation around y (ry)**

|   |                 |                      |
|---|-----------------|----------------------|
| moment of inertia                                 | l <sub>by</sub> | 11170398 m4          |
| shallow foundation<br>on elastic half-space       | Kry(shallow-r)  | 46041563.1 MN m      |
| equivalent radius                                 | Req(ry)         | 61.3 m               |
| shallow circular found.<br>on elastic layer       | Kry(shallow-c)  | 49349858.9           |
| embedded circular found.<br>on elastic layer      | Kry(emb-c)      | <b>1.28E+08 MN m</b> |
| embedded rectang. found.<br>on elastic half-space | Kry(emb-r)      | <b>1.02E+08 MN m</b> |

**1.28E+11 kN m**

**1.02E+11 kN m**

**mixed mode**

|               |       |                    |                    |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|
| circular y-rx | Ky-rx | <b>8.99E+05 MN</b> | <b>8.99E+08 kN</b> |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|

**mixed mode**

|               |       |                    |                    |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|
| circular x-ry | Kx-ry | <b>8.77E+05 MN</b> | <b>8.77E+08 kN</b> |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|

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

*Codice documento*  
PB0030\_F0\_ITA.doc

*Rev*  
F0

*Data*  
20/06/2011

**CALABRIA ANCHOR BLOCK**

**ELASTIC SOLUTIONS**

|                      |        |                      |
|----------------------|--------|----------------------|
| total area           | Ab     | 8950 m <sup>2</sup>  |
| equivalent rectangle |        |                      |
| half-width           | B      | 44.75 m              |
| half-length          | L      | 50 m                 |
|                      | $\chi$ | 0.895                |
| embedment            | D      | 37 m                 |
|                      | d      | 37 m                 |
|                      | Aw     | 15355 m <sup>2</sup> |
| thickness of layer   | H      | 180 m                |
|                      | B/H    | 0.249                |
| shear modulus        | G      | 400 MPa              |
| Poisson's ratio      | $\nu$  | 0.2                  |
| Young's modulus      | E      | 960.0 MPa            |

| 2D/3D equivalence |      |
|-------------------|------|
| L (m)             | 100  |
| factor (see 7.a)  | 0.54 |

**FEM 2D**

(to calibrate elastic stiffness G)

|                             | N<br>z<br>MN | H<br>y<br>MN | M<br>rx<br>MN m |
|-----------------------------|--------------|--------------|-----------------|
| Loads @ reference point     | -1018        | -3800        | 0               |
| Loads @ found. centre/bott. | -1018        | -3800        | -120425         |
|                             | m            | m            | rad             |
| 2D displacements            | -0.004       | -0.030       | -0.0001         |
| equivalent 3D displ.s       | -0.002       | -0.016       | -2.72E-05       |
| ratios (computed/FEM)       | 0.57         | 1.03         | 0.83            |
| comp. forces @ centre/bott. | -575         | -3924        | -99429          |
| computed displacements      | 0.00         | -0.01        | -0.0001         |
| ratio (computed/FEM)        | 1.77         | 0.91         | 2.69            |

**vertical displacement (z)**

|  |                |                      |                      |
|--|----------------|----------------------|----------------------|
| shallow rectangular found. on elastic half-space | Kz (shallow-r) | 126485.0 MN/m        |                      |
| equivalent radius                                | Req(z)         | 53.7 m               |                      |
| shallow circular found. on elastic layer         | Kz(shallow-c)  | 148969.8 MN/m        |                      |
| embedded foundation on elastic layer             | Kz (emb-c)     | <b>2.40E+05 MN/m</b> | <b>2.40E+08 kN/m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space   | Kz (emb-r)     | <b>1.77E+05 MN/m</b> | <b>1.77E+08 kN/m</b> |

**torsion (rz)**

|  |                              |   |                      |
|--|------------------------------|---|----------------------|
| polar moment of inertia shallow foundation on elastic half-space | lb=lbx+lby<br>Krz(shallow-r) | 19356817 m <sup>4</sup><br>466923187 MN m |                      |
| equivalent radius  | Req(rz)                      | 60.3 m                                    |                      |
| shallow circular found. on elastic layer                         | Krz(shallow-c)               | 482555929 MN/m                            |                      |
| embedded circular found. on elastic layer                        | Krz(emb-c)                   | <b>1.27E+09 MN m</b>                      | <b>1.27E+12 kN m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space                   | Krz(emb-r)                   | <b>1.51E+09 MN m</b>                      | <b>1.51E+12 kN m</b> |

**horizontal displacement (y)**  
(along the bridge)

|  |               |                                    |                      |
|--|---------------|------------------------------------|----------------------|
| shallow rectangular found. on elastic half-space | Ky(shallow-r) | 95000.9531 MN/m                    |                      |
| equivalent radius                                | Req(y)        | 53.4 m                             |                      |
| shallow circular found. on elastic layer         | Ky(shallow-c) | 109102.799 MN/m                    |                      |
| embedded circular found. on elastic layer        | Ky(emb-c)     | <b>2.32E+05 MN/m</b>               | <b>2.32E+08 kN/m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space   | Ky(emb-r)     | <b>2.15E+05 MN/m</b>               | <b>2.15E+08 kN/m</b> |
| embeddede strip foundation on elastic layer      | Ky(emb-strip) | <b>1262.27105 MN/m<sup>2</sup></b> |                      |

**horizontal displacement (x)**  
(trasversale ponte)

|  |               |                      |                      |
|--|---------------|----------------------|----------------------|
| shallow rectangular found. on elastic half-space | Kx(shallow-r) | 94237.3168           |                      |
| equivalent radius                                | Req(x)        | 53.0 m               |                      |
| shallow circular found. on elastic layer         | Kx(shallow-c) | 108113.367           |                      |
| embedded circular found. on elastic layer        | Kx(emb-c)     | <b>2.31E+05 MN/m</b> | <b>2.31E+08 kN/m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space   | Kx(emb-r)     | <b>2.14E+05 MN/m</b> | <b>2.14E+08 kN/m</b> |

**rotation around x (rx)**

|  |                 |                        |                      |
|--|-----------------|------------------------|----------------------|
| moment of inertia                              | l <sub>bx</sub> | 8186419 m <sup>4</sup> |                      |
| shallow foundation on elastic half-space       | Krx(shallow-r)  | 224026016 MN m         |                      |
| equivalent radius                              | Req(rx)         | 55.2 m                 |                      |
| shallow circular found. on elastic layer       | Krx(shallow-c)  | 235701138 MN m         |                      |
| embedded circular found. on elastic layer      | Krx(emb-c)      | <b>6.26E+08 MN m</b>   | <b>6.26E+11 kN m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space | Krx(emb-r)      | <b>6.40E+08 MN m</b>   | <b>6.40E+11 kN m</b> |

**rotation around y (ry)**

|  |                 |                         |                      |
|--|-----------------|-------------------------|----------------------|
| moment of inertia                              | l <sub>by</sub> | 11170398 m <sup>4</sup> |                      |
| shallow foundation on elastic half-space       | Kry(shallow-r)  | 294692640 MN m          |                      |
| equivalent radius                              | Req(ry)         | 60.5 m                  |                      |
| shallow circular found. on elastic layer       | Kry(shallow-c)  | 311520254               |                      |
| embedded circular found. on elastic layer      | Kry(emb-c)      | <b>7.85E+08 MN m</b>    | <b>7.85E+11 kN m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space | Kry(emb-r)      | <b>7.62E+08 MN m</b>    | <b>7.62E+11 kN m</b> |

**mixed mode**

|               |       |                    |                    |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|
| circular y-rx | Ky-rx | <b>5.05E+06 MN</b> | <b>5.05E+09 kN</b> |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|

**mixed mode**

|               |       |                    |                    |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|
| circular x-ry | Kx-ry | <b>5.02E+06 MN</b> | <b>5.02E+09 kN</b> |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|

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

*Codice documento*  
PB0030\_F0\_ITA.doc

*Rev*  
F0

*Data*  
20/06/2011

**SICILY TERMINAL STRUCTURE**

**ELASTIC SOLUTIONS**

|                      |        |                       |
|----------------------|--------|-----------------------|
| total area           | Ab     | 1540 m <sup>2</sup>   |
| equivalent rectangle |        |                       |
| half-width           | B      | 11 m                  |
| half-length          | L      | 35 m                  |
|                      | $\chi$ | 0.314                 |
| embedment            | D      | 27.1 m                |
|                      | d      | 25.6 m                |
|                      | Aw     | 4710.4 m <sup>2</sup> |
| thickness of layer   | H      | 88.4 m                |
|                      | B/H    | 0.124                 |
| shear modulus        | G      | 60 MPa                |
| Poisson's ratio      | $\nu$  | 0.2                   |
| Young's modulus      | E      | 144.0 MPa             |

**vertical displacement (z)**

|  |                |                      |                      |
|--|----------------|----------------------|----------------------|
| shallow rectangular found. on elastic half-space | Kz (shallow-r) | 8330.5 MN/m          |                      |
| equivalent radius                                | Req(z)         | 24.1 m               |                      |
| shallow circular found. on elastic layer         | Kz(shallow-c)  | 9785.9 MN m          |                      |
| embedded foundation on elastic layer             | Kz (emb-c)     | <b>1.92E+04 MN/m</b> | <b>1.92E+07 kN/m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space   | Kz (emb-r)     | <b>1.38E+04 MN/m</b> | <b>1.38E+07 kN/m</b> |

**torsion (rz)**

|  |                              |  |                      |
|--|------------------------------|--|----------------------|
| polar moment of inertia shallow foundation on elastic half-space | lb=lbx+lby<br>Krz(shallow-r) | 19356817 m <sup>4</sup><br>74465394.9 MN m |                      |
| equivalent radius  | Req(rz)                      | 61.5 m                                     |                      |
| shallow circular found. on elastic layer                         | Krz(shallow-c)               | 79646675 MN m                              |                      |
| embedded circular found. on elastic layer                        | Krz(emb-c)                   | <b>1.68E+08 MN m</b>                       | <b>1.68E+11 kN m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space                   | Krz(emb-r)                   | <b>3.68E+08 MN m</b>                       | <b>3.68E+11 kN m</b> |

**horizontal displacement (y)  
(along the bridge)**

|  |                 |                                    |                      |
|--|-----------------|------------------------------------|----------------------|
| shallow rectangular found. on elastic half-space | Ky(shallow-r)   | 6847.60175 MN/m                    |                      |
| equivalent radius                                | Req(y)          | 25.7 m                             |                      |
| shallow circular found. on elastic layer         | Ky(shallow-c)   | 7842.15032 MN/m                    |                      |
| embedded circular found. on elastic layer        | Ky(emb-c)       | <b>2.17E+04 MN/m</b>               | <b>2.17E+07 kN/m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space   | Ky(emb-r)       | <b>1.90E+04 MN/m</b>               | <b>1.90E+07 kN/m</b> |
| embeddede strip foundation on elastic layer      | Ky(emb-strip)2D | <b>248.246707 MN/m<sup>2</sup></b> |                      |

**horizontal displacement (x)  
(trasversale ponte)**

|  |               |                      |                      |
|--|---------------|----------------------|----------------------|
| shallow rectangular found. on elastic half-space | Kx(shallow-r) | 6323.96539           |                      |
| equivalent radius                                | Req(x)        | 23.7 m               |                      |
| shallow circular found. on elastic layer         | Kx(shallow-c) | 7172.22341           |                      |
| embedded circular found. on elastic layer        | Kx(emb-c)     | <b>2.06E+04 MN/m</b> | <b>2.06E+07 kN/m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space   | Kx(emb-r)     | <b>1.76E+04 MN/m</b> | <b>1.76E+07 kN/m</b> |

**rotation around x (rx)**

|  |                 |                        |                      |
|--|-----------------|------------------------|----------------------|
| moment of inertia                              | l <sub>bx</sub> | 8186419 m <sup>4</sup> |                      |
| shallow foundation on elastic half-space       | Krx(shallow-r)  | 39201760.5 MN m        |                      |
| equivalent radius                              | Req(rx)         | 58.1 m                 |                      |
| shallow circular found. on elastic layer       | Krx(shallow-c)  | 43580953.5 MN m        |                      |
| embedded circular found. on elastic layer      | Krx(emb-c)      | <b>9.83E+07 MN m</b>   | <b>9.83E+10 kN m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space | Krx(emb-r)      | <b>3.22E+08 MN m</b>   | <b>3.22E+11 kN m</b> |

**rotation around y (ry)**

|  |                 |                         |                      |
|--|-----------------|-------------------------|----------------------|
| moment of inertia                              | l <sub>by</sub> | 11170398 m <sup>4</sup> |                      |
| shallow foundation on elastic half-space       | Kry(shallow-r)  | 51717236.1 MN m         |                      |
| equivalent radius                              | Req(ry)         | 63.7 m                  |                      |
| shallow circular found. on elastic layer       | Kry(shallow-c)  | 58053507                |                      |
| embedded circular found. on elastic layer      | Kry(emb-c)      | <b>1.26E+08 MN m</b>    | <b>1.26E+11 kN m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space | Kry(emb-r)      | <b>1.33E+08 MN m</b>    | <b>1.33E+11 kN m</b> |

**mixed mode**

|               |       |                    |                    |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|
| circular y-rx | Ky-rx | <b>1.85E+05 MN</b> | <b>1.85E+08 kN</b> |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|

**mixed mode**

|               |       |                    |                    |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|
| circular x-ry | Kx-ry | <b>1.76E+05 MN</b> | <b>1.76E+08 kN</b> |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|

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

*Codice documento*  
*PB0030\_F0\_ITA.doc*

|            |             |
|------------|-------------|
| <i>Rev</i> | <i>Data</i> |
| F0         | 20/06/2011  |

**CALABRIA TERMINAL STRUCTURE**

**ELASTIC SOLUTIONS**

|                      |        |                |
|----------------------|--------|----------------|
| total area           | Ab     | 1400           |
| equivalent rectangle |        |                |
| half-width           | B      | 10             |
| half-length          | L      | 35             |
|                      | $\chi$ | 0.286          |
| embedment            | D      | 13.75          |
|                      | d      | 9              |
|                      | Aw     | 1620           |
| thickness of layer   | H      | 130            |
|                      | B/H    | 0.077          |
| shear modulus        | G      | <b>300 MPa</b> |
| Poisson's ratio      | $\nu$  | <b>0.2</b>     |
| Young's modulus      | E      | 720.0 MPa      |

**vertical displacement (z)**

|  |                |                      |                      |
|--|----------------|----------------------|----------------------|
| shallow rectangular found. on elastic half-space | Kz (shallow-r) | 38383.1 MN/m         |                      |
| equivalent radius                                | Req(z)         | 23.3 m               |                      |
| shallow circular found. on elastic layer         | Kz(shallow-c)  | 43108.6 MN m         |                      |
| embedded foundation on elastic layer             | Kz (emb-c)     | <b>5.65E+04 MN/m</b> | <b>5.65E+07 kN/m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space   | Kz (emb-r)     | <b>5.11E+04 MN/m</b> | <b>5.11E+07 kN/m</b> |

**torsion (rz)**

|  |                              |                               |                      |
|--|------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| polar moment of inertia shallow foundation on elastic half-space | lb=lbx+lby<br>Krz(shallow-r) | 19356817 m4<br>383485858 MN m |                      |
| equivalent radius  | Req(rz)                      | 62.1 m                        |                      |
| shallow circular found. on elastic layer                         | Krz(shallow-c)               | 401809669 MN m                |                      |
| embedded circular found. on elastic layer                        | Krz(emb-c)                   | <b>5.57E+08 MN m</b>          | <b>5.57E+11 kN m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space                   | Krz(emb-r)                   | <b>1.01E+09 MN m</b>          | <b>1.01E+12 kN m</b> |

**horizontal displacement (y)  
(along the bridge)**

|  |               |                         |                      |
|--|---------------|-------------------------|----------------------|
| shallow rectangular found. on elastic half-space | Ky(shallow-r) | 33389.4189 MN/m         |                      |
| equivalent radius                                | Req(y)        | 25.0 m                  |                      |
| shallow circular found. on elastic layer         | Ky(shallow-c) | 36605.3419 MN/m         |                      |
| embedded circular found. on elastic layer        | Ky(emb-c)     | <b>5.63E+04 MN/m</b>    | <b>5.63E+07 kN/m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space   | Ky(emb-r)     | <b>6.12E+04 MN/m</b>    | <b>6.12E+07 kN/m</b> |
| embeddede strip foundation on elastic layer      | Ky(emb-strip) | <b>583.735935 MN/m2</b> |                      |

**horizontal displacement (x)  
(trasversale ponte)**

|  |               |                      |                      |
|--|---------------|----------------------|----------------------|
| shallow rectangular found. on elastic half-space | Kx(shallow-r) | 30662.1462           |                      |
| equivalent radius                                | Req(x)        | 23.0 m               |                      |
| shallow circular found. on elastic layer         | Kx(shallow-c) | 33374.167            |                      |
| embedded circular found. on elastic layer        | Kx(emb-c)     | <b>5.26E+04 MN/m</b> | <b>5.26E+07 kN/m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space   | Kx(emb-r)     | <b>5.62E+04 MN/m</b> | <b>5.62E+07 kN/m</b> |

**rotation around x (rx)**

|  |                |                      |                      |
|--|----------------|----------------------|----------------------|
| moment of inertia                              | lbx            | 8186419 m4           |                      |
| shallow foundation on elastic half-space       | Krx(shallow-r) | 199613872 MN m       |                      |
| equivalent radius                              | Req(rx)        | 58.4 m               |                      |
| shallow circular found. on elastic layer       | Krx(shallow-c) | 214869374 MN m       |                      |
| embedded circular found. on elastic layer      | Krx(emb-c)     | <b>3.00E+08 MN m</b> | <b>3.00E+11 kN m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space | Krx(emb-r)     | <b>6.80E+08 MN m</b> | <b>6.80E+11 kN m</b> |

**rotation around y (ry)**

|  |                |                      |                      |
|--|----------------|----------------------|----------------------|
| moment of inertia                              | lby            | 11170398 m4          |                      |
| shallow foundation on elastic half-space       | Kry(shallow-r) | 262309618 MN m       |                      |
| equivalent radius                              | Req(ry)        | 64.0 m               |                      |
| shallow circular found. on elastic layer       | Kry(shallow-c) | 284267537            |                      |
| embedded circular found. on elastic layer      | Kry(emb-c)     | <b>3.89E+08 MN m</b> | <b>3.89E+11 kN m</b> |
| embedded rectang. found. on elastic half-space | Kry(emb-r)     | <b>4.33E+08 MN m</b> | <b>4.33E+11 kN m</b> |

**mixed mode**

|               |       |                    |                    |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|
| circular y-rx | Ky-rx | <b>1.69E+05 MN</b> | <b>1.69E+08 kN</b> |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|

**mixed mode**

|               |       |                    |                    |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|
| circular x-ry | Kx-ry | <b>1.58E+05 MN</b> | <b>1.58E+08 kN</b> |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|