

# 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)

#### IL PROGETTISTA



Dott. Ing. F. Colla  
 Ordine Ingegneri  
 Milano  
 n° 20355  
 Dott. Ing. E. Pagani  
 Ordine Ingegneri Milano  
 n° 15408



#### IL CONTRAENTE GENERALE

Project Manager  
 (Ing. P.P. Marcheselli)

STRETTO DI MESSINA  
 Direttore Generale e  
 RUP Validazione  
 (Ing. G. Fiammenghi)

STRETTO DI MESSINA  
 Amministratore Delegato  
 (Dott. P. Ciucci)

*Unità Funzionale* COLLEGAMENTI SICILIA

SS0779\_F0

*Tipo di sistema* INFRASTRUTTURE STRADALI - OPERE CIVILI

*Raggruppamento di opere/attività* SVINCOLO ANNUNZIATA

*Opera - tratto d'opera - parte d'opera* VIADOTTO DIREZIONE REGGIO CALABRIA

*Titolo del documento* RELAZIONE GEOTECNICA

CODICE

C G 0 7 0 0 P R B D S S C A 4 V I V 3 0 0 0 0 0 1 F0

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	20/06/2011	EMISSIONE FINALE	R. CAFFARENA	G. SCIUTO	F. COLLA



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## INDICE

INDICE .....	3
PREMESSA.....	5
1 RIFERIMENTI NORMATIVI .....	5
2 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	7
3 CARATTERISTICHE MATERIALI.....	9
3.1 CALCESTRUZZI (Secondo UNI 11104 - 2004) .....	9
3.2 ACCIAIO PER ARMATURE DI CONGLOMERATO CEMENTIZIO ARMATO (Secondo NTC 2008 – D.M. 14/01/2008).....	10
4 DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA.....	11
4.1 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E UBICAZIONE DELLA STRUTTURA.....	11
4.2 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL LUOGO.....	16
4.2.1 DESCRIZIONE DELLE LITOLOGIE PREVALENTI .....	16
4.2.2 INDAGINI ESEGUITE.....	16
4.2.3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....	18
4.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA SISMICITA' DEL LUOGO .....	52
4.3.1 AZIONI SISMICHE .....	53
4.3.1.1 VITA NOMINALE .....	54
4.3.1.2 CLASSE D'USO.....	54
4.3.1.3 PERIODO DI RIFERIMENTO .....	54
4.3.1.4 STATO LIMITE CONSIDERATO .....	55
4.3.1.5 PARAMETRI E PUNTI DELLO SPETTRO DI RISPOSTA ORIZZONTALE PER LO STATO LIMITE SLV .....	55
5 ANALISI DELLE FONDAZIONI.....	57
5.1 ANALISI DEL SISTEMA FONDAZIONALE DELLE SPALLE E DELLA PILA .....	57
5.2 ANALISI AZIONI SUI PALI .....	59
5.2.1 MODELLO DI CALCOLO.....	64
5.2.1.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO .....	64
5.2.2 CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI .....	64
5.2.2.1 AZIONI ORIZZONTALI .....	64
5.2.3 VERIFICA DELLE SEZIONI.....	69
5.2.3.1 VERIFICHE GEOTECNICHE (SLU).....	69

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

5.2.3.2	VERIFICHE GEOTECNICHE (SLE) .....	86
5.2.3.3	VERIFICHE STRUTTURALI .....	90

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## PREMESSA

La presente relazione geotecnica tratta della realizzazione dello Svincolo “Annunziata”, carreggiata direzione Reggio Calabria (progressive Pk. Iniz. 10+163.34 - Pk. Fin. 10+178.34 km), facente parte dei collegamenti lato Sicilia del ponte sullo stretto di Messina.

in particolare vengono analizzate le fondazioni e l'interazione fondazioni – strutture.

## 1 RIFERIMENTI NORMATIVI

I calcoli delle strutture sono stati eseguiti in base alle seguenti disposizioni:

- Legge 5/11/1971 n° 1086: "Norme per le discipline delle opere di conglomerato cementizio armato normale e precompresso ed a struttura metallica".
- Legge 2 febbraio 1974, n. 64 “Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche”.
- D.M. del 14/01/2008 - “Norme Tecniche per le Costruzioni 2008”
- Istruzioni per l'applicazione delle norme tecniche per le costruzioni di cui al DM 14/01/2008 – Circolare 2 febbraio 2009 n. 617
- CNR-DT 207/2008 - Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni
- UNI EN1990:2002 - Basi della progettazione strutturale
- UNI EN1991-2:2003 - Azioni sulle strutture - Parte 2: Carichi da traffico sui ponti
- UNI EN1992-1-1:2004 - Progettazione delle strutture in cls - Parte 1.1: Regole generali e regole per gli edifici
- UNI EN1993-1-1:2005: Progettazione delle strutture in acciaio - Parte 1.1: Regole generali e regole per gli edifici
- UNI EN1993-1-5:2006: Progettazione delle strutture in acciaio - Parte 1.5: Elementi strutturali a lastra
- UNI EN1993-1-8:2005: Progettazione delle strutture in acciaio - Parte 1.8: Progettazione dei collegamenti
- UNI EN1993-1-9:2005: Progettazione delle strutture in acciaio - Parte 1.9: Fatica
- UNI EN1993-2:2006: Progettazione delle strutture in acciaio - Parte 2: Ponti in acciaio
- UNI EN1994-1-1:2004: Progettazione delle strutture miste acciaio-cls - Parte 1.1: Regole

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

generali e regole per gli edifici

- UNI EN1994-1-2:2005: Progettazione delle strutture miste acciaio-clc - Parte 2: Ponti a struttura composta
- UNI EN1998-1-1:2004: Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 1.1: Regole generali

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 2 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] SEAOC Blue Book “Conceptual Framework for Performance-Based Seismic Design”, Appendix B (2000).
- [2] Gruppo di Lavoro (2004). Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall’Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici).
- [3] Priestley M.J.N., Seible F. e Calvi G.M. “Seismic Design and Retrofit of Bridges”, J. Wiley & Sons, Inc. (1996).
- [4] Migliacci A. e Mola F., “Progetto agli stati limite delle strutture in c.a.”. Parte prima e seconda, Ed. Masson. 1996.
- [5] FEMA 440 – “Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures”, prepared by ATC, ATC-55 Project, Redwood City CA, June 2005.
- [6] FEMA 440 – “Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures”, prepared by ATC, ATC-55 Project, Redwood City CA, June 2005.
- [7] M. W. O’Neill and L. C. Reese “Drilled shafts: construction procedures and design methods”, prepared for U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration; printed by ADSC: The International Association of Foundation Drilling, pub. n. ADSC-TL 4, August 1999.
- [8] CALTRANS “Seismic Design Criteria” Version 1.1; California department of transportation, USA, July 1999.
- [9] ATC-32 “Improved Seismic Design Criteria for California Bridges: Provisional Recommendations” Version 1.1; California, USA, June 1996.
- [10] ATC-49 “Recommended LRFD guidelines for the seismic design of highway bridges. Part I: Specifications. Part II: Commentary and Appendices”, ATC/MCEER Joint Venture, USA, June 2003.
- [11] Roesset J.M. [1969] “Fundamentals of soil amplification”, Conference on Seismic Design for Nuclear Power Plants, MIT, Ed. by Robert J. Hansen, Vol 1, pp. 183-244.
- [12] Mylonakis G. [2001] “Simplified model for seismic pile bending at soil layer interfaces”, The Japanese Geotechnical Society, Vol. 41, No. 4(20010815), pp. 47-58.

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>		
<p align="center">RELAZIONE GEOTECNICA</p>		<p><i>Codice documento</i>  SS0779_F0.doc</p>	<p><i>Rev</i>  F0</p>	<p><i>Data</i>  20/06/2011</p>

[13] Joseph E. Bowles. [1988] “Fondazioni – progetto e analisi”, McGraw-Hill.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE GEOTECNICA	<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 3 CARATTERISTICHE MATERIALI

#### 3.1 CALCESTRUZZI (Secondo UNI 11104 - 2004)

##### Per sottofondazioni

classe di resistenza

C12/15

classe di esposizione

XC0

##### Per pali gettati in opera

classe di resistenza

C25/30

modulo elastico

$E_c = 31447 \text{ N/mm}^2$

resistenza caratteristica a compressione cilindrica

$f_{ck} = 24.90 \text{ N/mm}^2$

resistenza media a compressione cilindrica

$f_{cm} = 32.90 \text{ N/mm}^2$

resistenza di calcolo a compressione

$f_{cd} = 14.11 \text{ N/mm}^2$

resistenza a trazione ( valore medio )

$f_{ctm} = 2.56 \text{ N/mm}^2$

resistenza caratteristica a trazione (frattile al 5%)

$f_{ctk,5\%} = 1.79 \text{ N/mm}^2$

resistenza a trazione per flessione

$f_{ctf} = 3.07 \text{ N/mm}^2$

tensione a SLE – combinazione rara

$\sigma_c = 14.94 \text{ N/mm}^2$

tensione a SLE – combinazione quasi permanente

$\sigma_c = 11.20 \text{ N/mm}^2$

copriferro

$C = 60 \text{ mm}$

classe di esposizione

XC2

classe di consistenza slump

S4-S5

max dimensione aggregati

$D_{max} = 32 \text{ mm}$

rapporto A/C massimo

0.50

##### Fondazioni pile e spalle

classe di resistenza

C25/30

modulo elastico

$E_c = 31447 \text{ N/mm}^2$

resistenza caratteristica a compressione cilindrica

$f_{ck} = 24.90 \text{ N/mm}^2$

resistenza media a compressione cilindrica

$f_{cm} = 32.90 \text{ N/mm}^2$

resistenza di calcolo a compressione

$f_{cd} = 14.11 \text{ N/mm}^2$

resistenza a trazione ( valore medio )

$f_{ctm} = 2.56 \text{ N/mm}^2$

resistenza caratteristica a trazione (frattile al 5%)

$f_{ctk,5\%} = 1.79 \text{ N/mm}^2$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

resistenza a trazione per flessione	$f_{cfm} =$	3.07	N/mm <sup>2</sup>
tensione a SLE – combinazione rara	$\sigma_C =$	14.94	N/mm <sup>2</sup>
tensione a SLE – combinazione quasi permanente	$\sigma_C =$	11.20	N/mm <sup>2</sup>
copriferro	$C =$	40	mm
classe di esposizione		XC2	
classe di consistenza slump		S4	
max dimensione aggregati	$D_{max} =$	32	mm
rapporto A/C massimo		0.50	

Per il calcestruzzo ordinario armato si assume il seguente peso per unità di volume:

$$\rho'_{cls} = \boxed{25} \text{ kN/m}^3$$

### 3.2 ACCIAIO PER ARMATURE DI CONGLOMERATO CEMENTIZIO ARMATO (Secondo NTC 2008 – D.M. 14/01/2008)

		<b>B450C</b>	
tensione caratteristica di snervamento	$f_{yk} =$	450	N/mm <sup>2</sup>
tensione caratteristica di rottura	$f_{tk} =$	540	N/mm <sup>2</sup>
resistenza di calcolo a trazione	$f_{yd} =$	391.30	N/mm <sup>2</sup>
modulo elastico	$E_s =$	206.000	N/mm <sup>2</sup>
deformazione caratteristica al carico massimo	$\epsilon_{uk} =$	7.50	%
deformazione di progetto	$\epsilon_{ud} =$	6.75	%
coeff. resistenza a instabilità delle membrature	$\gamma_m =$	1.10	

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 4 DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA

### 4.1 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E UBICAZIONE DELLA STRUTTURA

La presente relazione di calcolo tratta le sottostrutture costituenti il viadotto direzione Reggio Calabria facente parte dello svincolo denominato Annunziata definito nel comprensorio dei collegamenti Sicilia del ponte sullo stretto di Messina. Da un inquadramento infrastrutturale dell'opera è possibile desumerne la strutturazione fondamentale utilizzata nel corso delle analisi.

Il viadotto è composto da una singola campata la cui luce di calcolo è pari a 15.00 m. L'impalcato è caratterizzato da un asse rettilineo, con sviluppo longitudinale pari a 15.0 m misurato tra gli assi di appoggio delle due spalle in cemento armato, e da una larghezza trasversale pari a 14.0 m. Nel particolare l'estensione trasversale del suddetto impalcato, può essere ripartita in 11.2 m di superficie bitumata, 0,80 m di cordolo destro e 2.0 m di cordolo sinistro, sui quali sono impostati i montanti delle barriere sicurvia e delle barriere di protezione. Allo scopo di sopperire a logiche necessità cinematiche e di servizio, viene conferita alla sovrastruttura, una pendenza trasversale del 4.5%. Da un punto di vista prettamente strutturale, l'impalcato del ponte oggetto di studio, è realizzato attraverso travi accostate in c.a.p.. Nell'ambito dell'esecuzione delle analisi strutturali, atte a fornire le sollecitazioni di progetto agenti sulle sottostrutture, viene utilizzato uno schema statico di trave semplicemente appoggiata, con allineamento tra l'asse stradale e quello delle spalle. Le spalle afferenti a tale opera ed oggetto di studio del seguente elaborato, sono caratterizzate dalla compresenza su entrambe di appoggi in neoprene armato. Esse nel particolare risultano realizzate in calcestruzzo armato gettato in opera. Geometricamente presentano ambedue un muro frontale di spessore pari a 1.80 m. In sommità al muro frontale è situato il muro paraghiaia di spessore costante pari a 0.60 m largo quanto il muro stesso e di altezza pari a 1.13 m, collegato ai due muretti laterali di larghezza pari a 0.80 m. Entrambe le spalle presentano una platea di fondazione con base a parallelogramma, di dimensioni pari a 10.00 x 16.50 m e spessore 2.50 m. Le due spalle si differenziano in altezza, dove la maggiore risulta indicizzata con la sigla SPALLA A (lato Reggio Calabria), mentre la più bassa viene definita SPALLA B (lato Messina). Ai lati della spalla classica è presente un muro andatore parallelo all'asse del cavalcavia di spessore variabile pari a 0.80 m in sommità e 2.0 m alla base. L'analisi dei carichi e l'analisi sismica sono state effettuate in ottemperanza alla NTC del 14 Gennaio 2008; inoltre per il terreno sono state assunte le ipotesi di spinta a riposo in condizioni statiche e spinta attiva in condizioni sismiche. Nel seguito si riportano la pianta e il profilo dell'opera in esame.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Le azioni orizzontali trasversali (vento e sisma) vengono contrastate dagli appoggi.

Nel seguito si riportano la sezione trasversale tipica e sulle spalle, la pianta e il profilo dell'opera in esame.

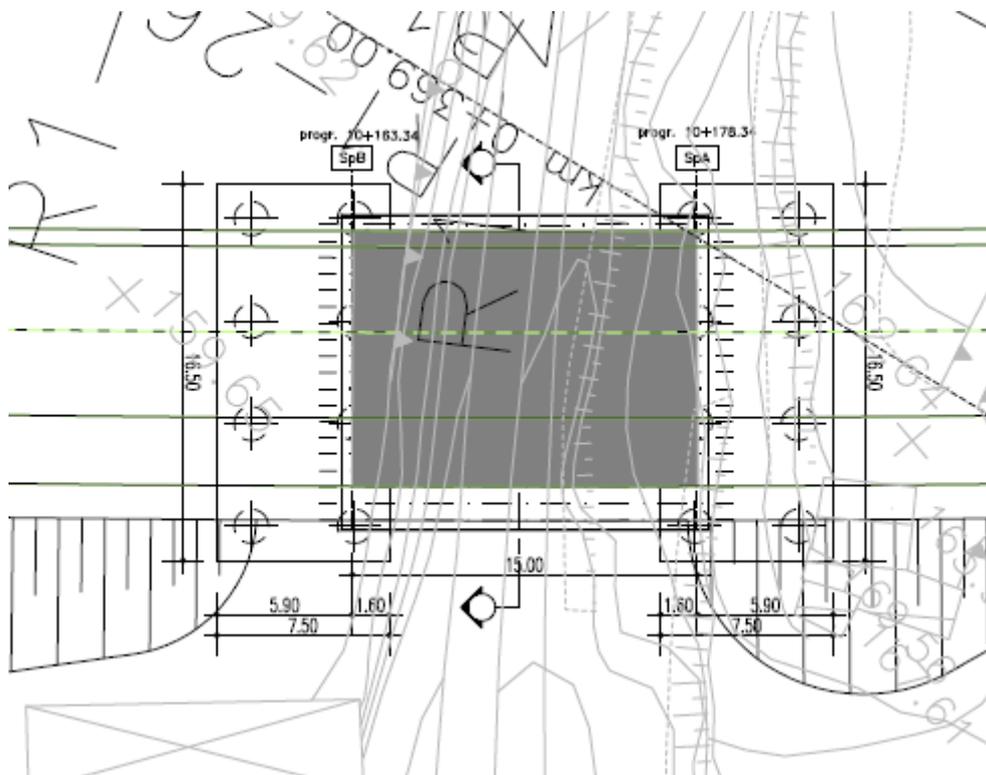


Figura 4.1 – Planimetria viadotto svincolo Annunziata direzione Reggio Calabria.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

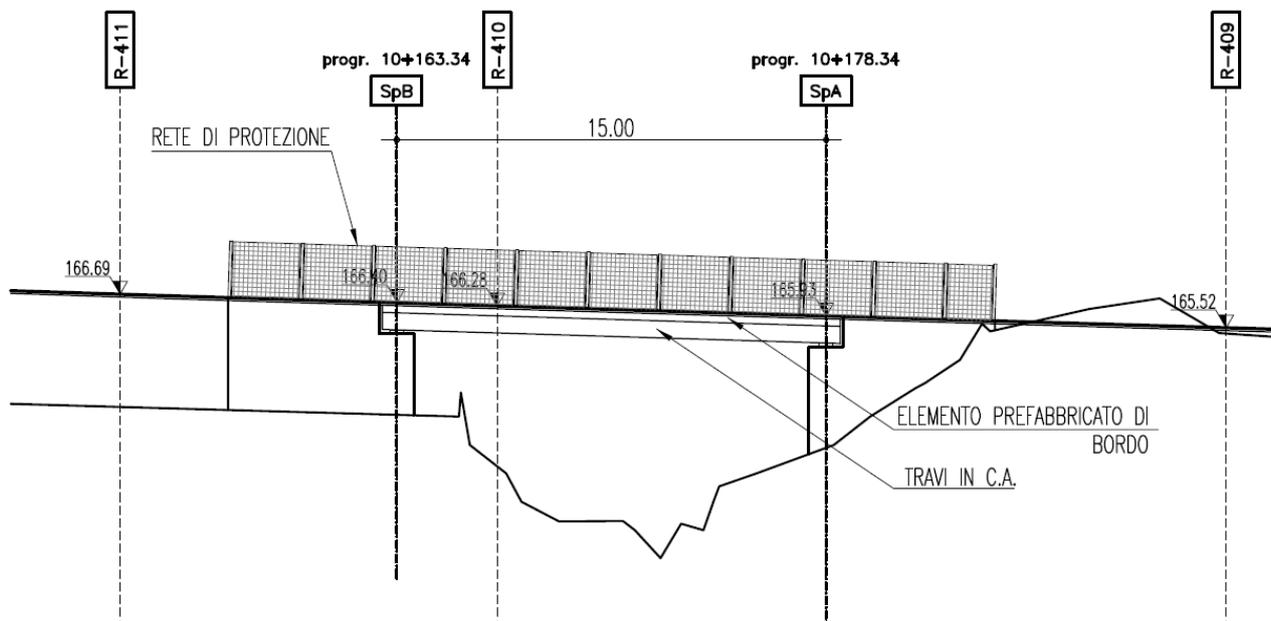


Figura 4.2 - Profilo longitudinale lato monte viadotto svincolo Annunziata direzione Reggio Calabria.

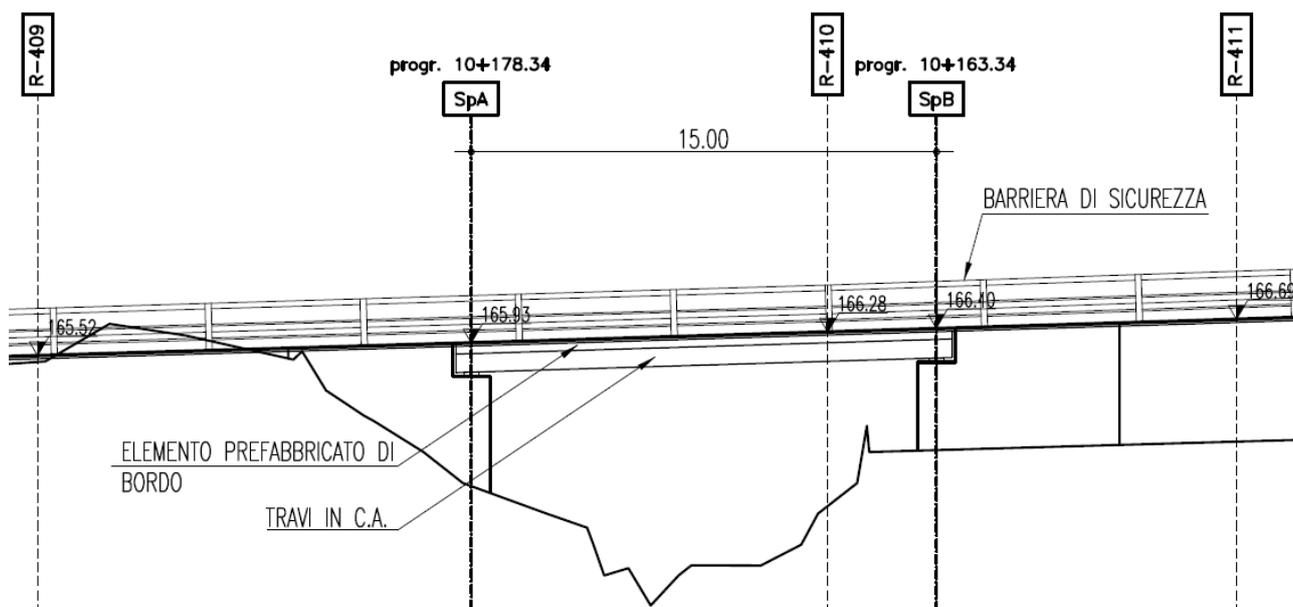


Figura 4.3 - Profilo longitudinale lato valle viadotto svincolo Annunziata direzione Reggio Calabria.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Rev</i></td> <td style="text-align: center;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">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						

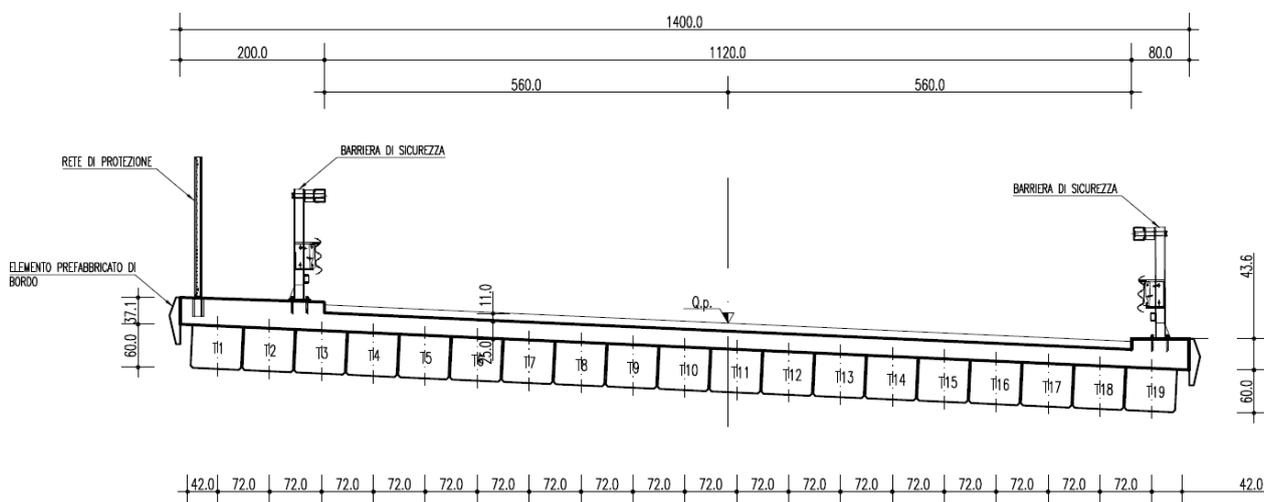


Figura 4.4 - Sezione trasversale impalcato viadotto svincolo Annunziata direzione Reggio Calabria.

L'impalcato ha le seguenti caratteristiche geometriche:

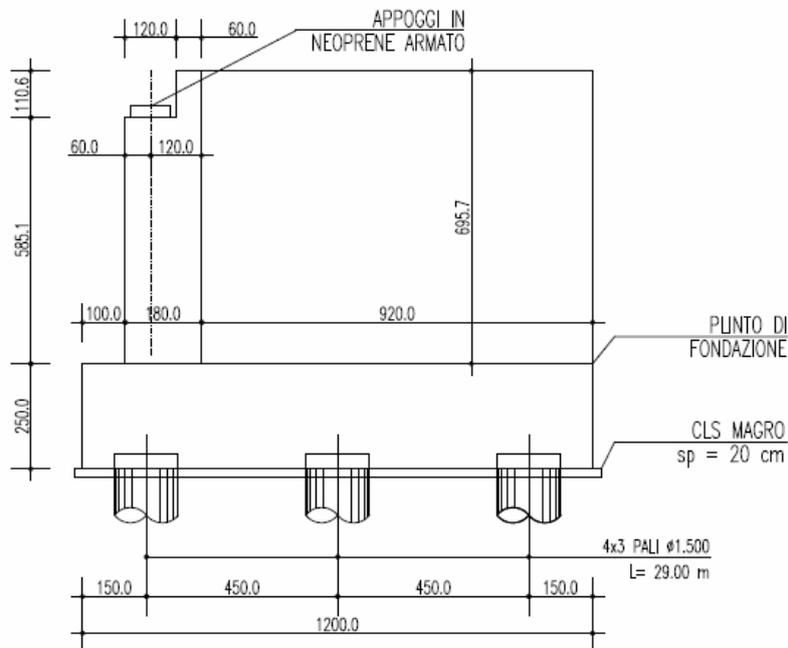
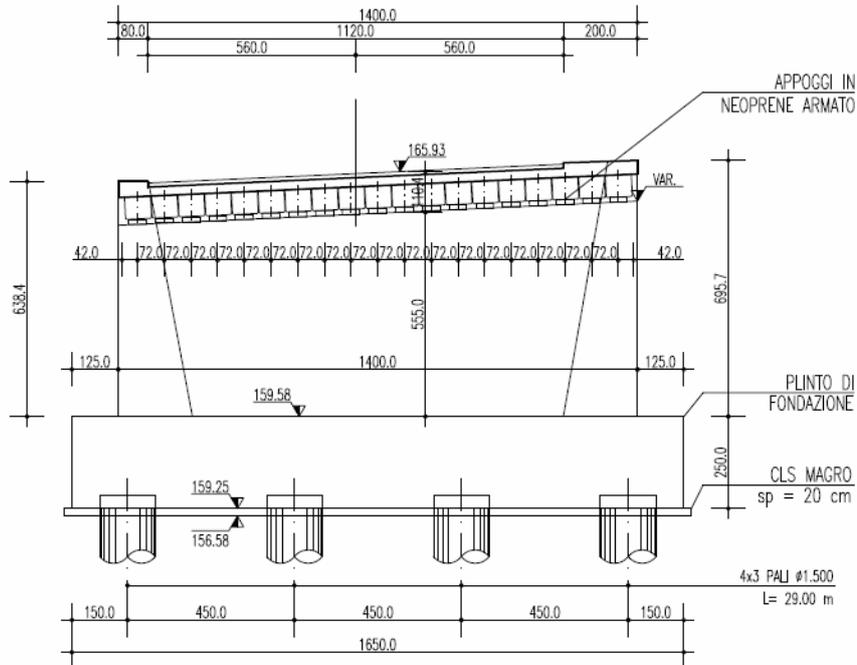
- |                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| • Luce di calcolo                    | 15.0 m |
| • Lunghezza totale                   | 16.2 m |
| • Larghezza impalcato (media)        | 14.0 m |
| • Larghezza carreggiata (media)      | 11.2 m |
| • Larghezza cordolo destro           | 0,8 m  |
| • Larghezza cordolo sinistro (medio) | 2,0 m  |

### **SOTTOSTRUTTURE E FONDAZIONI**

La spalla è costituita da una ciabatta di fondazione a base quadrata con lati di 16.50 m e 12.00 m, di spessore 2.5 m e da un muro frontale di spessore pari a 1.80 m e altezza massima circa 5.50 m. Sul muro frontale corre un muro paraghiaia caratterizzato da spessore 0.60 m ed altezza media pari a 1.10 m. La spalla è dotata di 3 file da 4 pali  $\phi 1500$  mm, per un totale di 12 pali.

Ai lati della spalla sono presenti due muri andatori paralleli all'asse stradale di lunghezza pari a 9.20 m, spessore variabile da 2.00 a 0.80 m e altezza massima pari a circa 6.95 m, che poggiano sulla medesima fondazione del muro frontale.

L'intradosso delle solette di base si trova ad una profondità media di 3.00-4.00 m al di sotto del locale piano campagna.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 4.2 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL LUOGO

### 4.2.1 DESCRIZIONE DELLE LITOLOGIE PREVALENTI

Le litologie prevalenti sono costituite dalla formazione dei Depositi alluvionali e del San Pier Niceto (sia argilloso che conglomeratico)

I Depositi alluvionali sono costituiti da ghiaie poligeniche ed eterometriche, giallastre o brune a clasti prevalentemente arrotondati di diametro da 2 a 30 cm, clasti sostenuti o a supporto di matrice argilloso-sabbiosa, alternate a rari sottili livelli di sabbie argillose rossastre; sabbie ciottolose a supporto di matrice argilloso-terrosa. L'età dei depositi alluvionali terrazzati è Pleistocene medio-superiore.

I depositi alluvionali recenti sono costituiti da limi e sabbie con livelli di ghiaie a supporto di matrice terroso-argillosa, talora terrazzati, localizzati in aree più elevate rispetto agli alvei fluviali attuali. La componente ruditica è rappresentata da ciottoli poligenici, prevalentemente cristallini, da spigolosi a subarrotondati di diametro tra 1 e 10 cm, mediamente di 4-5 cm. L'età dei depositi alluvionali recenti è l'Olocene.

La formazione del San Pier Niceto è costituita essenzialmente da due facies distinte, una basale conglomeratica ed arenacea e l'altra superiore di natura prevalentemente argillosa.

Alla base il conglomerato è costituito da grossi ciottoli poligenici arrotondati e ghiaie di colore marrone-avana in una matrice arenacea rossastra con sabbia sempre più fine man mano che ci si sposta verso l'alto. Nella parte superiore assume l'aspetto di un ammasso roccioso che affiora estesamente in banchi.

Superiormente la porzione arenacea lascia il posto a strati limo argillosi di potenza metrica.

La falda risulta presente nei depositi alluvionali a quota assoluta 150 m s.l.m.

### 4.2.2 INDAGINI ESEGUITE

I sondaggi di riferimento per la presente tratta sono quindi S430, S431, S432, S435, S436, S437, S441, I2, I3 (campagna del 2010), S07, S08 (campagna del 2002).

La categoria di suolo sismico, secondo N.T.C: 2008, risulta pari a **C** (sismica a rifrazione SR11, S441), come si evince dalle tabelle e figure in Allegato.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Le prove utilizzate nella caratterizzazione sono:

#### Depositi alluvionali

- prove SPT (S437 ,S441)
- prove sismiche a rifrazione (S432-SR11)
- prove di laboratorio per la determinazione delle granulometrie e delle caratteristiche fisiche (S430, S431, S432, S436, S437)

#### San Pier Niceto argilloso

Le prove utilizzate nella caratterizzazione sono:

- prove pressiometriche (S432, S454)
- prove dilatometriche (S459bis, S453)
- prove sismiche a rifrazione (SR2, SR3, SR5)
- prove di laboratorio per la determinazione dei parametri di resistenza (S457, S465)
- prove di laboratorio per la determinazione dei parametri fisici.

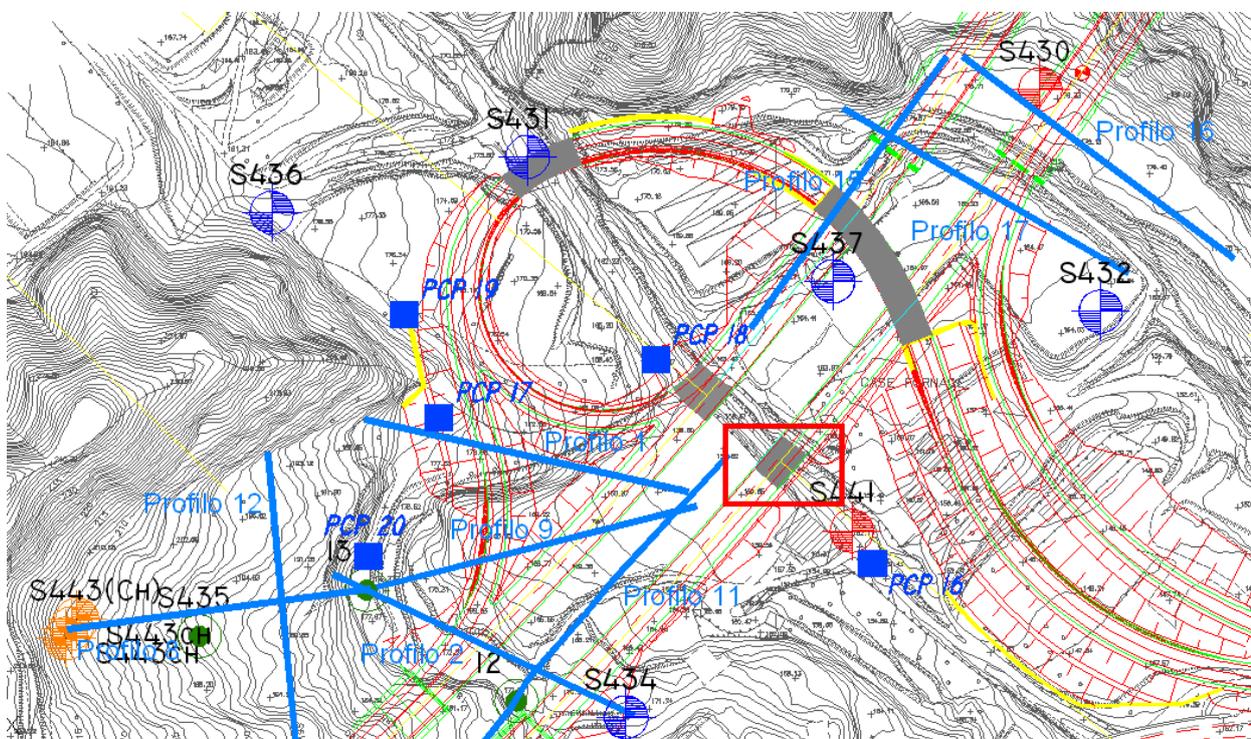
#### San Pier Niceto Conglomeratico

Le prove utilizzate nella caratterizzazione sono:

- prova sismica a rifrazione ( PR18 SR)
- prova down hole (S464)
- prove dilatometriche (S464bis, S443, S456)
- prove di laboratorio per la determinazione delle caratteristiche fisiche e della granulometria (S429bis, S434, S456,S464, S465)

Si riporta nella figura successiva uno stralcio planimetrico delle indagini geognostiche eseguite.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



LEGENDA INDAGINI PROGETTO DEFINITIVO	
	PDC PROVA DI CARICO SU PIASTRA
	SR STESA SISMICA
	SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO
	SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO PZ.Tubo aperto
	SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO PZ.Casagrande
	FORO PER POSA DI TUBAZIONE INCLINOMETRICA

#### 4.2.3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Per i criteri e per gli aspetti generali di caratterizzazione si rimanda a quanto riportato nella relazione Elab. CG0800PRBDCSBC8G00000001A. Per la definizione delle categorie di suolo si rimanda al medesimo elaborato ed alla relazione sismica di riferimento.

#### Depositi alluvionali

Per quanto riguarda le caratteristiche fisiche l'andamento del fuso (campioni dei sondaggi

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

S432,S437,S431,S441,S436) evidenzia che i litotipi corrispondono a materiali a grana grossa (ghiaie 39%), materiali intermedi (sabbie 45%). Il contenuto di fino è mediamente del 14%.

Con riferimento al fuso medio:

- Il valore di  $D_{50}$  è pari a 0.8mm
- Il valore di  $D_{60}$  è pari a 2 mm
- Il valore di  $D_{10}$  è pari a 0.01 mm

Il peso di volume dei grani medio  $\gamma_s$  è risultato pari a circa 26.5 kN/m<sup>3</sup>.

Per quanto concerne lo stato iniziale ed i parametri di resistenza dalle prove SPT si ha:

- **Dr:** I valori di  $N_{spt}$  sono stati corretti con il fattore correttivo  $C_{sg}=0.75$  corrispondente al  $d_{50}=0.8mm$ . I due valori di  $N_{SPT}$  a 4.5m e a 6m, riscontrati nel sondaggio S441 nel livello limoso tra 3.6m e 7.4m da p.c., non sono stati ritenuti rappresentativi e non sono stati utilizzati per la caratterizzazione della resistenza.
- **$e_0$ :** a partire dal  $d_{50}$  stimato si ottiene di  $e_{max}-e_{min}$  pari a 0.305 stimando per  $e_{max}$  un valore pari a 0.7: a partire dai valori di Dr è stato possibile determinare i valori di  $e_0$  in sito; il valore di  $e_0$  è mediamente pari a 0.5-0.6.
- **$\gamma_d$  :** si ottiene un pari a 17-19 KN/m<sup>3</sup>
- **$K_0$ :** si considera la relazione di Jaky.

<b>z(m)</b>	<b>Dr(%)</b>	<b><math>e_0</math></b>	<b><math>K_0</math></b>	<b><math>\phi'_p</math> (<math>p_{ff}=0-272KPa</math>) (°)</b>	<b><math>\phi'_{cv}</math> (°)</b>
<b>0-10</b>	<b>40-70</b>	<b>0.5-0.6</b>	<b>0.38-0.40</b>	<b>37-38</b>	<b>33</b>

Per i parametri di deformabilità dalle sismiche a rifrazione (S432-SR11) si ottengono valori di  $V_s$  che vanno mediamente da 200 m/s a 300 m/s.

$G_0$  varia conseguentemente da 80 a 150 Mpa fino a 10-15m di profondità.

I parametri ricavati dalle sismiche a rifrazione possono ritenersi rappresentativi della deformabilità

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

delle lenti limose circoscritte che possono riscontrarsi (S441).

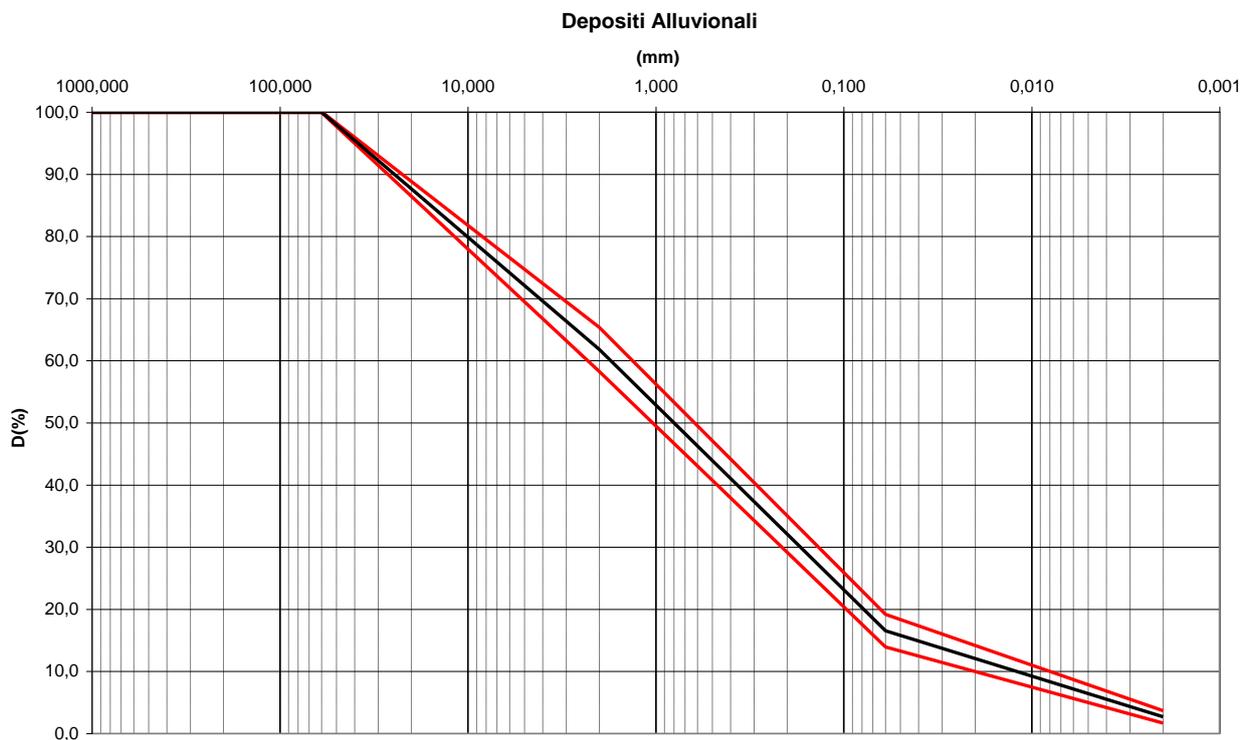
I valori di  $G_o$  da prove SPT hanno invece un andamento compatibile con le sismiche che, stimato graficamente con una linea di tendenza, risulta pari a:

$$G_o = 34 \cdot (z)^{0,65}$$

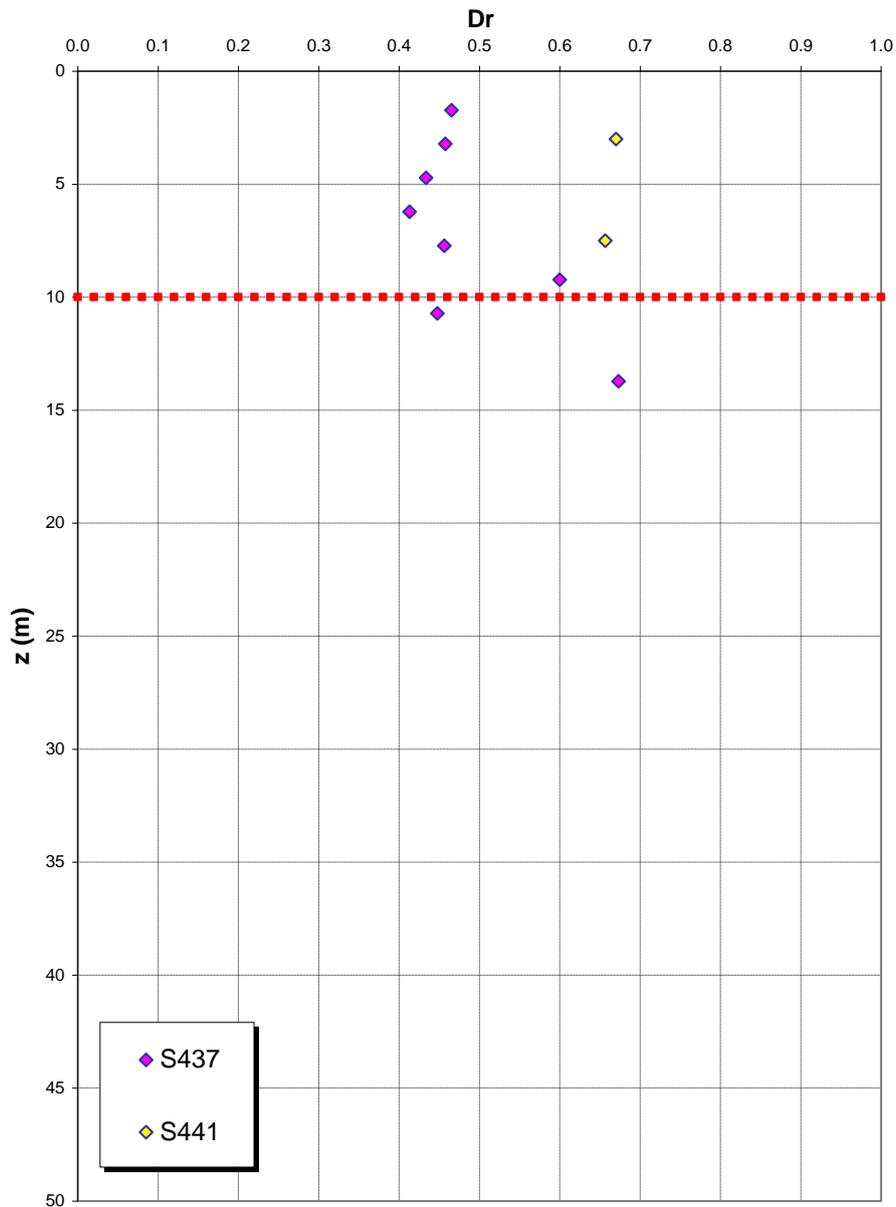
$$E_o = 80 \cdot (z)^{0,65}$$

$$E = (10 \div 25) \cdot (z)^{0,65}$$

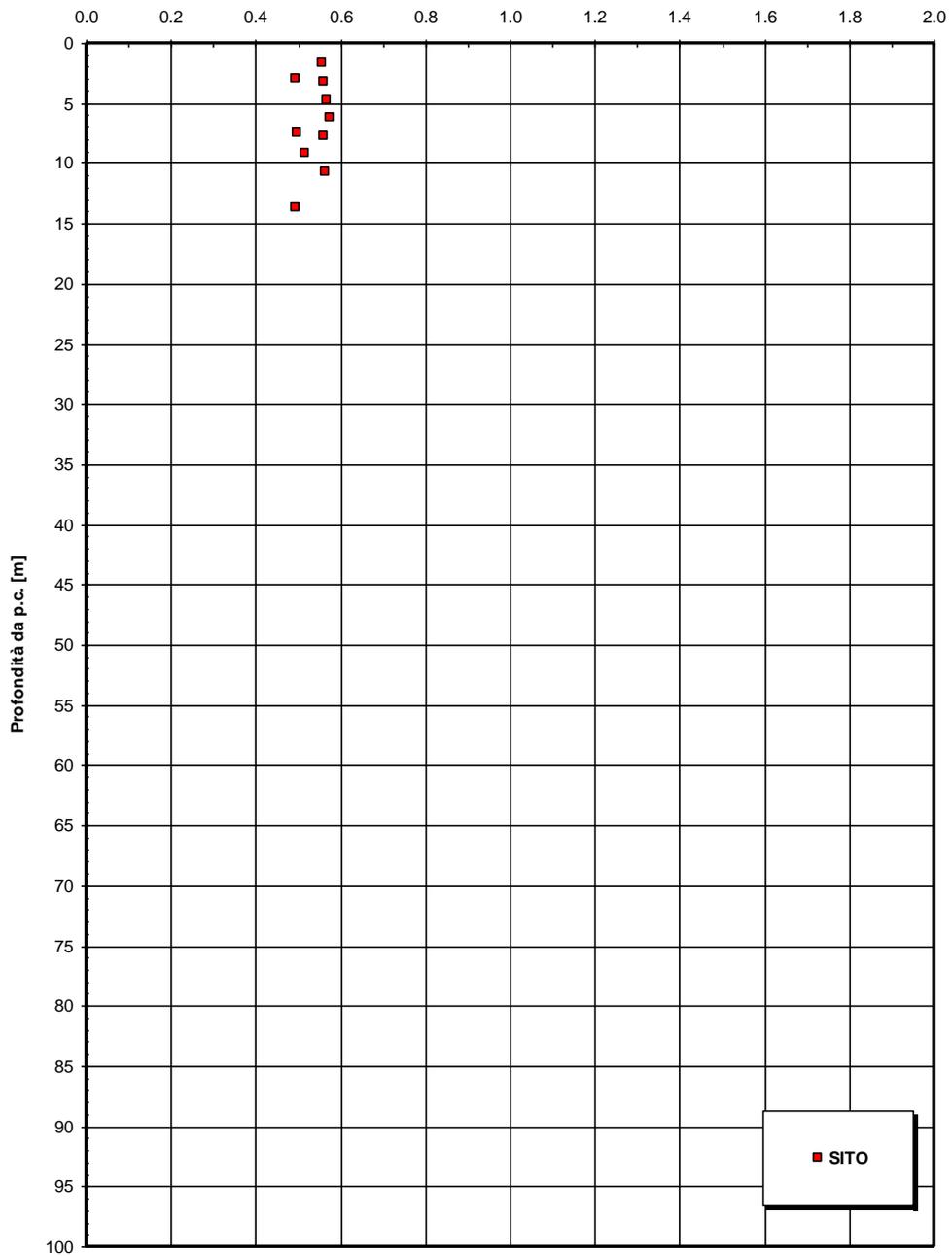
pari rispettivamente a circa  $1/10 \div 1/5$  (medio - alte deformazioni) ed ad  $1/3$  di quelli iniziali (piccole deformazioni). I valori minimi si riferiscono al progetto delle fondazioni.

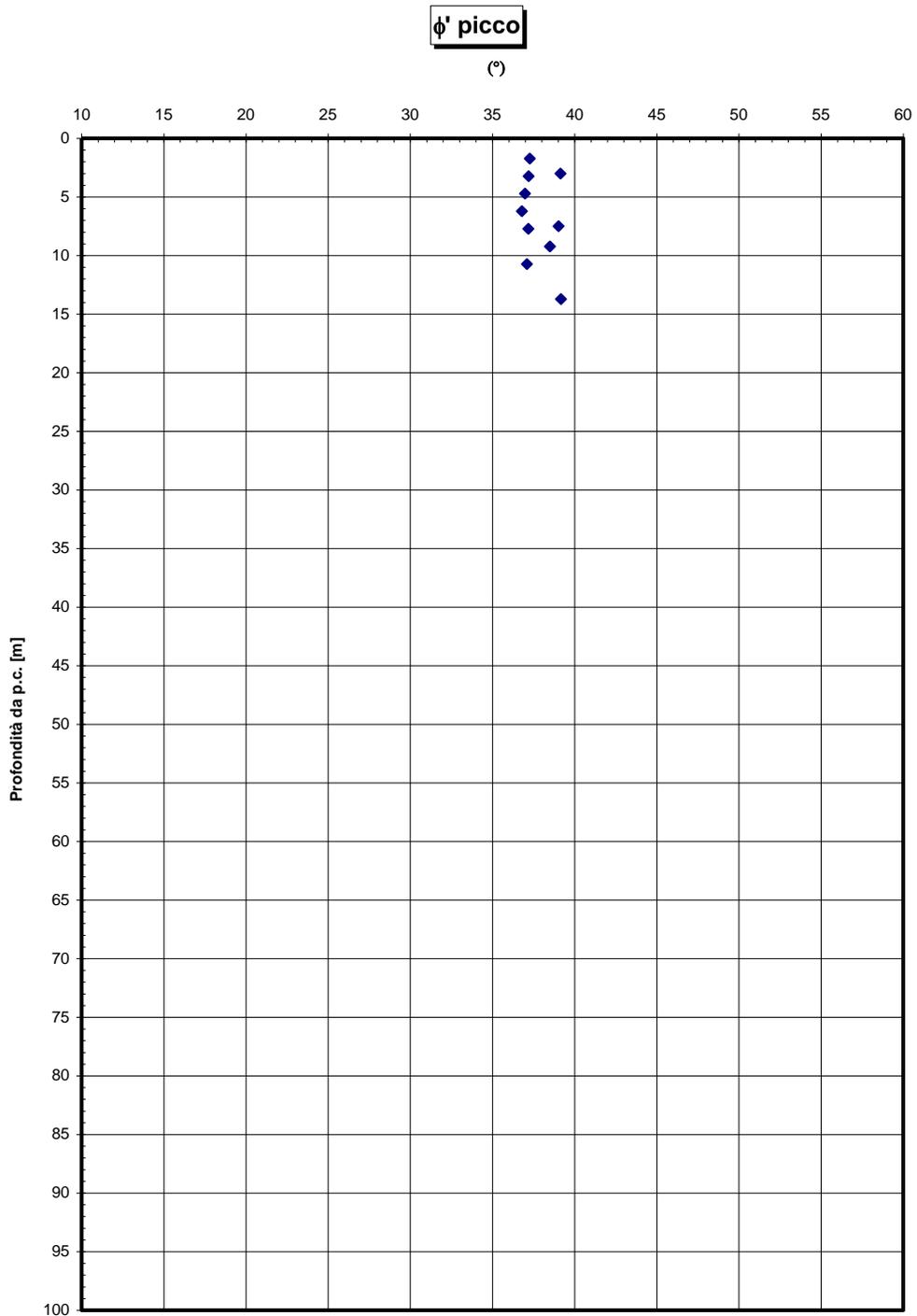


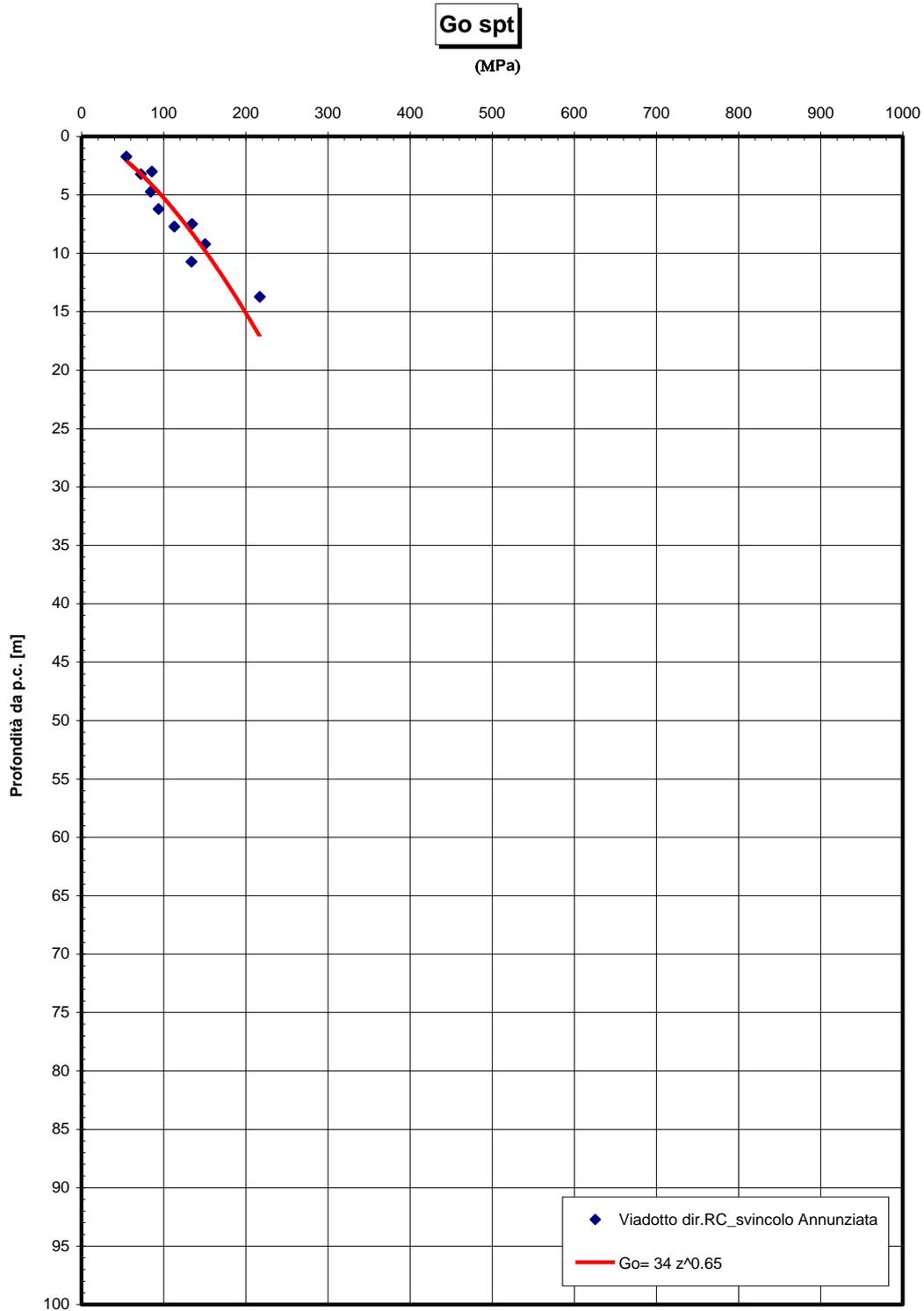
**Dr Skempton (1986)  
Componente sabbiosa prevalente  
DEPOSITI ALLUVIONALI**



eo



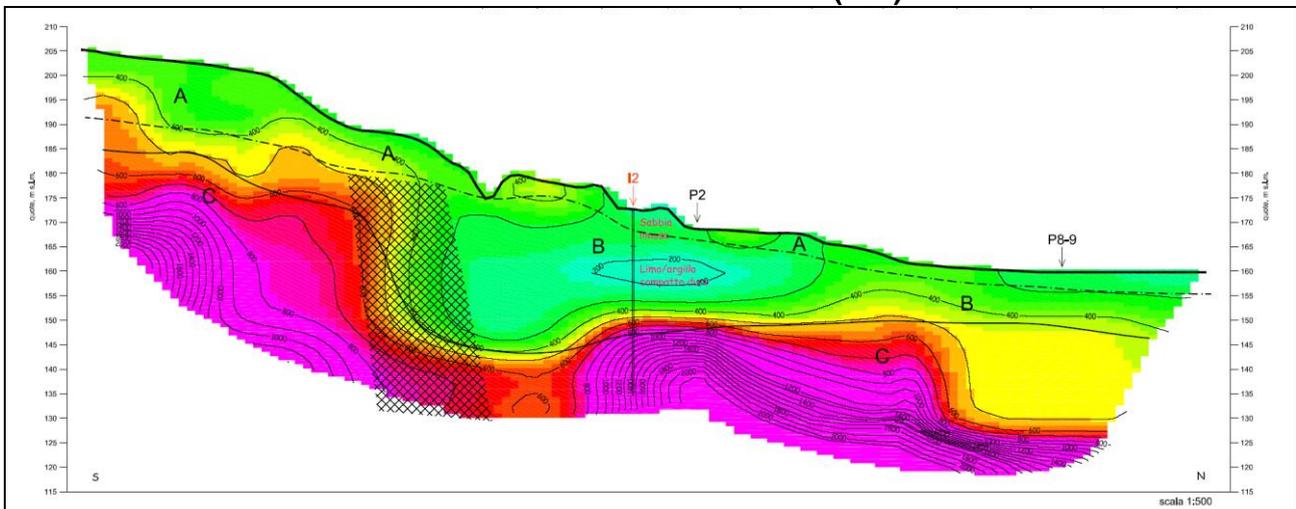




**S441 - Nspt30**

FORO	z [m]	Nspt	hi				
S441	3	25	3	0,12	0,649848	46	C
S441	4,5	20	1,5	0,075			
S441	6	26	1,5	0,057692			
S441	7,5	32	1,5	0,046875			
S441	9	57	1,5	0,026316			
S441	10,5	61	1,5	0,02459			
S441	12	40	1,5	0,0375			
S441	13,5	85	1,5	0,017647			
S441	15	73	1,5	0,020548			
S441	16,5	69	1,5	0,021739			
S441	18	61	1,5	0,02459			
S441	19,5	71	1,5	0,021127			
S441	21	75	1,5	0,02			
S441	22,5	51	1,5	0,029412			
S441	24	71	1,5	0,021127			
S441	25,5	46	1,5	0,032609			
S441	27	100	1,5	0,015			
S441	28,5	100	1,5	0,015			
S441	30	65	1,5	0,023077			

**Sismica a rifrazione SR11 – Vs (m/s)**



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### San Pier Niceto argilloso

Per quanto riguarda le caratteristiche fisiche il fuso granulometrico mostra che le caratteristiche sono tipiche di materiali a grana medio fine con percentuale media di sabbia al 20%, limo al 62% ed argilla al 18%. Si ha che  $D_{50}=0.06$ ,  $D_{60}=0.15$  e  $D_{10}=0.001$  mm.

Per quanto riguarda i limiti di Atterberg si ha  $W_n=30\%$ ,  $W_l=50\%$ ,  $W_p=35\%$ ,  $IP=15\%$

Dalla carta di Casagrande la posizione corrisponderebbe a limi di medio alta plasticità.

Per il peso di volume  $\gamma$  si assume un valore medio di  $20\text{KN/m}^3$ .

Per quanto concerne le caratteristiche di resistenza non si hanno a disposizione localmente delle prove per cui si fa riferimento alle 6 prove di laboratorio (4TD e 2 CID) su campioni prelevati fra 6m e 35m in altri sondaggi (S457, S465) .

Dalle prove di taglio diretto (campioni sondaggio S457) si ottengono i seguenti range di valori di resistenza di picco:

$$c'_{\text{picco}} = 0,050-0,080 \text{ MPa}$$

$$\varphi'_{\text{picco}} = 27^\circ \div 20^\circ$$

Per i valori di resistenza in condizioni di stato critico si ottiene:

$$c'_{\text{cv}} = 0 \text{ MPa}$$

$$\varphi'_{\text{cv}} = 25^\circ - 20^\circ$$

Nelle prove triassiali (campioni sondaggio S465) si ottengono i seguenti range di valori di resistenza di picco:

$$c'_{\text{picco}} = 0,016-0,020 \text{ MPa}$$

$$\varphi'_{\text{picco}} = 21^\circ \div 22^\circ$$

Per i valori di resistenza in condizioni di stato critico si ottiene:

$$c'_{\text{cv}} = 0 \text{ MPa}$$

$$\varphi'_{\text{cv}} = 21^\circ$$

Dalle correlazioni con i valori di  $N_{\text{spt}}$  si ottiene un valore di  $C_u$  mediamente pari a 370 kPa.

Per i parametri di deformabilità, dalle prove dilatometriche (S459bis, S453) effettuate sulla componente argillosa si evince un range del modulo pari a 55-75 Mpa.

Un valore singolo (S459bis a 54m) raggiunge invece 1000 MPa ma sembrerebbe essere stato effettuato su un livello conglomeratico che si alterna a quello argilloso.

Dalle prove di sismica a rifrazione (S454-SR3 e SR5 e S434-SR2) si ottengono valori medi di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

velocità  $V_s$  ascrivibili all'intero pacchetto del San Pier Niceto argilloso molto elevate e pari a 800 e 1500 m/s fra 20 e 50m di profondità.

A tali valori corrisponderebbe un range di moduli  $G_0$  pari a 1100 e a 4600 MPa, e quindi di  $E_0$  pari a 2640 e a 11000 MPa con  $E' = 264-1100$  MPa e  $1100-3670$  MPa (rispettivamente pari a  $1/10 E_0$  ed  $1/3 E_0$ ).

Tale discrepanza con i valori ottenuti dalle pressiometriche possono ascrivarsi

- alla difficoltà, nell'interpretazione delle sismiche a rifrazione, nell'individuare il sismostrato esattamente riferibile alla formazione in esame che rende eventualmente affetta da errore l'individuazione dell'esatto valore di  $V_s$ ,
- alla presenza, all'interno del pacchetto del San Pier Niceto argilloso, di strati arenacei cementati che condizionano la risposta elastica globale.
- all'eventuale disturbo del foro in cui sono state effettuate le prove pressiometriche
- al fatto che quasi tutte le dilatometriche (tranne S459bis) forniscono valori di primo carico.

Si ritiene cautelativo assumere, per la sola facies prettamente argillosa, un modulo operativo pari a:

$E' = 70 \div 120$  MPa

compatibili rispettivamente con:

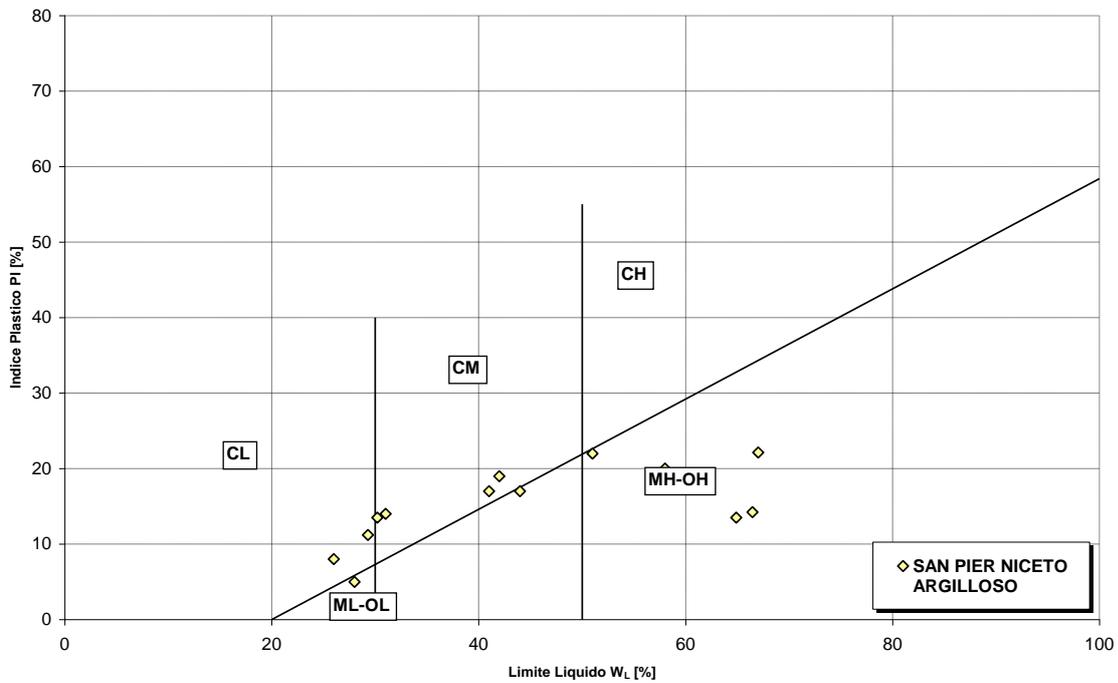
$E' = 200$  Cu (valore minimo)

$E' = 400$  Cu (valore massimo)

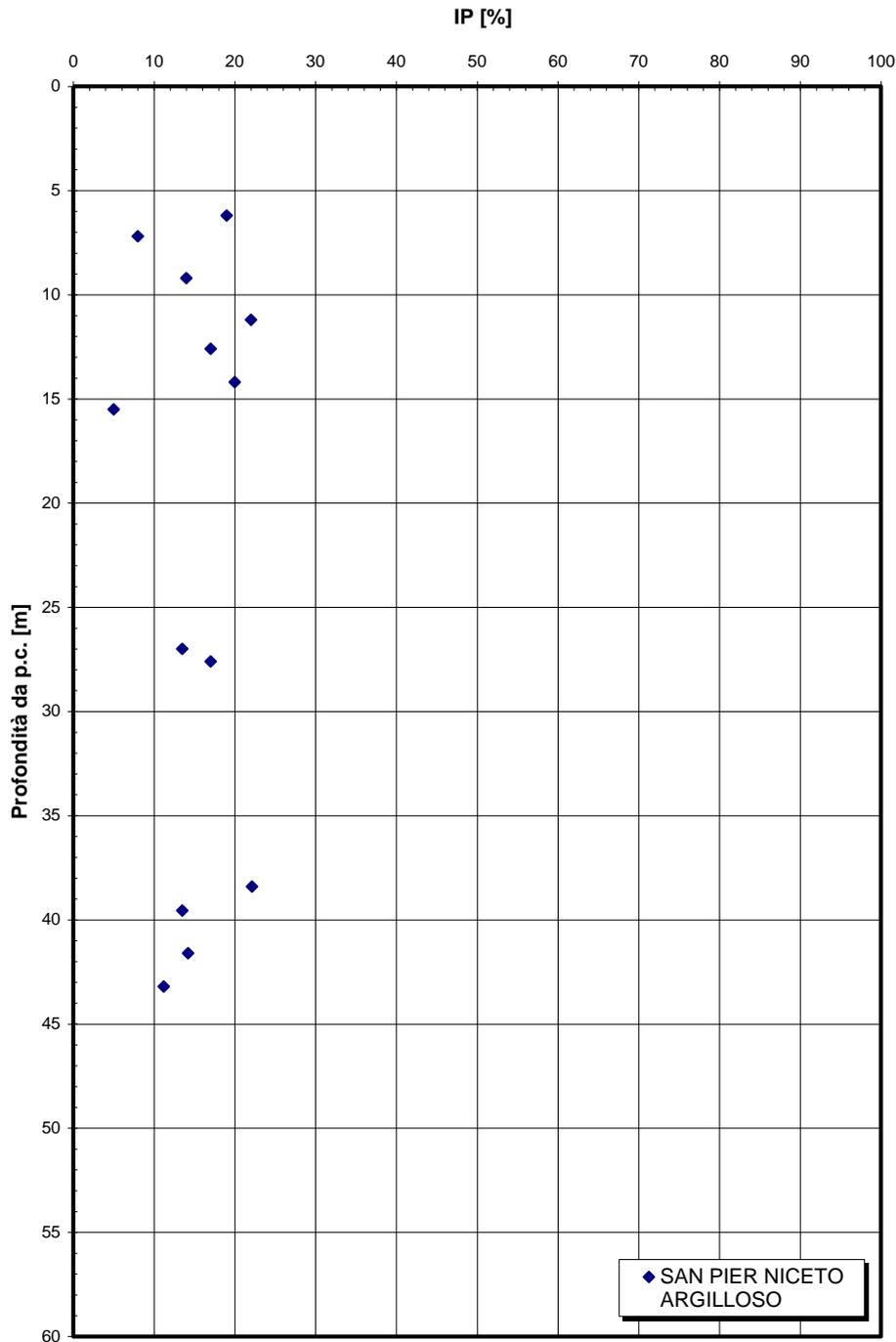
avendo posto un valore cautelativo di  $Cu = 300$  Kpa



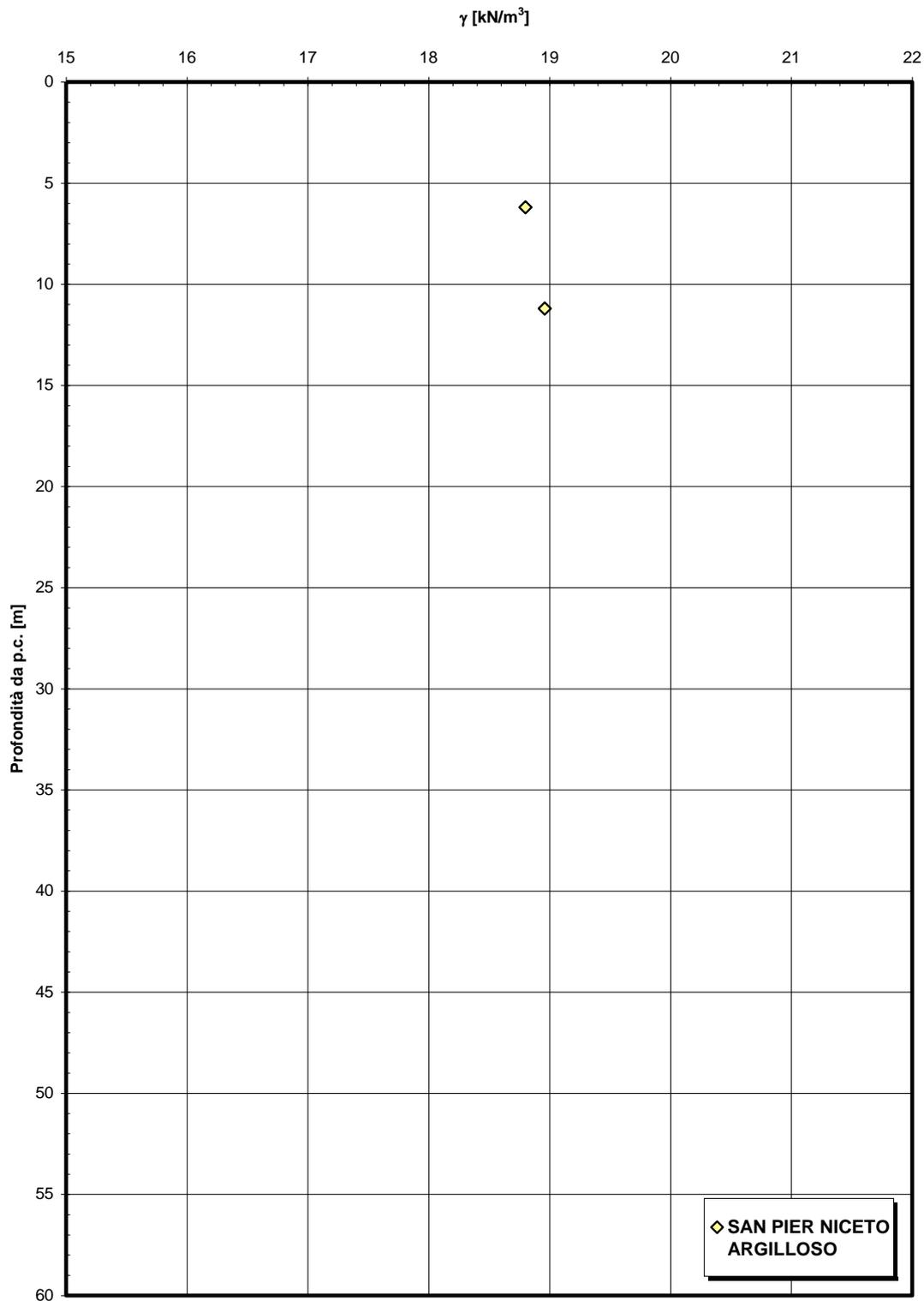
**Carta di Plasticità di Casagrande**



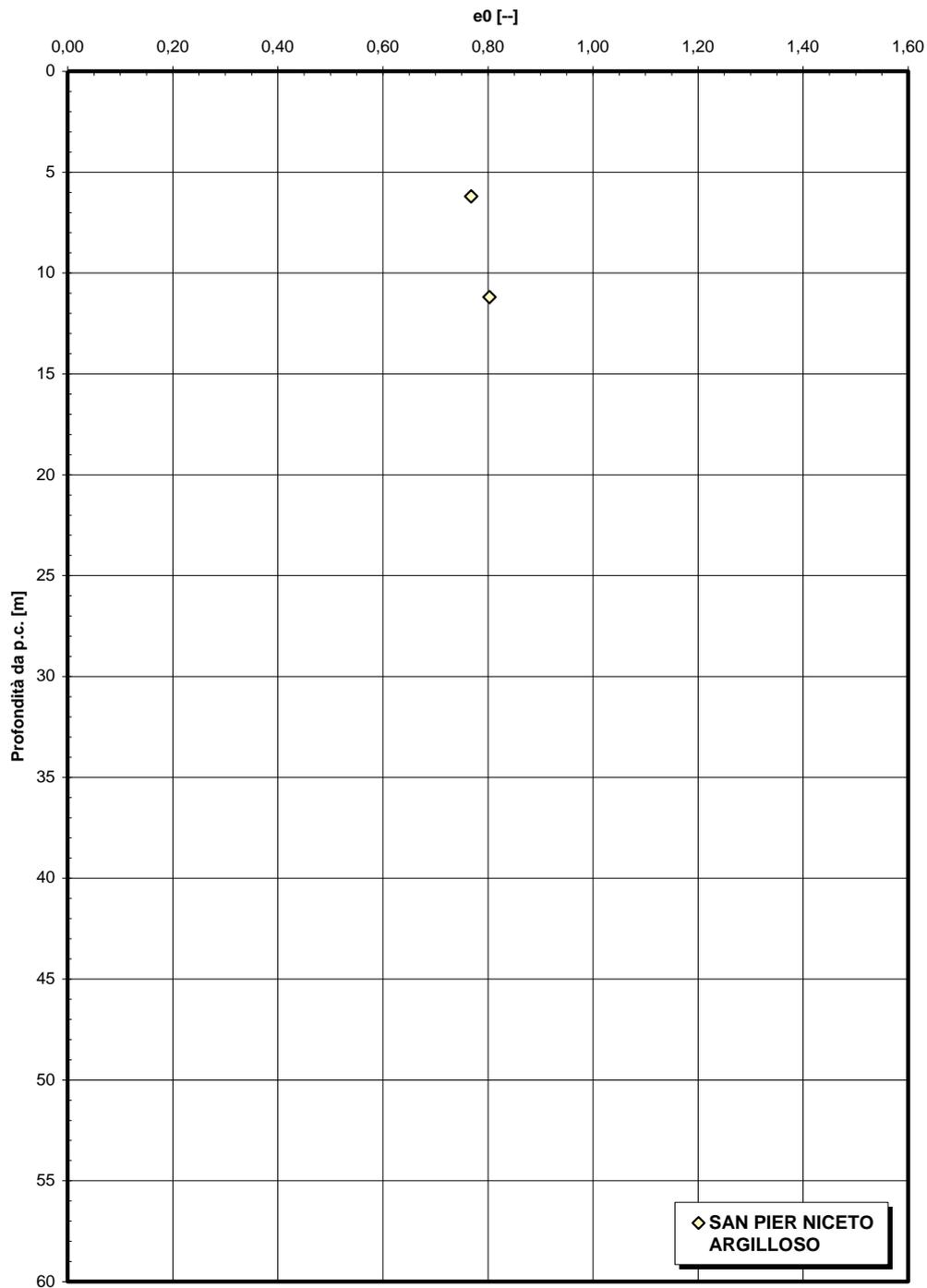
**Indice di plasticità**



**Peso di volume naturale**

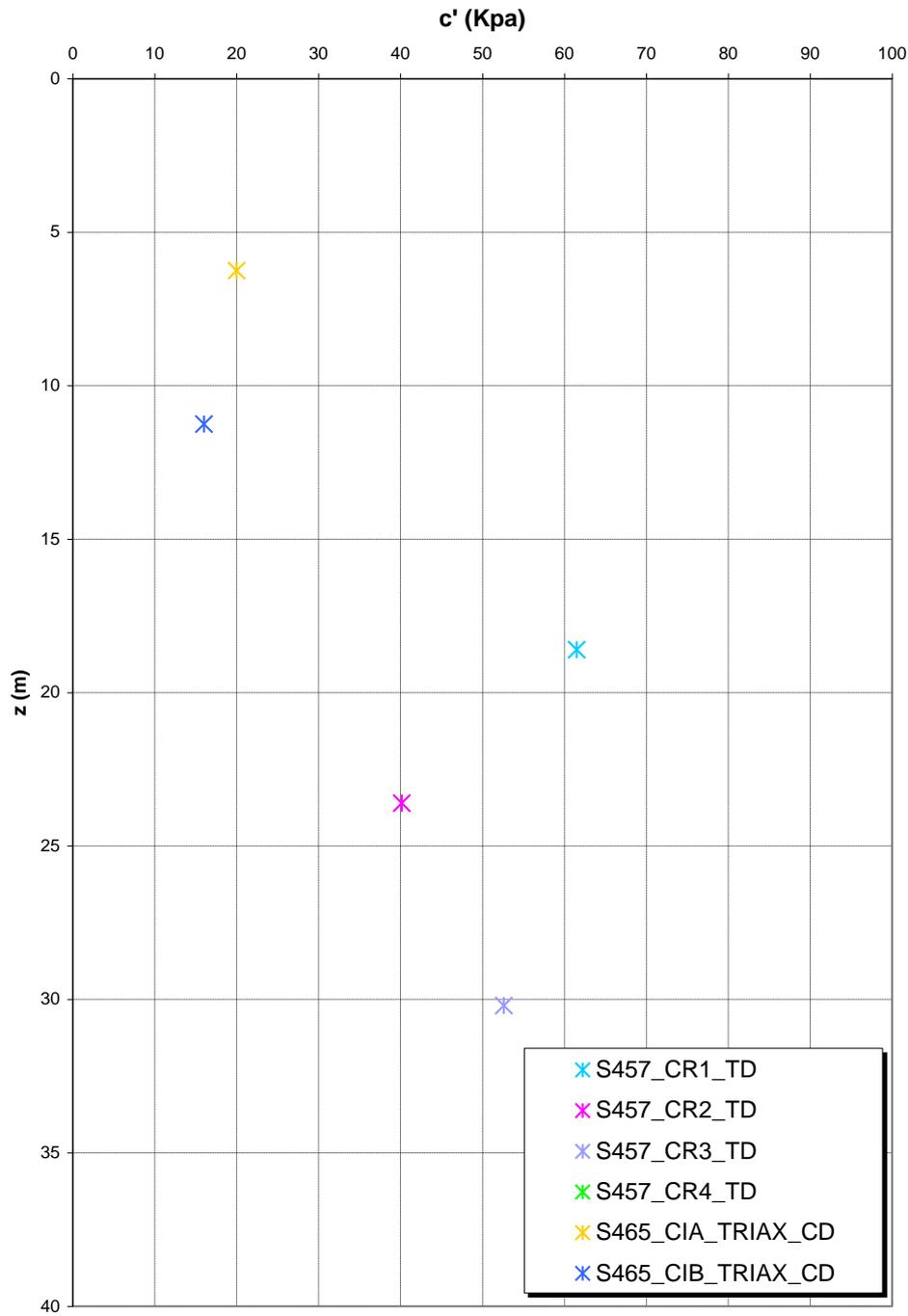


**Indice dei vuoti iniziale**

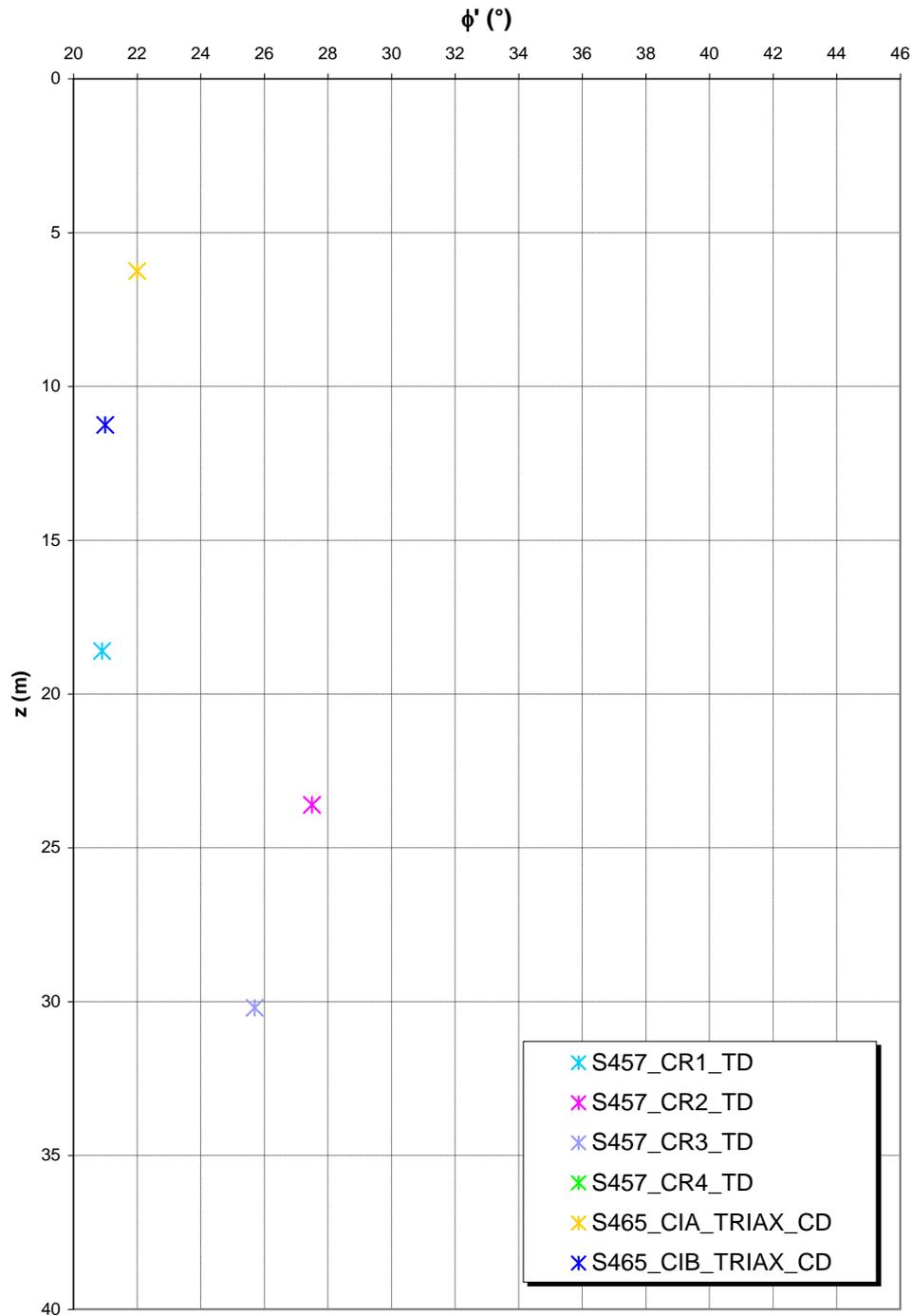


◇ SAN PIER NICETO  
ARGILLOSO

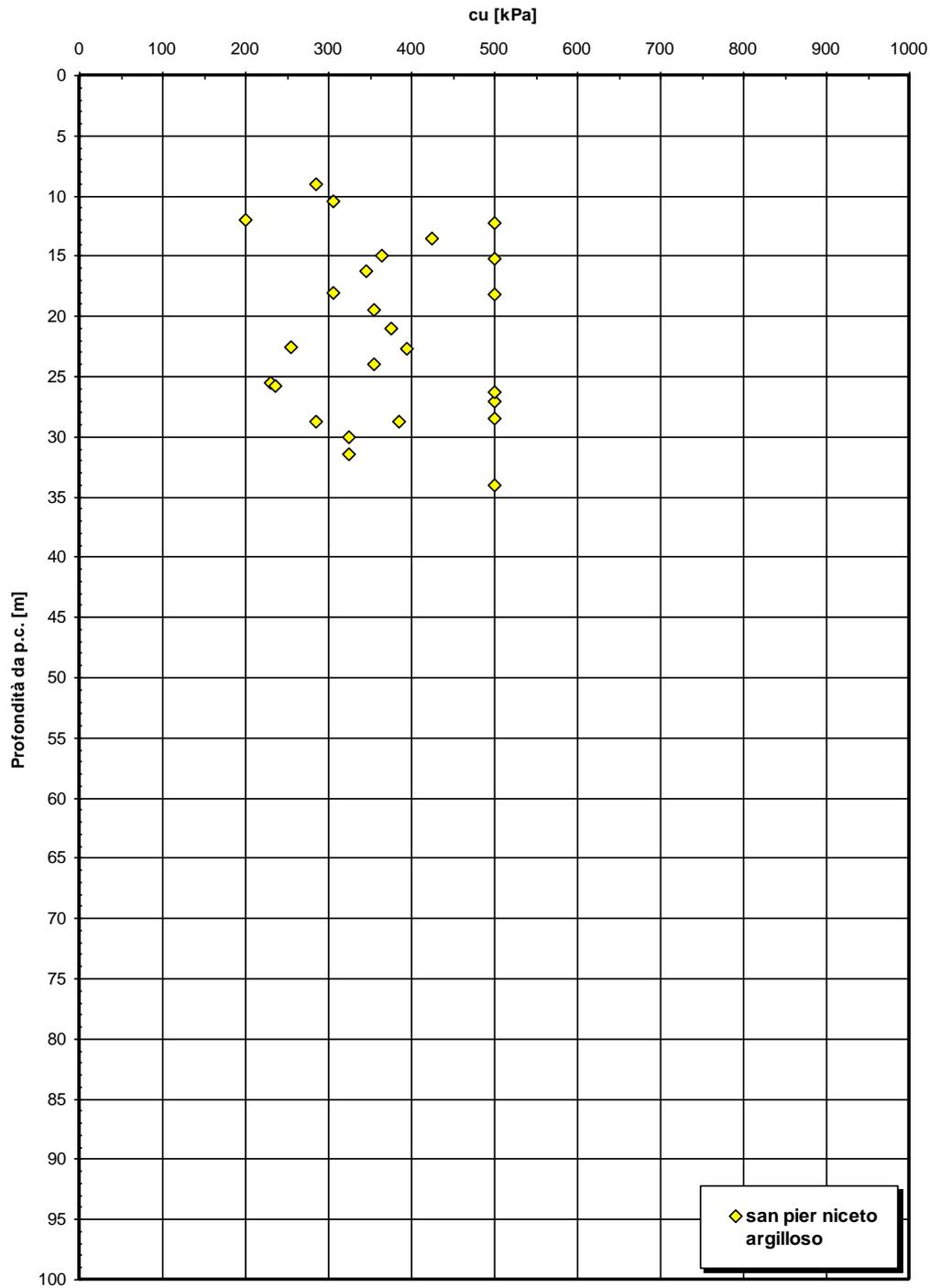
**Coesione  
SAN PIER NICETO ARGILLOSO**

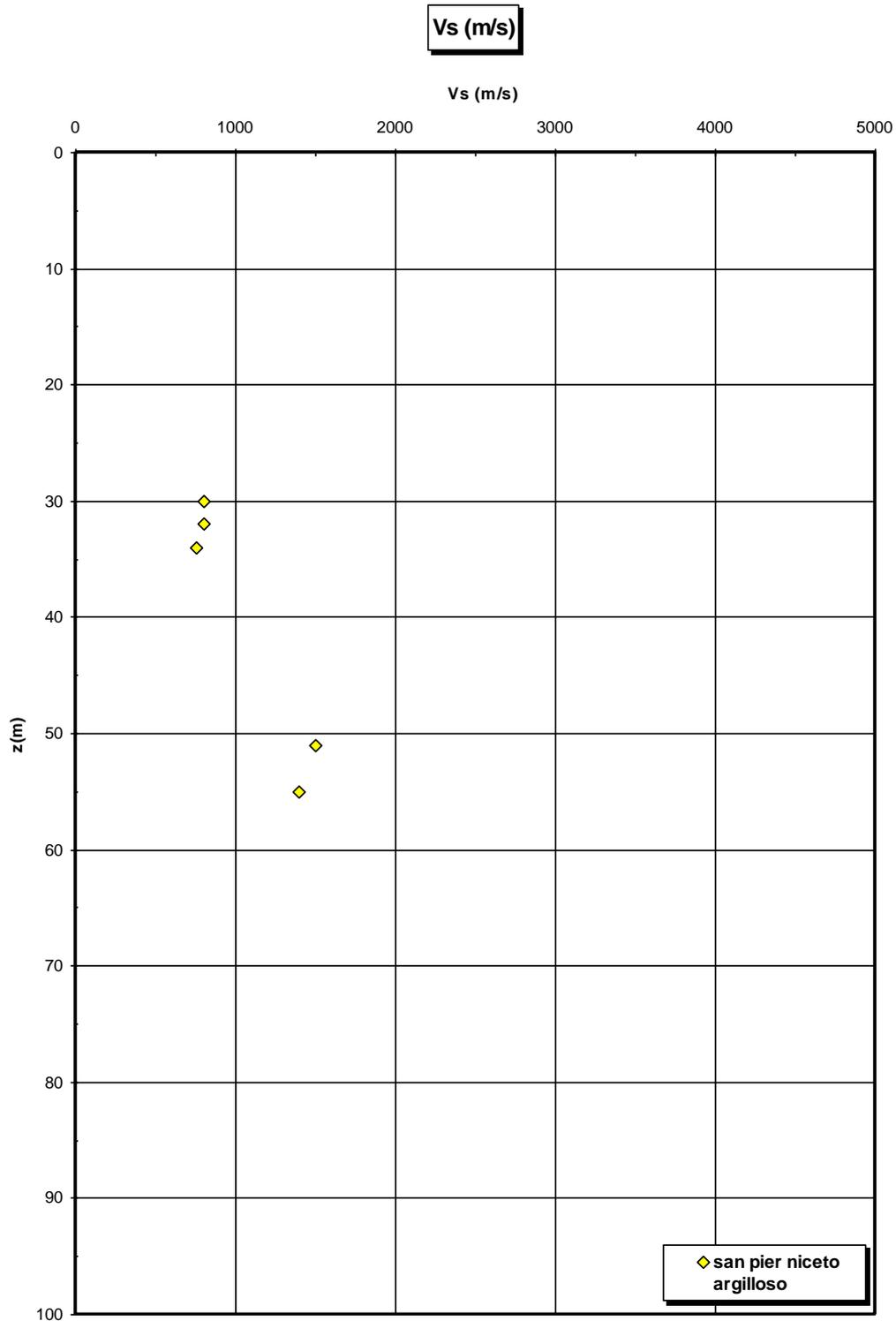


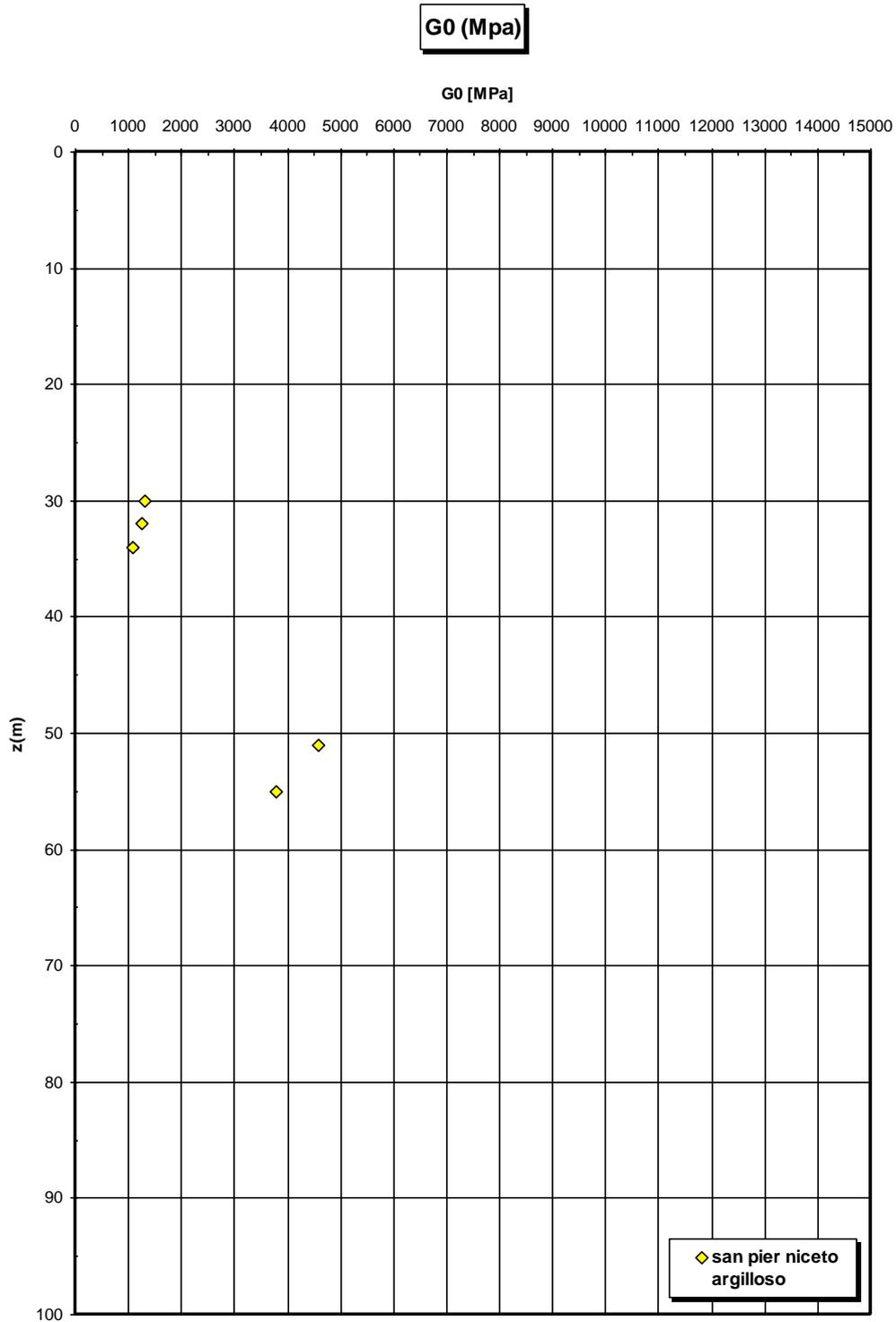
**Angolo di attrito  
SAN PIER NICETO ARGILLOSO**



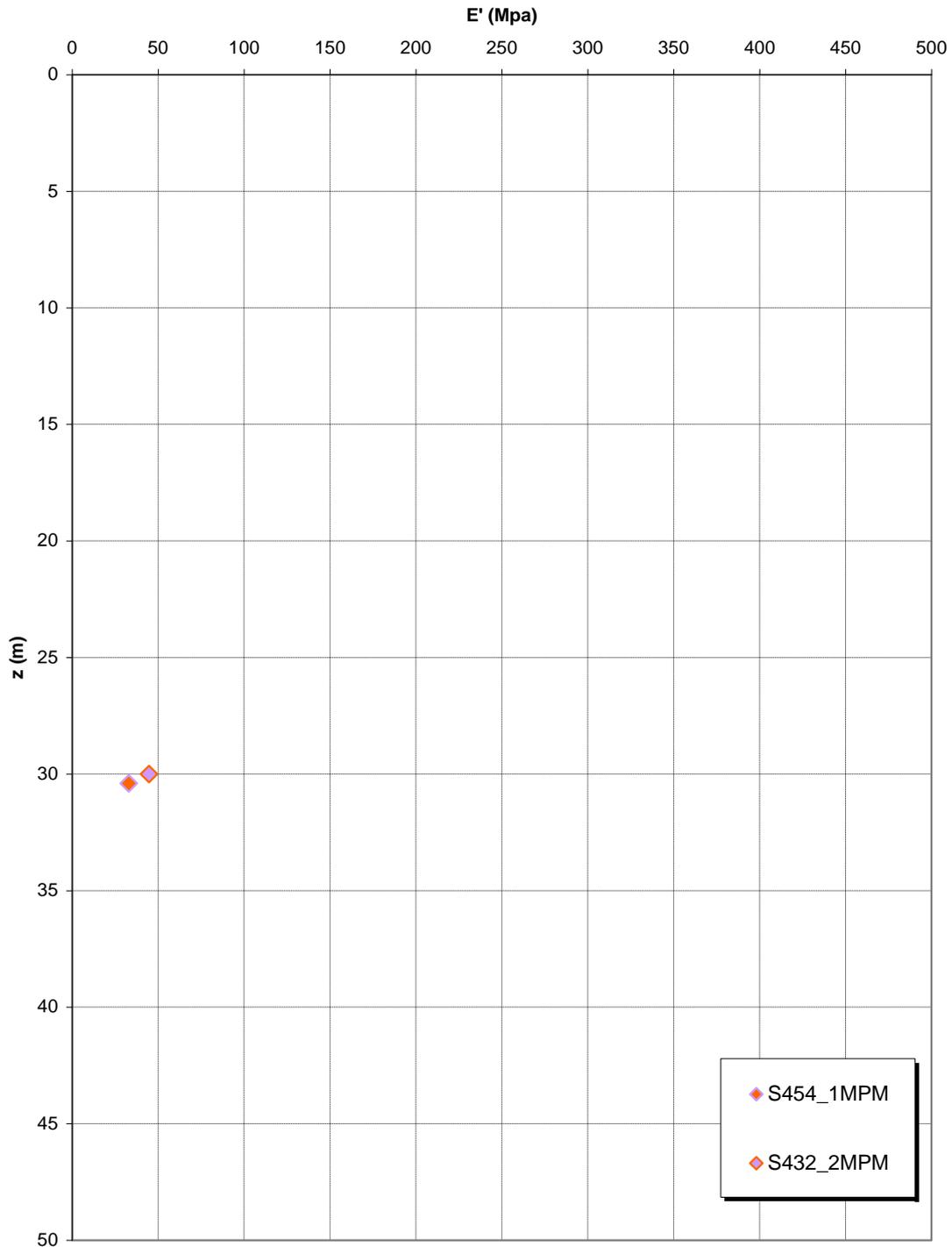
**Coesione non drenata da prove SPT**



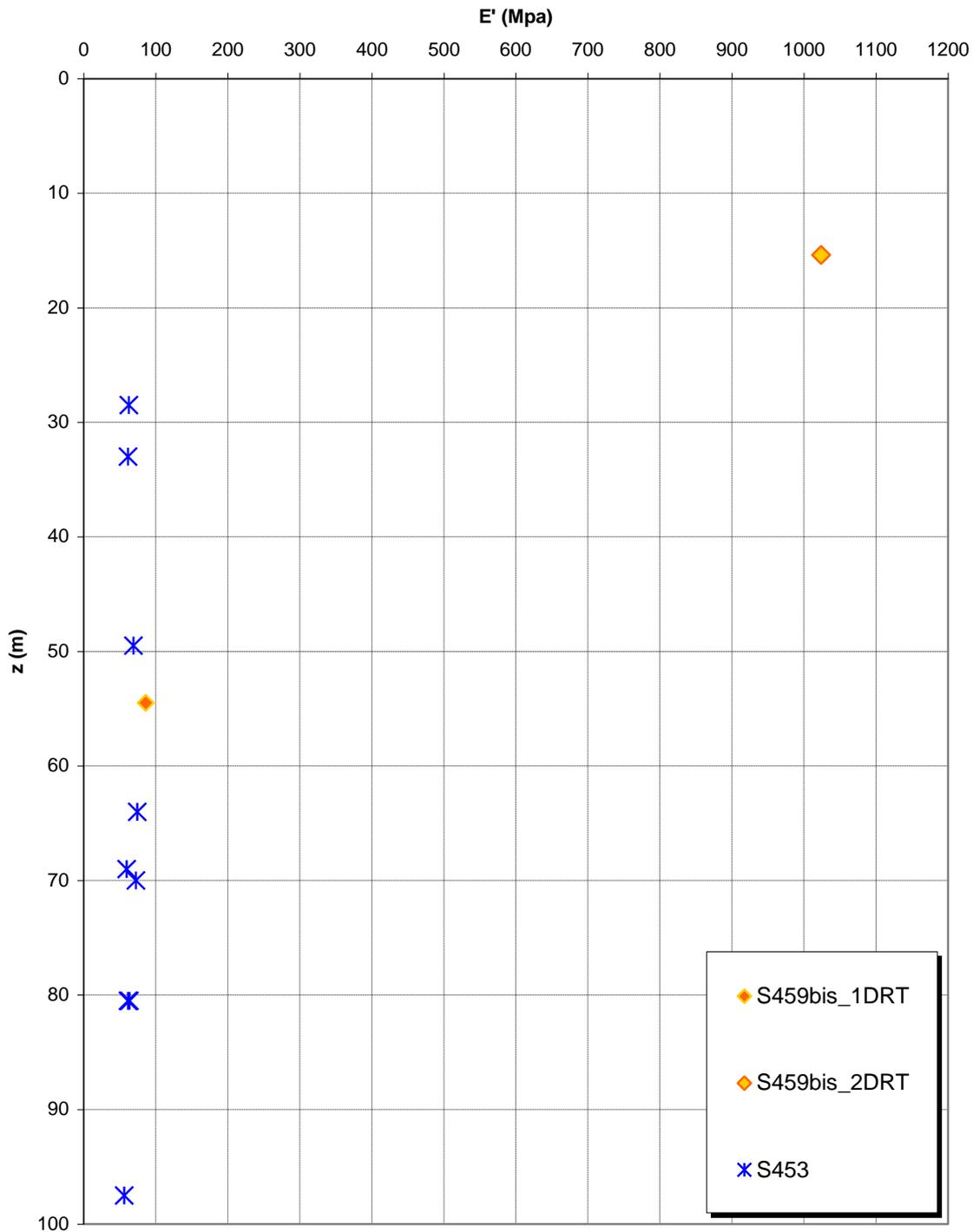




**Prove pressiometriche  
SAN PIER NICETO ARGILLOSO**



**Prove dilatometriche  
SAN PIER NICETO ARGILLOSO**



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## San Pier Niceto Conglomeratico

Per quanto riguarda le caratteristiche fisiche del materiale, l'andamento del fuso conferma che le caratteristiche granulometriche dei materiali in esame sono tipiche sia di materiali a grana grossa (ghiaie 23%) che di materiali intermedi (sabbie 48%). Il contenuto di fino è mediamente del 25%. Sia per la porzione conglomeratica che per quella sabbiosa risulta infatti che:

- Il valore di  $D_{50}$  è pari a 0.3mm
- Il valore di  $D_{60}$  è pari a 0.6 mm
- Il valore di  $D_{10}$  è pari a 0.04 mm

Il peso di volume naturale medio  $\gamma_s$  è risultato pari a circa 26.5 kN/m<sup>3</sup>.

Per quanto concerne lo stato iniziale si ha:

- **Dr**: la densità relativa media è del 80%. I valori risultano non numerosi e molto dispersi e si riferiscono ai primi 30m dove si è riscontrata preponderante la componente sabbiosa. Non è stato possibile tenere in conto l'effetto della cementazione;
- **$\gamma_d$**  : si può stimare un valore medio di  $\gamma_d$  che risulta uguale a circa 21 KN/m<sup>3</sup>;
- **$K_0$** : si considera la relazione di Mesri.

Per le caratteristiche di resistenza si parte dalla stima del parametro  $RMR_{89}$  che è stato valutato sulla base di un rilievo effettuato in corrispondenza dell'imbocco est della galleria stradale Serrazzo.

Il parametro  $RMR_{89}$  è risultato pari a 51. Il parametro GSI è quindi pari a 46.

Gli involuipi di rottura dell'ammasso roccioso sono stati determinati tenendo conto:

- del valore GSI di cui in precedenza;
- dei valori della resistenza alla compressione semplice  $\sigma_c$  stimata (15MPa) e del parametro  $m_i$  della roccia intatta pari a 19.
- 

I risultati che si ottengono per  $GSI = 46$  sono riportati nella tabella, sia per le condizioni di resistenza di picco ("undisturbed rock mass") che per le condizioni di resistenza residua ("disturbed rock mass") per tensioni normali corrispondenti a profondità massime di circa 20m.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

	Picco		Residuo	
$\sigma_n$ (Mpa)	$c'$ (Mpa)	$\phi'$ (°)	$c'$ (Mpa)	$\phi'$ (°)
0.21	0.14	55	0.09	45
0.42	0.21	50	0.15	38

Tenuto conto però che tali parametri sono stati determinati facendo riferimento ad un solo rilievo determinato su un fronte di roccia di altezza di circa 10-20m ed in base ad  $m_i$  stimato in letteratura, si ritiene prudente adottare valori più cautelativi sia per la coesione che per l'angolo d'attrito.

Inoltre si ritiene anche prudente assumere che tali parametri siano rappresentativi di tutto l'ammasso, non essendo a conoscenza delle caratteristiche presenti in profondità.

Si pone quindi:

$c'=0 \div 0.050$  MPa (valore minimo per la porzione sciolta sabbiosa)

$\phi'=38^\circ-40^\circ$

Per le caratteristiche di deformabilità dalle prove sismiche in foro (S464) e dalla sismica a rifrazione PR18 si ottengono valori di  $V_s$  elevati (da 500 a 2000 m/s) già a partire da 15m fino a 70m di profondità.

Il numero di dati a disposizione è molto esiguo;

Ai valori delle velocità di taglio  $V_s$  corrisponderebbero moduli di taglio iniziali  $G_0$  che mostrano tale correlazione:

$G_0=100 z$  (Mpa)

Per la componente sabbiosa caratterizzabile da prove SPT l'andamento di  $G_0$ , stimato fino a 30m di profondità con una correlazione pari a:

$$G_o = 38 \cdot (z)^{0.7}$$

Le correlazioni ottenute mostrano un differente andamento: le prove sismiche risultano essere in numero troppo esiguo per ritenersi rappresentative della deformabilità dell'ammasso.

Per i moduli di Young "operativi" a medie e piccole deformazioni si dà quindi il seguente andamento cautelativo:

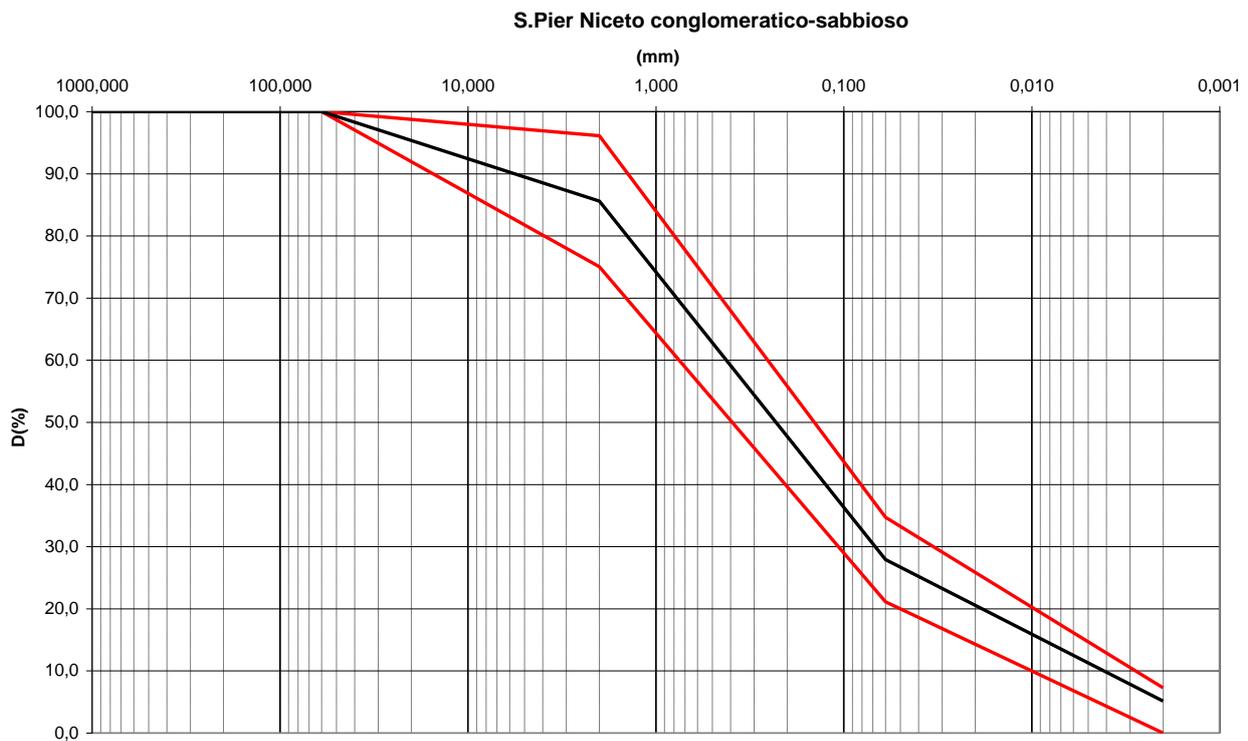
$$E_o = 90 \cdot (z)^{0.7}$$

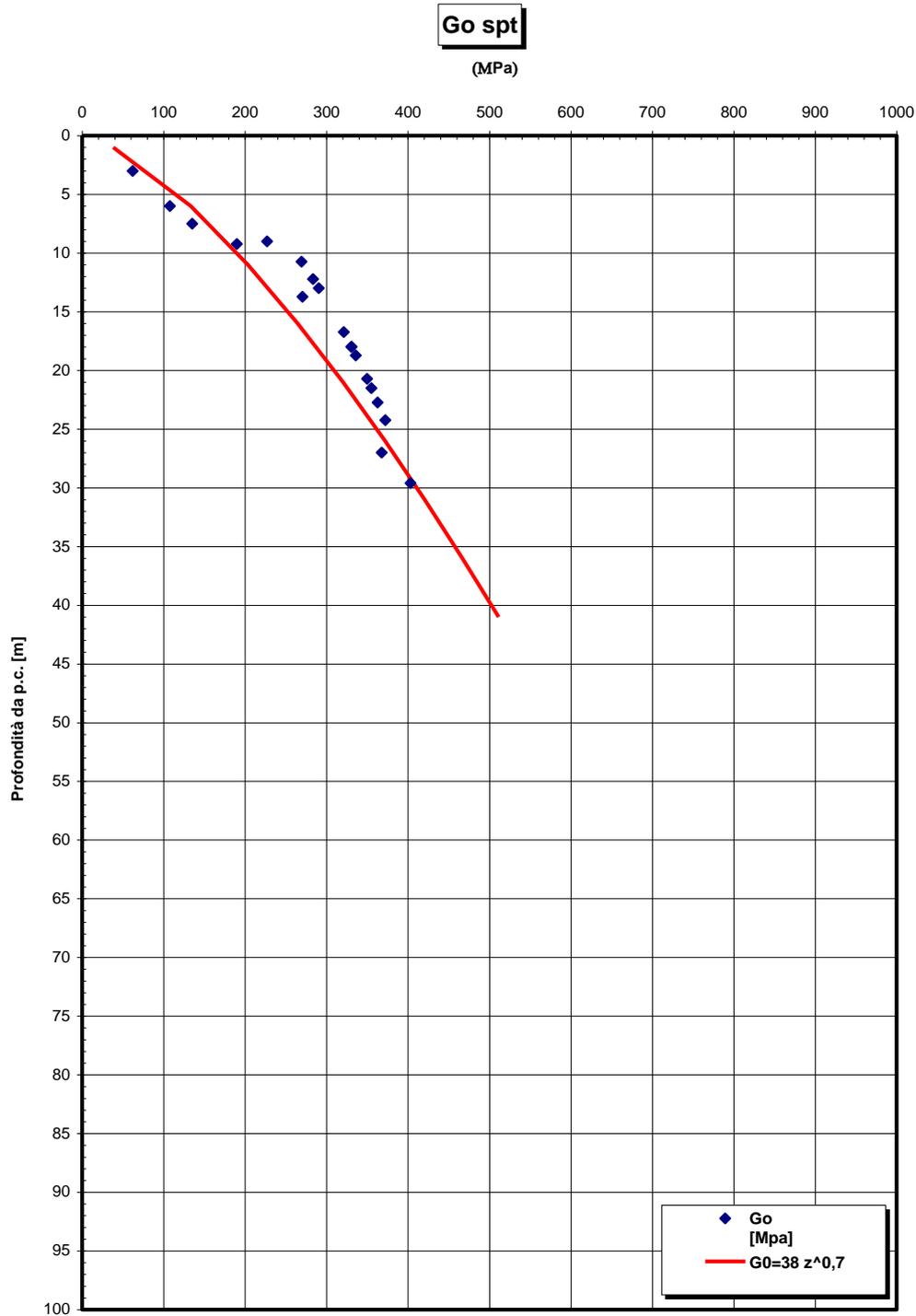
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

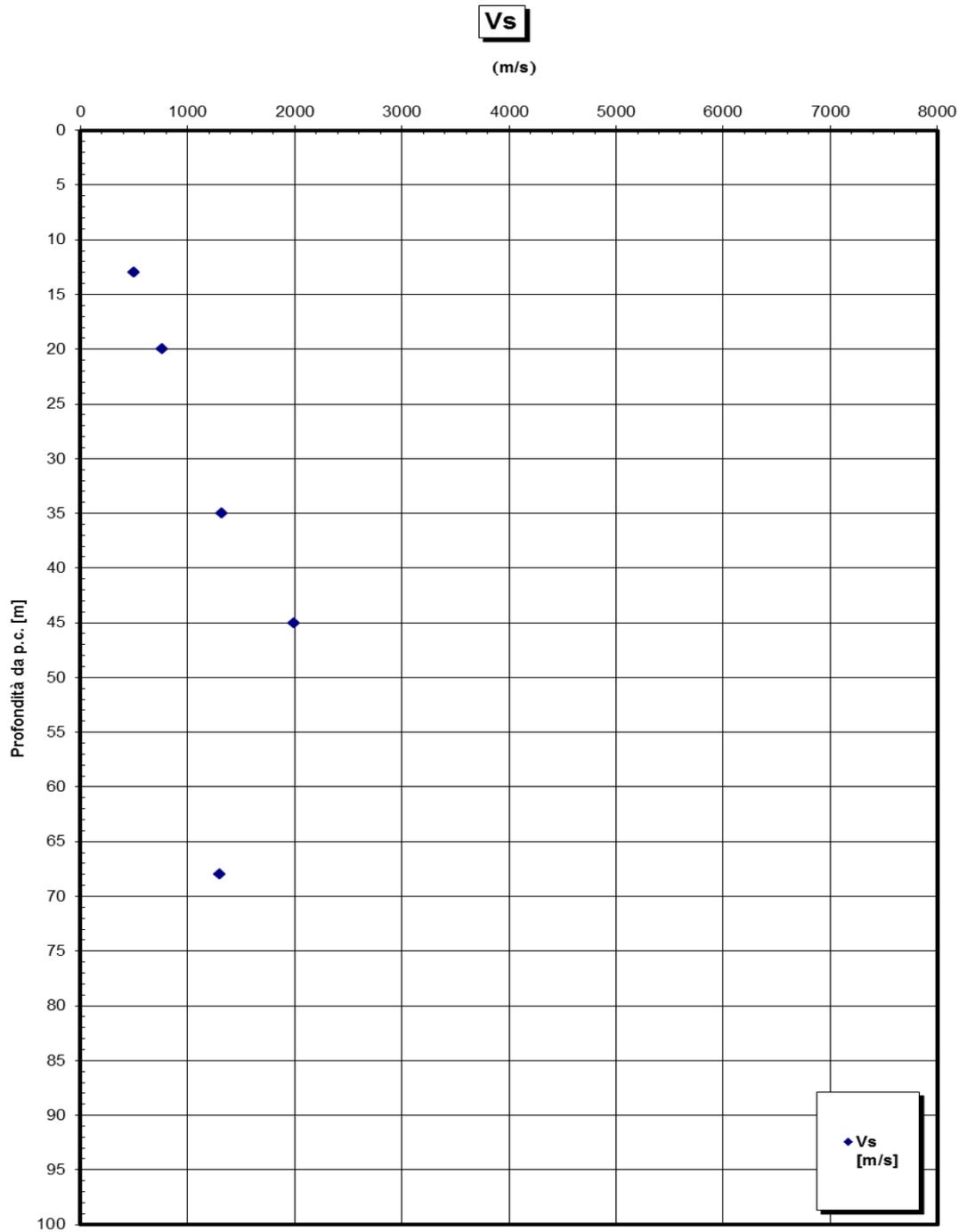
$$E = (20 \div 30) \cdot (z)^{0.7}$$

pari rispettivamente a circa 1/5 ÷ 1/3 di quelli iniziali.

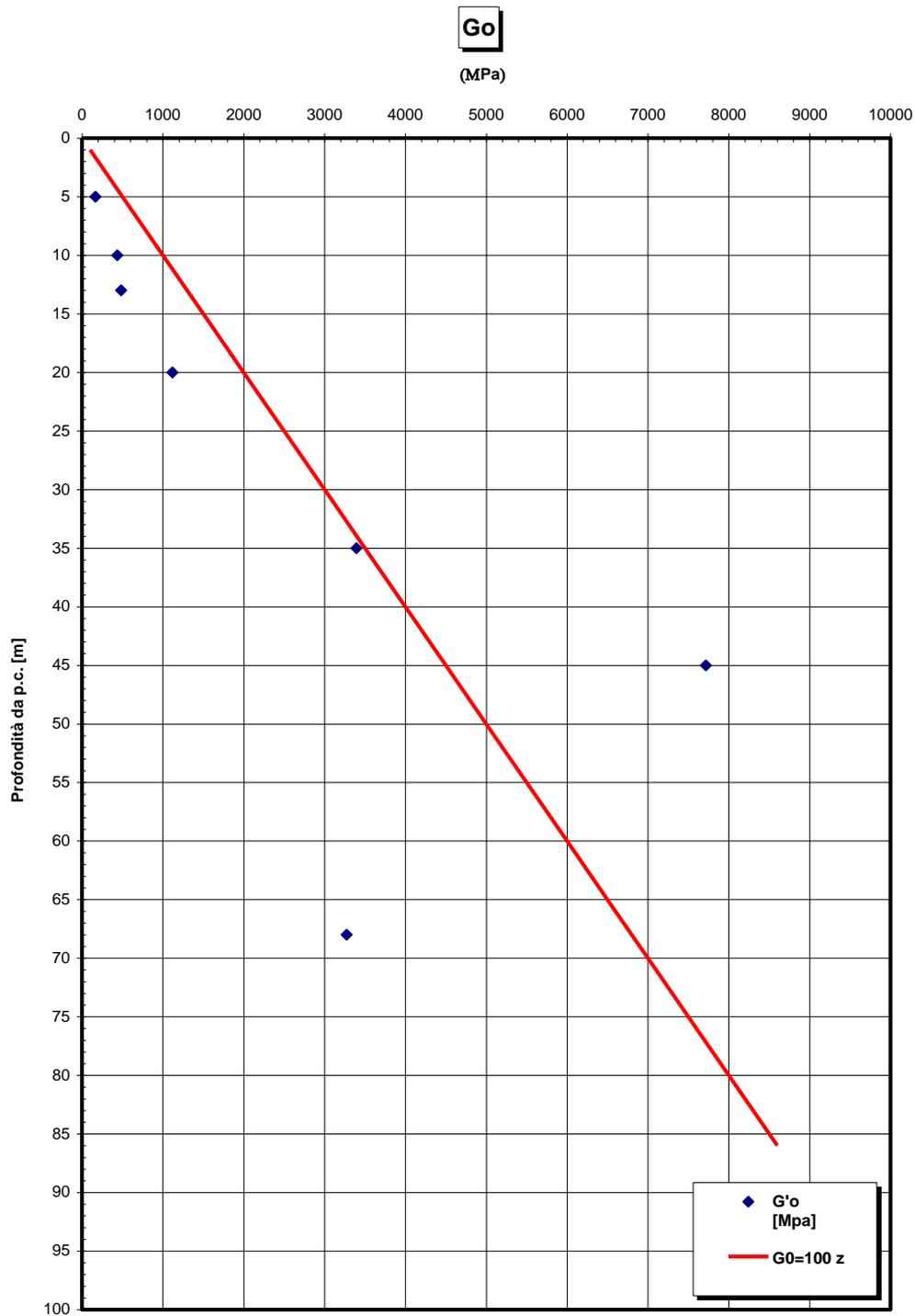
Dalle prove dilatometriche (S464bis, S443, S456) effettuate nella nuova campagna di indagine 2010 i valori di  $E'$  (ciclo scarico – ricarica) risultano pari a 200 e 745 MPa a elevate profondità (55m e 60m).

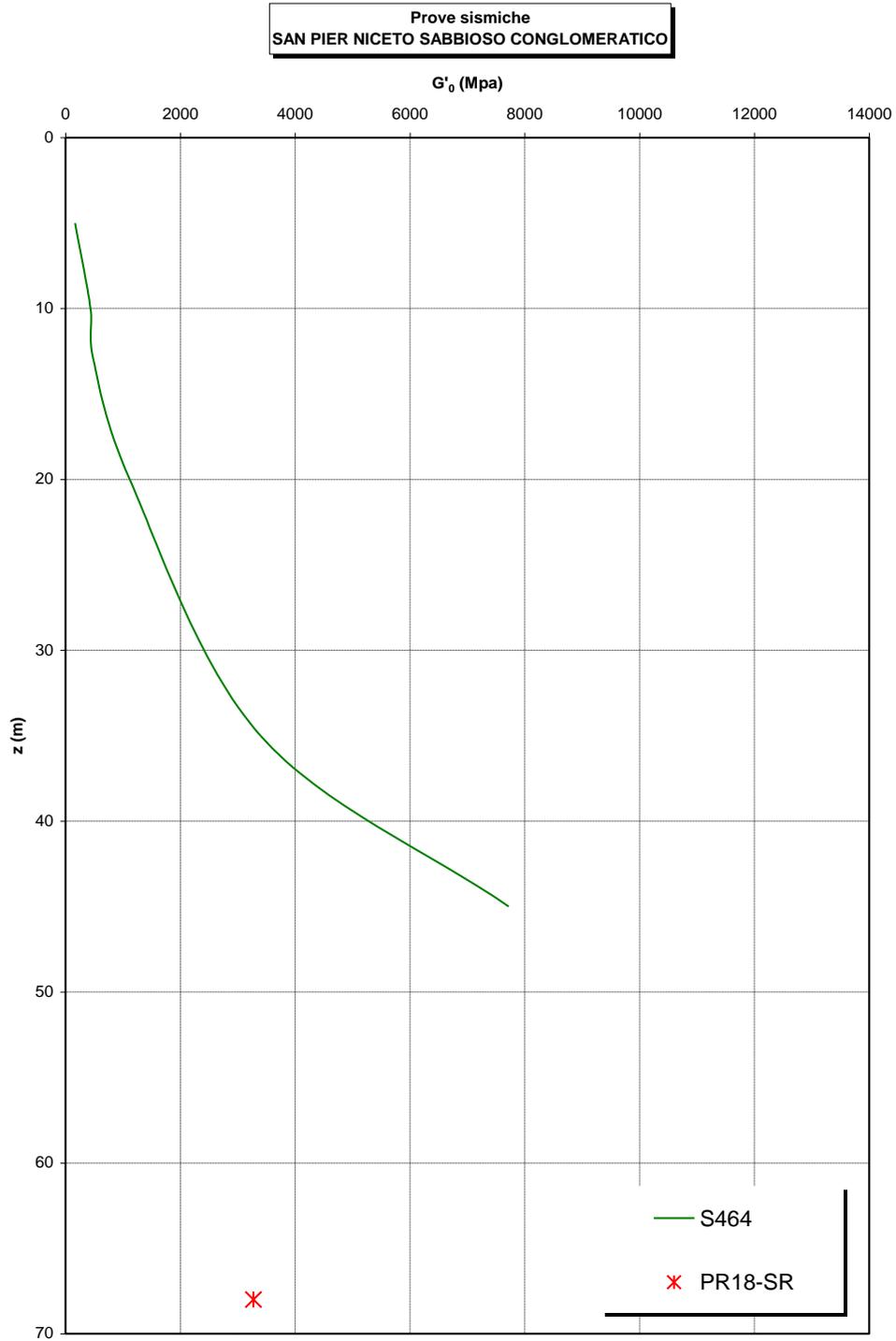


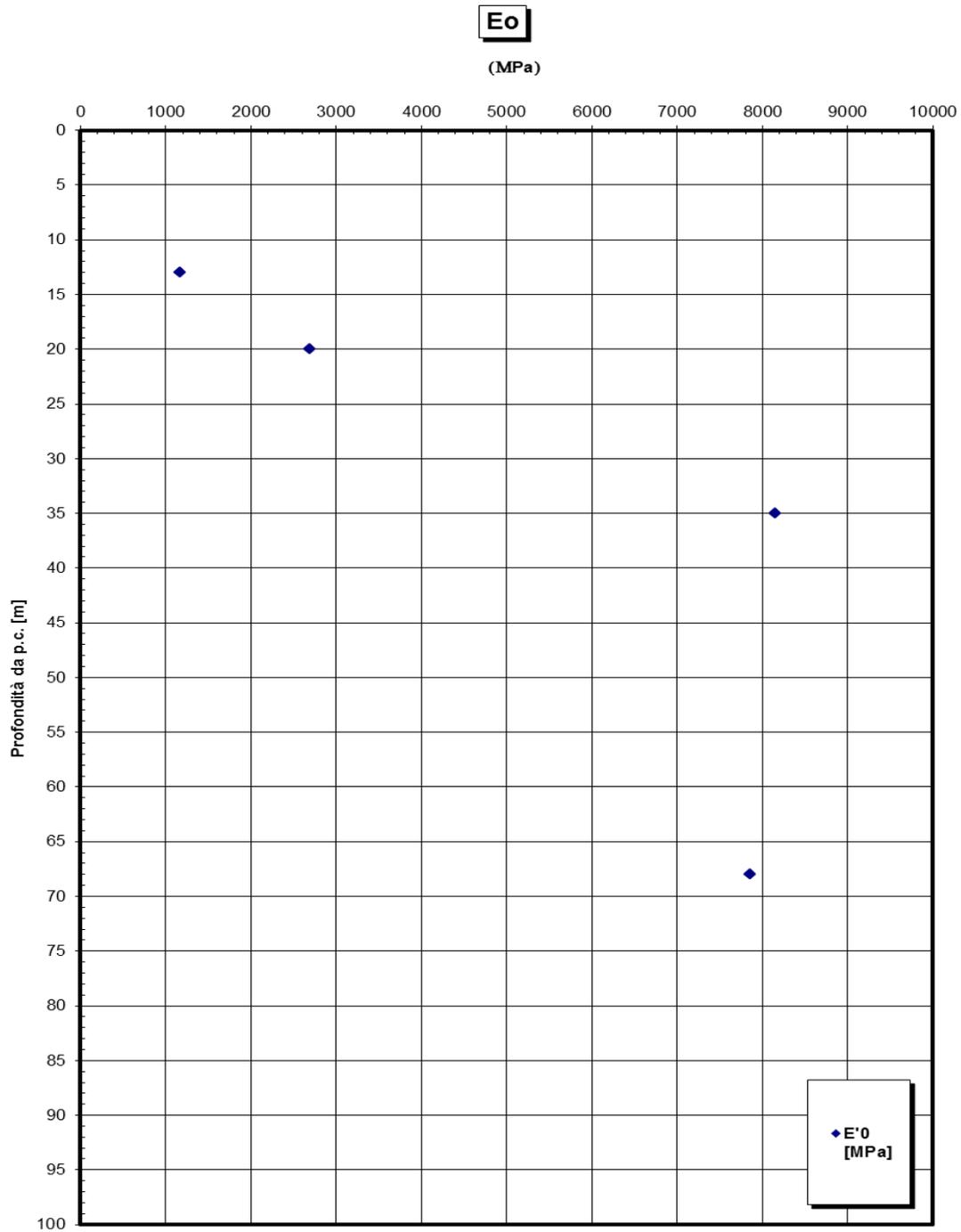


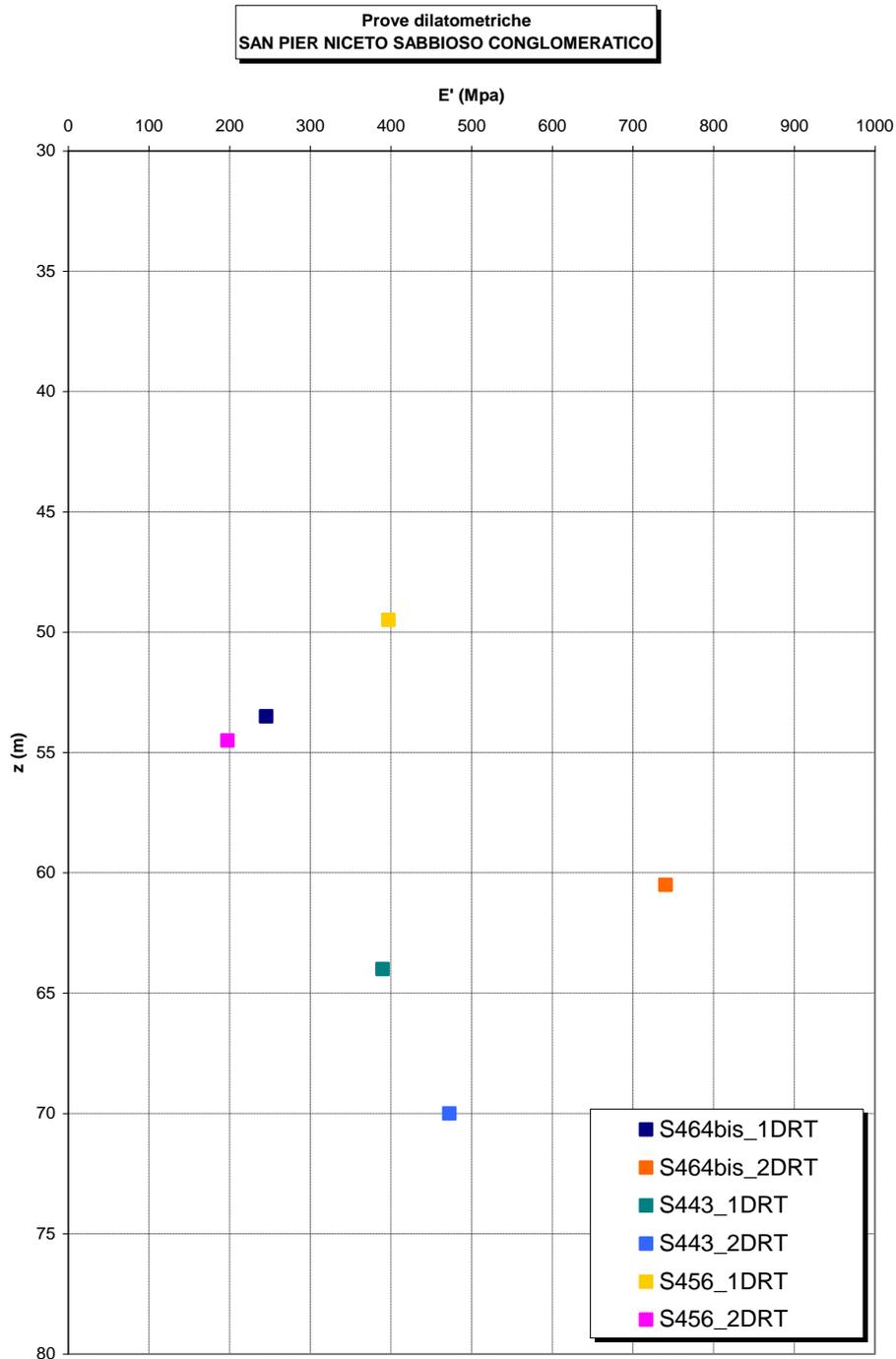












		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### Parametri principali assunti

Dall'esame del profilo geotecnico ed in base alla stratigrafia riscontrata dal sondaggio **S441**, posto in corrispondenza delle opere da realizzarsi, le fondazioni dell'opera in esame appaiono intercettare le formazioni di seguito riportate. Si sono riportati i parametri geotecnici di maggiore interesse per i calcoli e le verifiche successivamente eseguite.

Litologia	prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso del secco	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) Peso totale	$c'$ (Kpa)	$\phi'$ (°)	$E' *$ (MPa)	Cu (KPa)	$E'$ (MPa)
Riporti	0-0.5	-	-	-	-	-	-	-
Depositi alluvionali Sabbie limose	0.5-3.6	17-19	19-20	0	37	$(10\div 25)z^{0.65}$	-	-
Depositi alluvionali Limo argilloso	3.6-7.4	-	***	***	***	-	150**	30**
Depositi alluvionali Sabbie limose	7.4-8.2	17-19	19-20	0	37	$(10\div 25)z^{0.65}$	-	-
San Pier Niceto argilloso	8.2 -37	-	19-21	20-50	30-22	70-120	200-400	-
San Pier Niceto conglomeratico	>37	-	20-22	0-50	38-40	$(20\div 30) z^{0.7}$	-	-

Tabella 1 – Parametri geotecnici utilizzati

\* Modulo di Young “operativo” - si considerano valori nel range per fronti di scavo sostenuti, opere di sostegno tirantate o puntonate; valori al minimo del range per fondazioni dirette, fondazioni su pali e rilevati.

\*\* Si è posto  $Cu=5.5 N_{spt}$  ed  $E'=200 Cu$

\*\*\* Per i parametri drenati del limo argilloso (3.6-7.4m da p.c.) rilevato in S441 in assenza di prove locali si può porre:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$\gamma=19 \text{ KN/m}^3$   
 $C'=10 \text{ KPa}$   
 $\phi'=30^\circ$

La falda risulta presente nei depositi alluvionali a quota assoluta 150 m s.l.m..

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 4.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA SISMICITA' DEL LUOGO

Le azioni di progetto si ricavano, ai sensi delle NTC, dalle accelerazioni  $a_g$  e dalle relative forme spettrali.

Le forme spettrali previste dalle NTC sono definite, su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione dei tre parametri:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima del terreno;
- $F_0$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T_C^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Per ciascun nodo del reticolo di riferimento e per ciascuno dei periodi di ritorno  $T_R$  considerati dalla pericolosità sismica, i tre parametri si ricavano attribuendo ad:

$a_g$  il valore previsto dalla pericolosità sismica;

$F_0$  e  $T_C^*$  i valori ottenuti imponendo che le forme spettrali in accelerazione, velocità e spostamento previste dalle NTC scartino al minimo dalle corrispondenti forme spettrali previste dalla pericolosità sismica.

Le forme spettrali previste dalle NTC sono caratterizzate da prescelte probabilità di superamento e vite di riferimento. A tal fine occorre fissare:

- la vita di riferimento  $V_R$  della costruzione;
- le probabilità di superamento nella vita di riferimento  $P_{VR}$  associate agli stati limite considerati, per individuare infine, a partire dai dati di pericolosità sismica disponibili, le corrispondenti azioni sismiche.

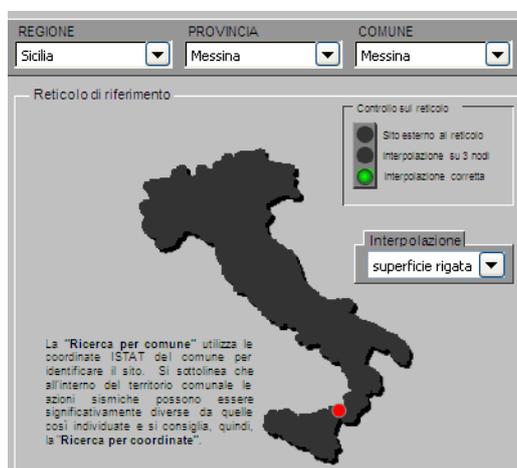
A tal fine è conveniente utilizzare, come parametro caratterizzante la pericolosità sismica, il periodo di ritorno dell'azione sismica  $T_R$ , espresso in anni. Fissata la vita di riferimento  $V_R$ , i due parametri  $T_R$  e  $P_{VR}$  sono immediatamente esprimibili, l'uno in funzione dell'altro, mediante l'espressione:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} = -\frac{200}{\ln(1 - 0.1)} = 1.898 \text{ anni}$$

I valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_C^*$  relativi alla pericolosità sismica su reticolo di riferimento nell'intervallo di riferimento sono forniti nelle tabelle riportate nell'ALLEGATO B delle NTC.

Nel seguito si riporta una tabella riassuntiva dei parametri che caratterizzano il Comune di Messina:



$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [-]	$T_C^*$ [s]
30	0.061	2.364	0.277
50	0.081	2.318	0.294
72	0.099	2.305	0.312
101	0.118	2.319	0.319
140	0.139	2.343	0.326
201	0.166	2.361	0.334
475	0.247	2.411	0.359
975	0.336	2.446	0.384
2475	0.482	2.491	0.432

#### 4.3.1 AZIONI SISMICHE

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione, che costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

categoria A, nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente  $S_e(T)$ , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento  $V_R$ .

Nel presente progetto è stata verificata la combinazione di carico sismica con riferimento allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV): a seguito del terremoto la struttura subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; mentre conserva invece una parte della esistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.

#### 4.3.1.1 VITA NOMINALE

La vita nominale di un'opera strutturale è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata. Nel caso in oggetto, l'opera ricade all'interno del tipo di costruzione: "Grandi opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica" (paragrafo 2.4 delle 'Nuove Norme tecniche per le costruzioni – D.M. 14 gennaio 2008').

La vita nominale si assume pertanto pari a  **$V_N = 100$  anni**.

#### 4.3.1.2 CLASSE D'USO

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un'eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso. Nel caso in oggetto si fa riferimento alla Classe IV: costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità..... Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico."

Il coefficiente d'uso si assume pertanto pari a  **$c_U = 2,0$** .

#### 4.3.1.3 PERIODO DI RIFERIMENTO

Le azioni sismiche sulla costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

ottenuto moltiplicando la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$ .

Considerando il manufatto in classe d'uso IV (secondo 2.4.2 D.M. 14/01/2008 e par. 5.2 Relazione Sismica), si ottiene:

$$V_R = V_N \times C_U = 200 \text{ anni}$$

dove:  $V_N = 100$  anni vita nominale (Tab. 2.3.I D.M. 14/01/2008)

$C_U = 2$  coefficiente d'uso per classe d'uso IV (Tab. 2.3.II D.M. 14/01/2008)

#### 4.3.1.4 STATO LIMITE CONSIDERATO

Ai fini del progetto e della verifica delle strutture per gli stati limite ultimi lo spettro di progetto da utilizzare è lo spettro di progetto per lo stato limite di salvaguardia della vita SLV (riferito alla probabilità di superamento  $P_{VR}$  pari al 10% nel periodo di riferimento  $V_R$ ).

#### 4.3.1.5 PARAMETRI E PUNTI DELLO SPETTRO DI RISPOSTA ORIZZONTALE PER LO STATO LIMITE SLV

La forma spettrale è definita in funzione dei seguenti parametri:

Categoria suolo C

Categoria topografica:  $T_1$

I parametri per gli spettri di risposta della componente orizzontale allo SLV sono i seguenti:

accelerazione orizzontale =	$a_g [g] = 0.435$
fattore di amplificazione =	$F_0 = 2.478$
periodo di inizio =	$T_{c^*} = 0.418$
fattore di amplificazione =	$F_V = 2.207$
periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro	$T_C = 0.585$
periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante	$T_B = 0.195$
periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro	$T_D = 3.340$
coefficiente dipendente dalla categoria del suolo	$C_C = 1.401$
coefficiente dipendente dalla categoria del suolo	$S_S = 1.053$
coefficiente topografico	$S_T = 1.000$
	$S = 1.053$

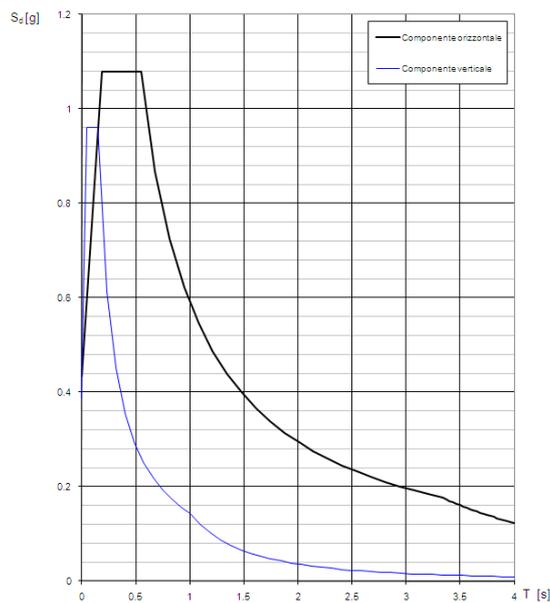
I parametri per gli spettri di risposta della componente verticale sono i seguenti:

	SLV
accelerazione verticale =	$a_g [g] = 0.387$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

fattore di amplificazione =	$F_0 = 2.478$
fattore di amplificazione =	$F_V = 2.207$
periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro	$T_C = 0.150$
periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante	$T_B = 0.050$
periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro	$T_D = 1.000$
coefficiente dipendente dalla categoria del suolo	$S_S = 1.000$
coefficiente topografico	$S_T = 1.000$
	$S = 1.000$

Grafici degli spettri di risposta



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Rev</i></td> <td style="text-align: center;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">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						

## 5 ANALISI DELLE FONDAZIONI

### 5.1 ANALISI DEL SISTEMA FONDAZIONALE DELLE SPALLE E DELLA PILA

Si sono previste fondazioni profonde, costituite da pali trivellati di grande diametro dalle seguenti caratteristiche:

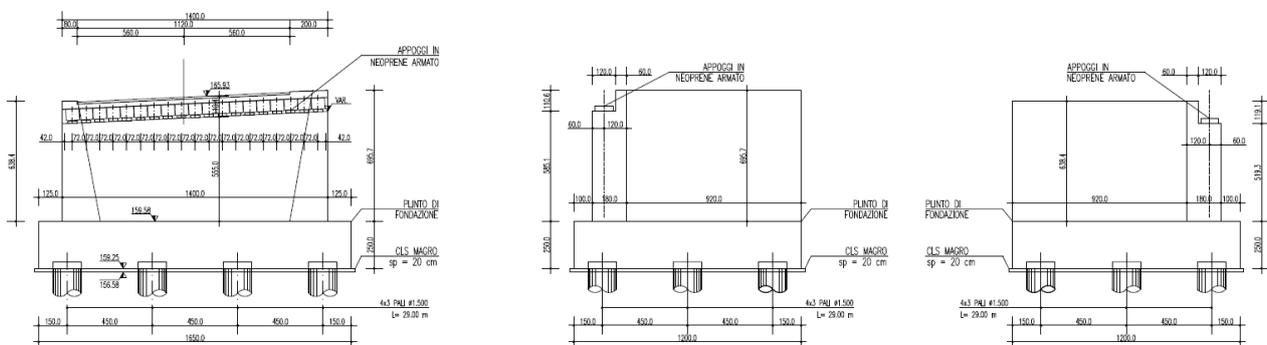
SPALLA A:

D: 1.50 m  
 Interasse: 4.50 m (3D)  
 Lunghezza: 29.00 m.  
 Numero: 12

SPALLA B:

D: 1.50 m  
 Interasse: 4.50 m (3D)  
 Lunghezza: 31.00 m.  
 Numero: 12

Nelle figure successive si riporta la disposizione planimetrica dei pali per la tipologia di fondazione considerata.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

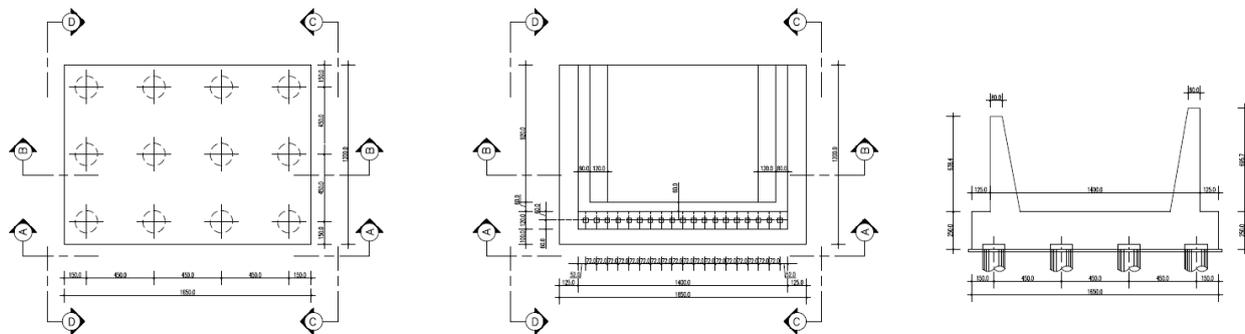


Figura 5 – Fondazione - Spalla A

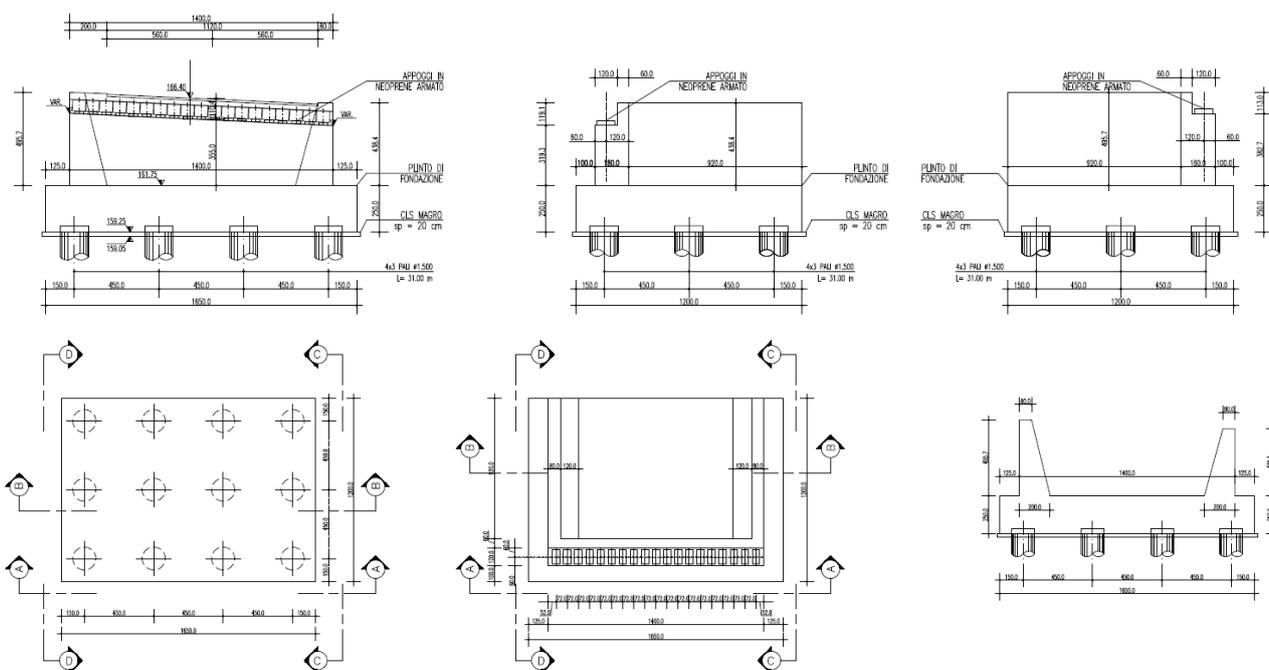


Figura 6 – Fondazione - Spalla B

La falda è stata posta nei calcoli ad un livello di 150 m s.m.m. (le profondità rispetto al piano campagna locale di ciascuna opera sono riportate successivamente nelle tabelle di calcolo).

Come precedentemente osservato, si è fatto riferimento alla stratigrafia ricavata dal sondaggio S441, posto in vicinanza delle opere di progetto. La quota di esecuzione del sondaggio è di 152.74 m s.m.m.

Si è considerato che il piano campagna locale sia mediamente posto a circa 3-4 metri dal piano di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

posa dei plinti di collegamento dei pali. Il terreno posto a quota superiore a quella di riferimento del sondaggio è stato considerato appartenente alla formazione “Depositi Alluvionali”.

## 5.2 ANALISI AZIONI SUI PALI

La distribuzione sui pali delle azioni a quota spiccato plinto viene realizzata attraverso una ripartizione rigida, corrispondente cioè alla assunzione di plinto di fondazione rigido.

Nel tentativo comunque di definire meglio e con maggior precisione l’azione assiale e la relativa ridistribuzione, si riporta di seguito analisi analitica semplificata che andremo ad applicare sui pali e che permette di valutare l’incremento di sforzo assiale dovuto all’incastro palo plinto di fondazione. Per valutare l’incremento dello sforzo assiale le analisi sono state eseguite utilizzando il metodo di Matlock e Reese con l’ipotesi di rotazione nulla della fondazione. Noti i carichi, orizzontali e di momento trasmessi dal plinto di fondazione alla palificata e la geometria di quest’ultima, è possibile calcolare le sollecitazioni agenti sul singolo palo facendo le seguenti ipotesi:

- plinto rigido;
- vincolo di incastro tra pali e plinto;
- interazione fra i pali trascurabile;
- rotazione dei plinto e della testa dei pali impedita.

Infatti per un gruppo di n pali, sottoposto a forze verticali, orizzontali e di momento esterne (agenti alla quota testa pali ed in corrispondenza dei baricentro della palificata) i carichi agenti alla testa di ciascun palo sono valutabili con le seguenti espressioni:

$$\begin{aligned}
 Q_{ti} &= Q/n \pm [(M_x + M_{inc,x}) \cdot y_i / \sum_i y_i^2] \pm [(M_y + M_{inc,y}) \cdot x_i / \sum_i x_i^2] \\
 V_{ti,x} &= V_x / n \quad V_{ti,y} = V_y / n
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

essendo:

Q = forza verticale esterna;

$M_x$ ,  $M_y$  = momento esterno rispettivamente attorno agli assi X e Y.

$V_x$ ,  $V_y$  = forza orizzontale esterna rispettivamente nella direzioni X e Y.

$Q_{ti}$  = forza verticale agente alla testa dei palo i-esimo;

$V_{ti,x}$ ,  $V_{ti,y}$  = forza orizzontale agente alla testa dei palo i-esimo nelle direzioni X e Y.

$M_{inc,x} = \sum M_{ti,x}$  = momento di incastro risultante che i pali esercitano sul plinto per effetto dei vincolo di rotazione impedita nella direzione Y

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$M_{ti,x}$  = momento di incastro agente alla testa dei palo i-esimo per effetto del vincolo di rotazione impedita nella direzione Y

$M_{inc,y} = \sum M_{ti,y}$  = momento di incastro risultante che i pali esercitano sul plinto per effetto del vincolo di rotazione impedita nella direzione X

$M_{ti,y}$  = momento di incastro agente alla testa dei palo i-esimo per effetto del vincolo di rotazione impedita nella direzione X

$x_i$  = distanza dei palo i-esimo dall'asse baricentrico della palificata nella direzione X

$y_i$  = distanza dei palo i-esimo dall'asse baricentrico della palificata nella direzione Y

I momenti di incastro alla testa dei pali ( $M_{ti,x}$  e  $M_{ti,y}$ ) verranno stimati sulla base della teoria elastica di Matlock-Reese (1960) a cui si rimanda.

Si riportano le coordinate dei pali, opportunamente numerati nel sistema di riferimento adottato.

## SPALLE A E B

$n^{\circ}_{\text{pali}} = 12$

PALO n°	X [m]	Y [m]
1	-6.75	-4.50
2	-2.25	-4.50
3	2.25	-4.50
4	6.75	-4.50
5	-6.75	0.00
6	-2.25	0.00
7	2.25	0.00
8	6.75	0.00
9	-6.75	4.50
10	-2.25	4.50
11	2.25	4.50
12	6.75	4.50

Le coordinate del baricentro dei pali sono:

$$X_g = \frac{\sum X_i}{n^{\circ}_{\text{pali}}} = 0.00 \quad \text{m}$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">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						

$$Y_g = \quad \quad \quad \Sigma Y_i / n^{\circ}_{\text{pali}} = \quad \quad \quad 0.00 \quad \text{m}$$

Il "momento di inerzia" dei pali, nelle due direzioni è:

$$\begin{aligned}
 J_y &= \quad \quad \quad \Sigma y_i^2 = \quad \quad \quad 162.00 \quad \text{m}^2 \\
 J_x &= \quad \quad \quad \Sigma x_i^2 = \quad \quad \quad 303.75 \quad \text{m}^2
 \end{aligned}$$

Si determinano le azioni verticali sui pali per le combinazioni considerate ((-) compressione, (+) trazione).

I valori riportati non tengono in conto l'effetto di incremento/decremento dello sforzo assiale, precedentemente citato, dovuto ai momenti di incastro dei pali. Tale effetto verrà considerato successivamente, una volta ricavati i momenti di incastro secondo la teoria di Matlock-Reese.

## SPALLE A E B

AZIONI VERTICALI SUI PALI [kN]															
	COMBIN.	PALO 1	PALO 2	PALO 3	PALO 4	PALO 5	PALO 6	PALO 7	PALO 8	PALO 9	PALO 10	PALO 11	PALO 12	min	min
COMBINAZIONI SLU - A1-M1	1	-3081.25	-3137.83	-3194.41	-3250.99	-4120.47	-4177.06	-4233.64	-4290.22	-5159.70	-5216.28	-5272.86	-5329.44		
	2	-3081.25	-3137.83	-3194.41	-3250.99	-4120.47	-4177.06	-4233.64	-4290.22	-5159.70	-5216.28	-5272.86	-5329.44		
	3	-3077.50	-3126.08	-3174.66	-3223.24	-4166.22	-4214.81	-4263.39	-4311.97	-5254.95	-5303.53	-5352.11	-5400.69		
	4	-3077.50	-3126.08	-3174.66	-3223.24	-4166.22	-4214.81	-4263.39	-4311.97	-5254.95	-5303.53	-5352.11	-5400.69		
	5	-3050.82	-3085.40	-3119.98	-3154.56	-4121.41	-4155.99	-4190.57	-4225.15	-5192.00	-5226.58	-5261.16	-5295.74		
	6	-3050.82	-3085.40	-3119.98	-3154.56	-4121.41	-4155.99	-4190.57	-4225.15	-5192.00	-5226.58	-5261.16	-5295.74		
	7	-3048.01	-3076.59	-3105.17	-3133.75	-4155.72	-4184.31	-4212.89	-4241.47	-5263.44	-5292.02	-5320.60	-5349.18		-5400.69
	8	-3048.01	-3076.59	-3105.17	-3133.75	-4155.72	-4184.31	-4212.89	-4241.47	-5263.44	-5292.02	-5320.60	-5349.18		-5400.69
	9	-3178.17	-3212.75	-3247.33	-3281.91	-4116.91	-4151.49	-4186.07	-4220.65	-5055.65	-5090.23	-5124.81	-5159.39		
	10	-3178.17	-3212.75	-3247.33	-3281.91	-4116.91	-4151.49	-4186.07	-4220.65	-5055.65	-5090.23	-5124.81	-5159.39		
	11	-3175.36	-3203.94	-3232.52	-3261.10	-4151.22	-4179.81	-4208.39	-4236.97	-5127.09	-5155.67	-5184.25	-5212.83		
	12	-3175.36	-3203.94	-3232.52	-3261.10	-4151.22	-4179.81	-4208.39	-4236.97	-5127.09	-5155.67	-5184.25	-5212.83		
COMBINAZIONI SLU - A2-M1	13	-2715.86	-2766.15	-2816.44	-2866.73	-3387.66	-3437.95	-3488.24	-3538.53	-4059.46	-4109.75	-4160.04	-4210.32		
	14	-2715.86	-2766.15	-2816.44	-2866.73	-3387.66	-3437.95	-3488.24	-3538.53	-4059.46	-4109.75	-4160.04	-4210.32		
	15	-2712.67	-2756.14	-2799.62	-2843.09	-3426.64	-3470.11	-3513.58	-3557.05	-4140.60	-4184.07	-4227.55	-4271.02		
	16	-2712.67	-2756.14	-2799.62	-2843.09	-3426.64	-3470.11	-3513.58	-3557.05	-4140.60	-4184.07	-4227.55	-4271.02		
	17	-2705.56	-2737.11	-2768.66	-2800.20	-3388.46	-3420.01	-3451.56	-3483.10	-4071.36	-4102.91	-4134.46	-4166.00		
	18	-2705.56	-2737.11	-2768.66	-2800.20	-3388.46	-3420.01	-3451.56	-3483.10	-4071.36	-4102.91	-4134.46	-4166.00		
	19	-2703.17	-2729.60	-2756.04	-2782.47	-3417.69	-3444.13	-3470.56	-3497.00	-4132.22	-4158.65	-4185.09	-4211.52		-4271.02
	20	-2703.17	-2729.60	-2756.04	-2782.47	-3417.69	-3444.13	-3470.56	-3497.00	-4132.22	-4158.65	-4185.09	-4211.52		-4271.02
	21	-2814.05	-2845.59	-2877.14	-2908.69	-3384.63	-3416.18	-3447.72	-3479.27	-3955.21	-3986.76	-4018.31	-4049.85		
	22	-2814.05	-2845.59	-2877.14	-2908.69	-3384.63	-3416.18	-3447.72	-3479.27	-3955.21	-3986.76	-4018.31	-4049.85		
	23	-2811.65	-2838.09	-2864.52	-2890.96	-3413.86	-3440.29	-3466.73	-3493.16	-4016.07	-4042.50	-4068.94	-4095.37		
	24	-2811.65	-2838.09	-2864.52	-2890.96	-3413.86	-3440.29	-3466.73	-3493.16	-4016.07	-4042.50	-4068.94	-4095.37		
COMBINAZIONI SLU - A2-M2	25	-2604.03	-2654.32	-2704.61	-2754.89	-3387.66	-3437.95	-3488.24	-3538.53	-4171.30	-4221.58	-4271.87	-4322.16		
	26	-2604.03	-2654.32	-2704.61	-2754.89	-3387.66	-3437.95	-3488.24	-3538.53	-4171.30	-4221.58	-4271.87	-4322.16		
	27	-2600.84	-2644.31	-2687.78	-2731.25	-3426.64	-3470.11	-3513.58	-3557.05	-4252.44	-4295.91	-4339.38	-4382.85		
	28	-2600.84	-2644.31	-2687.78	-2731.25	-3426.64	-3470.11	-3513.58	-3557.05	-4252.44	-4295.91	-4339.38	-4382.85		
	29	-2604.78	-2636.33	-2667.87	-2699.42	-3388.46	-3420.01	-3451.56	-3483.10	-4172.14	-4203.69	-4235.24	-4266.78		
	30	-2604.78	-2636.33	-2667.87	-2699.42	-3388.46	-3420.01	-3451.56	-3483.10	-4172.14	-4203.69	-4235.24	-4266.78		
	31	-2602.38	-2628.82	-2655.26	-2681.69	-3417.69	-3444.13	-3470.56	-3497.00	-4233.00	-4259.43	-4285.87	-4312.30		-4382.85
	32	-2602.38	-2628.82	-2655.26	-2681.69	-3417.69	-3444.13	-3470.56	-3497.00	-4233.00	-4259.43	-4285.87	-4312.30		-4382.85
	33	-2713.26	-2744.81	-2776.36	-2807.90	-3384.63	-3416.18	-3447.72	-3479.27	-4055.99	-4087.54	-4119.09	-4150.63		
	34	-2713.26	-2744.81	-2776.36	-2807.90	-3384.63	-3416.18	-3447.72	-3479.27	-4055.99	-4087.54	-4119.09	-4150.63		
	35	-2710.87	-2737.30	-2763.74	-2790.17	-3413.86	-3440.29	-3466.73	-3493.16	-4116.85	-4143.28	-4169.72	-4196.15		
	36	-2710.87	-2737.30	-2763.74	-2790.17	-3413.86	-3440.29	-3466.73	-3493.16	-4116.85	-4143.28	-4169.72	-4196.15		
COMBINAZIONI SLU - SISMICHE	37	-463.19	-58.41	346.38	751.17	-3448.77	-3043.98	-2639.19	-2234.41	-6434.34	-6029.55	-5624.77	-5219.98		
	38	707.50	331.82	-43.85	-419.53	-2278.07	-2653.75	-3029.43	-3405.11	-5263.64	-5639.32	-6015.00	-6390.68		
	39	260.37	-114.37	-489.10	-863.83	-2602.38	-2977.11	-3351.85	-3726.58	-5465.13	-5839.86	-6214.59	-6589.33		
	40	-910.33	-504.60	-98.87	306.87	-3773.08	-3367.35	-2961.61	-2555.88	-6635.83	-6230.09	-5824.36	-5418.63		
	41	-1648.80	-1245.12	-841.44	-437.75	-3070.40	-2666.72	-2263.04	-1859.35	-4492.00	-4088.32	-3684.64	-3280.96		
	42	-478.10	-854.89	-1231.67	-1608.45	-1899.71	-2276.49	-2653.27	-3030.05	-3321.31	-3698.09	-4074.87	-4451.65		
	43	-3139.26	-2732.42	-2325.59	-1918.75	-4151.44	-3744.61	-3337.77	-2930.93	-5163.63	-4756.79	-4349.96	-3943.12		-6635.83
	44	-1968.56	-2342.19	-2715.82	-3089.45	-2980.74	-3354.37	-3728.00	-4101.63	-3992.93	-3466.56	-2942.19	-2416.90		
	45	-3536.28	-2220.95	-905.62	409.71	-4814.58	-3499.25	-2183.92	-868.59	-6092.89	-4777.56	-3462.23	-2146.90		
	46	-3983.41	-2667.14	-1350.86	-34.59	-5138.89	-3822.62	-2506.34	-1190.07	-6294.37	-4978.10	-3661.82	-2345.55		
	47	366.05	-920.17	-2206.39	-3492.61	-912.25	-2198.48	-3484.70	-4770.92	-2190.56	-3476.78	-4763.00	-6049.22		
	48	-81.09	-1366.36	-2651.64	-3936.91	-1236.57	-2521.84	-3807.12	-5092.39	-2392.05	-3677.32	-4962.60	-6247.87		

AZIONI VERTICALI SUI PALI [kN]															
	COMBIN.	PALO 1	PALO 2	PALO 3	PALO 4	PALO 5	PALO 6	PALO 7	PALO 8	PALO 9	PALO 10	PALO 11	PALO 12	min	max
SLE - RARE	1	-2282.90	-2325.64	-2368.37	-2411.11	-3047.26	-3090.00	-3132.74	-3175.47	-3811.63	-3854.36	-3897.10	-3939.83		
	2	-2282.90	-2325.64	-2368.37	-2411.11	-3047.26	-3090.00	-3132.74	-3175.47	-3811.63	-3854.36	-3897.10	-3939.83		
	3	-2280.12	-2316.93	-2353.74	-2390.55	-3081.15	-3117.96	-3154.77	-3191.58	-3882.18	-3918.99	-3955.80	-3992.61		
	4	-2280.12	-2316.93	-2353.74	-2390.55	-3081.15	-3117.96	-3154.77	-3191.58	-3882.18	-3918.99	-3955.80	-3992.61		
	5	-2260.36	-2286.80	-2313.24	-2339.68	-3047.96	-3074.40	-3100.84	-3127.28	-3835.55	-3861.99	-3888.43	-3914.87		
	6	-2260.36	-2286.80	-2313.24	-2339.68	-3047.96	-3074.40	-3100.84	-3127.28	-3835.55	-3861.99	-3888.43	-3914.87		
	7	-2258.28	-2280.27	-2302.27	-2324.26	-3073.37	-3095.37	-3117.36	-3139.36	-3888.47	-3910.47	-3932.46	-3954.46		
	8	-2258.28	-2280.27	-2302.27	-2324.26	-3073.37	-3095.37	-3117.36	-3139.36	-3888.47	-3910.47	-3932.46	-3954.46		
	9	-2354.69	-2381.13	-2407.57	-2434.01	-3044.62	-3071.06	-3097.50	-3123.94	-3136.03	-3787.47	-3809.47	-3831.46		
	10	-2354.69	-2381.13	-2407.57	-2434.01	-3044.62	-3071.06	-3097.50	-3123.94	-3136.03	-3787.47	-3809.47	-3831.46		
	11	-2352.61	-2374.60	-2396.60	-2418.60	-3070.04	-3092.04	-3114.03	-3136.03	-3787.47	-3809.47	-3831.46	-3853.46		
	12	-2352.61	-2374.60	-2396.60	-2418.60	-3070.04	-3092.04	-3114.03	-3136.03	-3787.47	-3809.47	-3831.46	-3853.46		
	13	-2354.69	-2381.13	-2407.57	-2434.01	-3044.62	-3071.06	-3097.50	-3123.94	-3136.03	-3787.47	-3809.47	-3831.46		
	14	-2352.61	-2374.60	-2396.60	-2418.60	-3070.04	-3092.04	-3114.03	-3136.03	-3787.47	-3809.47	-3831.46	-3853.46		
	15	-2354.69	-2381.13	-2407.57	-2434.01	-3044.62	-3071.06	-3097.50	-3123.94	-3136.03	-3787.47	-3809.47	-3831.46		
	16	-2352.61	-2374.60	-2396.60	-2418.60	-3070.04	-3092.04	-3114.03	-3136.03	-3787.47	-3809.47	-3831.46	-3853.46		
	17	-2362.11	-2383.61	-2405.10	-2426.59	-3052.05	-3073.54	-3095.03	-3116.52	-3741.98	-3763.47	-3784.96	-3806.45		
	18	-2362.11	-2383.61	-2405.10	-2426.59	-3052.05	-3073.54	-3095.03	-3116.52	-3741.98	-3763.47	-3784.96	-3806.45		
	19	-2360.03	-2377.08	-2394.13	-2411.17	-3077.46	-3094.51	-3111.56	-3128.60	-3794.89	-3811.94	-3828.99	-3846.04		
	20	-2360.03	-2377.08	-2394.13	-2411.17	-3077.46	-3094.51	-3111.56	-3128.60	-3794.89	-3811.94	-3828.99	-3846.04		
SLE - FREQUENTI	21	-2343.56	-2377.42	-2411.28	-2445.15	-3033.49	-3067.35	-3101.21	-3135.08	-3723.42	-3757.28	-3791.15	-3825.01		
	22	-2343.56	-2377.42	-2411.28	-2445.15	-3033.49	-3067.35	-3101.21	-3135.08	-3723.42	-3757.28	-3791.15	-3825.01		
	23	-2341.48	-2370.89	-2400.31	-2429.73	-3058.91	-3088.32	-3117.74	-3147.16	-3776.34	-3805.76	-3835.17	-3864.59		
	24	-2341.48	-2370.89	-2400.31	-2429.73	-3058.91	-3088.32	-3117.74	-3147.16	-3776.34	-3805.76	-3835.17	-3864.59		
	25	-2558.94	-2543.91	-2528.88	-2513.86	-3025.57	-3010.55	-2995.52	-2980.49	-3492.21	-3477.18	-3462.16	-3447.13		
	26	-2558.94	-2543.91	-2528.88	-2513.86	-3025.57	-3010.55	-2995.52	-2980.49	-3492.21	-3477.18	-3462.16	-3447.13		
	27	-2558.94	-2543.91	-2528.88	-2513.86	-3025.57	-3010.55	-2995.52	-2980.49	-3492.21	-3477.18	-3462.16	-3447.13		
	28	-2558.94	-2543.91	-2528.88	-2513.86	-3025.57	-3010.55	-2995.52	-2980.49	-3492.21	-3477.18	-3462.16	-3447.13		
	29	-2562.65	-2545.15	-2527.65	-2510.15	-3029.28	-3011.78	-2994.28	-2976.78	-3495.92	-3478.42	-3460.92	-3443.42		
	30	-2562.65	-2545.15	-2527.65	-2510.15	-3029.28	-3011.78	-2994.28	-2976.78	-3495.92	-3478.42	-3460.92	-3443.42		
SLE -	31	-2558.94	-2543.91	-2528.88	-2513.86	-3025.57	-3010.55	-2995.52	-2980.49	-3492.21	-3477.18	-3462.16	-3447.13		
	32	-2558.94	-2543.91	-2528.88	-2513.86	-3025.57	-3010.55	-2995.52	-2980.49	-3492.21	-3477.18	-3462.16	-3447.13		

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 5.2.1 MODELLO DI CALCOLO

### 5.2.1.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO

Le verifiche geotecniche sui pali di seguito riportate sono state condotte secondo metodi e formulazioni note dell'ingegneria geotecnica. In ciascun paragrafo verranno brevemente descritti i metodi via via utilizzati per il calcolo della capacità portante (SLU) e dei cedimenti (SLE). In particolare nelle analisi di palo soggetto ad azioni orizzontali si è imposto che la testa del palo sia impedita di ruotare. Le verifiche strutturali sono state eseguite, invece, per mezzo del codice di calcolo freeware VCASLU (Università di Brescia).

## 5.2.2 CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI

Si riportano di seguito le sollecitazioni massime applicate alla testa dei pali (sforzo normale massimo di compressione, trazione e taglio), nelle combinazioni di carico di interesse.

<b>COMBINAZIONE</b>	<b>N<sub>max</sub> (comp) (kN)</b>	<b>N<sub>max</sub> (traz) (kN)</b>	<b>V<sub>max</sub> (kN)</b>
A1+M1	5400.7	-	671.4
A2+M1	4271.0	-	502.4
SISMA+M1	6635.8	-751.2	1940.9

Tabella 2 – Sollecitazioni massime testa pali (comp[+]-traz[-])- Spalle A e B

### 5.2.2.1 AZIONI ORIZZONTALI

La valutazione dei parametri della sollecitazione sul palo dovuta all'azione di forze orizzontali è stata eseguita secondo la teoria della trave su suolo elastico, schematizzando il terreno come una serie di molle distribuite lungo la lunghezza del palo. La valutazione della rigidità delle molle (detta anche coefficiente di reazione orizzontale  $k_h$ ) è indicata nel successivo paragrafo.

Una volta noto il valore del coefficiente di reazione orizzontale e delle sollecitazioni applicate alla testa del palo, è possibile ricavare secondo la teoria di Matlock e Reese (1960) la deformata del

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

palo, lo sforzo di taglio e il momento flettente agenti lungo il palo stesso.

### 5.2.2.1.1 COEFFICIENTE DI REAZIONE ORIZZONTALE

Il valore del coefficiente orizzontale utilizzato nelle successive verifiche è stato ricavato secondo la formulazione proposta da Chiarugi e Maia, essendo:

$$k_h = \frac{E}{D \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \sqrt[1.2]{\frac{E \cdot D^4}{E_p \cdot J_p}}$$

dove:

E: modulo elastico del terreno (posto pari a 35 MPa)

Il valore del modulo elastico è stato calcolato come valore medio nei primi metri al di sotto della testa del palo, utilizzando i valori minimi forniti dalla correlazione precedentemente riportata per i Depositi Alluvionali.

La zona di maggiore importanza, infatti, ai fini del comportamento dei pali soggetti a carichi orizzontali, è quella in prossimità della testa del palo.

Per tenere in considerazione l'effetto ombra (shadowing), per cui i pali "frontali" assorbono valori di taglio diversi da quelli delle file posteriori, variando i momenti di incastro a seconda della posizione del palo nella palificata, molti autori (Canadian Foundation Engineering Manual – 1978 – Poulos Davis "Pile foundation analysis and design"– 1980) suggeriscono di ridurre il valore del coefficiente orizzontale. In particolare per gruppi composti da più di 5 pali, si indica un fattore di riduzione pari a **0.25**.

D: diametro del palo (1.50 m)

$E_p$ : modulo elastico del palo (31447 MPa)

$J_p$ : momento d'inerzia sezione circolare palo

$\nu$ : modulo di Poisson del terreno.

Si ottiene in tal modo:

$k_h = 4676 \text{ kN/m}^3$  (valore già ridotto del fattore 0.25)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Si riportano nelle successive tabelle e figure i valori di spostamento, taglio e momento flettente ottenuti per la combinazione più gravosa (SISMA+M1) ( $V_{max}=1940.9$  kN).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## SPALLE A E B

<b>z (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>Θ (rad)</b>	<b>M (kNm)</b>	<b>V (kN)</b>
0	3.386979	0.00E+00	7929.26	-1940.89
100	3.340259	-8.96E-04	6106.86	-1704.46
200	3.215144	-1.57E-03	4518.27	-1474.19
300	3.031971	-2.06E-03	3154.82	-1254.84
400	2.808202	-2.39E-03	2003.79	-1049.85
500	2.558581	-2.58E-03	1049.55	-861.54
600	2.295339	-2.67E-03	274.68	-691.28
700	2.028410	-2.66E-03	-339.24	-539.67
800	1.765670	-2.58E-03	-810.87	-406.66
900	1.513175	-2.46E-03	-1158.60	-291.76
1000	1.275392	-2.29E-03	-1400.13	-194.07
1100	1.055430	-2.10E-03	-1552.10	-112.45
1200	0.855250	-1.90E-03	-1629.93	-45.56
1300	0.675864	-1.69E-03	-1647.67	8.00
1400	0.517511	-1.48E-03	-1617.87	49.73
1500	0.379822	-1.28E-03	-1551.67	81.08
1600	0.261960	-1.08E-03	-1458.70	103.47
1700	0.162745	-9.03E-04	-1347.26	118.26
1800	0.080758	-7.39E-04	-1224.30	126.70
1900	0.014431	-5.90E-04	-1095.59	129.95
2000	-0.037878	-4.59E-04	-965.78	129.05
2100	-0.077825	-3.43E-04	-838.56	124.93
2200	-0.107036	-2.44E-04	-716.73	118.39
2300	-0.127068	-1.59E-04	-602.35	110.13
2400	-0.139382	-8.92E-05	-496.85	100.74
2500	-0.145328	-3.18E-05	-401.08	90.73
2600	-0.146131	1.39E-05	-315.47	80.48
2700	-0.142886	4.94E-05	-240.09	70.32
2800	-0.136558	7.58E-05	-174.71	60.51
2900	-0.127985	9.45E-05	-118.89	51.22
3000	-0.117880	1.07E-04	-72.04	42.59
3100	-0.106845	1.13E-04	-33.46	34.71
z	profondità			
y	spostamento			
Θ	rotazione			
M	momento			
T	taglio			

Tabella 3 – Risultati ottenuti

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">F0</td> <td style="text-align: left;">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						

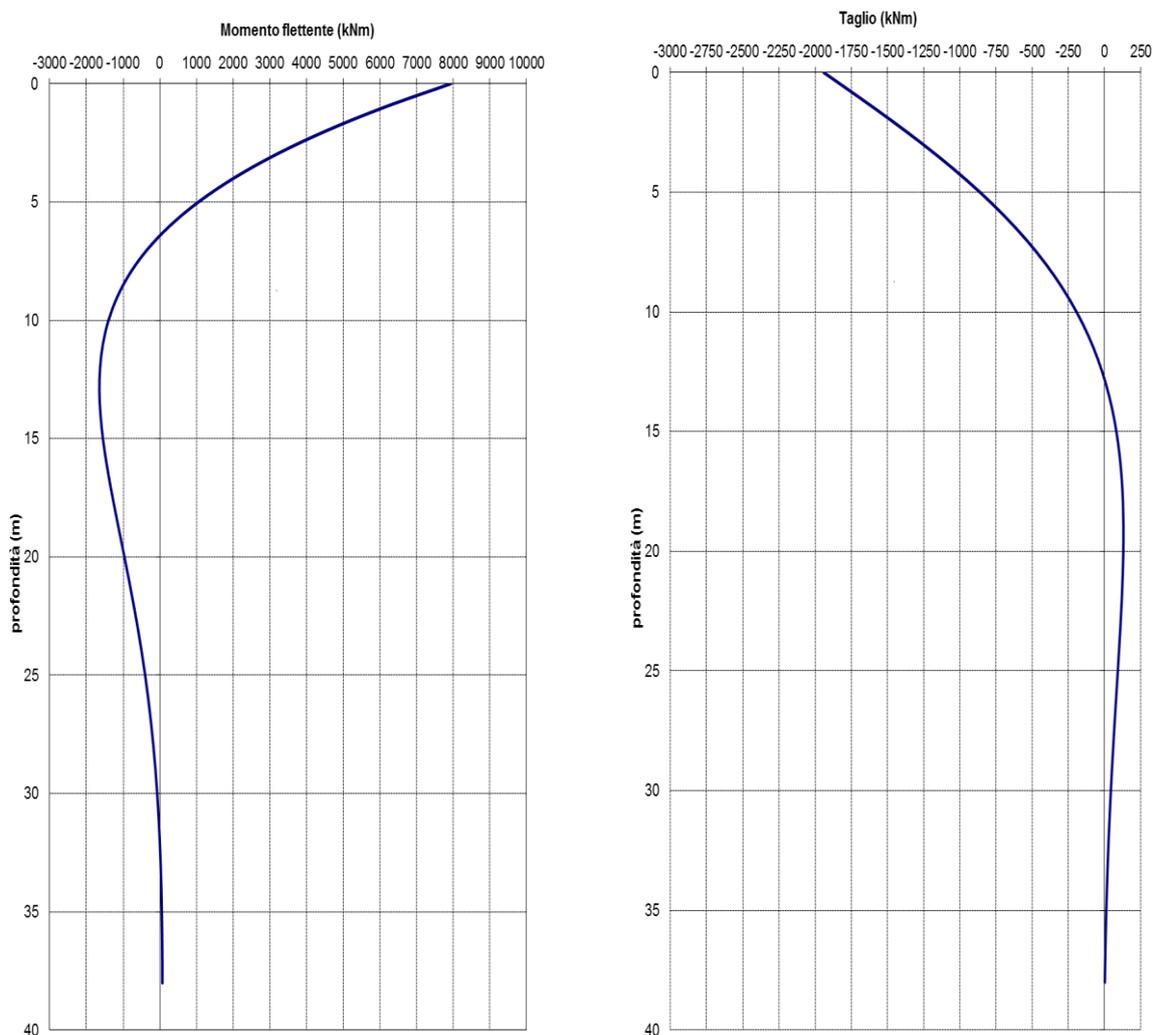


Figura 7 – Risultati ottenuti

Le componenti dello sforzo tagliante massimo secondo le due direzioni principali x e y sono date da:

$$V_x = 457.9 \text{ kN}$$

$$V_y = 1886.1 \text{ kN.}$$

Analogamente a quanto eseguito precedentemente si sono ricavati i momenti di incastro relativi alle due componenti suddette ottenendo:

$$M_{x,i} = 1870 \text{ kNm}$$

$$M_{y,i} = 7705 \text{ kNm.}$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Con riferimento alla precedente formula [1], i momenti di incastro massimi ottenuti dalla combinazione di carico cui corrisponde il valore massimo del taglio sono stati cautelativamente applicati a ciascuno degli approcci progettuali considerati,. Si sono pertanto ottenuti i valori di sollecitazione massimi e minimi applicate alla testa dei pali per i vari approcci di calcolo utilizzati, che tengono in conto della variazione del carico assiale (sia in compressione che in trazione) dovuta ai momenti di incastro alla testa dei pali.

Si riportano di seguito le sollecitazioni massime ottenute.

<b>COMBINAZIONE</b>	<b>N<sub>max</sub> (comp) (kN)</b>	<b>N<sub>max</sub> (traz) (kN)</b>
A1+M1	8078.7	-
A2+M1	6949.0	-
SISMA+M1	9206.3	-3385.5

Tabella 4 – Sollecitazioni massime testa pali (comp[+]-traz[-])- Spalle A e B

## 5.2.3 VERIFICA DELLE SEZIONI

### 5.2.3.1 VERIFICHE GEOTECNICHE (SLU)

Nei calcoli successivamente riportati si è operato secondo quanto indicato dalle “Norme tecniche per le Costruzioni”, D.M. 14/01/2008. In particolare si è fatto riferimento al capitolo 6 “Progettazione geotecnica” e al paragrafo 6.4.3 “Fondazioni su pali”.

Come previsto dal punto 6.4.3.1 N.T.C le verifiche di sicurezza devono prevedere tutti i meccanismi di stato limite ultimo.

Le verifiche sono state effettuate determinando la capacità portante seguendo i due approcci

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

(punto 6.4.3.1 N.T.C):

### Approccio 1

- **(A1+M1+R1)**
- **(A2+M1+R2)**

### Approccio 2

- **(A1+M1+R3)**

In presenza di azioni sismiche, come previsto al punto 7.11.5.3, è stata considerata anche la combinazione **SISMA+M1+R3**.

Le azioni sollecitanti sono state calcolate utilizzando i coefficienti A di cui alla Tabella 5 di seguito riportata; i parametri di resistenza del terreno tramite i coefficienti M di Tabella 6, mentre i valori di resistenza sono stati adeguatamente ridotti tramite i coefficienti R riportati in Tabella 7 relativi a pali trivellati.

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali <sup>(1)</sup>	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

(1) Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Tabella 5 - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
		<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>	<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE $\gamma_M$	(M1)	(M2)
<i>Tangente dell'angolo di resistenza al taglio</i>	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
<i>Coesione efficace</i>	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
<i>Resistenza non drenata</i>	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
<i>Peso dell'unità di volume</i>	$\gamma$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0

Tabella 6 - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Resistenza	Simbolo	Pali infissi			Pali trivellati			Pali ad elica continua		
		(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)
Base	$\gamma_b$	1,0	1,45	1,15	1,0	1,7	1,35	1,0	1,6	1,3
Laterale in compressione	$\gamma_s$	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15
Totale <sup>(*)</sup>	$\gamma_t$	1,0	1,45	1,15	1,0	1,6	1,30	1,0	1,55	1,25
Laterale in trazione	$\gamma_{st}$	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25

<sup>(\*)</sup> da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

Tabella 7 – Coefficienti parziali da applicare alle resistenze caratteristiche

Secondo tale schema la resistenza di calcolo  $R_d$  del singolo palo, ricavata da metodi di calcolo analitici che prevedono l'uso dei parametri geotecnici, può essere determinata andando a valutare la resistenza a compressione  $R_{c,k}$  o in trazione  $R_{t,k}$  come il minore dei valori ottenuti applicando i coefficienti di riduzione  $\xi_3$  e  $\xi_4$ , riportati di seguito, alle resistenze  $R_{cal}$ , dedotte dai risultati delle prove in sito eseguite.

$$R_{c,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c,cal})_{media}}{\zeta_3}, \frac{(R_{c,cal})_{min}}{\zeta_4} \right\}$$

Considerando una verticale di indagine disponibile in corrispondenza delle opere di progetto, si è fatto riferimento ai parametri geotecnici medi. Si avrà inoltre:

$$\zeta_3 = 1.70$$

$$\zeta_4 = 1.70.$$

Ricavata la  $R_{c,k}$  ( $R_{t,k}$ ) si otterrà la resistenza di calcolo  $R_d$ , andando ad applicare alla  $R_{c,k}$  ( $R_{t,k}$ ) i coefficienti parziali, riportati nella precedente Tabella 7 rispettivamente per pali trivellati.

Dovrà risultare che:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$$E_d \leq R_d$$

dove  $E_d$  rappresenta il valore di progetto delle azioni.

### 5.2.3.1.1 VERIFICA PER FORZE ASSIALI

La capacità portante del palo è data da:

$$Q_{TOT} = Q_l + Q_p - W_{palo}$$

dove:

$Q_l$ : resistenza per attrito laterale

$Q_p$ : resistenza di punta.

$W_{palo}$ : peso proprio palo

Nei successivi paragrafi verranno descritti i metodi di calcolo utilizzati per ricavare i singoli contributi di resistenza.

### RESISTENZA DI PUNTA

#### **Punta in terreni incoerenti**

Per pali con punta in terreni incoerenti è valida l'espressione:

$$Q_p = A_b \cdot \sigma_{vb}' \cdot N_q$$

dove:

$\sigma_{vb}'$  = tensione verticale efficace al livello della base del palo;

$N_q$  = fattore di capacità portante;

$A_b$  = area di base del palo.

$N_q$  è funzione del rapporto  $L/D$  e del valor mediato-ponderato dell'angolo d'attrito nel terreno posto ad una distanza dalla punta del palo di  $L-3\div 5D \leq z \leq L+3\div 5D$ .

I valori di  $N_q$  utilizzati sono quelli di Berezantzev corrispondenti al rapporto cedimento alla base e

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE GEOTECNICA		Codice documento SS0779_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">Rev</td> <td style="width: 50%;">Data</td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	Rev	Data	F0	20/06/2011
Rev	Data						
F0	20/06/2011						

diametro pari a  $s/D = 0.06 \div 0.10$  dedotti dalle “Raccomandazioni sui pali di fondazione” dell’Associazione geotecnica italiana (1984), validi per pali trivellati di “grande” diametro.

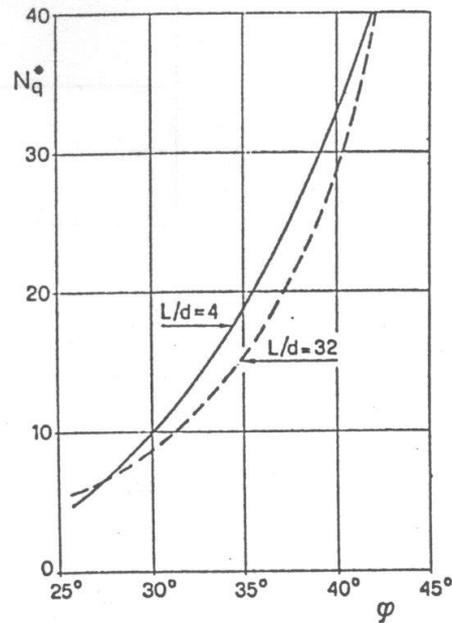


Figura 8 – Fattore  $N_q$  Berezantzev ridotto

### Punta in terreni coesivi

Per pali con punta in terreni coesivi è valida l’espressione:

$$Q_p = A_b \cdot 9 \cdot C_u$$

dove:

$C_u$  = coesione non drenata;

$A_b$  = area di base del palo.

### RESISTENZA LATERALE

La resistenza per attrito laterale assume due diverse espressioni a seconda che il palo si trovi all’interno di uno strato di natura coesiva o sabbiosa.

#### Strati argillosi

La resistenza fornita dall’attrito laterale tra palo e strato argilloso, per pali soggetti a compressione,

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

viene calcolata secondo la:

$$Q_{l,comp} = \alpha \cdot c_u \cdot A_l$$

dove:

- $\alpha$  : coefficiente rappresentato in Figura 9 (tratto da Raccomandazioni AGI sui pali di fondazione);
- $c_u$  : coesione non drenata;
- $A_l$  : superficie laterale del palo per lo strato interessato.

<b>Pali trivellati CLS</b>	
<b><math>C_u</math> [kPa]</b>	<b><math>\alpha</math></b>
<= 25	0.90
25 – 50	0.80
50 – 75	0.60
>= 75	0.40

Figura 9 – Valori del coefficiente  $\alpha$

La resistenza laterale per pali soggetti a trazione è stata valutata secondo la relazione proposta da De Nicola e Randolph (1993):

$$Q_{l,irraz} = 0.7Q_{l,comp} + W_{palo}$$

dove

$W_{palo}$  peso proprio del palo.

Si noti che il coefficiente relativo al peso proprio del palo (forza esterna “favorevole”) è pari a “1” sia per le combinazioni di carico A1-STR che A2-GEO (cfr. Tab. 2.6.I-NTC2008).

### **Strati sabbiosi**

L’espressione della resistenza laterale per pali soggetti a compressione assume tale espressione:

$$Q_{l,comp} = K_s \cdot \mu \cdot \sigma'_v \cdot A_l$$

dove:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$K_s$  coefficiente dipendente dalla tipologia di palo posto pari a 0.40 per pali trivellati;

$\mu$  coefficiente di attrito pari a  $\tan \phi$ ;

$\sigma_v'$  tensione verticale efficace media dello strato in esame;

$A_l$  superficie laterale del palo per lo strato interessato.

La resistenza laterale per pali soggetti a trazione è stata valutata secondo la relazione proposta da De Nicola e Randolph (1993):

$$Q_{l, \text{traz}} = 0.7Q_{l, \text{comp}} + W_{\text{palo}}$$

dove

$W_{\text{palo}}$  peso proprio del palo.

Si noti che il coefficiente relativo al peso proprio del palo (forza esterna “favorevole”) è pari a “1” sia per le combinazioni di carico A1-STR che A2-GEO (cfr. Tab. 2.6.I-NTC2008).

### 5.2.3.1.2 EFFICIENZA PALIFICATA

Il carico limite di ciascuna palificata sarà dato da:

$$Q_{\text{gruppo}} = \eta \cdot n \cdot Q_{\text{sing}}$$

dove:

$\eta$ : efficienza della palificata;

$n$ : numero dei pali della palificata;

$Q_{\text{sing}}$ : capacità portante palo singolo.

Come proposto dalle Raccomandazioni AGI sui pali di fondazione, l’efficienza della palificata per pali trivellati realizzati in terreni coesivi ad interassi  $< 4D$  è da valutarsi verificando la stabilità globale della palificata quale blocco (Terzaghi-Peck, 1967).

### 5.2.3.1.3 RISULTATI OTTENUTI – PALO SINGOLO

I risultati ottenuti in termini di capacità portante per la tipologia di palo considerata sono di seguito rappresentati.

Come già osservato, si è fatto riferimento a:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### Approccio 1

- (A1+M1+R1)

- (A2+M1+R2)

### Approccio 2

- (A1+M1+R3)

**SISMA+M1+R3.**

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
		<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>	<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0

## SPALLA A

Prof. falda		10.70 m		Litologia Terreno	Tipologia (S/A)	Cu,med (kPa)	φmed (°)	γ (kN/m <sup>3</sup> )	σv (kPa)	σ'v (kPa)
Da (m)	A (m)	L (m)								
0	4			Depositi Alluvionali - sabbie limose				19	38	38.0
4.00	8.00	4.00		Depositi Alluvionali - sabbie limose	S		37	19	114	114.0
8.00	11.60	7.60		Depositi Alluvionali - sabbie limose	S		37	19	186.2	186.2
11.60	15.40	11.40		Depositi Alluvionali - limo argilloso	A	150		19	256.5	228.5
15.40	16.20	12.20		Depositi Alluvionali - sabbie limose	S		37	19	300.2	249.2
16.20	17.00	13.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	315.4	256.4
17.00	18.00	14.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	332.5	264.5
18.00	19.00	15.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	351.5	273.5
19.00	20.00	16.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	370.5	282.5
20.00	21.00	17.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	389.5	291.5
21.00	22.00	18.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	408.5	300.5
22.00	23.00	19.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	427.5	309.5
23.00	24.00	20.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	446.5	318.5
24.00	25.00	21.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	465.5	327.5
25.00	26.00	22.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	484.5	336.5
26.00	27.00	23.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	503.5	345.5
27.00	28.00	24.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	522.5	354.5
28.00	29.00	25.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	541.5	363.5
29.00	30.00	26.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	560.5	372.5
30.00	31.00	27.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	579.5	381.5
31.00	32.00	28.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	598.5	390.5
32.00	33.00	29.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	617.5	399.5
33.00	34.00	30.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	636.5	408.5
34.00	35.00	31.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	655.5	417.5
35.00	36.00	32.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	674.5	426.5
36.00	37.00	33.00		San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	693.5	435.5

Figura 10 – Parametri geotecnici

α (kPa)	K	Alat (m <sup>2</sup> )	Qlim,lat (kN)	σv,punta (kPa)	σ'v,punta (kPa)	Apunta (m <sup>2</sup> )	Peso palo* (kN)	L/D	Nq	Qlim,punta (kN)
0.70	0.4	18.8	647.7	152	152	1.77	42.4	2.7	21.03	5649.0
0.70	0.4	17.0	1599.8	220.4	220.4	1.77	80.6	5.1	21.03	8191.1
0.40	0.4	17.9	2674.3	292.6	245.6	1.77	120.9	7.6	0.00	2385.6
0.70	0.4	3.8	2957.4	307.8	252.8	1.77	129.4	8.1	21.03	9395.2
0.40	0.4	3.8	3485.2	323	260	1.77	137.8	8.7	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	4145.0	342	269	1.77	148.4	9.3	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	4804.7	361	278	1.77	159.0	10.0	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	5464.4	380	287	1.77	169.6	10.7	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	6124.2	399	296	1.77	180.2	11.3	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	6783.9	418	305	1.77	190.9	12.0	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	7443.6	437	314	1.77	201.5	12.7	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	8103.4	456	323	1.77	212.1	13.3	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	8763.1	475	332	1.77	222.7	14.0	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	9422.8	494	341	1.77	233.3	14.7	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	10082.6	513	350	1.77	243.9	15.3	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	10742.3	532	359	1.77	254.5	16.0	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	11402.0	551	368	1.77	265.1	16.7	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	12061.8	570	377	1.77	275.7	17.3	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	12721.5	589	386	1.77	286.3	18.0	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	13381.2	608	395	1.77	296.9	18.7	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	14041.0	627	404	1.77	307.5	19.3	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	14700.7	646	413	1.77	318.1	20.0	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	15360.4	665	422	1.77	328.7	20.7	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	16020.2	684	431	1.77	339.3	21.3	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	16679.9	703	440	1.77	349.9	22.0	0.00	5566.5

Figura 11 – Capacità portante limite laterale e di punta

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		Codice documento SS0779_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

COMPRESSIONE									
LATERALE			PUNTA			APPROCCIO 1		APPROCCIO 2	
R1	R2	R3	R1	R2	R3	$\xi_3$	A1+M1+R1	A2+M1+R2	A1+M1+R3
						$\xi_4$	SISMA+M1+R3		
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	3648.8	2175.0	2737.6
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	5654.6	3402.7	4282.7
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	2819.3	1789.5	2250.3
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	7098.1	4321.3	5438.4
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	5145.4	3202.2	4029.0
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	5519.7	3459.2	4352.7
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	5894.0	3716.3	4676.4
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	6268.2	3973.3	5000.1
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	6642.5	4230.3	5323.7
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	7016.8	4487.4	5647.4
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	7391.1	4744.4	5971.1
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	7765.4	5001.4	6294.8
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	8139.7	5258.5	6618.4
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	8514.0	5515.5	6942.1
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	8888.3	5772.6	7265.8
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	9262.6	6029.6	7589.5
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	9636.9	6286.6	7913.1
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	10011.2	6543.7	8236.8
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	10385.5	6800.7	8560.5
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	10759.8	7057.7	8884.2
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	11134.1	7314.8	9207.9
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	11508.4	7571.8	9531.5
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	11882.7	7828.9	9855.2
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	12257.0	8085.9	10178.9
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	12631.3	8342.9	10502.6

Figura 12 – Resistenza di calcolo pali (compressione) [Rd]

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
		<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>	<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0

TRAZIONE					
R1	R2	R3	APPROCCIO 1		APPROCCIO 2
			A1+M1+R1	A2+M1+R2	A1+M1+R3
			SISMA+M1+R3		
1.00	1.60	1.25	443.4	343.4	390.1
1.00	1.60	1.25	978.6	731.6	846.9
1.00	1.60	1.25	1521.7	1108.8	1301.5
1.00	1.60	1.25	1659.6	1202.9	1416.0
1.00	1.60	1.25	1898.1	1359.9	1611.1
1.00	1.60	1.25	2196.2	1556.2	1854.9
1.00	1.60	1.25	2494.4	1752.5	2098.7
1.00	1.60	1.25	2792.6	1948.8	2342.6
1.00	1.60	1.25	3090.7	2145.1	2586.4
1.00	1.60	1.25	3388.9	2341.4	2830.2
1.00	1.60	1.25	3687.1	2537.7	3074.1
1.00	1.60	1.25	3985.2	2734.0	3317.9
1.00	1.60	1.25	4283.4	2930.3	3561.7
1.00	1.60	1.25	4581.5	3126.6	3805.6
1.00	1.60	1.25	4879.7	3322.8	4049.4
1.00	1.60	1.25	5177.9	3519.1	4293.2
1.00	1.60	1.25	5476.0	3715.4	4537.0
1.00	1.60	1.25	5774.2	3911.7	4780.9
1.00	1.60	1.25	6072.4	4108.0	5024.7
1.00	1.60	1.25	6370.5	4304.3	5268.5
1.00	1.60	1.25	6668.7	4500.6	5512.4
1.00	1.60	1.25	6966.9	4696.9	5756.2
1.00	1.60	1.25	7265.0	4893.2	6000.0
1.00	1.60	1.25	7563.2	5089.5	6243.9
1.00	1.60	1.25	7861.3	5285.8	6487.7

Figura 13 – Resistenza di calcolo pali (trazione) [Rd]

L (m)	COMPRESIONE				TRAZIONE			
	APPROCCIO 1		APPROCCIO 2		APPROCCIO 1		APPROCCIO 2	
	A1+M1+R1	A2+M1+R2	A1+M1+R3	SISMA M1+R3	A1+M1+R1	A2+M1+R2	A1+M1+R3	SISMA M1+R3
	Ed,max (kN)				Ed,max (kN)			
	8078.7	6949.0	8078.7	9206.3	-	-	-	3385.5
4.0	0.45	0.31	0.34	0.30	-	-	-	0.12
7.6	0.70	0.49	0.53	0.47	-	-	-	0.25
11.4	0.35	0.26	0.28	0.24	-	-	-	0.38
12.2	0.88	0.62	0.67	0.59	-	-	-	0.42
13.0	0.64	0.46	0.50	0.44	-	-	-	0.48
14.0	0.68	0.50	0.54	0.47	-	-	-	0.55
15.0	0.73	0.53	0.58	0.51	-	-	-	0.62
16.0	0.78	0.57	0.62	0.54	-	-	-	0.69
17.0	0.82	0.61	0.66	0.58	-	-	-	0.76
18.0	0.87	0.65	0.70	0.61	-	-	-	0.84
19.0	0.91	0.68	0.74	0.65	-	-	-	0.91
20.0	0.96	0.72	0.78	0.68	-	-	-	0.98
21.0	1.01	0.76	0.82	0.72	-	-	-	1.05
22.0	1.05	0.79	0.86	0.75	-	-	-	1.12
23.0	1.10	0.83	0.90	0.79	-	-	-	1.20
24.0	1.15	0.87	0.94	0.82	-	-	-	1.27
25.0	1.19	0.90	0.98	0.86	-	-	-	1.34
26.0	1.24	0.94	1.02	0.89	-	-	-	1.41
27.0	1.29	0.98	1.06	0.93	-	-	-	1.48
28.0	1.33	1.02	1.10	0.97	-	-	-	1.56
29.0	1.38	1.05	1.14	1.00	-	-	-	1.63
30.0	1.42	1.09	1.18	1.04	-	-	-	1.70
31.0	1.47	1.13	1.22	1.07	-	-	-	1.77
32.0	1.52	1.16	1.26	1.11	-	-	-	1.84
33.0	1.56	1.20	1.30	1.14	-	-	-	1.92

Figura 14 – Rapporti Resistenza di calcolo [Rd] / Azione di calcolo [Ed]

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
		<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>	<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0

Nella tabella precedente si riportano i rapporti Rd/Ed. In tal modo si è valutata la lunghezza minima richiesta dei pali, dovendo essere Rd/Ed  $\geq 1$ .

*I valori di  $R_d$  ottenuti tengono in conto dell'incremento dovuto al peso proprio del palo rispetto al terreno in sito (circa 6 kPa), al quale sono stati applicati i coefficienti relativi alle forze esterne (A1-STR=1.30 – A2-GEO=1.00).*

## SPALLA B

Prof. falda		12.40 m								
Da	A	L	Litologia Terreno	Tipologia	Cu,med	$\phi_{med}$	$\gamma$	$\sigma_v$	$\sigma'_v$	
(m)	(m)	(m)		(S/A)	(kPa)	(°)	(kN/m <sup>3</sup> )	(kPa)	(kPa)	
0	3		Depositi Alluvionali - sabbie limose				19	28.5	28.5	
3.00	9.50	6.50	Depositi Alluvionali - sabbie limose	S		37	19	118.75	118.8	
9.50	13.10	10.10	Depositi Alluvionali - sabbie limose	S		37	19	214.7	214.7	
13.10	16.90	13.90	Depositi Alluvionali - limo argilloso	A	150		19	285	259.0	
16.90	17.70	14.70	Depositi Alluvionali - sabbie limose	S		37	19	328.7	279.7	
17.70	18.00	15.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	339.15	284.7	
18.00	19.00	16.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	351.5	290.5	
19.00	20.00	17.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	370.5	299.5	
20.00	21.00	18.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	389.5	308.5	
21.00	22.00	19.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	408.5	317.5	
22.00	23.00	20.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	427.5	326.5	
23.00	24.00	21.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	446.5	335.5	
24.00	25.00	22.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	465.5	344.5	
25.00	26.00	23.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	484.5	353.5	
26.00	27.00	24.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	503.5	362.5	
27.00	28.00	25.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	522.5	371.5	
28.00	29.00	26.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	541.5	380.5	
29.00	30.00	27.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	560.5	389.5	
30.00	31.00	28.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	579.5	398.5	
31.00	32.00	29.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	598.5	407.5	
32.00	33.00	30.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	617.5	416.5	
33.00	34.00	31.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	636.5	425.5	
34.00	35.00	32.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	655.5	434.5	
35.00	36.00	33.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	674.5	443.5	
36.00	37.00	34.00	San Pier Niceto Argilloso	A	350		19	693.5	452.5	

Figura 15 – Parametri geotecnici

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
		<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>	<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0

$\alpha$	K	Alat	Qlim,lat	$\sigma v$ ,punta	$\sigma'v$ ,punta	Apunta	Peso palo*	L/D	Nq	Qlim,punta
(kPa)		(m <sup>2</sup> )	(kN)	(kPa)	(kPa)	(m <sup>2</sup> )	(kN)			(kN)
0.70	0.4	30.6	1096.4	180.5	180.5	1.77	68.9	4.3	21.03	6708.2
0.70	0.4	17.0	2194.3	248.9	248.9	1.77	107.1	6.7	21.03	9250.2
0.40	0.4	17.9	3268.7	321.1	276.1	1.77	147.4	9.3	0.00	2385.6
0.70	0.4	3.8	3586.5	336.3	283.3	1.77	155.9	9.8	21.03	10528.7
0.40	0.4	1.4	3784.4	342	286	1.77	159.0	10.0	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	4444.2	361	295	1.77	169.6	10.7	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	5103.9	380	304	1.77	180.2	11.3	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	5763.6	399	313	1.77	190.9	12.0	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	6423.4	418	322	1.77	201.5	12.7	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	7083.1	437	331	1.77	212.1	13.3	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	7742.8	456	340	1.77	222.7	14.0	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	8402.6	475	349	1.77	233.3	14.7	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	9062.3	494	358	1.77	243.9	15.3	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	9722.0	513	367	1.77	254.5	16.0	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	10381.8	532	376	1.77	265.1	16.7	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	11041.5	551	385	1.77	275.7	17.3	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	11701.2	570	394	1.77	286.3	18.0	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	12361.0	589	403	1.77	296.9	18.7	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	13020.7	608	412	1.77	307.5	19.3	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	13680.4	627	421	1.77	318.1	20.0	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	14340.2	646	430	1.77	328.7	20.7	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	14999.9	665	439	1.77	339.3	21.3	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	15659.6	684	448	1.77	349.9	22.0	0.00	5566.5
0.40	0.4	4.7	16319.4	703	457	1.77	360.5	22.7	0.00	5566.5

Figura 16 – Capacità portante limite laterale e di punta

COMPRESSIONE									
LATERALE			PUNTA			APPROCCIO 1		APPROCCIO 2	
R1	R2	R3	R1	R2	R3	$\zeta_3$	A1+M1+R1	A2+M1+R2	A1+M1+R3
						$\zeta_4$	SISMA+M1+R3		
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	4501.3	2697.0	3394.2
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	6592.8	3983.8	5013.8
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	3134.5	2004.1	2519.9
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	8100.4	4942.3	6219.6
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	5293.8	3302.3	4154.5
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	5668.1	3559.4	4478.2
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	6042.4	3816.4	4801.9
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	6416.7	4073.5	5125.5
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	6791.0	4330.5	5449.2
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	7165.3	4587.5	5772.9
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	7539.6	4844.6	6096.6
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	7913.9	5101.6	6420.2
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	8288.2	5358.7	6743.9
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	8662.5	5615.7	7067.6
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	9036.7	5872.7	7391.3
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	9411.0	6129.8	7714.9
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	9785.3	6386.8	8038.6
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	10159.6	6643.8	8362.3
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	10533.9	6900.9	8686.0
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	10908.2	7157.9	9009.7
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	11282.5	7415.0	9333.3
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	11656.8	7672.0	9657.0
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	12031.1	7929.0	9980.7
1.00	1.45	1.15	1.00	1.70	1.35	1.70	12405.4	8186.1	10304.4

Figura 17 – Resistenza di calcolo pali (compressione) [Rd]

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
		<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>	<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0

TRAZIONE					
R1	R2	R3	APPROCCIO 1		APPROCCIO 2
			A1+M1+R1	A2+M1+R2	A1+M1+R3
			SISMA+M1+R3		
1.00	1.60	1.25	738.6	569.3	648.3
1.00	1.60	1.25	1337.3	998.5	1156.6
1.00	1.60	1.25	1880.5	1375.8	1611.3
1.00	1.60	1.25	2032.6	1478.8	1737.2
1.00	1.60	1.25	2122.0	1537.7	1810.4
1.00	1.60	1.25	2420.2	1733.9	2054.2
1.00	1.60	1.25	2718.3	1930.2	2298.0
1.00	1.60	1.25	3016.5	2126.5	2541.8
1.00	1.60	1.25	3314.7	2322.8	2785.7
1.00	1.60	1.25	3612.8	2519.1	3029.5
1.00	1.60	1.25	3911.0	2715.4	3273.3
1.00	1.60	1.25	4209.2	2911.7	3517.2
1.00	1.60	1.25	4507.3	3108.0	3761.0
1.00	1.60	1.25	4805.5	3304.3	4004.8
1.00	1.60	1.25	5103.6	3500.6	4248.7
1.00	1.60	1.25	5401.8	3696.9	4492.5
1.00	1.60	1.25	5700.0	3893.2	4736.3
1.00	1.60	1.25	5998.1	4089.4	4980.2
1.00	1.60	1.25	6296.3	4285.7	5224.0
1.00	1.60	1.25	6594.5	4482.0	5467.8
1.00	1.60	1.25	6892.6	4678.3	5711.7
1.00	1.60	1.25	7190.8	4874.6	5955.5
1.00	1.60	1.25	7488.9	5070.9	6199.3
1.00	1.60	1.25	7787.1	5267.2	6443.2

Figura 18 – Resistenza di calcolo pali (trazione) [Rd]

L (m)	COMPRESIONE				TRAZIONE			
	APPROCCIO 1		APPROCCIO 2	SISMA	APPROCCIO 1		APPROCCIO 2	SISMA
	A1+M1+R1	A2+M1+R2	A1+M1+R3	M1+R3	A1+M1+R1	A2+M1+R2	A1+M1+R3	M1+R3
Ed,max (kN)					Ed,max (kN)			
	8078.7	6949.0	8078.7	9206.3	-	-	-	3385.5
6.5	0.56	0.39	0.42	0.37	-	-	-	0.19
10.1	0.82	0.57	0.62	0.54	-	-	-	0.34
13.9	0.39	0.29	0.31	0.27	-	-	-	0.48
14.7	1.00	0.71	0.77	0.68	-	-	-	0.51
15.0	0.66	0.48	0.51	0.45	-	-	-	0.53
16.0	0.70	0.51	0.55	0.49	-	-	-	0.61
17.0	0.75	0.55	0.59	0.52	-	-	-	0.68
18.0	0.79	0.59	0.63	0.56	-	-	-	0.75
19.0	0.84	0.62	0.67	0.59	-	-	-	0.82
20.0	0.89	0.66	0.71	0.63	-	-	-	0.89
21.0	0.93	0.70	0.75	0.66	-	-	-	0.97
22.0	0.98	0.73	0.79	0.70	-	-	-	1.04
23.0	1.03	0.77	0.83	0.73	-	-	-	1.11
24.0	1.07	0.81	0.87	0.77	-	-	-	1.18
25.0	1.12	0.85	0.91	0.80	-	-	-	1.25
26.0	1.16	0.88	0.95	0.84	-	-	-	1.33
27.0	1.21	0.92	1.00	0.87	-	-	-	1.40
28.0	1.26	0.96	1.04	0.91	-	-	-	1.47
29.0	1.30	0.99	1.08	0.94	-	-	-	1.54
30.0	1.35	1.03	1.12	0.98	-	-	-	1.62
31.0	1.40	1.07	1.16	1.01	-	-	-	1.69
32.0	1.44	1.10	1.20	1.05	-	-	-	1.76
33.0	1.49	1.14	1.24	1.08	-	-	-	1.83
34.0	1.54	1.18	1.28	1.12	-	-	-	1.90

Figura 19 – Rapporti Resistenza di calcolo [Rd] / Azione di calcolo [Ed]

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Nella tabella precedente si riportano i rapporti Rd/Ed. In tal modo si è valutata la lunghezza minima richiesta dei pali, dovendo essere Rd/Ed ≥ 1.

*I valori di  $R_d$  ottenuti tengono in conto dell'incremento dovuto al peso proprio del palo rispetto al terreno in sito (circa 6 kPa), al quale sono stati applicati i coefficienti relativi alle forze esterne (A1-STR=1.30 – A2-GEO=1.00).*

#### 5.2.3.1.4 EFFICIENZA PALIFICATA

Come precedentemente accennato, secondo le Raccomandazioni AGI sui pali di fondazione, l'efficienza della palificata per pali trivellati realizzati in terreni coesivi ad interassi < 4D è da valutarsi verificando la stabilità globale della palificata quale blocco (Terzaghi-Peck, 1967).

La capacità portante limite del blocco diviene:

$$Q_{blocco} = BhN_c C_{u(L)} + 2(h + B)L\bar{q}_s$$

dove:

B: dimensione minore del plinto di collegamento

L: lunghezza pali (compreso spessore plinto)

h: dimensione maggiore plinto di collegamento

$N_c$ : coefficiente da valutarsi secondo le Raccomandazioni AGI

$C_{u(L)}$ : coesione non drenata alla profondità L

$q_s$ : valore medio resistenza al taglio nel tratto L.

#### SPALLA A

h	16.5	m
B	12	m
L	31.5	m
$N_c$	11.29	
$C_{uL}$	350	kPa
$q_s$	140	kPa
$Q_{lim, blocco}$	1033420.5	kN
$Q_{lim, sing}$	19300	kN

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

n° pali	12	
Q <sub>lim,singxn,pali</sub>	231600	kN
<b>Efficienza</b>	<b>4.46</b>	

## SPALLA B

h	16.5	m
B	12	m
L	31.5	m
N <sub>c</sub>	11.29	
C <sub>uL</sub>	350	kPa
q <sub>s</sub>	140	kPa
Q <sub>lim, blocco</sub>	1033420.5	kN
Q <sub>lim,sing</sub>	20227	kN
n° pali	12	
Q <sub>lim,singxn,pali</sub>	242726	kN
<b>Efficienza</b>	<b>4.26</b>	

L'efficienza risulterebbe in tal modo superiore all'unità per tutti i casi considerati.

Si è scelto quindi di considerare l'efficienza della palificata pari alla somma delle capacità portante dei singoli pali.

### 5.2.3.1.5 CALCOLO CARICO LIMITE ORIZZONTALE

La valutazione del carico limite orizzontale dei pali è stata eseguita secondo la teoria di Broms (1964). Secondo l'autore sono possibili tre meccanismi di rottura del palo soggetto ad azioni orizzontali:

- palo corto
- palo intermedio (formazione di una cerniera plastica)
- palo lungo (formazione di due cerniere plastiche).

L'espressione dell'azione orizzontale limite sul palo diviene:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">F0</td> <td style="text-align: left;">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						

$$\frac{H}{c_u d^2} = -13.5 + \sqrt{\left(182.25 + 36 \frac{M_y}{c_u d^3}\right)}$$

essendo:

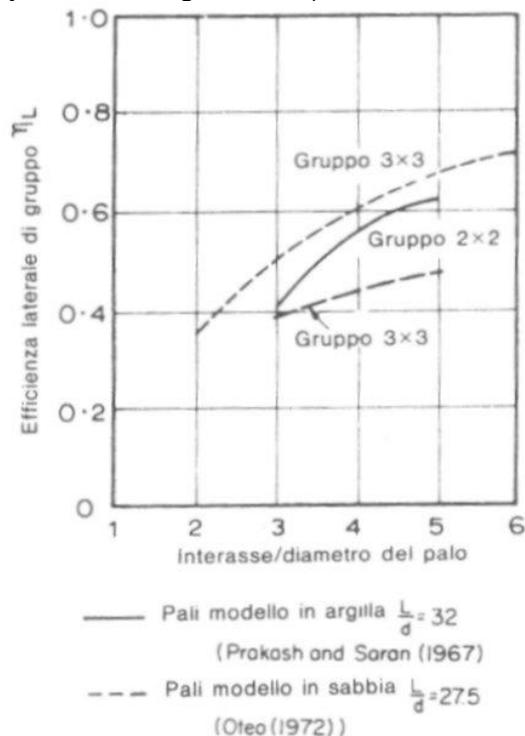
H: azione orizzontale;

$c_u$ : coesione non drenata

d: diametro del palo;

$M_y$ : momento di plasticizzazione del palo calcolato per una sezione circolare  $D=1.50$  m, calcestruzzo  $R_{ck}=30$  MPa (C25/30), acciaio B450C. Considerando un'armatura pari a  $36\phi 40$  si ottiene  $M_y = 9346$  kNm.

I valori di  $H_{lim}$  ricavati sono stati quindi moltiplicati per il coefficiente  $\eta=0.50$ , per tenere conto dell'efficienza del gruppo di pali soggetti ad azioni laterali (vedi figura successiva tratta da Poulos e Davis "Pile foundation analysis and design"– 1980).



Secondo la tabella delle NTC 2008, seguendo i due approcci si ottiene:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

	APPROCCIO 1		APPROCCIO 2 SISMA
	R1	R2	R3
<b>H<sub>lim,d</sub> [kN]</b>	3194.1	1996.3	2457.0
<b>V<sub>max</sub> [kN]</b>	671.4	502.4	1940.9

Tabella 8 – Azione orizzontale limite (NTC 2008 – Approcci 1 e 2 e sisma) – Spalle A e B

In tutti i casi risulta  $H_{lim,d} > V_{max}$ .

La verifica è quindi soddisfatta.

#### 5.2.3.1.6 INTERAZIONE CINEMATICA

Nel punto 7.11.5.3.2 delle NTC 2008 (vedi anche EC8-parte 5-punto 5.4.2) si osserva che “i momenti flettenti dovuti all’interazione cinematica siano valutati per le costruzioni di classe d’uso III e IV, per sottosuoli di tipo D o peggiori, in siti a sismicità media o alta ( $a_g > 0.25g$ ) e in presenza di elevati contrasti di rigidezza al contatto fra strati contigui di terreno”.

Trattandosi di suolo di tipo C, si può trascurare l’effetto dell’interazione cinematica.

#### 5.2.3.2 VERIFICHE GEOTECNICHE (SLE)

##### 5.2.3.2.1 CEDIMENTI PALO SINGOLO

Tra i molteplici schemi di calcolo presenti in letteratura si è utilizzata per il caso in esame la soluzione approssimata proposta da Randolph per mezzo della quale il cedimento  $w_s$  in sommità, di un palo singolo a sezione circolare soggetto ad un carico verticale  $Q_T$ , immerso in un mezzo elastico, omogeneo ed isotropo può essere stimato con la seguente espressione:

$$w_s = \frac{Q_T}{k_1}$$

essendo  $k_1$  la rigidezza del singolo palo data dalla seguente relazione:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$$k_1 = G_L \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} + \rho \frac{4\pi \tanh(\mu L)}{\zeta} \frac{L}{(\mu L) D}}{1 + \frac{1}{\pi\lambda} \frac{8\eta}{(1-\nu)\xi} \frac{L}{(\mu L) D}}$$

dove:

$\eta = D_B/D_S$  rapporto tra il diametro del palo lungo il fusto ed il diametro alla base (pari a 1 nei casi analizzati)

$\xi = G_L/G_B$  rapporto tra il modulo di taglio del terreno in prossimità della base ed il modulo di taglio del terreno sotto la base

$\rho = G_{AVG}/G_L$  rapporto tra il modulo di taglio medio del terreno lungo il fusto ed il modulo di taglio del terreno prossimità della base

$\lambda = E_p/G_L$  rapporto tra il modulo di elasticità del palo ed il modulo di taglio del terreno prossimità della base

$$\zeta = \ln(D_M/D)$$

$$\mu L = \sqrt{2/\zeta} (2L/D) = \text{compressibilità del palo}$$

essendo  $D_M$  il diametro di influenza espresso da

$$D_M = 2.5\rho (1-\nu)L \quad \text{per } \xi = 1 \text{ (pali sospesi) ovvero}$$

$$D_M = (0.25 + \xi(2.5\rho (1-\nu) - 0.25))L \quad \text{per } \xi \neq 1$$

I valori del modulo di taglio del terreno ( $G_{AVG}$ ,  $G_L$ ,  $G_B$ ) da introdurre nelle precedenti relazioni sono nettamente inferiori ai valori di  $G_0$  e validi per bassi livelli di deformazione, poiché nell'intorno del palo le tensioni tangenziali e le deformazioni angolari sono molto elevate. In mancanza di determinazioni sperimentali dirette dei suddetti moduli si è proceduto alla stima indiretta degli stessi per mezzo della seguente relazione estratta dalla teoria dell'elasticità tra il modulo di taglio con quello normale:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

I parametri geotecnici significativi assunti per il calcolo dei cedimenti sono riassunti nella successiva Tabella 9.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

E <sub>L</sub> (MPa)	E <sub>B</sub> (MPa)	E <sub>AVG</sub> (MPa)	G <sub>L</sub> (MPa)	G <sub>B</sub> (MPa)	G <sub>AVG</sub> (MPa)	E <sub>P</sub> (MPa)
70	70	50	26.9	26.9	19.2	31447

Tabella 9 – Parametri utilizzati per il calcolo dei cedimenti

### 5.2.3.2.2 CEDIMENTI PALIFICATA

Poiché le dimensioni in pianta dei plinti di collegamento di pali sono piccole rispetto alla lunghezza dei pali, appare evidente che sia la distribuzione di tensioni sia la profondità dei terreni interessati sono molto simili a quelle che si hanno nel caso di palo singolo.

In tal senso si è fatto riferimento per il calcolo del cedimento della palificata a metodi che lo estrapolano a partire dal cedimento  $w_s$  del palo singolo, precedentemente ricavato.

Sono stati, in particolare, utilizzati due approcci.

Il primo viene suggerito dalle Raccomandazioni AGI secondo le quali il cedimento della palificata può essere espresso dalla:

$$w = w_s \cdot \left( \frac{0.6B}{0.3B + 0.3} \right)^2 \quad (\text{pali trivellati})$$

Il secondo approccio è stato proposto da Vesic (1977).

Il cedimento della palificata è dato in tal caso dalla:

$$w = w_s \cdot \sqrt{\frac{B}{D}}$$

Nelle precedenti formule:

B: dimensione minore del plinto di collegamento dei pali;

D: diametro del palo;

$w_s$ : cedimento del palo singolo.

### 5.2.3.2.3 RISULTATI OTTENUTI

#### SPALLE A E B

Si riportano nella successiva Tabella 10 i risultati ottenuti considerando un carico massimo in condizioni SLE di **3992.6 kN** e una larghezza del plinto di collegamento dei pali B=12.0 m.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Q (kN)	D (mm)	B (m)	Cedimento palo singolo (mm)	Cedimento palificata VESIC (mm)	Cedimento palificata AGI (mm)
3993	1500	12.0	4.2	11.9	14.4

Tabella 10 – Risultati cedimenti (estrapolazione cedimento palo singolo) – Spalle A e B

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE GEOTECNICA	<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 5.2.3.3 VERIFICHE STRUTTURALI

#### 5.2.3.3.1 SOLLECITAZIONI TESTA PALO E ARMATURA MINIMA

##### SPALLE A E B

Riassumendo le sollecitazioni massime agenti sul palo, saranno date da:

$N_{\max}$ (comp) (kN)	$N_{\min}$ (traz) (kN)	$V_{\max}^*$ (kN)	$M_{\max}$ (kNm)
9206.3	-3385.5	2523.2*	7929.3

Tabella 11 – Sollecitazioni massime testa pali (comp[+]-traz[-])- Spalle Direzione ME

\* Anche in questo caso, per tenere in considerazione l'effetto ombra (**shadowing**), per cui i pali "frontali" assorbono valori di taglio diversi da quelli delle file posteriori, il valore del taglio massimo (1940.9 kN) è stato incrementato di un 30%, rifacendosi agli schemi proposti da Poulos e Davis (*Pile foundation analysis and design*, 1980). La figura successiva evidenzia, ad esempio, il rapporto tra l'azione orizzontale che ciascun palo assorbe rispetto all'azione orizzontale media, per un gruppo di 3x3 pali, con testa incastrata.

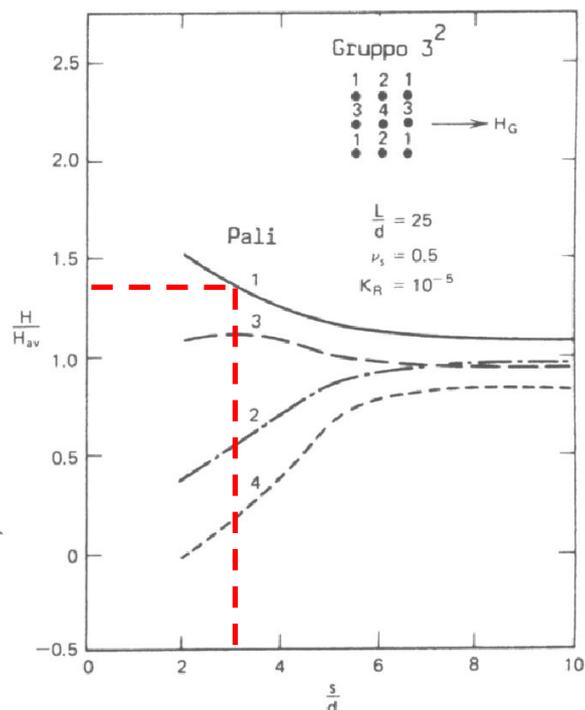


Figura 20 – Distribuzione tipica del carico orizzontale in un gruppo di pali a testa incastrata (Poulos-Davis, 1980)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

Armatura minima da normativa (cfr. p.to 7.2.5 N.T.C. 2008):

per tutta la lunghezza:

$$A_{s, \text{long.}} \geq 0.3\% A_c = 5299 \text{ mm}^2$$

da testa palo per  $L=10\phi$  :

$$A_{s, \text{long.}} \geq 1\% A_c = 17663 \text{ mm}^2$$

copriferro armatura=

$$60 \text{ mm}$$

Armatura longitudinale

n°	$\phi$	$A_{s, \text{long.}}$
	mm	mm <sup>2</sup>
<b>36</b>	<b>40</b>	<b>45216</b>

### 5.2.3.3.2 VERIFICA A TAGLIO

La sezione circolare viene assimilata ad una sezione quadrata con altezza utile pari a  $d=r+2*r/\pi$  (punto 7.9.5.2.2-NTC 2008).

Resistenza cilindrica caratteristica	$f_{ck} =$	24.90 MPa
Resistenza di calcolo a compressione	$f_{cd} =$	14.11 MPa
Altezza utile sezione	$d =$	1227.71 mm
Base sezione	$b_w =$	1227.71 mm
	$k =$	1.40
Area armatura longitudinale tesa	$A_{sl} =$	22608 mm <sup>2</sup>
Azione assiale di progetto	$N_{ed} =$	6174.8 kN
Rapporto geometrico acciaio-clc	$\rho_l =$	0.014999
Area clc sezione equivalente	$A_c =$	1507264 mm <sup>2</sup>
Compressione di progetto	$\sigma_{cp} =$	2.822 MPa
	$v_{min} =$	0.290 MPa
<b>Resistenza al taglio senza armatura</b>	<b><math>V_{Rd} =</math></b>	<b>1075.78 kN</b>

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$V_{Rd} = 1075.78 < 2523.2 \text{ kN}$       **Serve armatura a taglio**

Nel modello a traliccio si assume un'inclinazione del puntone compresso pari a 45°.

Diametro staffe	$\phi_{\text{staffe}}$	18 mm
Bracci	n	2 mm
Spaziatura	s	85 mm
Area staffatura	$A_{sw}$	508.68 mm <sup>2</sup>
Coefficiente maggiorativo (4.1.2.1.3.2)	$\alpha_c$	1.00
Resistenza di calcolo a "taglio trazione"	$V_{Rsd}$	2587.48 kN
Resistenza di calcolo a "taglio compressione"	$V_{Rcd}$	4785.19 kN
<b>Resistenza a taglio con armatura</b>	<b><math>V_{Rd}</math></b>	<b>2587.48 kN</b>

$V_{Rd} = 2587.5 > 2523.2 \text{ kN}$

Tale staffatura andrà inserita da testa palo per una lunghezza di circa 2.00-2.50 m, nel tratto soggetto al taglio massimo. L'area della staffatura sarà poi ridotta secondo le sollecitazioni agenti.

### 5.2.3.3 VERIFICA A PRESSO (TENSO)-FLESSIONE

#### SPALLE A E B

La verifica a presso (tenso)-flessione è stata eseguita per le seguenti combinazioni:

$N_{\max}$ [kN]	$M_{\max}$ [kNm]	$M_{Rd}$ [kNm]
9206.3	7929.3	10859

Tabella 12 – Combinazione  $N_{\max}$  - (comp[+]-traz[-])

$N_{\min}$ [kN]	$M_{\max}$ [kNm]	$M_{Rd}$ [kNm]
-3385.5	7929.3	9166

Tabella 13 – Combinazione  $N_{\min}$  - (comp[+]-traz[-])

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE GEOTECNICA		<i>Codice documento</i> SS0779_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Il calcolo dell'armatura minima è stato eseguito mediante l'utilizzo di un codice di calcolo freeware (VCASLU), che fornisce anche il dominio di resistenza N-M per la sezione circolare considerata. Si riportano di seguito i risultati ottenuti. L'armatura longitudinale del palo utilizzata è di **36  $\phi$  40**. Tale armatura andrà inserita in prossimità della testa del palo, ove sono presenti le sollecitazioni maggiori, per essere poi ridotta lungo il suo sviluppo.

Come si può osservare dai domini di resistenza M-N, le verifiche risultano soddisfatte.

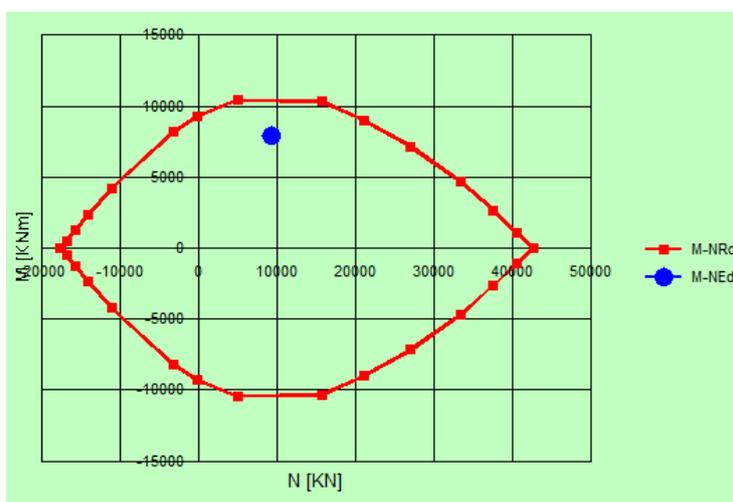


Figura 21 – Risultati verifica presso-flessione ( $N_{max}$ )

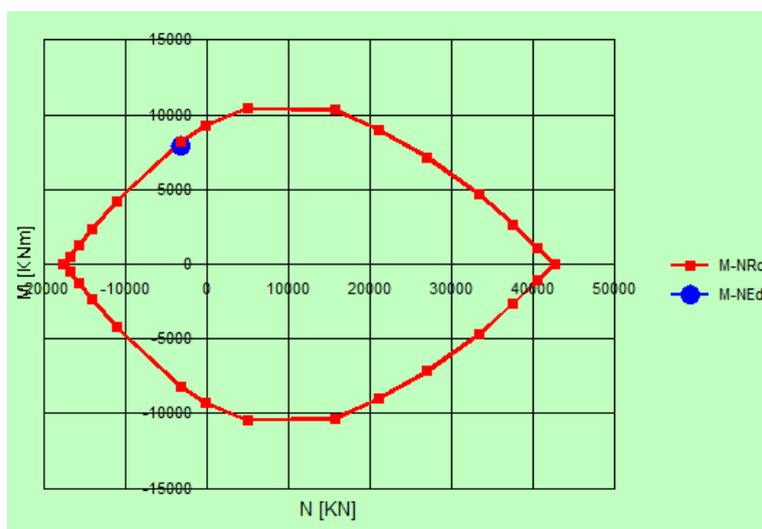


Figura 22 – Risultati verifica tenso-flessione ( $N_{min}$ )