

Gruppo T.M.E. Termomeccanica Ecologia		Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
		97758	PMRE	97758TMCR002	00
				Pag. 1 di 73	

	<h1>REGIONE SICILIANA</h1>
	<h2>PARCO EOLICO OFFSHORE GOLFO DI GELA</h2>
	
<h3>RELAZIONE DI CALCOLO FONDAZIONI AEROGENERATORI</h3>	

					
00	03/12/2006	Prima emissione	D.Cantagallo	F.Baroni	A.Sammartano
REV	Data	Descrizione	Preparato	Verificato	Approvato
Autorizzazione Emissione					



INDICE

1.	Caratterizzazione geotecnica dei terreni	3
1.1.	Riferimenti per la caratterizzazione geotecnica a mare	6
1.2.	Stratigrafia a mare	6
1.2.1.	Postazione Prezioso	6
1.2.2.	Postazione Perla.....	7
1.2.3.	Spiaggiamento della condotta GreenStream	9
1.3.	Stratigrafia per le analisi	10
2.	Determinazione delle azioni di progetto	15
2.1.	Premessa	15
2.2.	Carico da Onde di Progetto (Wave Loads).....	16
2.3.	Carico da Onde Frangenti (Breaking Wave Loads).....	27
2.4.	Effetti delle Correnti (Sea Current Loads).....	28
2.5.	Carico da Impatto (Boat Impact Loads)	38
2.6.	Azioni indotte dagli aerogeneratori	39
2.7.	Carico Sismico (Earthquake Loads)	41
2.8.	Riepilogo delle azioni che impegnano le fondazioni degli aerogeneratori	44
2.9.	Combinazione delle azioni	48
3.	Dimensionamento delle fondazioni degli aerogeneratori.....	52
3.1.	Criteri di Verifica	52
3.2.	Risultati delle analisi effettuate.....	52
3.3.	Fondazioni a monopalo	53
3.3.1.	Stratigrafia tipo 1	53
3.3.2.	Stratigrafia tipo 2	59
3.4.	Fondazione a Tripode	69

Gruppo T.M.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 3 di 73	

1. Caratterizzazione geotecnica dei terreni

Il presente capitolo ha lo scopo di fornire le indicazioni sulla caratterizzazione geotecnica dell'area ubicata al largo di Gela, nella Sicilia Sud-Orientale (Figura 1) dove è prevista la costruzione di un parco eolico composto da 38 aerogeneratori.

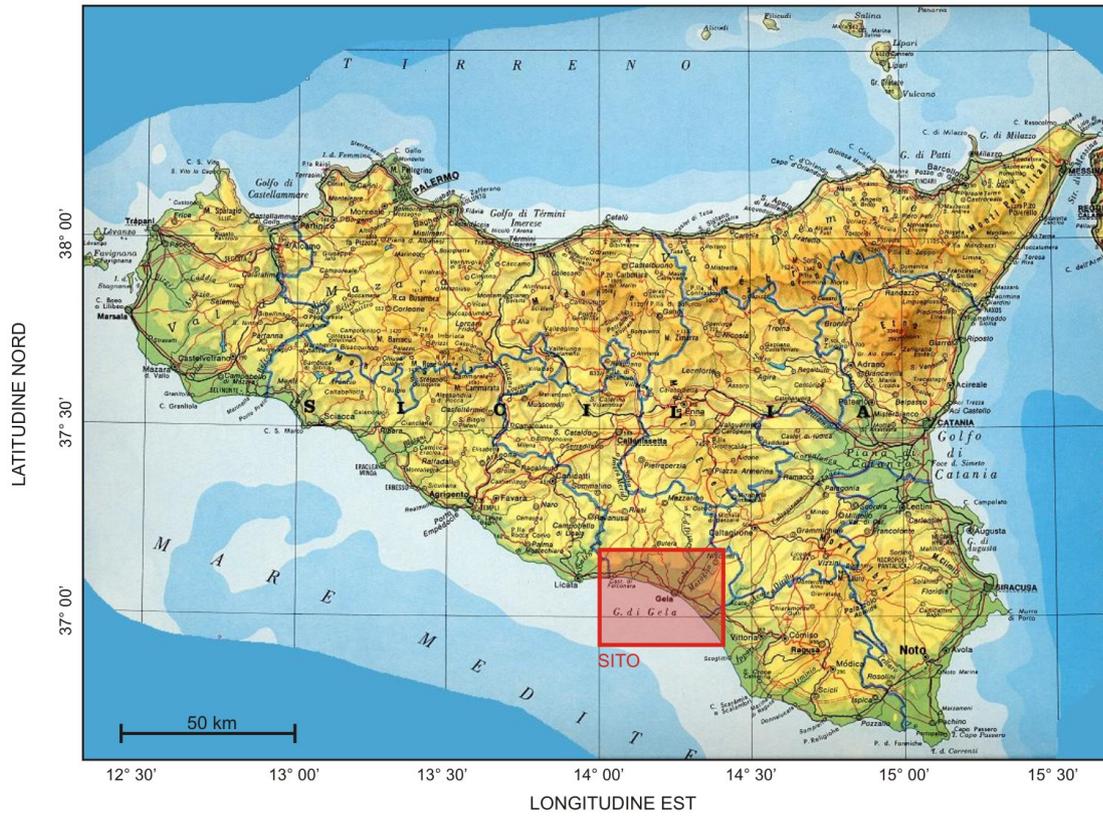
La profondità d'acqua interessata va da un minimo di 13 ad un massimo di 23 m.

Nel seguito del si riportano

- sintesi dei dati disponibili
- definizione della stratigrafia per i calcoli preliminari

La presente relazione è sviluppata in conformità agli standard seguenti:

- American Petroleum Institute, 1993 - Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, Load and Resistance Factor Design, (RP2A-LRFD), Prima Edizione, July 1.
- Germanischer Lloyd, 2005 - Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines – Edizione 2005;



MAPPA CHIAVE



Figura 1 - Ubicazione del Sito

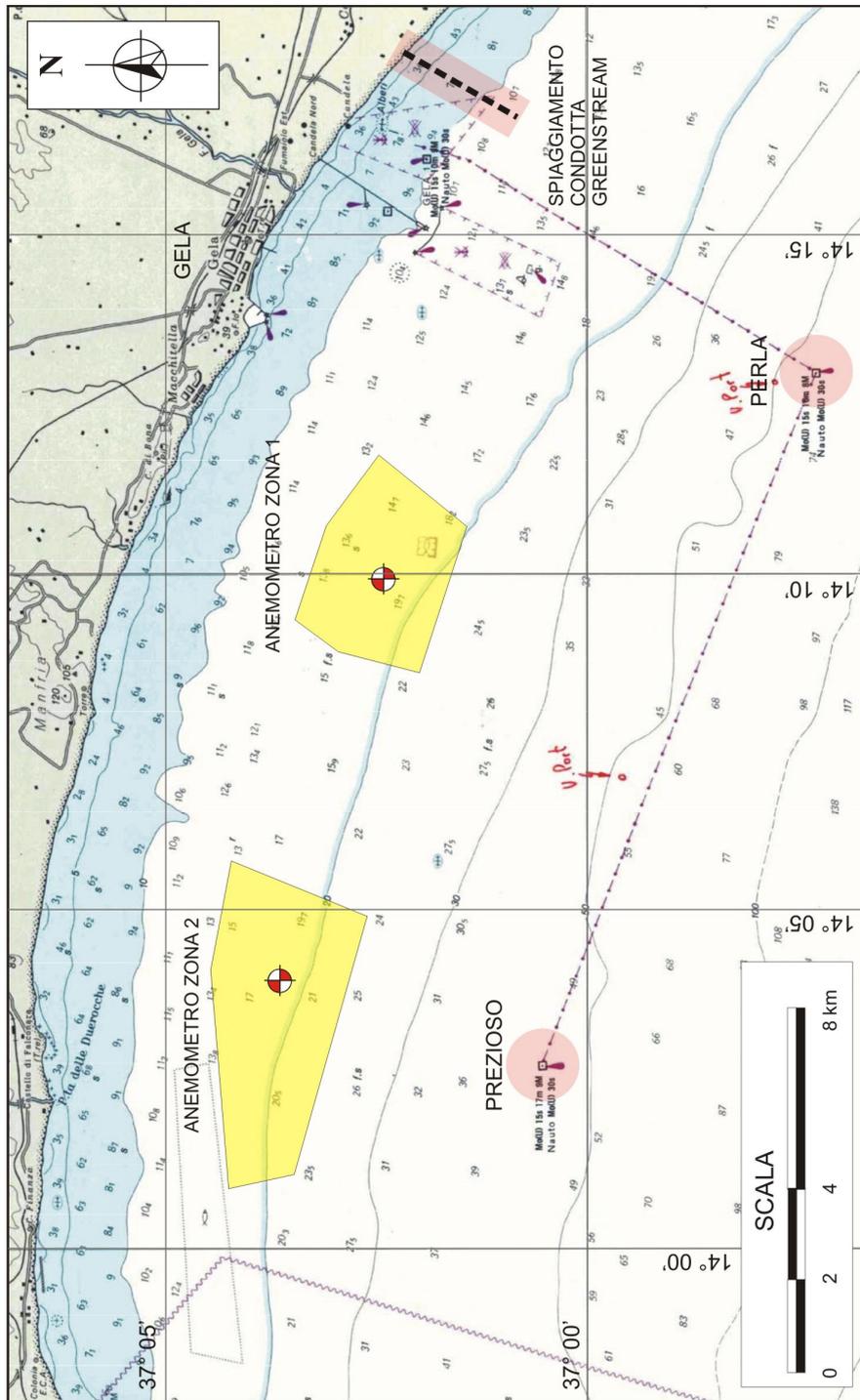


Figura 2 – Identificazione delle aree e localizzazione delle torri meteo

Gruppo T.M.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 6 di 73	

1.1. Riferimenti per la caratterizzazione geotecnica a mare

Per la caratterizzazione geotecnica delle zone di interesse è stato fatto riferimento ai seguenti documenti:

- D'Appolonia, 1985, Rapporto, "Geotechnical Investigation, Location Prezioso, Sicily Channel", Doc. No. 05-321-H2, Revisione 0, emesso in data 1 aprile.
- D'Appolonia, 2001, Rapporto, "Geotechnical Investigation - Sicilian SHore Approach, Lybian Gas Transmission System", Revisione 1, emesso in data 23 aprile
- Fugro, 1980, Rapporto, "Soil and Foundation Report, Perla Field, Mediterranean", Project No. K-1077, Revisione 0, emesso in data 25 gennaio.

1.2. Stratigrafia a mare

1.2.1. Postazione Prezioso

I dati relativi alla postazione Prezioso sono presentati in Figura 3. La stratigrafia al sito è stata suddivisa in 3 Unità, descritte brevemente nel seguito. La profondità d'acqua alla postazione è di circa 45 m.

Unità 1 - da 0 a 39.0 m: argille da soffici a moderatamente consistenti

Questa unità è costituita da argille di alta plasticità, ovvero di tipo CH secondo il sistema di classificazione USCS. Il limite liquido è generalmente compreso tra 70 ed 80, e l'indice di plasticità è di circa 40 - 50. Le argille presentano inoltre un contenuto d'acqua molto elevato, da circa 80% al fondale marino e decrescente con la profondità fino a circa 38% a 39 m. Il peso specifico di questi materiali, coerentemente con il contenuto d'acqua risulta crescere con la profondità da 6.0 a 8.5 kN/m³. La resistenza al taglio non drenata aumenta anch'essa con la profondità da un valore approssimativamente pari a 2 kPa al fondale fino a 50 kPa a fondo strato. La resistenza a taglio non drenata ha un andamento consistente con condizioni normalconsolidate. L'Unità 1 costituisce pertanto materiali che si sono depositati in condizioni recenti e che non hanno subito processi di preconsolidazione.

Unità 2 - da 39.0 a 43.5: sabbie fini e limi addensati

Questa unità è costituita da sabbie e limi densi. Visto lo scarso spessore dello strato si hanno a disposizione un limitato numero di dati. Il contenuto di materiali fini è di circa il 50%. Il contenuto d'acqua è pari a circa 20%. La resistenza alla punta del cono penetrometrico statico varia tra circa 2.5 a 20 MPa a seconda del contenuto di limo presente nello strato.

Unità 3 - da 43.5 a 120 m: argille da molto consistenti a dure

Le argille dell'Unità 3 sono classificate come argille da elevata a media plasticità, ovvero CH oppure CL. Il limite liquido è solitamente prossimo 50, mentre l'indice di plasticità varia tra circa 25 e 40. Il contenuto d'acqua è approssimativamente costante con la profondità pari a circa 28%, prossimo al limite plastico. Il peso specifico è anch'esso grossomodo costante con la profondità ad un valore di 9.5 kN/m³. La resistenza al taglio varia da circa 100 kPa alla sommità dello strato e cresce linearmente fino a 225 kPa a fondo strato. Al di sotto di 100 m, la resistenza al taglio non drenata è all'incirca costante e pari a 325 kPa.

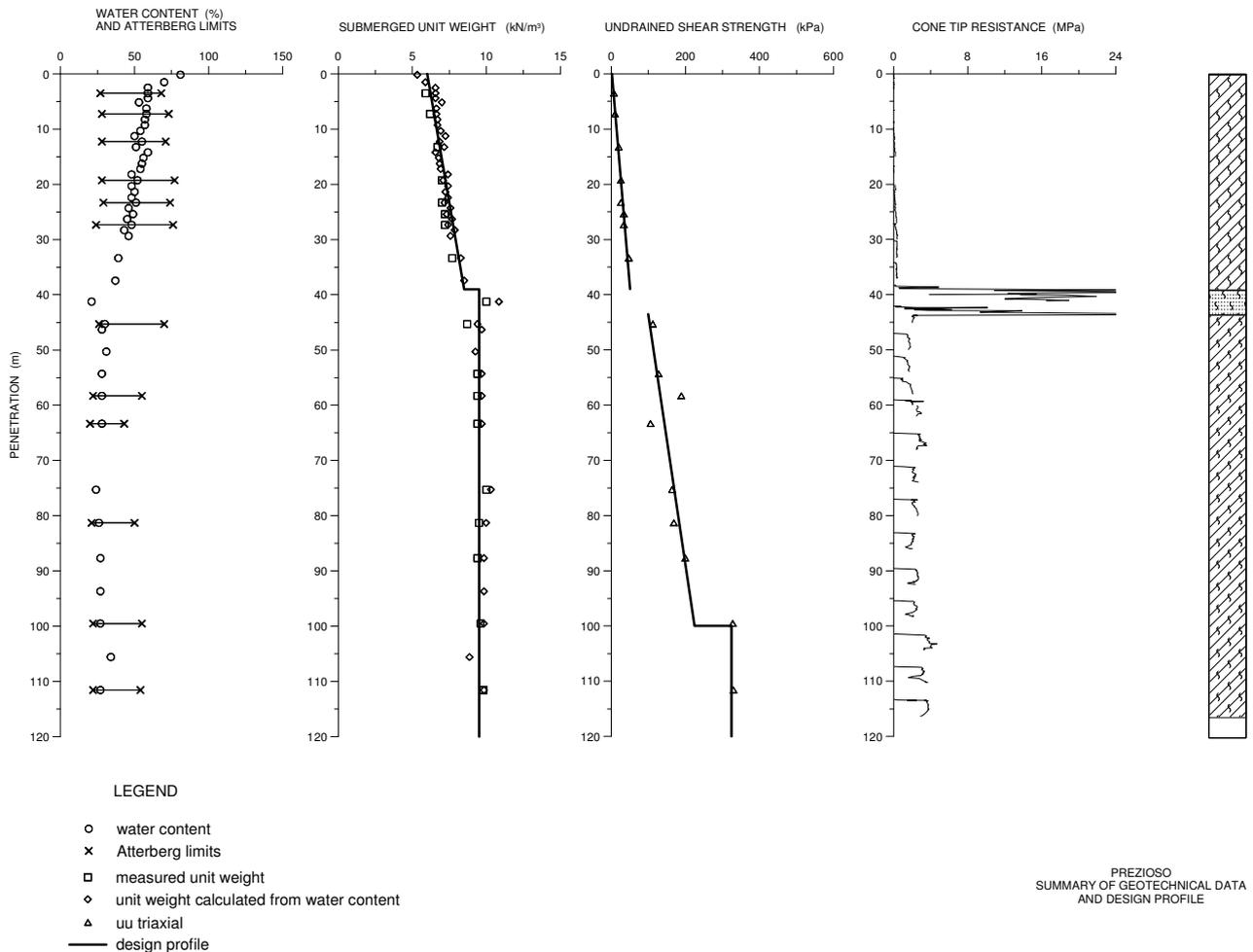


Figura 3 - Postazione Prezioso - Sintesi dei Dati Geotecnici Disponibili

1.2.2. Postazione Perla

La sintesi dei dati disponibili alla postazione Perla (Fugro, 1980) è riportata in Figura 4. La stratigrafia alla postazione Perla comprende le seguenti Unità. La profondità d'acqua è di circa 65 m.

Gruppo TM.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 8 di 73	

Unità 1 - da 0 a 60.0 m: argille da soffici a consistenti

L'Unità 1 è costituita da argille ad alta plasticità (CH). Il limite liquido è pari a circa 80, mentre l'indice di plasticità è mediamente pari a 50. Il contenuto d'acqua diminuisce gradualmente con la profondità da circa 80% al fondale marino a circa 40% a fondo strato. Congruentemente, il peso specifico aumenta da 6.0 a 8.5 kN/m³. La resistenza al taglio ha andamento lineare con la profondità, a partire da circa 2 kPa al fonale fino a 80 kPa alla profondità di 60 m. L'Unità 1 rappresenta uno strato di argille normalconsolidate, molto simile a quanto riscontrato alla postazione Prezioso.

Unità 2 - da 60.0 a 91.4 m: argille da molto consistenti a dure

L'Unità 2 è costituita da argille ad elevata o media plasticità (CH o CL). Il limite liquido è compreso tra circa 60 e poco meno di 50, mentre l'indice di plasticità è tra circa 35 e 25. Il contenuto d'acqua diminuisce leggermente con la profondità, ed è pari a circa 30% a metà strato. Il peso specifico può essere ragionevolmente assunto costante con la profondità su un valore di 9.5 kN/m³. La resistenza al taglio, desunta da prove triassiali non consolidate non drenate, varia linearmente con la profondità da 150 a 250 kPa, ed è caratteristica di una argilla da normalmente consolidata a leggermente sovraconsolidata.

Unità 3 - da 91.4 a 94.2m: sabbia media da addensata a molto addensata

L'Unità 3 è costituita da una sabbia media, pulita, da addensata a mediamente addensata. Visto lo scarso spessore dello strato si hanno a disposizione un limitato numero di dati. Il contenuto d'acqua è intorno a 25%. La resistenza alla punta del cono varia da 6 a più di 20 MPa.

Unità 4 - da 94.2 a 110m: argilla dura

L'Unità 3 è costituita da argille a bassa plasticità (CL) con limite liquido pari a circa 45 e indice di plasticità di circa 20. Il contenuto d'acqua è pari a circa 30%, mentre il peso specifico è costante e pari a 9.5 kN/m³. La rsistenza a taglio non drenata dell'Unità 4 desunta da prove triassiali è di 250 kPa.

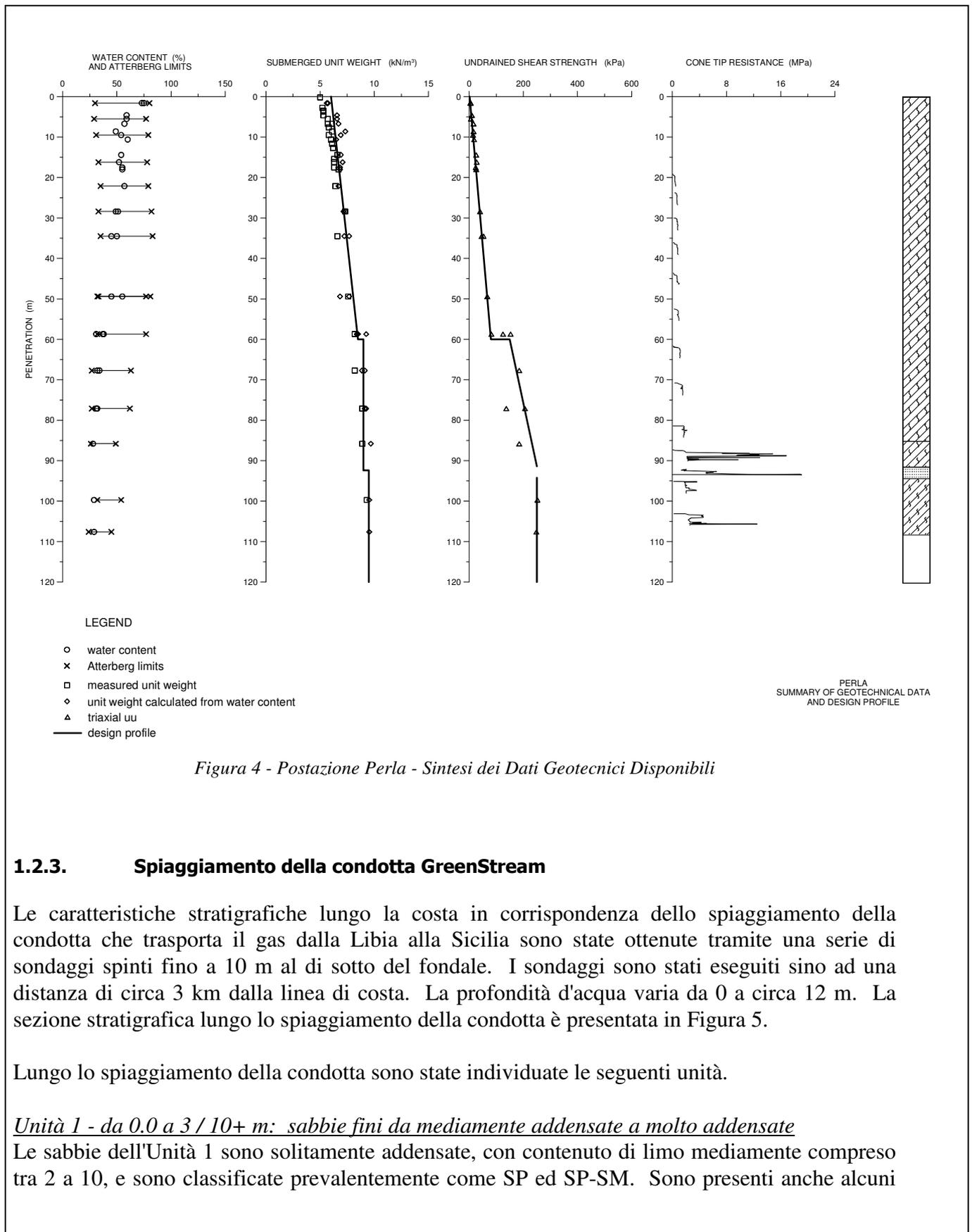


Figura 4 - Postazione Perla - Sintesi dei Dati Geotecnici Disponibili

1.2.3. Spiaggiamento della condotta GreenStream

Le caratteristiche stratigrafiche lungo la costa in corrispondenza dello spiaggiamento della condotta che trasporta il gas dalla Libia alla Sicilia sono state ottenute tramite una serie di sondaggi spinti fino a 10 m al di sotto del fondale. I sondaggi sono stati eseguiti sino ad una distanza di circa 3 km dalla linea di costa. La profondità d'acqua varia da 0 a circa 12 m. La sezione stratigrafica lungo lo spiaggiamento della condotta è presentata in Figura 5.

Lungo lo spiaggiamento della condotta sono state individuate le seguenti unità.

Unità 1 - da 0.0 a 3 / 10+ m: sabbie fini da mediamente addensate a molto addensate

Le sabbie dell'Unità 1 sono solitamente addensate, con contenuto di limo mediamente compreso tra 2 a 10, e sono classificate prevalentemente come SP ed SP-SM. Sono presenti anche alcuni

livelli più limosi, anche se questi sono limitati nello spessore. Le sabbie hanno un contenuto di carbonato di calcio di circa 35%, un contenuto d'acqua intorno a 30 - 35%, ed un peso specifico di circa 8.5 kN/m³. Questa unità è evidentemente costituita da sabbie costiere soggette all'azione delle onde e delle correnti litoranee.

Unità 2a/b - da 3 a 10+m: limi argillosi e argille limose da soffici a moderatamente consistenti

L'Unità 2 è costituita da materiali fini, limosi e argillosi. Sono state distinte due sottounità come descritto nel seguito

- Unità 2a - da 3 a 8 m: limi argillosi moderatamente consistenti
- Unità 2b - da 5 a 10+: argille limose da soffici a moderatamente consistenti

Si tratta di materiali classificati come ML per l'Unità 2a, e CH o CL per l'Unità 2b. Il contenuto d'acqua è di circa 30 - 40% e la resistenza a taglio non drenata varia tra circa 20 e 35 kPa.

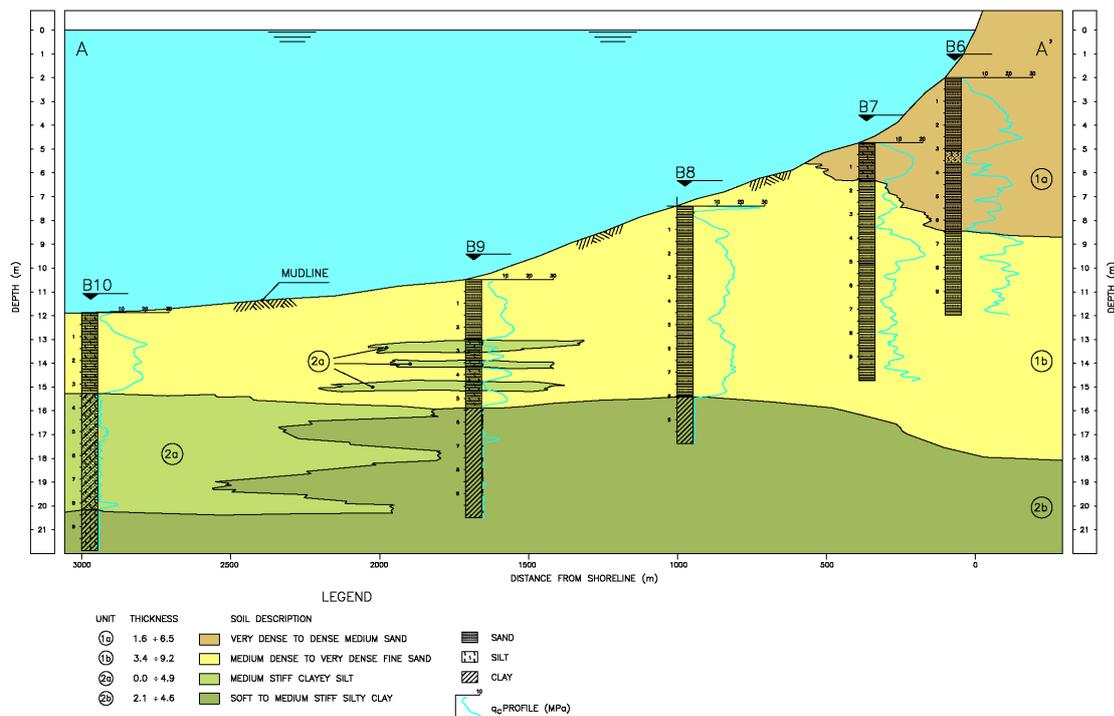


Figura 5 - Spiaggiamento Greenstream - Sintesi dei Dati Geotecnici Disponibili

1.3. Stratigrafia per le analisi



I dati disponibili sono stati analizzati per definire una stratigrafia preliminare e per la progettazione preliminare delle fondazioni delle torri e degli aerogeneratori. Si premette, tuttavia, che i dati disponibili non sono sufficienti ad una progettazione esecutiva, e pertanto dovranno essere complementati da una specifica campagna di indagine.

Un tentativo di correlazione stratigrafica tra la postazione Prezioso e Perla è presentato nella sezione seguente (Figura 6). Da questa si evince come lo strato argilloso superficiale si ispessisca verso est e con l'aumentare della profondità d'acqua. Il sottile strato di sabbie che si sovrappone alle argille sottostanti mostra anch'esso lo stesso andamento. Assumendo un andamento stratigrafico dei terreni superficiali grossomodo parallelo alla costa, si può ragionevolmente pensare che alla profondità d'acqua di circa 50 m si trovi al di sotto del fondale marino uno strato di argille normalconsolidate dello spessore di alcune decine di metri.

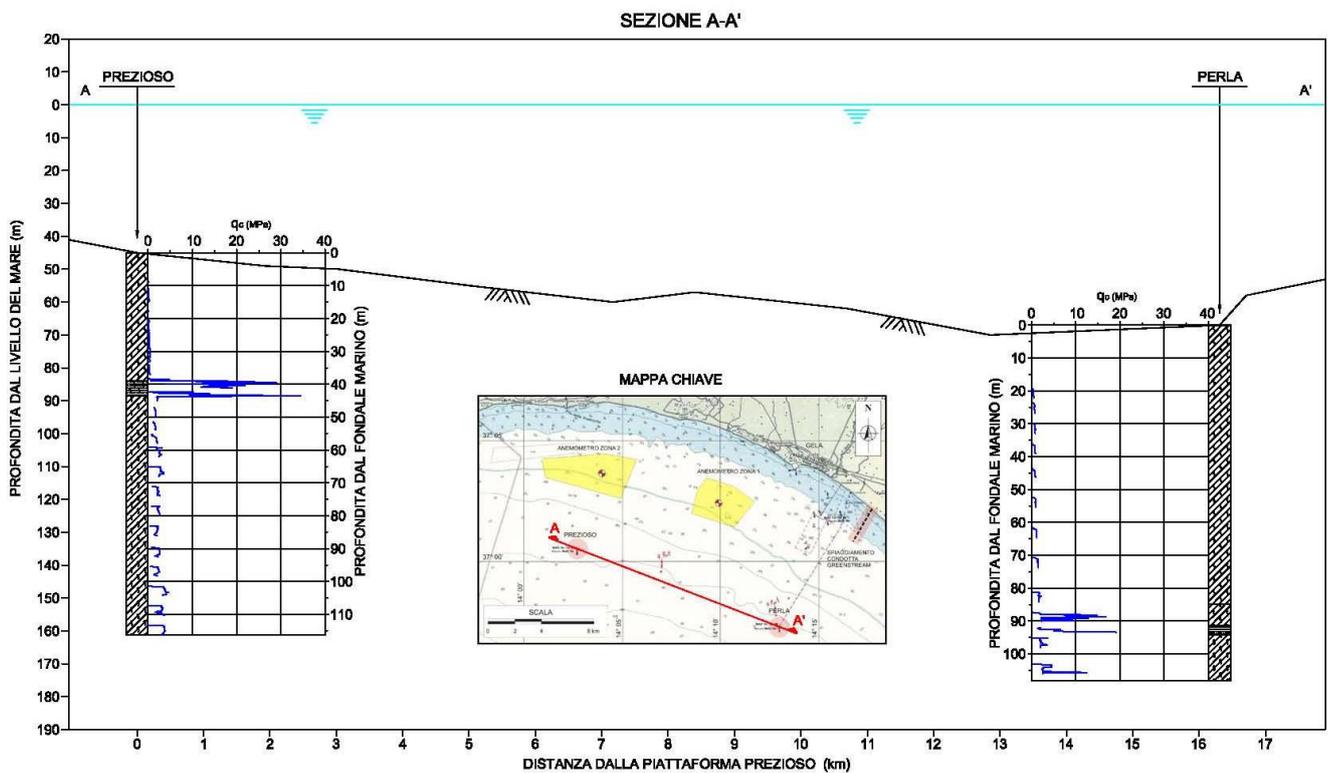


Figura 6 - Correlazione Stratigrafica tra Prezioso e Perla



Le Figure 7 e 8 mostrano due sezioni perpendicolari alla costa. Lo scopo di tali sezioni è di visualizzare le distanze e le caratteristiche del fondale marino per una estrapolazione dei dati di Prezioso e Perla alle previste posizioni per l'anemometro in Zona 1 e 2.

L'andamento del fondale in corrispondenza della Torre in Zona 2 è presentato nella Sezione B-B' in Figura 7.

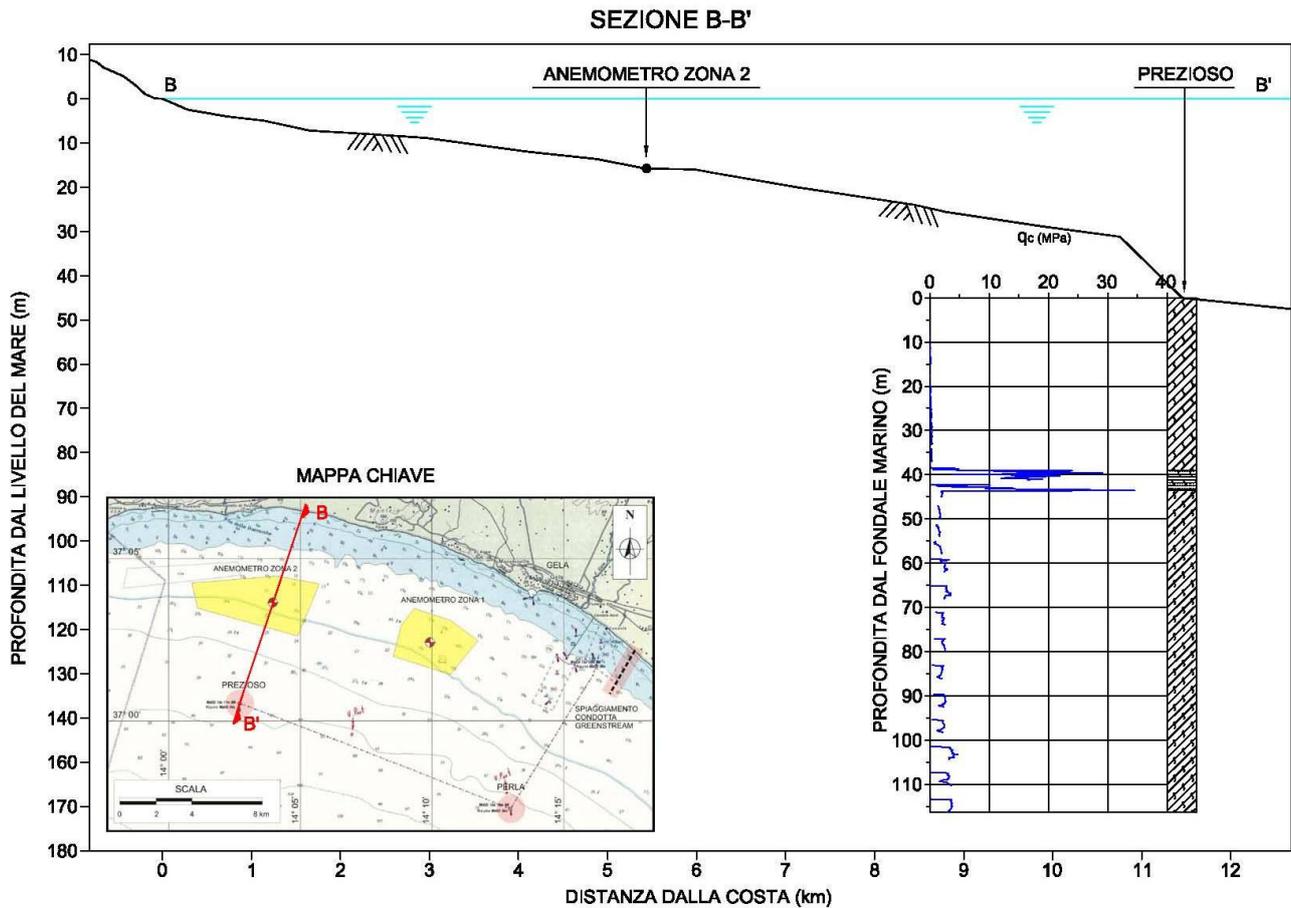
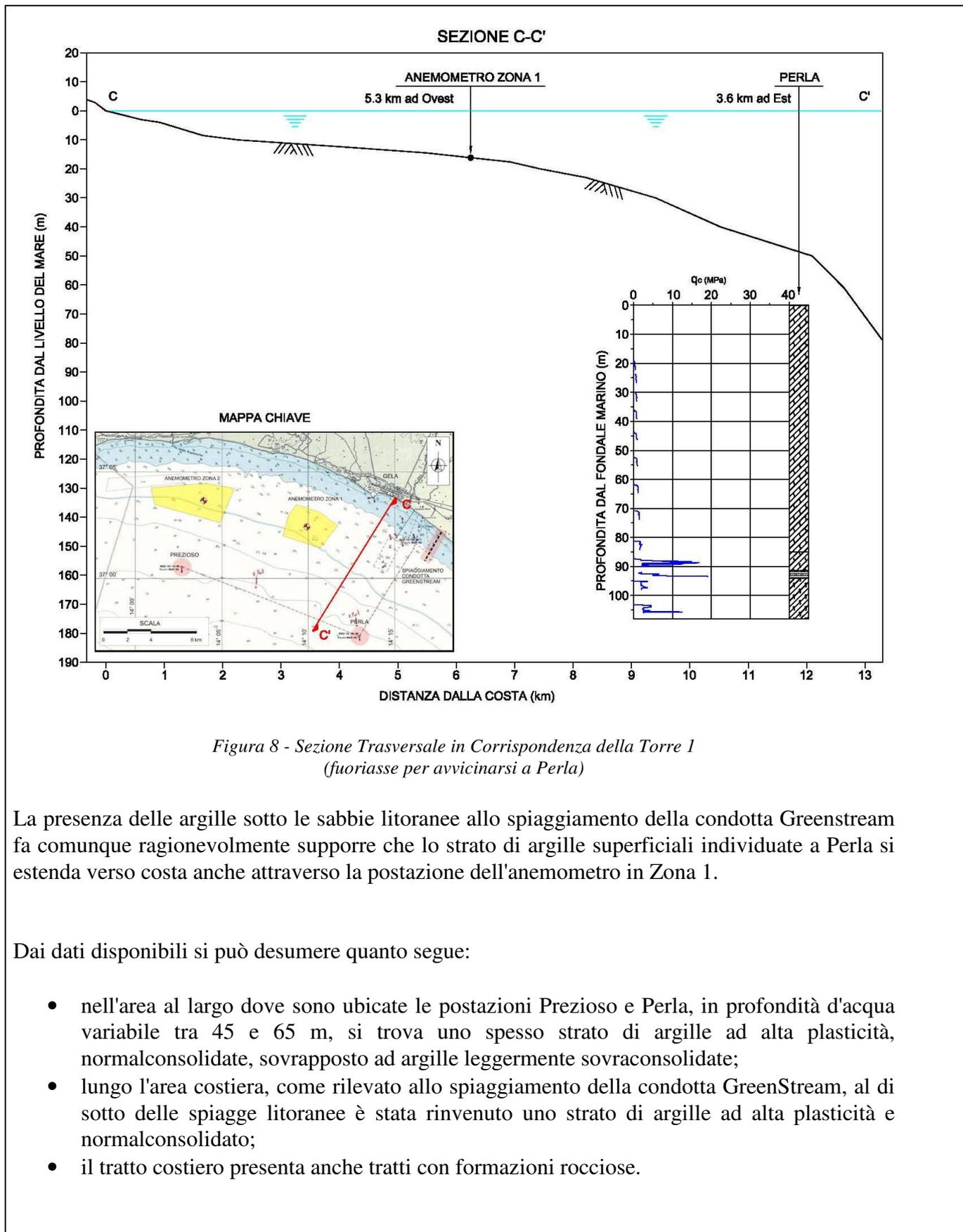


Figura 7 - Sezione Trasversale in Corrispondenza della Torre 2

Il sito della prevista torre in Zona 2 è all'incirca a metà tra la postazione Prezioso e la linea di costa. E' comunque ancora ragionevole pensare che le argille normalconsolidate siano ancora presenti al sito. Non è noto invece lo spessore delle stesse e di eventuali materiali sabbiosi sottostanti.

La Sezione C-C' di Figura 8 mostra invece l' andamento del fondale in corrispondenza della Torre 1. La sezione è stata tracciata perpendicolarmente alla costa a metà tra la posizione dell'anemometro e la postazione Perla. Anche in questo caso si nota la considerevole distanza e la conseguente incertezza per l'estrapolazione dei dati disponibili.



Sulla base dei risultati attualmente disponibili e delle estrapolazioni presentate nei paragrafi precedenti, è ragionevole supporre che lo strato di argille ad alta plasticità normalconsolidate sia presente anche nell'area delle previste torri meteo. Non è però nota la reale profondità né si può escludere la presenza di orizzonti sabbiosi di limitato spessore, come quelli riscontrati a Perla e Prezioso.

Sulla base di quanto esposto ed in assenza di indagini più specifiche sul sito oggetto d'intervento, in questa fase di progettazione di massima si è tenuto conto di due diverse stratigrafie.

Il dimensionamento delle fondazioni è stato sviluppato, per ciascuna configurazione geotecnica, in relazione a fondali di profondità di 13, 18 e 23 m.

Stratigrafia 1

PROFONDITA' (m)	TERRENO	PESO SPECIFICO (kN)	RESISTENZA A TAGLIO NON DRENATA (kPa)
0 - 40	Argilla	6.0 - 8.5	2 - 50
> 40	Argilla compatta	18.0	>150

Tabella 1 - Stratigrafia Preliminare 1

PROFONDITA' (m)	TERRENO	PESO SPECIFICO (kN)	RESISTENZA A TAGLIO NON DRENATA (kPa)
0 - 15	Argilla	6.0 - 8.5	2 - 50
> 15	Argilla compatta	18.0	>150

Tabella 2 - Stratigrafia Preliminare 2

Gruppo T.M.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 15 di 73	

2. Determinazione delle azioni di progetto

2.1. Premessa

Nel capitolo in oggetto, si illustrano le azioni di progetto necessarie per il dimensionamento di massima delle strutture di fondazione degli aerogeneratori.

I carichi determinati sono stati riferiti a tre diversi pali di sostegno (rispettivamente di 3, 4 e 5 metri) e a tre diverse profondità di fondale marino (13, 18 e 23 metri).

Come anticipato nel capitolo precedente, le strutture di fondazione sono dimensionate in riferimento a due ipotesi differenti di stratigrafia di terreno ed in relazione a fondali di 13, 18 e 23 metri.

Le analisi dei pali di fondazione sono state svolte sia mediante il programma a differenze finite FLAC della ITASCA (lic. 213.039.0176.1267.3), Minneapolis (USA), sia mediante analisi non lineare il con il programma ad elementi finiti NOLIAN della Softing s.r.l. di Roma (lic. 1058).

La presente relazione è sviluppata in conformità agli standard forniti dal cliente.

In particolare si è fatto riferimento ai seguenti documenti:

- Germanischer Lloyd – *Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines* – Edizione 2005;
- UNI EN 1991-1-4:2005 – *Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture - Parte 1-4: Azioni in generale - Azioni del vento*;
- UNI ENV 1991-2-7:200 – *Eurocodice 1 – Parte 2-7: Azioni sulle strutture – Azioni eccezionali dovute a impatti ed esplosioni*;
- D.M. del 14/09/2005 “*Norme tecniche per le costruzioni*”
- O.P.C.M. 20/03/2003 N° 3274 e sue successive modifiche – *Primi Elementi in Materia di Criteri Generali Per la Classificazione Sismica del Territorio Nazionale e di Normative Tecniche per le Costruzioni in Zona Sismica*.

Nel calcolo delle sollecitazioni ambientali, secondo quanto prescritto da Germanischer Lloyd, si è proceduto a calcolare le azioni di progetto sia con riferimento a periodi di ritorno di 50 anni (nel seguito definite anche Condizioni Estreme, def. G.L.) sia con periodi di ritorno di 1 anno (nel seguito definite anche Condizioni Normali, def. G.L.). Per il calcolo delle azioni sismiche, determinate mediante analisi modale con spettro di risposta, si è fatto riferimento al D.M. del 14/09/2005, e pertanto hanno periodi di ritorno di 475 anni.

Le azioni elementari sono state successivamente fattorizzate e combinate secondo quanto richiesto dalle norme citate.

2.2. Carico da Onde di Progetto (Wave Loads)

Il carico dovuto all'azione delle onde è stato calcolato in accordo con quanto previsto da Germanischer Lloyd Edizione 2005. Si è proceduto in primo luogo a definire l'altezza d'onda significativa H_S (altezza d'onda spettrale), relativa ad un periodo di ritorno di 50 anni. Allo scopo è stato utilizzato il modello di previsione a lungo termine elaborato dal Professor Boccotti (P. Boccotti "Idraulica Marittima", UTET 1997). In assenza di informazioni più accurate si è scelto di usare il modello di previsione omnidirezionale, in cui la funzione di distribuzione di probabilità è del tipo Weibull. La probabilità di superamento è espressa dall'equazione.

$$Q(H_S) = \exp\left\{-\left(H_S / w\right)^u\right\}$$

in cui w ed u sono parametri ricavabili da serie campionarie proprie dei bacini marini interessati. La funzione densità di probabilità associata alla predetta probabilità di superamento è data da:

$$p(H_S) = \left(uH_S^{u-1} / w^u\right) \cdot \exp\left\{-\left(H_S / w\right)^u\right\}$$

Il periodo di ritorno $T_R(H_S)$ relativo all'altezza spettrale H_S è fornito da:

$$T_R(H_S) = \frac{D_M(H_S)}{p(H_S) \cdot H_S + Q(H_S)}$$

dove $D_M(H_S)$ è la durata della mareggiata triangolare equivalente, espressa da:

$$D_M(H_S) = b_{10} (1.11 - 0.11 \cdot H_S / a_{10})$$

in cui, nuovamente, i parametri a_{10} e b_{10} dipendono dal tratto di mare considerato.

Nel caso di Gela i dati disponibili più vicini alla zona in esame, ed in assenza di studi più specifici, sono quelli relativi a Mazara del Vallo, che vengono riportati in tabella 1.1

Località	w [m]	u	a_{10} [m]	b_{10} [ore]
Mazara del Vallo	1.021	1.275	3.6	73

Tabella 1.1

Nel caso in esame, assumendo $T_R(H_S) = 50$ anni, si ottengono i seguenti valori:

$H_{S50} = 6.964$ metri;

Gruppo T.M.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 17 di 73	

$T(H_{S50}) = 11.25$ secondi;

$T_R(H_{S50}) = 50$ anni;

$D_M(H_{S50}) = 65.50$ ore;

$p(H_{S50}) = 2.01E-05$;

$Q(H_{S50}) = 9.50E-06$;

Da quanto sopra espresso, e secondo quanto previsto da Germanischer Lloyd, si assumeranno i seguenti dati di progetto, relativi al valore atteso dell'onda più alta in una mareggiata di 3 ore:

$T_D = 11.25$ secondi;

$$11.1\sqrt{H_{S50}/g} \leq T_D \leq 14.3\sqrt{H_{S50}/g};$$

$$9.35 \leq 11.25 \leq 12.05;$$

$$H_D = H_{S50} \sqrt{0.5 \cdot \ln(10800/T_D)};$$

$$H_D = 12.904 \text{ m.}$$

Una volta noto il valore dell'onda di progetto su profondità infinita, ed i relativi valori di periodo e di lunghezza d'onda, è necessario studiarne la propagazione verso riva.

Tale valutazione viene condotta facendo riferimento alla profondità media del campo, e cioè a 18 metri. In assenza di indicazioni specifiche, ed a favore di sicurezza si è ipotizzato attacco frontale, vale a dire si è assunto che la direzione dei fronti d'onda sia ortogonale alle batimetriche, che vengono ipotizzate rettilinee e parallele alla linea di riva. I processi considerati nello studio della propagazione sono i seguenti:

- processo di shoaling;
- processo di saturazione.

Si è trascurato la dissipazione al fondo a causa del ruolo marginale che esso svolge, soprattutto quando la propagazione avviene su alti fondali.

I dati di ingresso sono i seguenti:

$H_{D,0} = 12.904$ m;	altezza d'onda di progetto su profondità infinita;
$T_D = 11.25$ se;	periodo d'onda di progetto (invariante della propagazione);
$L_{D,0} = 197.682$ m;	lunghezza d'onda di progetto su profondità infinita;
$c_{D,0} = 17.57$ m/s ² ;	velocità d'onda di progetto su profondità infinita;
$c_{GD,0} = 8.79$ m/s ² ;	velocità di gruppo di progetto su profondità infinita
$s_b = 0.004$;	pendenza del fondale.

Gruppo T.M.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 18 di 73	

Considerando come detto solo i processi di shoaling e di saturazione, l'altezza d'onda di progetto effettiva sulla profondità di 18 metri, sarà data da:

$$H_{D,E}(h = 18) = \text{MIN}\{H_{D,S}(h = 18); H_{D,SAT}(h = 18)\}$$

in cui:

$$H_{D,S}(h = 18) = H_{D,0} \cdot K_{\text{Shoaling}}(h = 18) \quad \text{altezza d'onda di shoaling;}$$

$$H_{D,SAT}(h = 18) = H_{D,0} \cdot K_{\text{Saturazione}}(h = 18) \quad \text{altezza d'onda di saturazione;}$$

Nella situazione in esame si ha:

$$K_{\text{Shoaling}}(h = 18) = 0.9412; \quad \text{coefficiente di shoaling;}$$

$$K_{\text{Saturazione}}(h = 18) = 0.7230; \quad \text{coefficiente di saturazione;}$$

$$H_{D,S}(h = 18) = 12.145 \text{ metri;}$$

$$H_{D,SAT}(h = 18) = 9.333 \text{ metri;}$$

Pertanto l'altezza d'onda di progetto effettiva sulla profondità di 18 metri è pari a:

$$H_{D,E}(h = 18) = 9.333 \text{ m;}$$

$$T_D = 11.25 \text{ s;}$$

Tale valore di altezza d'onda è il punto di partenza per il calcolo del carico d'onda sul palo di sostegno della torre meteo.

La spinta delle onde su oggetti cilindrici quali pali è calcolata mediante l'equazione di Morison, integrata su tutta l'altezza sommersa del palo:

$$F(t) = F_D(t) + F_I(t) = \int_0^{h+\eta} C_D \frac{\rho}{2g} SU(t,s)|U(t,s)|ds + \int_0^{h+\eta} C_I \frac{\rho}{2g} VA(t,s)ds$$

in cui:

F_D = forza d'attrito;

F_I = forza d'inerzia;

Gruppo T.M.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 19 di 73	

C_D = coefficiente di attrito;

C_I = coefficiente d'inerzia;

ρ = peso specifico dell'acqua di mare;

S = area della sezione frontale della struttura isolata, riferita ad una lunghezza verticale unitaria;

V = area della sezione orizzontale della struttura;

$U(t,s)$ = velocità dell'onda di progetto, al tempo t , alla quota s : $U(t,s) = \frac{gkH}{2\sigma} \frac{\text{Cosh}(ks)}{\text{Cos}(kh)} \cos(\sigma \cdot t)$;

$A(t,s)$ = accelerazione dell'onda di progetto, al tempo t , alla quota

s : $A(t,s) = \frac{gkH}{2} \frac{\text{Cosh}(ks)}{\text{Cos}(kh)} \sin(\sigma \cdot t)$;

$\eta(t)$ = spostamento verticale della superficie rispetto al livello di quiete: $\eta(t) = H/2 \cdot \cos(\sigma \cdot t)$;

σ = frequenza angolare $\sigma = 2\pi/T$.

k = numero d'onda $k = 2\pi/L$

Il valore dei coefficienti d'attrito e d'inerzia dipendono dal valore del numero di Reynolds e del tipo di superficie (scabra o liscia). Nel caso in esame si ha

$Re > 1.6E+07$ (D=4.00 m)

$Re > 2.0E+07$ (D=5.00 m)

Ipotizzando a favore di sicurezza superficie scabra si ricava:

$C_D = 1.1$;

$C_I = 2.0$;

L'entità della forza agente sul palo dipende dall'istante t scelto. L'intervallo di tempo da investigare è pari al periodo dell'onda di progetto. Esplicitando le equazioni della velocità e dell'accelerazione ed effettuando l'integrazione si ottengono le seguenti espressioni per la forza ed il momento complessivo alla base del palo:

$$F_D(t) = \frac{1}{8} \rho g C_D \frac{DH^2 kh \cos(\sigma \cdot t) |\cos(\sigma \cdot t)|}{\text{Sinh}(2kh)} \left[\frac{1}{2kh} \text{Sinh} \left[2kh \left(1 + \frac{\eta(t)}{h} \right) \right] + \left[1 + \frac{\eta(t)}{h} \right] \right]$$

$$F_I(t) = -\frac{1}{8} \rho g C_I \frac{\pi D^2 H \sin(\sigma \cdot t)}{\text{Cosh}(kh)} \left[\text{Sinh} \left[kh \left(1 + \frac{\eta(t)}{h} \right) \right] \right]$$

Gruppo T.M.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 20 di 73	

$$M_D(t) = \frac{1}{8} \rho g C_D \frac{DH^2 kh^2 \cos(\sigma \cdot t) |\cos(\sigma \cdot t)|}{\text{Sinh}(2kh)} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\eta(t)}{h} \right)^2 + \frac{1}{2kh} \left(1 + \frac{\eta(t)}{h} \right) \text{Sinh} \left[2kh \left(1 + \frac{\eta(t)}{h} \right) \right] \right]$$

$$M_I(t) = -\frac{1}{8} \rho g C_I \frac{\pi D^2 H h \sin(\sigma \cdot t)}{\text{Cosh}(kh)} \left[\left(1 + \frac{\eta(t)}{h} \right) \text{Sinh} \left[kh \left(1 + \frac{\eta(t)}{h} \right) \right] + \frac{1}{kh} \left(1 - \text{Cosh} \left[kh \left(1 + \frac{\eta(t)}{h} \right) \right] \right) \right]$$

I valori delle grandezze necessarie a definire il carico agente sono i seguenti:

H = 9.333 metri;

$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$;

$C_D = 1.1$;

$C_I = 2.0$;

$k = 0.0465$;

$\sigma = 0.559$.

Nelle tabelle seguenti, si riportano i valori di taglio e momento riferiti alla sezione in prossimità del fondale dei pali nelle condizioni estreme ($h_{\text{onda}} = 9.333 \text{ m}$) e normali ($h_{\text{onda}} = 7.50 \text{ m}$).

**D = 3 metri, h=13 m – Condizioni estreme**

t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	4,67	489150	0	4,89E+05	6923338	0	6,92,E+06
0,703	4,31	405221	-191197	2,14E+05	5606944	-1738797	3,87,E+06
1,406	3,30	217661	-328659	-1,11E+05	2817210	-2799360	1,79,E+04
2,109	1,78	55636	-383023	-3,27E+05	647103	-2937209	-2,29,E+06
2,813	-0,01	-1	-357992	-3,58E+05	-6	-2394047	-2,39,E+06
3,516	-1,79	-39928	-280736	-3,21E+05	-345350	-1607724	-1,95,E+06
4,219	-3,31	-114734	-183526	-2,98E+05	-852442	-904258	-1,76,E+06
4,922	-4,32	-172747	-88063	-2,61E+05	-1145094	-387501	-1,53,E+06
5,625	-4,67	-192977	617	-1,92E+05	-1225855	2601	-1,22,E+06
6,328	-4,31	-172170	89361	-8,28E+04	-1142623	393673	-7,49,E+05
7,031	-3,29	-113707	184922	7,12E+04	-846481	912919	6,64,E+04
7,734	-1,77	-38965	282039	2,43E+05	-337782	1618787	1,28,E+06
8,438	0,02	6	358790	3,59E+05	57	2404443	2,40,E+06
9,141	1,81	57266	382852	4,40E+05	667240	2940986	3,61,E+06
9,844	3,32	220432	327263	5,48E+05	2856609	2790860	5,65,E+06
10,547	4,32	407417	188758	5,96E+05	5640897	1717684	7,36,E+06
11,250	4,67	489132	-2847	4,86E+05	6923050	-26475	6,90,E+06

Fw(max) 596175 N Mw(max) 7358581 Nm

D = 4 metri, h=13 m – Condizioni estreme

t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	4,67	652200	0	6,52E+05	9231117	0	9,23,E+06
0,703	4,31	540295	-339906	2,00E+05	7475925	-3091195	4,38,E+06
1,406	3,30	290215	-584282	-2,94E+05	3756280	-4976640	-1,22,E+06
2,109	1,78	74181	-680930	-6,07E+05	862803	-5221705	-4,36,E+06
2,813	-0,01	-1	-636430	-6,36E+05	-8	-4256084	-4,26,E+06
3,516	-1,79	-53237	-499087	-5,52E+05	-460467	-2858176	-3,32,E+06
4,219	-3,31	-152979	-326269	-4,79E+05	-1136590	-1607571	-2,74,E+06
4,922	-4,32	-230330	-156557	-3,87E+05	-1526792	-688890	-2,22,E+06
5,625	-4,67	-257303	1096	-2,56E+05	-1634474	4625	-1,63,E+06
6,328	-4,31	-229561	158864	-7,07E+04	-1523497	699863	-8,24,E+05
7,031	-3,29	-151610	328751	1,77E+05	-1128641	1622967	4,94,E+05
7,734	-1,77	-51953	501402	4,49E+05	-450376	2877844	2,43,E+06
8,438	0,02	8	637848	6,38E+05	76	4274565	4,27,E+06
9,141	1,81	76355	680625	7,57E+05	889653	5228419	6,12,E+06
9,844	3,32	293909	581800	8,76E+05	3808813	4961529	8,77,E+06
10,547	4,32	543222	335570	8,79E+05	7521196	3053661	1,06,E+07
11,250	4,67	652176	-5062	6,47E+05	9230733	-47067	9,18,E+06

Fw(max) 878792 N Mw(max) 10574856 Nm

D = 5 metri h=13m – Condizioni estreme

t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	4,67	815250	0	8,15E+05	11538896	0	1,15,E+07
0,703	4,31	675369	-531104	1,44E+05	9344906	-4829992	4,51,E+06
1,406	3,30	362768	-912941	-5,50E+05	4695351	-7776000	-3,08,E+06
2,109	1,78	92726	-1063953	-9,71E+05	1078504	-8158914	-7,08,E+06
2,813	-0,01	-1	-994422	-9,94E+05	-11	-6650131	-6,65,E+06
3,516	-1,79	-66546	-779824	-8,46E+05	-575584	-4465900	-5,04,E+06
4,219	-3,31	-191224	-509796	-7,01E+05	-1420737	-2511829	-3,93,E+06
4,922	-4,32	-287912	-244620	-5,33E+05	-1908490	-1076391	-2,98,E+06
5,625	-4,67	-321629	1713	-3,20E+05	-2043092	7226	-2,04,E+06
6,328	-4,31	-286951	248225	-3,87E+04	-1904371	1093535	-8,11,E+05
7,031	-3,29	-189512	513673	3,24E+05	-1410801	2535886	1,13,E+06
7,734	-1,77	-64941	783441	7,19E+05	-562969	4496631	3,93,E+06
8,438	0,02	9	996638	9,97E+05	96	6679008	6,68,E+06
9,141	1,81	95443	1063477	1,16E+06	1112066	8169405	9,28,E+06
9,844	3,32	367386	909063	1,28E+06	4761016	7752390	1,25,E+07
10,547	4,32	679028	524328	1,20E+06	9401495	4771345	1,42,E+07
11,250	4,67	815219	-7909	8,07E+05	11538417	-73542	1,15,E+07

Fw(max) 1276449 N Mw(max) 14172840 Nm

D = 3 metri, h=13 m – Condizioni normali



t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	3,75	292556	0	2,93E+05	3902869	0	3,90,E+06
0,703	3,46	243656	-144692	9,90E+04	3189242	-1246062	1,94,E+06
1,406	2,65	132921	-251797	-1,19E+05	1645438	-2052866	-4,07,E+05
2,109	1,43	34814	-299440	-2,65E+05	394529	-2238270	-1,84,E+06
2,813	-0,01	0	-287714	-2,88E+05	-4	-1924267	-1,92,E+06
3,516	-1,44	-26751	-233351	-2,60E+05	-239067	-1380199	-1,62,E+06
4,219	-2,66	-79811	-158092	-2,38E+05	-634520	-832959	-1,47,E+06
4,922	-3,47	-123829	-78103	-2,02E+05	-904063	-378214	-1,28,E+06
5,625	-3,75	-139958	553	-1,39E+05	-990423	2598	-9,88,E+05
6,328	-3,46	-123376	79229	-4,41E+04	-901542	383998	-5,18,E+05
7,031	-2,64	-79057	159217	8,02E+04	-629464	840129	2,11,E+05
7,734	-1,42	-26092	234315	2,08E+05	-233586	1388317	1,15,E+06
8,438	0,02	4	288229	2,88E+05	37	1930977	1,93,E+06
9,141	1,45	35820	299205	3,35E+05	406515	2239692	2,65,E+06
9,844	2,66	134575	250670	3,85E+05	1667628	2045746	3,71,E+06
10,547	3,47	244939	142829	3,88E+05	3207749	1230667	4,44,E+06
11,250	3,75	292546	-2146	2,90E+05	3902714	-18827	3,88,E+06

Fw(max) 387768 N Mw(max) 4438416 Nm

D = 4 metri, h=13 m – Condizioni normali

t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	3,75	390075	0	3,90E+05	5203825	0	5,20,E+06
0,703	3,46	324874	-257230	6,76E+04	4252323	-2215222	2,04,E+06
1,406	2,65	177228	-447639	-2,70E+05	2193917	-3649540	-1,46,E+06
2,109	1,43	46419	-532338	-4,86E+05	526039	-3979147	-3,45,E+06
2,813	-0,01	-1	-511491	-5,11E+05	-5	-3420919	-3,42,E+06
3,516	-1,44	-35668	-414846	-4,51E+05	-318756	-2453687	-2,77,E+06
4,219	-2,66	-106414	-281052	-3,87E+05	-846027	-1480816	-2,33,E+06
4,922	-3,47	-165105	-138849	-3,04E+05	-1205418	-672380	-1,88,E+06
5,625	-3,75	-186610	984	-1,86E+05	-1320565	4618	-1,32,E+06
6,328	-3,46	-164501	140851	-2,36E+04	-1202055	682663	-5,19,E+05
7,031	-2,64	-105409	283052	1,78E+05	-839285	1493562	6,54,E+05
7,734	-1,42	-34789	416560	3,82E+05	-311448	2468119	2,16,E+06
8,438	0,02	5	512407	5,12E+05	49	3432847	3,43,E+06
9,141	1,45	47760	531919	5,80E+05	542020	3981675	4,52,E+06
9,844	2,66	179433	445635	6,25E+05	2223504	3636881	5,86,E+06
10,547	3,47	326586	253919	5,81E+05	4276999	2187852	6,46,E+06
11,250	3,75	390061	-3815	3,86E+05	5203619	-33471	5,17,E+06

Fw(max) 625068 N Mw(max) 6464851 Nm

D = 5 metri, h=13m – Condizioni normali

t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	3,75	487593	0	4,88E+05	6504782	0	6,50,E+06
0,703	3,46	406093	-401921	4,17E+03	5315403	-3461284	1,85,E+06
1,406	2,65	221535	-699436	-4,78E+05	2742397	-5702406	-2,96,E+06
2,109	1,43	58023	-831779	-7,74E+05	657549	-6217416	-5,56,E+06
2,813	-0,01	-1	-799205	-7,99E+05	-7	-5345186	-5,35,E+06
3,516	-1,44	-44585	-648197	-6,93E+05	-398445	-3833886	-4,23,E+06
4,219	-2,66	-133018	-439143	-5,72E+05	-1057534	-2313775	-3,37,E+06
4,922	-3,47	-206381	-216952	-4,23E+05	-1506772	-1050593	-2,56,E+06
5,625	-3,75	-233263	1537	-2,32E+05	-1650706	7216	-1,64,E+06
6,328	-3,46	-205626	220080	1,45E+04	-1502569	1066661	-4,36,E+05
7,031	-2,64	-131761	442269	3,11E+05	-1049106	2333691	1,28,E+06
7,734	-1,42	-43486	650875	6,07E+05	-389310	3856436	3,47,E+06
8,438	0,02	6	800635	8,01E+05	62	5363824	5,36,E+06
9,141	1,45	59700	831124	8,91E+05	677526	6221367	6,90,E+06
9,844	2,66	224292	696305	9,21E+05	2779379	5682627	8,46,E+06
10,547	3,47	408232	396748	8,05E+05	5346249	3418518	8,76,E+06
11,250	3,75	487576	-5960	4,82E+05	6504523	-52298	6,45,E+06

Fw(max) 920596 N Mw(max) 8764767 Nm

D = 3 metri, h=18 m – Condizioni estreme



t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	4,67	432702	0	4,33E+05	8130529	0	8,13,E+06
0,703	4,31	359096	-228495	1,31E+05	6625001	-2755360	3,87,E+06
1,406	3,30	194048	-396999	-2,03E+05	3393350	-4542217	-1,15,E+06
2,109	1,78	50204	-471555	-4,21E+05	806950	-4967197	-4,16,E+06
2,813	-0,01	-1	-453449	-4,53E+05	-8	-4302002	-4,30,E+06
3,516	-1,79	-37881	-369170	-4,07E+05	-487297	-3125494	-3,61,E+06
4,219	-3,31	-112795	-251681	-3,64E+05	-1303449	-1917753	-3,22,E+06
4,922	-4,32	-175204	-125112	-3,00E+05	-1874682	-883801	-2,76,E+06
5,625	-4,67	-198210	889	-1,97E+05	-2062430	6107	-2,06,E+06
6,328	-4,31	-174559	126907	-4,77E+04	-1869244	897170	-9,72,E+05
7,031	-3,29	-111729	253448	1,42E+05	-1292884	1933796	6,41,E+05
7,734	-1,77	-36950	370668	3,34E+05	-476092	3143198	2,67,E+06
8,438	0,02	5	454246	4,54E+05	75	4316387	4,32,E+06
9,141	1,81	51663	471187	5,23E+05	831552	4970013	5,80,E+06
9,844	3,32	196494	395231	5,92E+05	3439523	4526370	7,97,E+06
10,547	4,32	361023	225558	5,87E+05	6663960	2721313	9,39,E+06
11,250	4,67	432686	-3391	4,29E+05	8130201	-41633	8,09,E+06

Fw(max) 591726 N Mw(max) 9385272 Nm

D = 4 metri, h=18 m – Condizioni estreme

t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	4,67	576936	0	5,77E+05	10840705	0	1,08,E+07
0,703	4,31	478795	-406213	7,26E+04	8833335	-4898418	3,93,E+06
1,406	3,30	258731	-705777	-4,47E+05	4524467	-8075052	-3,55,E+06
2,109	1,78	66938	-838320	-7,71E+05	1075933	-8830572	-7,75,E+06
2,813	-0,01	-1	-806131	-8,06E+05	-11	-7648003	-7,65,E+06
3,516	-1,79	-50508	-656302	-7,07E+05	-649729	-5556433	-6,21,E+06
4,219	-3,31	-150393	-447434	-5,98E+05	-1737932	-3409338	-5,15,E+06
4,922	-4,32	-233605	-222421	-4,56E+05	-2499576	-1571202	-4,07,E+06
5,625	-4,67	-264280	1580	-2,63E+05	-2749906	10857	-2,74,E+06
6,328	-4,31	-232746	225612	-7,13E+03	-2492326	1594969	-8,97,E+05
7,031	-3,29	-148972	450575	3,02E+05	-1723846	3437860	1,71,E+06
7,734	-1,77	-49267	658965	6,10E+05	-634790	5587908	4,95,E+06
8,438	0,02	7	807548	8,08E+05	100	7673577	7,67,E+06
9,141	1,81	68884	837665	9,07E+05	1108736	8835578	9,94,E+06
9,844	3,32	261993	702633	9,65E+05	4586030	8046880	1,26,E+07
10,547	4,32	481364	400992	8,82E+05	8885279	4837890	1,37,E+07
11,250	4,67	576915	-6028	5,71E+05	10840268	-74014	1,08,E+07

Fw(max) 964626 N Mw(max) 13723169 Nm

D = 5 metri, h=18 m – Condizioni estreme

t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	4,67	721170	0	7,21E+05	13550881	0	1,36,E+07
0,703	4,31	598494	-634707	-3,62E+04	11041668	-7653779	3,39,E+06
1,406	3,30	323414	-1102776	-7,79E+05	5655584	-12617269	-6,96,E+06
2,109	1,78	83673	-1309874	-1,23E+06	1344916	-13797770	-1,25,E+07
2,813	-0,01	-1	-1259579	-1,26E+06	-14	-11950005	-1,20,E+07
3,516	-1,79	-63136	-1025472	-1,09E+06	-812162	-8681927	-9,49,E+06
4,219	-3,31	-187991	-699115	-8,87E+05	-2172415	-5327091	-7,50,E+06
4,922	-4,32	-292007	-347533	-6,40E+05	-3124470	-2455002	-5,58,E+06
5,625	-4,67	-330350	2468	-3,28E+05	-3437383	16963	-3,42,E+06
6,328	-4,31	-290932	352519	6,16E+04	-3115407	2492140	-6,23,E+05
7,031	-3,29	-186215	704023	5,18E+05	-2154807	5371657	3,22,E+06
7,734	-1,77	-61583	1029632	9,68E+05	-793487	8731106	7,94,E+06
8,438	0,02	9	1261794	1,26E+06	125	11989965	1,20,E+07
9,141	1,81	86105	1308852	1,39E+06	1385919	13805591	1,52,E+07
9,844	3,32	327491	1097865	1,43E+06	5732538	12573251	1,83,E+07
10,547	4,32	601706	626549	1,23E+06	11106599	7559202	1,87,E+07
11,250	4,67	721144	-9419	7,12E+05	13550335	-115646	1,34,E+07

Fw(max) 1425356 N Mw(max) 18665802 Nm

D = 3 metri, h=18 m – Condizioni normali



t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	3,75	260072	0	2,60E+05	4659215	0	4,66,E+06
0,703	3,46	216986	-174454	4,25E+04	3828586	-2013596	1,81,E+06
1,406	2,65	119056	-306489	-1,87E+05	2009607	-3387102	-1,38,E+06
2,109	1,43	31522	-370498	-3,39E+05	496532	-3826091	-3,33,E+06
2,813	-0,01	0	-364423	-3,64E+05	-5	-3457658	-3,46,E+06
3,516	-1,44	-25209	-304329	-3,30E+05	-332066	-2637205	-2,97,E+06
4,219	-2,66	-77164	-212634	-2,90E+05	-934727	-1697040	-2,63,E+06
4,922	-3,47	-122288	-107666	-2,30E+05	-1396298	-810766	-2,21,E+06
5,625	-3,75	-139369	770	-1,39E+05	-1557902	5678	-1,55,E+06
6,328	-3,46	-121813	109189	-1,26E+04	-1391702	822723	-5,69,E+05
7,031	-2,64	-76407	214058	1,38E+05	-926541	1710175	7,84,E+05
7,734	-1,42	-24579	305452	2,81E+05	-324183	2650281	2,33,E+06
8,438	0,02	3	364937	3,65E+05	49	3466941	3,47,E+06
9,141	1,45	32427	370102	4,03E+05	511351	3826207	4,34,E+06
9,844	2,66	120523	305061	4,26E+05	2036035	3374020	5,41,E+06
10,547	3,47	218118	172193	3,90E+05	3850195	1988333	5,84,E+06
11,250	3,75	260062	-2579	2,57E+05	4659035	-30217	4,63,E+06

Fw(max) 425585 N Mw(max) 5838528 Nm

D = 4 metri, h=18 m – Condizioni normali

t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	3,75	346762	0	3,47E+05	6212286	0	6,21,E+06
0,703	3,46	289314	-310140	-2,08E+04	5104781	-3579725	1,53,E+06
1,406	2,65	158741	-544869	-3,86E+05	2679475	-6021514	-3,34,E+06
2,109	1,43	42030	-658663	-6,17E+05	662042	-6801940	-6,14,E+06
2,813	-0,01	0	-647863	-6,48E+05	-7	-6146947	-6,15,E+06
3,516	-1,44	-33612	-541029	-5,75E+05	-442755	-4688364	-5,13,E+06
4,219	-2,66	-102885	-378015	-4,81E+05	-1246303	-3016960	-4,26,E+06
4,922	-3,47	-163050	-191406	-3,54E+05	-1861730	-1441363	-3,30,E+06
5,625	-3,75	-185825	1369	-1,84E+05	-2077202	10095	-2,07,E+06
6,328	-3,46	-162417	194115	3,17E+04	-1855603	1462618	-3,93,E+05
7,031	-2,64	-101877	380548	2,79E+05	-1235388	3040310	1,80,E+06
7,734	-1,42	-32772	543026	5,10E+05	-432245	4711611	4,28,E+06
8,438	0,02	4	648777	6,49E+05	65	6163451	6,16,E+06
9,141	1,45	43236	657959	7,01E+05	681801	6802147	7,48,E+06
9,844	2,66	160698	542331	7,03E+05	2714713	5998258	8,71,E+06
10,547	3,47	290824	306121	5,97E+05	5133593	3534814	8,67,E+06
11,250	3,75	346750	-4585	3,42E+05	6212046	-53720	6,16,E+06

Fw(max) 703029 N Mw(max) 8712971 Nm

D = 5 metri, h=18 m – Condizioni normali

t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	3,75	433453	0	4,33E+05	7765358	0	7,77,E+06
0,703	3,46	361643	-484593	-1,23E+05	6380976	-5593321	7,88,E+05
1,406	2,65	198426	-851358	-6,53E+05	3349344	-9408615	-6,06,E+06
2,109	1,43	52537	-1029161	-9,77E+05	827553	-10628031	-9,80,E+06
2,813	-0,01	-1	-1012286	-1,01E+06	-9	-9604604	-9,60,E+06
3,516	-1,44	-42015	-845358	-8,87E+05	-553443	-7325569	-7,88,E+06
4,219	-2,66	-128606	-590649	-7,19E+05	-1557879	-4713999	-6,27,E+06
4,922	-3,47	-203813	-299072	-5,03E+05	-2327163	-2252129	-4,58,E+06
5,625	-3,75	-232282	2139	-2,30E+05	-2596503	15773	-2,58,E+06
6,328	-3,46	-203021	303304	1,00E+05	-2319504	2285341	-3,42,E+04
7,031	-2,64	-127346	594606	4,67E+05	-1544235	4750485	3,21,E+06
7,734	-1,42	-40965	848478	8,08E+05	-540306	7361892	6,82,E+06
8,438	0,02	6	1013714	1,01E+06	81	9630392	9,63,E+06
9,141	1,45	54044	1028061	1,08E+06	852252	10628354	1,15,E+07
9,844	2,66	200872	847392	1,05E+06	3393392	9372278	1,28,E+07
10,547	3,47	363530	478314	8,42E+05	6416991	5523147	1,19,E+07
11,250	3,75	433437	-7164	4,26E+05	7765058	-83937	7,68,E+06

Fw(max) 1082106 N Mw(max) 12765669 Nm

D = 3 metri, h=23 m – Condizioni estreme



t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	4,67	392105	0	3,92E+05	9312399	0	9,31,E+06
0,703	4,31	325468	-255710	6,98E+04	7611730	-3896028	3,72,E+06
1,406	3,30	176048	-446867	-2,71E+05	3936804	-6512799	-2,58,E+06
2,109	1,78	45677	-536156	-4,90E+05	952408	-7292380	-6,34,E+06
2,813	-0,01	-1	-523103	-5,23E+05	-10	-6528201	-6,53,E+06
3,516	-1,79	-35021	-433699	-4,69E+05	-609429	-4938329	-5,55,E+06
4,219	-3,31	-105571	-301414	-4,07E+05	-1688345	-3159303	-4,85,E+06
4,922	-4,32	-165760	-152146	-3,18E+05	-2498045	-1504518	-4,00,E+06
5,625	-4,67	-188338	1087	-1,87E+05	-2778507	10527	-2,77,E+06
6,328	-4,31	-165130	154304	-1,08E+04	-2490048	1526749	-9,63,E+05
7,031	-3,29	-104554	303451	1,99E+05	-1673864	3183959	1,51,E+06
7,734	-1,77	-34155	435339	4,01E+05	-595121	4963319	4,37,E+06
8,438	0,02	5	523899	5,24E+05	91	6546573	6,55,E+06
9,141	1,81	47003	535644	5,83E+05	981151	7293578	8,27,E+06
9,844	3,32	178263	444828	6,23E+05	3989623	6488362	1,05,E+07
10,547	4,32	327212	252410	5,80E+05	7655813	3847387	1,15,E+07
11,250	4,67	392091	-3788	3,88E+05	9312029	-58598	9,25,E+06

Fw(max) 623091 N Mw(max) 11503200 Nm

D = 4 metri, h=23 m – Condizioni estreme

t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	4,67	522807	0	5,23E+05	12416531	0	1,24,E+07
0,703	4,31	433957	-454596	-2,06E+04	10148973	-6926272	3,22,E+06
1,406	3,30	234731	-794430	-5,60E+05	5249072	-11578310	-6,33,E+06
2,109	1,78	60903	-953165	-8,92E+05	1269878	-12964231	-1,17,E+07
2,813	-0,01	-1	-929960	-9,30E+05	-13	-11605690	-1,16,E+07
3,516	-1,79	-46695	-771021	-8,18E+05	-812572	-8779252	-9,59,E+06
4,219	-3,31	-140761	-535846	-6,77E+05	-2251127	-5616539	-7,87,E+06
4,922	-4,32	-221013	-270482	-4,91E+05	-3330727	-2674699	-6,01,E+06
5,625	-4,67	-251117	1932	-2,49E+05	-3704675	18714	-3,69,E+06
6,328	-4,31	-220174	274317	5,41E+04	-3320063	2714221	-6,06,E+05
7,031	-3,29	-139406	539468	4,00E+05	-2231819	5660371	3,43,E+06
7,734	-1,77	-45540	773937	7,28E+05	-793495	8823679	8,03,E+06
8,438	0,02	6	931377	9,31E+05	121	11638352	1,16,E+07
9,141	1,81	62670	952256	1,01E+06	1308201	12966362	1,43,E+07
9,844	3,32	237684	790805	1,03E+06	5319498	11534866	1,69,E+07
10,547	4,32	436283	448729	8,85E+05	10207751	6839799	1,70,E+07
11,250	4,67	522788	-6734	5,16E+05	12416039	-104175	1,23,E+07

Fw(max) 1028489 N Mw(max) 17047550 Nm

D = 5 metri, h=23 m – Condizioni estreme

t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	4,67	653509	0	6,54E+05	15520664	0	1,55,E+07
0,703	4,31	542446	-710306	-1,68E+05	12686217	-10822299	1,86,E+06
1,406	3,30	293414	-1241297	-9,48E+05	6561340	-18091109	-1,15,E+07
2,109	1,78	76129	-1489321	-1,41E+06	1587347	-20256610	-1,87,E+07
2,813	-0,01	-1	-1453063	-1,45E+06	-17	-18133891	-1,81,E+07
3,516	-1,79	-58369	-1204720	-1,26E+06	-1015714	-13717581	-1,47,E+07
4,219	-3,31	-175951	-837260	-1,01E+06	-2813908	-8775841	-1,16,E+07
4,922	-4,32	-276267	-422628	-6,99E+05	-4163409	-4179217	-8,34,E+06
5,625	-4,67	-313896	3019	-3,11E+05	-4630844	29241	-4,60,E+06
6,328	-4,31	-275217	428621	1,53E+05	-4150079	4240970	9,09,E+04
7,031	-3,29	-174257	842920	6,69E+05	-2789773	8844330	6,05,E+06
7,734	-1,77	-56924	1209276	1,15E+06	-991868	13786998	1,28,E+07
8,438	0,02	8	1455276	1,46E+06	152	18184926	1,82,E+07
9,141	1,81	78338	1487900	1,57E+06	1635252	20259940	2,19,E+07
9,844	3,32	297106	1235632	1,53E+06	6649372	18023229	2,47,E+07
10,547	4,32	545353	701139	1,25E+06	12759689	10687186	2,34,E+07
11,250	4,67	653485	-10521	6,43E+05	15520048	-162773	1,54,E+07

Fw(max) 1566238 N Mw(max) 24672601 Nm

D = 3 metri, h=23 m – Condizioni normali



t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	3,75	235824	0	2,36E+05	5381149	0	5,38,E+06
0,703	3,46	196817	-196171	6,47E+02	4434258	-2880285	1,55,E+06
1,406	2,65	108120	-346397	-2,38E+05	2347634	-4903662	-2,56,E+06
2,109	1,43	28707	-422348	-3,94E+05	588670	-5650842	-5,06,E+06
2,813	-0,01	0	-420397	-4,20E+05	-7	-5246789	-5,25,E+06
3,516	-1,44	-23252	-356121	-3,79E+05	-412355	-4130957	-4,54,E+06
4,219	-2,66	-71804	-252432	-3,24E+05	-1191481	-2743342	-3,93,E+06
4,922	-3,47	-114636	-129238	-2,44E+05	-1816296	-1342288	-3,16,E+06
5,625	-3,75	-131025	928	-1,30E+05	-2042098	9485	-2,03,E+06
6,328	-3,46	-114181	131052	1,69E+04	-1809934	1361745	-4,48,E+05
7,031	-2,64	-71092	254075	1,83E+05	-1180637	2763437	1,58,E+06
7,734	-1,42	-22668	357360	3,35E+05	-402414	4149519	3,75,E+06
8,438	0,02	3	420911	4,21E+05	59	5258644	5,26,E+06
9,141	1,45	29529	421836	4,51E+05	606086	5649119	6,26,E+06
9,844	2,66	109450	344750	4,54E+05	2378117	4883618	7,26,E+06
10,547	3,47	197842	193620	3,91E+05	4458932	2843828	7,30,E+06
11,250	3,75	235816	-2895	2,33E+05	5380944	-43051	5,34,E+06

Fw(max) 454201 N **Mw(max)** 7302760 Nm

D = 4 metri, h=23 m – Condizioni normali

t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	3,75	314432	0	3,14E+05	7174865	0	7,17,E+06
0,703	3,46	262423	-348748	-8,63E+04	5912344	-5120507	7,92,E+05
1,406	2,65	144161	-615817	-4,72E+05	3130178	-8717622	-5,59,E+06
2,109	1,43	38276	-750841	-7,13E+05	784893	-10045941	-9,26,E+06
2,813	-0,01	0	-747372	-7,47E+05	-9	-9327625	-9,33,E+06
3,516	-1,44	-31003	-633104	-6,64E+05	-549807	-7343924	-7,89,E+06
4,219	-2,66	-95739	-448769	-5,45E+05	-1588642	-4877053	-6,47,E+06
4,922	-3,47	-152848	-229756	-3,83E+05	-2421727	-2386290	-4,81,E+06
5,625	-3,75	-174700	1650	-1,73E+05	-2722798	16862	-2,71,E+06
6,328	-3,46	-152242	232980	8,07E+04	-2413245	2420881	7,64,E+03
7,031	-2,64	-94789	451689	3,57E+05	-1574183	4912777	3,34,E+06
7,734	-1,42	-30224	635307	6,05E+05	-536552	7376922	6,84,E+06
8,438	0,02	4	748286	7,48E+05	78	9348701	9,35,E+06
9,141	1,45	39372	749930	7,89E+05	808115	10042878	1,09,E+07
9,844	2,66	145934	612890	7,59E+05	3170823	8681987	1,19,E+07
10,547	3,47	263789	344212	6,08E+05	5945242	5055695	1,10,E+07
11,250	3,75	314421	-5147	3,09E+05	7174592	-76534	7,10,E+06

Fw(max) 789302 N **Mw(max)** 11852810 Nm

D = 5 metri, h=23 m – Condizioni normali

t(sec)	η	Fd(N)	Fi(N)	Ft(N)	Md(Nm)	Mi(Nm)	Mt(Nm)
0	3,75	393040	0	3,93E+05	8968581	0	8,97,E+06
0,703	3,46	328029	-544918	-2,17E+05	7390430	-8000792	-6,10,E+05
1,406	2,65	180201	-962214	-7,82E+05	3912723	-13621285	-9,71,E+06
2,109	1,43	47845	-1173190	-1,13E+06	981116	-15696783	-1,47,E+07
2,813	-0,01	-1	-1167769	-1,17E+06	-11	-14574414	-1,46,E+07
3,516	-1,44	-38754	-989225	-1,03E+06	-687258	-11474881	-1,22,E+07
4,219	-2,66	-119674	-701201	-8,21E+05	-1985802	-7620395	-9,61,E+06
4,922	-3,47	-191059	-358994	-5,50E+05	-3027159	-3728578	-6,76,E+06
5,625	-3,75	-218375	2578	-2,16E+05	-3403497	26347	-3,38,E+06
6,328	-3,46	-190302	364032	1,74E+05	-3016556	3782626	7,66,E+05
7,031	-2,64	-118486	705765	5,87E+05	-1967728	7676213	5,71,E+06
7,734	-1,42	-37780	992667	9,55E+05	-670690	11526441	1,09,E+07
8,438	0,02	5	1169197	1,17E+06	98	14607346	1,46,E+07
9,141	1,45	49216	1171765	1,22E+06	1010143	15691997	1,67,E+07
9,844	2,66	182417	957640	1,14E+06	3963529	13565605	1,75,E+07
10,547	3,47	329737	537832	8,68E+05	7431553	7899523	1,53,E+07
11,250	3,75	393026	-8043	3,85E+05	8968240	-119585	8,85,E+06

Fw(max) 1220981 N **Mw(max)** 17529134 Nm

Gruppo T.M.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 27 di 73	

2.3. Carico da Onde Frangenti (Breaking Wave Loads)

Nello studio della propagazione dal largo verso riva è necessario verificare che l'altezza d'onda effettiva calcolata sia inferiore all'altezza d'onda di frangimento. Esistono diversi criteri per definire l'altezza d'onda di frangimento e la profondità alla quale si verifica. Il modello a cui si è fatto riferimento è quello di Stokes. In particolare per il calcolo dell'altezza di frangimento si è utilizzata l'equazione empirica di Goda:

$$H_f = 0.18 \frac{gT_D^2}{2\pi} \left[1 - \exp \left[-3 \frac{\pi^2 h_f}{gT_D^2} (1 + 15s_b^{1.33}) \right] \right]$$

in cui:

h_f = profondità di frangimento;

T_D = periodo d'onda di progetto;

s_b = pendenza del fondo.

Con i dati a disposizione, per l'onda di progetto associata al periodo di ritorno di 50 anni (Condizioni Estreme), si ricava che il frangimento si verifica per una profondità di circa 9.90 m. Gli aerogeneratori, fondati a non meno di 13 metri di profondità, ricadono quindi al di fuori della zona dei frangenti, per un periodo di ritorno pari a quello di progetto. Non si ritiene pertanto necessario tenere conto dell'azione dovuta a tale tipo di onda.

$h_f = 9.89$ m;

$T_D = 11.25$ s;

$s_b = 0.004$;

$H_f = 7.53$ m.

Nel caso di periodo di ritorno di 1 anno si ricava che il frangimento si verifica alla profondità di 6.95 m. Nuovamente non si ritiene pertanto necessario considerare l'azione dovuta ad onda frangente.

$h_f = 6.95$ m;

$T_D = 9.31$ s;

$s_b = 0.004$;

$H_f = 5.27$ m.

Gruppo T.M.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 28 di 73	

2.4. Effetti delle Correnti (Sea Current Loads)

L'azione della corrente su una struttura cilindrica alla quota z è data dalla seguente espressione:

$$F_C(z) = C_D \frac{\rho}{2} D U_C^2(z)$$

dove $U_C(z)$ è la velocità della corrente alla quota z . La velocità complessiva della corrente può essere pensata composta da 3 contributi:

$$U_C(z) = U_{C,SUB}(z) + U_{C,WIND}(z) + U_{C,SURF}(z)$$

in cui:

- $U_{C,SUB}(z)$ = sub surface current; corrente generata dalle maree, da particolari condizioni topografiche, da differenze di temperatura e di salinità, etc.

$$U_{C,SUB}(z) = U_{C,SUB} \left(\frac{h+z}{h} \right)^{1/7}$$

dove:

$U_{C,SUB}$ = velocità della sub surface current al livello di quiete;

h = profondità;

z = distanza dal livello di quiete, positiva verso l'alto

Nel caso in esame:

$U_{C,SUB} = 0.6$ m/sec (fonte www.nautica.it);

- $U_{C,WIND}(z)$ = wind generated current; corrente dovuta all'azione del vento ed al gradiente di pressione atmosferica.

$$U_{C,WIND}(z) = U_{C,WIND} \left(\frac{h_0 + z}{h_0} \right) \quad - h_0 < z < 0$$

$$U_{C,WIND}(z) = 0 \quad z < -h_0$$

dove:

$h_0 = 20$ m;

$U_{C,WIND}$ = velocità della corrente al livello di quiete; $U_{C,WIND} = 0.015 \cdot u(10m, 1h)$



$u(10m,1h)$ = velocità media del vento a 10 metri d'altezza sull'intervallo di 1 ora;

$u(10m,1h) = 35.71$ m/sec;

$U_{C,WIND} = 0.54$ m/sec; per $T_R = 50$ anni;

$U_{C,WIND} = 0.43$ m/sec; per $T_R = 1$ anno;

- $U_{C,SURF}(z)$ = Wave Induced Current; corrente generata dall'azione delle onde frangenti. Dal momento che la torre meteo in esame è localizzata all'esterno della zona dei frangenti per il periodo di ritorno assegnato si è trascurato questa componente della velocità totale della corrente.

Sommando i due contributi considerati ed applicando l'equazione sopra riportata si ottengono le seguenti sollecitazioni alle varie quote.

Sub surface current			Wind generated current				
<i>hh</i>	13	<i>m</i>	<i>h0</i>	20			
<i>Uc,sub</i>	0,6	<i>m/sec</i>	<i>Uc,wind</i>	0,54 TR= 50 anni			
<i>D=</i>	3		<i>Uc,wind</i>	0,43 TR= 1 anno			
			condizioni estreme				
z(m)	Uc,sub (m)			z(m)	Uc,sub (m)		
-13	0			-13	0,19		
-12	0,42			-12	0,22		
-11	0,46			-11	0,24		
-10	0,49			-10	0,27		
-9	0,51			-9	0,30		
-8	0,52			-8	0,32		
-7	0,54			-7	0,35		
-6	0,55			-6	0,38		
-5	0,56			-5	0,41		
-4	0,57			-4	0,43		
-3	0,58			-3	0,46		
-2	0,59			-2	0,49		
-1	0,59			-1	0,51		
0	0,60			0	0,54		
			condizioni normali				
z(m)	Uc,sub (m)			z(m)	Uc,sub (m)		
-13	0			-13	0,15		
-12	0,42			-12	0,17		
-11	0,46			-11	0,19		
-10	0,49			-10	0,22		
-9	0,51			-9	0,24		
-8	0,52			-8	0,26		
-7	0,54			-7	0,28		
-6	0,55			-6	0,30		
-5	0,56			-5	0,32		
-4	0,57			-4	0,34		
-3	0,58			-3	0,37		
-2	0,59			-2	0,39		
-1	0,59			-1	0,41		
0	0,60			0	0,43		
Azione delle correnti - condizioni estreme				Azioni delle correnti - condizioni normali			
z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)	z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-13	0,19	60	0	-13	0,15	38	0
-12	0,63	675	675	-12	0,59	585	585
-11	0,70	834	1668	-11	0,65	721	1441
-10	0,76	968	2904	-10	0,70	833	2498
-9	0,80	1093	4373	-9	0,74	935	3740
-8	0,85	1215	6073	-8	0,78	1033	5164
-7	0,89	1334	8006	-7	0,82	1128	6769
-6	0,93	1454	10178	-6	0,85	1223	8558
-5	0,96	1574	12594	-5	0,88	1317	10532
-4	1,00	1696	15261	-4	0,91	1411	12696
-3	1,04	1818	18185	-3	0,94	1505	15053
-2	1,07	1943	21373	-2	0,97	1601	17607
-1	1,11	2069	24834	-1	1,00	1697	20363
0	1,14	2198	28573	0	1,03	1794	23325
FcTOT(N)		18933		FcTOT(N)		15819	
McTOT(Nm)			154698	McTOT(Nm)			128331



Sub surface current			Wind generated current				
<i>hh</i>	18	<i>m</i>	<i>h0</i>	20			
<i>Uc,sub</i>	0,6	<i>m/sec</i>	<i>Uc,wind</i>	0,54	<i>TR= 50 anni</i>		
<i>D=</i>	3		<i>Uc,wind</i>	0,43	<i>TR= 1 anno</i>		
			condizioni estreme		condizioni normali		
<i>z(m)</i>	<i>Uc,sub (m)</i>		<i>z(m)</i>	<i>Uc,sub (m)</i>	<i>z(m)</i>	<i>Uc,sub (m)</i>	
-18	0		-18	0,05	-18	0,04	
-17	0,40		-17	0,08	-17	0,06	
-16	0,44		-16	0,11	-16	0,09	
-15	0,46		-15	0,14	-15	0,11	
-14	0,48		-14	0,16	-14	0,13	
-13	0,50		-13	0,19	-13	0,15	
-12	0,51		-12	0,22	-12	0,17	
-11	0,52		-11	0,24	-11	0,19	
-10	0,53		-10	0,27	-10	0,22	
-9	0,54		-9	0,30	-9	0,24	
-8	0,55		-8	0,32	-8	0,26	
-7	0,56		-7	0,35	-7	0,28	
-6	0,57		-6	0,38	-6	0,30	
-5	0,57		-5	0,41	-5	0,32	
-4	0,58		-4	0,43	-4	0,34	
-3	0,58		-3	0,46	-3	0,37	
-2	0,59		-2	0,49	-2	0,39	
-1	0,60		-1	0,51	-1	0,41	
0	0,60		0	0,54	0	0,43	
Azione delle correnti - condizioni estreme			Azioni delle correnti - condizioni normali				
<i>z(m)</i>	<i>Uc,sub (m)</i>	<i>Fc(z) (N)</i>	<i>Mc(z) (Nm)</i>	<i>z(m)</i>	<i>Uc,sub (m)</i>	<i>Fc(z) (N)</i>	<i>Mc(z) (Nm)</i>
-18	0,05	5	0	-18	0,04	3	0
-17	0,48	386	386	-17	0,46	360	360
-16	0,55	505	1010	-16	0,52	465	930
-15	0,60	608	1824	-15	0,57	553	1660
-14	0,65	706	2823	-14	0,61	635	2542
-13	0,69	802	4010	-13	0,65	715	3575
-12	0,73	898	5391	-12	0,68	793	4759
-11	0,77	996	6970	-11	0,72	871	6099
-10	0,80	1094	8754	-10	0,75	950	7598
-9	0,84	1195	10751	-9	0,78	1029	9259
-8	0,88	1297	12969	-8	0,81	1109	11087
-7	0,91	1401	15414	-7	0,84	1190	13087
-6	0,94	1508	18095	-6	0,87	1272	15264
-5	0,98	1617	21019	-5	0,90	1355	17621
-4	1,01	1728	24194	-4	0,92	1440	20165
-3	1,04	1842	27628	-3	0,95	1527	22899
-2	1,08	1958	31329	-2	0,98	1614	25829
-1	1,11	2077	35305	-1	1,00	1704	28960
0	1,14	2198	39563	0	1,03	1794	32296
	FcTOT(N)	22820			FcTOT(N)	19380	
	McTOT(Nm)		267432		McTOT(Nm)		223991



Sub surface current

hh 23 m
Uc,sub 0,6 m/sec
D= 3

Wind generated current

h0 20
Uc,wind 0,54 TR= 50 anni
Uc,wind 0,43 TR= 1 anno

z(m)	Uc,sub (m)
-23	0
-22	0,38
-21	0,42
-20	0,45
-19	0,47
-18	0,48
-17	0,50
-16	0,51
-15	0,52
-14	0,52
-13	0,53
-12	0,54
-11	0,55
-10	0,55
-9	0,56
-8	0,56
-7	0,57
-6	0,57
-5	0,58
-4	0,58
-3	0,59
-2	0,59
-1	0,60
0	0,60

condizioni estreme

z(m)	Uc,sub (m)
-23	0,00
-22	0,00
-21	0,00
-20	0,00
-19	0,03
-18	0,05
-17	0,08
-16	0,11
-15	0,14
-14	0,16
-13	0,19
-12	0,22
-11	0,24
-10	0,27
-9	0,30
-8	0,32
-7	0,35
-6	0,38
-5	0,41
-4	0,43
-3	0,46
-2	0,49
-1	0,51
0	0,54

condizioni normali

z(m)	Uc,sub (m)
-23	0,00
-22	0,00
-21	0,00
-20	0,00
-19	0,02
-18	0,04
-17	0,06
-16	0,09
-15	0,11
-14	0,13
-13	0,15
-12	0,17
-11	0,19
-10	0,22
-9	0,24
-8	0,26
-7	0,28
-6	0,30
-5	0,32
-4	0,34
-3	0,37
-2	0,39
-1	0,41
0	0,43

Azione delle correnti - condizioni estreme

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-23	0,00	0	0
-22	0,38	249	249
-21	0,42	303	606
-20	0,45	340	1021
-19	0,49	413	1653
-18	0,54	487	2434
-17	0,58	562	3369
-16	0,61	638	4466
-15	0,65	717	5734
-14	0,69	798	7178
-13	0,72	881	8809
-12	0,76	967	10633
-11	0,79	1055	12658
-10	0,82	1146	14893
-9	0,86	1239	17346
-8	0,89	1335	20025
-7	0,92	1434	22938
-6	0,95	1535	26093
-5	0,98	1639	29497
-4	1,02	1745	33160
-3	1,05	1854	37089
-2	1,08	1966	41292
-1	1,11	2081	45777
0	1,14	2198	50553
	FcTOT(N)	25580	
	McTOT(Nm)		189601

Azioni delle correnti - condizioni normali

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-23	0,00	0	0
-22	0,38	249	249
-21	0,42	303	606
-20	0,45	340	1021
-19	0,49	404	1617
-18	0,53	467	2335
-17	0,56	530	3179
-16	0,59	593	4152
-15	0,62	657	5259
-14	0,65	723	6505
-13	0,68	789	7894
-12	0,71	857	9431
-11	0,74	927	11121
-10	0,77	998	12969
-9	0,80	1070	14981
-8	0,82	1144	17160
-7	0,85	1220	19513
-6	0,88	1297	22045
-5	0,90	1376	24760
-4	0,93	1456	27664
-3	0,95	1538	30761
-2	0,98	1622	34058
-1	1,00	1707	37558
0	1,03	1794	41268
	FcTOT(N)	22061	
	McTOT(Nm)		164797



Sub surface current

hh **13** *m*
Uc,sub **0,6** *m/sec*
D= **4**

z(m)	Uc,sub (m)
-13	0
-12	0,42
-11	0,46
-10	0,49
-9	0,51
-8	0,52
-7	0,54
-6	0,55
-5	0,56
-4	0,57
-3	0,58
-2	0,59
-1	0,59
0	0,60

Wind generated current

h0 **20**
Uc,wind **0,54** *TR= 50 anni*
Uc,wind **0,43** *TR= 1 anno*

condizioni estreme	
z(m)	Uc,sub (m)
-13	0,19
-12	0,22
-11	0,24
-10	0,27
-9	0,30
-8	0,32
-7	0,35
-6	0,38
-5	0,41
-4	0,43
-3	0,46
-2	0,49
-1	0,51
0	0,54

condizioni normali	
z(m)	Uc,sub (m)
-13	0,15
-12	0,17
-11	0,19
-10	0,22
-9	0,24
-8	0,26
-7	0,28
-6	0,30
-5	0,32
-4	0,34
-3	0,37
-2	0,39
-1	0,41
0	0,43

Azione delle correnti - condizioni estreme

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-13	0,19	81	0
-12	0,63	900	900
-11	0,70	1112	2224
-10	0,76	1291	3873
-9	0,80	1458	5831
-8	0,85	1619	8097
-7	0,89	1779	10675
-6	0,93	1939	13571
-5	0,96	2099	16792
-4	1,00	2261	20348
-3	1,04	2425	24246
-2	1,07	2591	28498
-1	1,11	2759	33111
0	1,14	2931	38098
FcTOT(N)		25244	
McTOT(Nm)			206264

Azioni delle correnti - condizioni normali

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-13	0,15	51	0
-12	0,59	779	779
-11	0,65	961	1921
-10	0,70	1110	3330
-9	0,74	1247	4986
-8	0,78	1377	6885
-7	0,82	1504	9026
-6	0,85	1630	11411
-5	0,88	1755	14043
-4	0,91	1881	16928
-3	0,94	2007	20071
-2	0,97	2134	23476
-1	1,00	2263	27151
0	1,03	2392	31100
FcTOT(N)		21092	
McTOT(Nm)			171108



Sub surface current

hh **18** *m*
Uc,sub **0,6** *m/sec*
D= **4**

Wind generated current

h0 **20**
Uc,wind **0,54** *TR= 50 anni*
Uc,wind **0,43** *TR= 1 anno*

z(m)	Uc,sub (m)
-18	0
-17	0,40
-16	0,44
-15	0,46
-14	0,48
-13	0,50
-12	0,51
-11	0,52
-10	0,53
-9	0,54
-8	0,55
-7	0,56
-6	0,57
-5	0,57
-4	0,58
-3	0,58
-2	0,59
-1	0,60
0	0,60

condizioni estreme

z(m)	Uc,sub (m)
-18	0,05
-17	0,08
-16	0,11
-15	0,14
-14	0,16
-13	0,19
-12	0,22
-11	0,24
-10	0,27
-9	0,30
-8	0,32
-7	0,35
-6	0,38
-5	0,41
-4	0,43
-3	0,46
-2	0,49
-1	0,51
0	0,54

condizioni normali

z(m)	Uc,sub (m)
-18	0,04
-17	0,06
-16	0,09
-15	0,11
-14	0,13
-13	0,15
-12	0,17
-11	0,19
-10	0,22
-9	0,24
-8	0,26
-7	0,28
-6	0,30
-5	0,32
-4	0,34
-3	0,37
-2	0,39
-1	0,41
0	0,43

Azione delle correnti - condizioni estreme

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-18	0,05	7	0
-17	0,48	515	515
-16	0,55	673	1346
-15	0,60	810	2431
-14	0,65	941	3764
-13	0,69	1069	5347
-12	0,73	1198	7187
-11	0,77	1328	9293
-10	0,80	1459	11672
-9	0,84	1593	14335
-8	0,88	1729	17292
-7	0,91	1868	20552
-6	0,94	2011	24126
-5	0,98	2156	28025
-4	1,01	2304	32258
-3	1,04	2456	36837
-2	1,08	2611	41772
-1	1,11	2769	47073
0	1,14	2931	52751
	FcTOT(N)	30427	
	McTOT(Nm)		356576

Azioni delle correnti - condizioni normali

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-18	0,04	4	0
-17	0,46	480	480
-16	0,52	620	1240
-15	0,57	738	2213
-14	0,61	847	3389
-13	0,65	953	4766
-12	0,68	1058	6346
-11	0,72	1162	8132
-10	0,75	1266	10130
-9	0,78	1372	12345
-8	0,81	1478	14783
-7	0,84	1586	17450
-6	0,87	1696	20352
-5	0,90	1807	23495
-4	0,92	1920	26886
-3	0,95	2035	30532
-2	0,98	2152	34439
-1	1,00	2271	38613
0	1,03	2392	43062
	FcTOT(N)	25840	
	McTOT(Nm)		298654



Sub surface current

hh 23 m
 Uc,sub 0,6 m/sec
 D= 4

Wind generated current

h0 20
 Uc,wind 0,54 TR= 50 anni
 Uc,wind 0,43 TR= 1 anno

z(m)	Uc,sub (m)
-23	0
-22	0,38
-21	0,42
-20	0,45
-19	0,47
-18	0,48
-17	0,50
-16	0,51
-15	0,52
-14	0,52
-13	0,53
-12	0,54
-11	0,55
-10	0,55
-9	0,56
-8	0,56
-7	0,57
-6	0,57
-5	0,58
-4	0,58
-3	0,59
-2	0,59
-1	0,60
0	0,60

condizioni estreme

z(m)	Uc,sub (m)
-23	0,00
-22	0,00
-21	0,00
-20	0,00
-19	0,03
-18	0,05
-17	0,08
-16	0,11
-15	0,14
-14	0,16
-13	0,19
-12	0,22
-11	0,24
-10	0,27
-9	0,30
-8	0,32
-7	0,35
-6	0,38
-5	0,41
-4	0,43
-3	0,46
-2	0,49
-1	0,51
0	0,54

condizioni normali

z(m)	Uc,sub (m)
-23	0,00
-22	0,00
-21	0,00
-20	0,00
-19	0,02
-18	0,04
-17	0,06
-16	0,09
-15	0,11
-14	0,13
-13	0,15
-12	0,17
-11	0,19
-10	0,22
-9	0,24
-8	0,26
-7	0,28
-6	0,30
-5	0,32
-4	0,34
-3	0,37
-2	0,39
-1	0,41
0	0,43

Azione delle correnti - condizioni estreme

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-23	0,00	0	0
-22	0,38	331	331
-21	0,42	404	808
-20	0,45	454	1361
-19	0,49	551	2204
-18	0,54	649	3245
-17	0,58	749	4492
-16	0,61	851	5955
-15	0,65	956	7645
-14	0,69	1063	9571
-13	0,72	1174	11745
-12	0,76	1289	14177
-11	0,79	1406	16877
-10	0,82	1528	19858
-9	0,86	1652	23128
-8	0,89	1780	26700
-7	0,92	1911	30584
-6	0,95	2046	34790
-5	0,98	2185	39330
-4	1,02	2327	44214
-3	1,05	2473	49452
-2	1,08	2622	55056
-1	1,11	2774	61037
0	1,14	2931	67404
	FcTOT(N)	34106	
	McTOT(Nm)		252801

Azioni delle correnti - condizioni normali

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-23	0,00	0	0
-22	0,38	331	331
-21	0,42	404	808
-20	0,45	454	1361
-19	0,49	539	2155
-18	0,53	623	3113
-17	0,56	706	4239
-16	0,59	791	5536
-15	0,62	877	7013
-14	0,65	964	8673
-13	0,68	1053	10525
-12	0,71	1143	12575
-11	0,74	1236	14828
-10	0,77	1330	17292
-9	0,80	1427	19974
-8	0,82	1525	22880
-7	0,85	1626	26018
-6	0,88	1729	29393
-5	0,90	1834	33013
-4	0,93	1941	36885
-3	0,95	2051	41015
-2	0,98	2162	45410
-1	1,00	2276	50078
0	1,03	2392	55024
	FcTOT(N)	29414	
	McTOT(Nm)		219729



Sub surface current

hh **13** *m*
Uc,sub **0,6** *m/sec*
D= **5**

Wind generated current

h0 **20**
Uc,wind **0,54** *TR= 50 anni*
Uc,wind **0,43** *TR= 1 anno*

z(m)	Uc,sub (m)
-13	0
-12	0,42
-11	0,46
-10	0,49
-9	0,51
-8	0,52
-7	0,54
-6	0,55
-5	0,56
-4	0,57
-3	0,58
-2	0,59
-1	0,59
0	0,60

condizioni estreme	
z(m)	Uc,sub (m)
-13	0,19
-12	0,22
-11	0,24
-10	0,27
-9	0,30
-8	0,32
-7	0,35
-6	0,38
-5	0,41
-4	0,43
-3	0,46
-2	0,49
-1	0,51
0	0,54

condizioni normali	
z(m)	Uc,sub (m)
-13	0,15
-12	0,17
-11	0,19
-10	0,22
-9	0,24
-8	0,26
-7	0,28
-6	0,30
-5	0,32
-4	0,34
-3	0,37
-2	0,39
-1	0,41
0	0,43

Azione delle correnti - condizioni estreme

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-13	0,19	101	0
-12	0,63	1126	1126
-11	0,70	1390	2780
-10	0,76	1614	4841
-9	0,80	1822	7289
-8	0,85	2024	10122
-7	0,89	2224	13344
-6	0,93	2423	16964
-5	0,96	2624	20990
-4	1,00	2826	25434
-3	1,04	3031	30308
-2	1,07	3238	35622
-1	1,11	3449	41389
0	1,14	3663	47622
FcTOT(N)		31555	
McTOT(Nm)			257830

Azioni delle correnti - condizioni normali

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-13	0,15	64	0
-12	0,59	974	974
-11	0,65	1201	2402
-10	0,70	1388	4163
-9	0,74	1558	6233
-8	0,78	1721	8606
-7	0,82	1880	11282
-6	0,85	2038	14263
-5	0,88	2194	17554
-4	0,91	2351	21160
-3	0,94	2509	25088
-2	0,97	2668	29346
-1	1,00	2828	33939
0	1,03	2990	38875
FcTOT(N)		26365	
McTOT(Nm)			213886



Sub surface current

hh **18** *m*
Uc,sub **0,6** *m/sec*
D= **5**

Wind generated current

h0 **20**
Uc,wind **0,54** *TR= 50 anni*
Uc,wind **0,43** *TR= 1 anno*

z(m)	Uc,sub (m)
-18	0
-17	0,40
-16	0,44
-15	0,46
-14	0,48
-13	0,50
-12	0,51
-11	0,52
-10	0,53
-9	0,54
-8	0,55
-7	0,56
-6	0,57
-5	0,57
-4	0,58
-3	0,58
-2	0,59
-1	0,60
0	0,60

condizioni estreme	
z(m)	Uc,sub (m)
-18	0,05
-17	0,08
-16	0,11
-15	0,14
-14	0,16
-13	0,19
-12	0,22
-11	0,24
-10	0,27
-9	0,30
-8	0,32
-7	0,35
-6	0,38
-5	0,41
-4	0,43
-3	0,46
-2	0,49
-1	0,51
0	0,54

condizioni normali	
z(m)	Uc,sub (m)
-18	0,04
-17	0,06
-16	0,09
-15	0,11
-14	0,13
-13	0,15
-12	0,17
-11	0,19
-10	0,22
-9	0,24
-8	0,26
-7	0,28
-6	0,30
-5	0,32
-4	0,34
-3	0,37
-2	0,39
-1	0,41
0	0,43

Azione delle correnti - condizioni estreme

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-18	0,05	8	0
-17	0,48	644	644
-16	0,55	841	1683
-15	0,60	1013	3039
-14	0,65	1176	4705
-13	0,69	1337	6684
-12	0,73	1497	8984
-11	0,77	1659	11616
-10	0,80	1824	14590
-9	0,84	1991	17919
-8	0,88	2161	21614
-7	0,91	2335	25690
-6	0,94	2513	30158
-5	0,98	2695	35031
-4	1,01	2880	40323
-3	1,04	3070	46046
-2	1,08	3263	52215
-1	1,11	3461	58841
0	1,14	3663	65938
	FcTOT(N)	38034	
	McTOT(Nm)		445720

Azioni delle correnti - condizioni normali

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-18	0,04	5	0
-17	0,46	600	600
-16	0,52	775	1550
-15	0,57	922	2767
-14	0,61	1059	4237
-13	0,65	1192	5958
-12	0,68	1322	7932
-11	0,72	1452	10165
-10	0,75	1583	12663
-9	0,78	1715	15432
-8	0,81	1848	18479
-7	0,84	1983	21812
-6	0,87	2120	25440
-5	0,90	2259	29369
-4	0,92	2401	33608
-3	0,95	2544	38165
-2	0,98	2691	43048
-1	1,00	2839	48266
0	1,03	2990	53827
	FcTOT(N)	32300	
	McTOT(Nm)		373318



Sub surface current

hh 23 m
Uc,sub 0,6 m/sec
D= 5

Wind generated current

h0 20
Uc,wind 0,54 TR= 50 anni
Uc,wind 0,43 TR= 1 anno

z(m)	Uc,sub (m)
-23	0
-22	0,38
-21	0,42
-20	0,45
-19	0,47
-18	0,48
-17	0,50
-16	0,51
-15	0,52
-14	0,52
-13	0,53
-12	0,54
-11	0,55
-10	0,55
-9	0,56
-8	0,56
-7	0,57
-6	0,57
-5	0,58
-4	0,58
-3	0,59
-2	0,59
-1	0,60
0	0,60

condizioni estreme	
z(m)	Uc,sub (m)
-23	0,00
-22	0,00
-21	0,00
-20	0,00
-19	0,03
-18	0,05
-17	0,08
-16	0,11
-15	0,14
-14	0,16
-13	0,19
-12	0,22
-11	0,24
-10	0,27
-9	0,30
-8	0,32
-7	0,35
-6	0,38
-5	0,41
-4	0,43
-3	0,46
-2	0,49
-1	0,51
0	0,54

condizioni normali	
z(m)	Uc,sub (m)
-23	0,00
-22	0,00
-21	0,00
-20	0,00
-19	0,02
-18	0,04
-17	0,06
-16	0,09
-15	0,11
-14	0,13
-13	0,15
-12	0,17
-11	0,19
-10	0,22
-9	0,24
-8	0,26
-7	0,28
-6	0,30
-5	0,32
-4	0,34
-3	0,37
-2	0,39
-1	0,41
0	0,43

Azione delle correnti - condizioni estreme

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-23	0,00	0	0
-22	0,38	414	414
-21	0,42	505	1010
-20	0,45	567	1701
-19	0,49	689	2755
-18	0,54	811	4056
-17	0,58	936	5615
-16	0,61	1063	7444
-15	0,65	1195	9556
-14	0,69	1329	11964
-13	0,72	1468	14681
-12	0,76	1611	17721
-11	0,79	1758	21097
-10	0,82	1909	24822
-9	0,86	2065	28910
-8	0,89	2225	33375
-7	0,92	2389	38230
-6	0,95	2558	43488
-5	0,98	2731	49162
-4	1,02	2909	55267
-3	1,05	3091	61815
-2	1,08	3277	68820
-1	1,11	3468	76296
0	1,14	3663	84255
	FcTOT(N)	42633	
	McTOT(Nm)		316002

Azioni delle correnti - condizioni normali

z(m)	Uc,sub (m)	Fc(z) (N)	Mc(z) (Nm)
-23	0,00	0	0
-22	0,38	414	414
-21	0,42	505	1010
-20	0,45	567	1701
-19	0,49	674	2694
-18	0,53	778	3892
-17	0,56	883	5298
-16	0,59	989	6920
-15	0,62	1096	8766
-14	0,65	1205	10842
-13	0,68	1316	13157
-12	0,71	1429	15718
-11	0,74	1545	18535
-10	0,77	1663	21615
-9	0,80	1783	24968
-8	0,82	1907	28601
-7	0,85	2033	32522
-6	0,88	2161	36742
-5	0,90	2293	41267
-4	0,93	2427	46106
-3	0,95	2563	51269
-2	0,98	2703	56763
-1	1,00	2845	62597
0	1,03	2990	68779
	FcTOT(N)	36768	
	McTOT(Nm)		274662

Gruppo T.M.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 38 di 73	

2.5. Carico da Impatto (Boat Impact Loads)

Il carico dovuto all'impatto del barge di servizio, è stato condotto secondo quanto previsto da Germanischer Lloyd. In particolare la forza orizzontale risultante dovuta all'impatto del natante è dato dalla formula:

$$F_B = v_B \sqrt{c \cdot a \cdot m}$$

in cui:

v_B = velocità di impatto del natante. In condizioni operative è stato assunto $v_B = 0.5$ m/sec;

c = rigidità della parte impattante del natante. $c = 1.0 \text{ E}+07$ N/m;

a = coefficiente di massa aggiunta. Nel caso in esame, per impatto laterale, $a = 1.6$;

m = massa del natante. $m = 1.5 \text{ E}+05$ kg (da dati del cliente);

Per calcolare l'altezza del punto di impatto rispetto al livello medio di quiete, integrando quanto previsto da Germanischer Lloyd, si è fatto riferimento a quanto previsto dalla norma UNI ENV 1991-2-7 secondo cui il punto di impatto più sfavorevole può essere preso fra 0.05 L sotto e 0.05 L sopra il livello di progetto dell'acqua, in cui L è la lunghezza del natante impattante. Nel caso in esame, assumendo $L = 30$ metri, come indicato dal cliente, si ottiene un'altezza di impatto sopra il livello di quiete pari a 1.5 metri. Tale valore è in accordo con quanto proposto da Germanischer Lloyd, secondo cui la posizione verticale dell'impatto può variare fra + 3 metri e - 5 metri rispetto al livello di quiete.

Con i dati a disposizione si ricavano le seguenti sollecitazioni alla base del palo:

h=13.00 m

$F_B = 775600$ N,

$M_B = 11246200$ Nm;

h=18.00 m

$F_B = 775600$ N,

$M_B = 15124200$ Nm;

h=23.00 m

$F_B = 775600$ N,

$M_B = 17838800$ Nm.

Gruppo TM.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 39 di 73	

2.6. Azioni indotte dagli aerogeneratori

Sulla base di quanto comunicato, le azioni indotte sulla sezione posta in prossimità del pelo libero dell'acqua, sono pari a:

Condizioni estreme

$N \approx 4700\ 000\ \text{N};$
 $T \approx 80\ 0000\ \text{N},$
 $M \approx 6000\ 0000\ \text{Nm}.$

Tali valori, riferiti alla sezione in prossimità del fondale (sea bed), valgono:

$h = 13\ \text{m},$

$N \approx 5500\ 000\ \text{N};$
 $T \approx 80\ 0000\ \text{N},$
 $M \approx 7040\ 0000\ \text{Nm}.$

$h = 18\ \text{m},$

$N \approx 5800\ 000\ \text{N};$
 $T \approx 80\ 0000\ \text{N},$
 $M \approx 7440\ 0000\ \text{Nm}.$

$h = 23\ \text{m},$

$N \approx 6200\ 000\ \text{N};$
 $T \approx 80\ 0000\ \text{N},$
 $M \approx 7840\ 0000\ \text{Nm}.$

Condizioni operative

$N \approx 4700\ 000\ \text{N};$
 $T \approx 48\ 0000\ \text{N},$
 $M \approx 3600\ 0000\ \text{Nm}.$

Tali valori, riferiti alla sezione in prossimità del fondale (sea bed), valgono:

$h = 13\ \text{m},$

$N \approx 5500\ 000\ \text{N};$
 $T \approx 48\ 0000\ \text{N},$
 $M \approx 4224\ 0000\ \text{Nm}.$

$h = 18\ \text{m},$

Gruppo T.M.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 40 di 73	

$N \approx 5800\ 000\ \text{N};$
 $T \approx 48\ 0000\ \text{N},$
 $M \approx 4464\ 0000\ \text{Nm}.$

$h = 23\ \text{m},$

$N \approx 6200\ 000\ \text{N};$
 $T \approx 48\ 0000\ \text{N},$
 $M \approx 4704\ 0000\ \text{Nm}.$



2.7. Carico Sismico (Earthquake Loads)

L'azione sismica è stata calcolata in accordo con quanto previsto dalle "Norme tecniche per le costruzioni" del 14/09/2005.

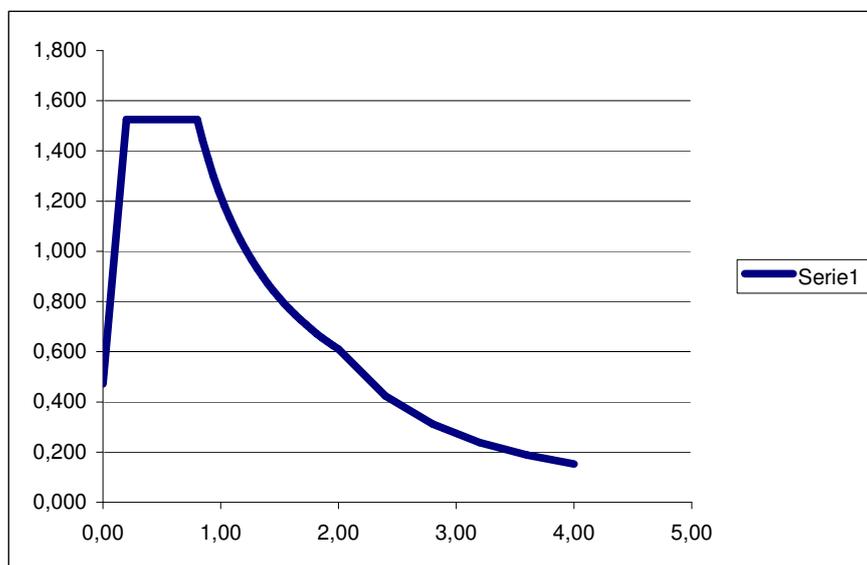
È stata condotta un'analisi dinamica con spettro di risposta.

Per la determinazione delle masse, è stato considerato un carico di 270 0000N in sommità (turbine e pale) e 200 0000N distribuite uniformemente lungo il fusto.

Secondo quanto comunicato agli scriventi, i parametri utili per la determinazione dello spettro elastico sono:

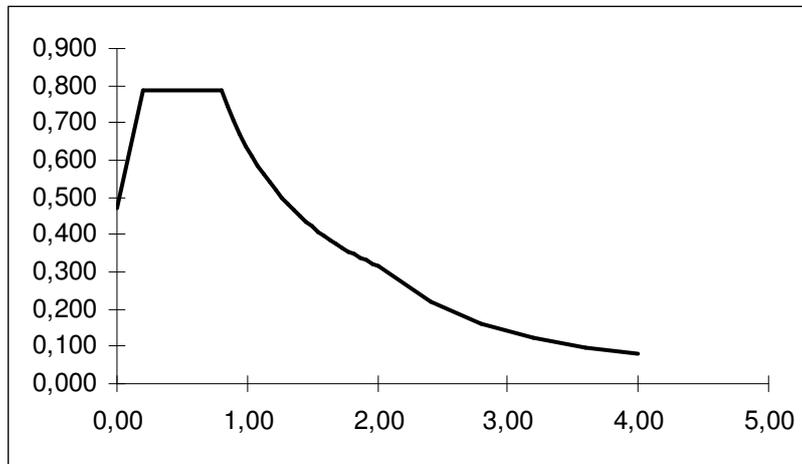
zona sismica	II categoria,	$a_g = 0.25 g$;
classe struttura:	1	
categoria del suolo:	E	$S = 1.35, T_B = 0.25, T_C = 0.80, T_D = 2$;
coefficiente di importanza	$I=1.4$	
smorzamento:	$\xi = 1\%$	

Nella figura seguente viene riportato lo spettro di risposta elastico



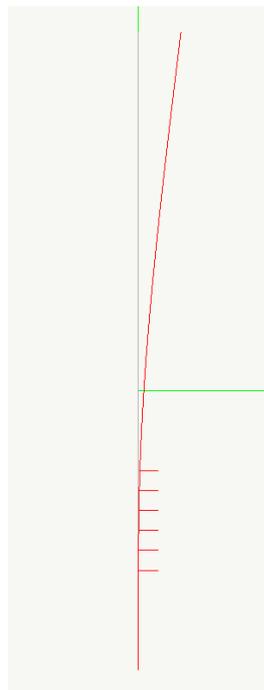
Lo spettro di risposta elastico

Lo spettro di progetto SLU, riportato nella figura seguente, viene determinato adottando un coefficiente di struttura $q=1.5$



Lo spettro di progetto per lo stato limite ultimo

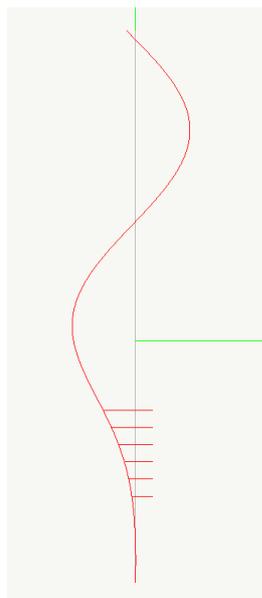
La struttura è stata modellata come mensola collegata elasticamente al terreno. Nelle figure seguenti, sono riportati i primi tre modi di vibrare (del sistema piano).



I modo (T1=4.4 sec)



II modo (T2=0.47 sec)



III modo (T=0.14 sec)

Riferendosi alla sezione di sea bed, si hanno le seguenti sollecitazioni:

$$F_S = 106\ 0000\ \text{N},$$

$$M_S = 3700\ 0000\ \text{Nm}.$$



2.8. Riepilogo delle azioni che impegnano le fondazioni degli aerogeneratori

Si riportano le tabelle riassuntive dei carichi riferiti alla sezione in prossimità del fondale per le diverse tipologie di fondazione analizzate.

AEROGENERATORI Profondità fondale h=13.00 m Diametro palo D=3.00 m

CARICHI IN FONDAZIONE - SEA BED					
	F_V [N]	$F_{H,X}$ [N]	$F_{H,Y}$ [N]	M_X [Nm]	M_Y [Nm]
Pesi Propri	550 0000	-	-	-	-
Vento Estremo	-	80 0000		7040 0000	
Vento Normale	-	48 0000		4224 0000	
Onde Estreme	-	59 6175	-	735 8581	-
Onde Normali	-	38 7768	-	443 8416	-
Onde Frangenti	-	-	-	-	-
Correnti Estreme	-	1 8933	-	15 4698	-
Correnti Normali	-	1 5819	-	12 8331	-
Impatto	-	77 5600	-	1124 6200	-
Sisma	-	106 0000	-	3700 0000	-

AEROGENERATORI Profondità fondale h=13.00 m Diametro palo D=4.00 m

CARICHI IN FONDAZIONE - SEA BED					
	F_V [N]	$F_{H,X}$ [N]	$F_{H,Y}$ [N]	M_X [Nm]	M_Y [Nm]
Pesi Propri	550 0000	-	-	-	-
Vento Estremo	-	80 0000		7040 0000	
Vento Normale	-	48 0000		4224 0000	
Onde Estreme	-	87 8792	-	1057 4856	-
Onde Normali	-	62 5068	-	646 4851	-
Onde Frangenti	-	-	-	-	-
Correnti Estreme	-	2 5244	-	20 6254	-
Correnti Normali	-	2 1092	-	17 1108	-
Impatto	-	77 5600	-	1124 6200	-
Sisma	-	106 0000	-	3700 0000	-



AEROGENERATORI

Profondità fondale h=13.00 m Diametro palo D=5.00 m

CARICHI IN FONDAZIONE - SEA BED

	F_V [N]	$F_{H,X}$ [N]	$F_{H,Y}$ [N]	M_X [Nm]	M_Y [Nm]
Pesi Propri	550 0000	-	-	-	-
Vento Estremo	-	80 0000	-	7040 0000	-
Vento Normale	-	48 0000	-	4224 0000	-
Onde Estreme	-	127 6449	-	1417 2840	-
Onde Normali	-	92 0596	-	876 4767	-
Onde Frangenti	-	-	-	-	-
Correnti Estreme	-	3 0427	-	35 6576	-
Correnti Normali	-	2 5840	-	29 8654	-
Impatto	-	77 5600	-	1124 6200	-
Sisma	-	106 0000	-	3700 0000	-

AEROGENERATORI

Profondità fondale h=18.00 m Diametro palo D=3.00 m

CARICHI IN FONDAZIONE - SEA BED

	F_V [N]	$F_{H,X}$ [N]	$F_{H,Y}$ [N]	M_X [Nm]	M_Y [Nm]
Pesi Propri	580 0000	-	-	-	-
Vento Estremo	-	80 0000	-	7440 0000	-
Vento Normale	-	48 0000	-	4464 0000	-
Onde Estreme	-	59 1726	-	938 5272	-
Onde Normali	-	42 5585	-	583 8528	-
Onde Frangenti	-	-	-	-	-
Correnti Estreme	-	2 2820	-	26 7432	-
Correnti Normali	-	1 9380	-	22 3991	-
Impatto	-	77 5600	-	1512 4200	-
Sisma	-	106 0000	-	3700 0000	-

AEROGENERATORI

Profondità fondale h=18.00 m Diametro palo D=4.00 m

CARICHI IN FONDAZIONE - SEA BED

	F_V [N]	$F_{H,X}$ [N]	$F_{H,Y}$ [N]	M_X [Nm]	M_Y [Nm]
--	-----------	---------------	---------------	------------	------------



	F_V [N]	$F_{H,X}$ [N]	$F_{H,Y}$ [N]	M_X [Nm]	M_Y [Nm]
Pesi Propri	580 0000	-	-	-	-
Vento Estremo	-	80 0000		7440 0000	
Vento Normale	-	48 0000		4464 0000	
Onde Estreme	-	96 4626	-	1372 3169	-
Onde Normali	-	70 3029	-	871 2971	-
Onde Frangenti	-	-	-	-	-
Correnti Estreme	-	3 0427	-	35 6576	-
Correnti Normali		2 5840		29 8654	
Impatto	-	77 5600	-	1512 4200	-
Sisma	-	106 0000		3700 0000	

AEROGENERATORI **Profondità fondale h=18.00 m Diametro palo D=5.00 m**

CARICHI IN FONDAZIONE - SEA BED					
	F_V [N]	$F_{H,X}$ [N]	$F_{H,Y}$ [N]	M_X [Nm]	M_Y [Nm]
Pesi Propri	580 0000	-	-	-	-
Vento Estremo	-	80 0000		7440 0000	
Vento Normale	-	48 0000		4464 0000	
Onde Estreme	-	142 5356	-	1866 5802	-
Onde Normali	-	108 2106	-	1276 5669	-
Onde Frangenti	-	-	-	-	-
Correnti Estreme	-	3 8034	-	44 5720	-
Correnti Normali		3 2300		37 3318	
Impatto	-	77 5600	-	1512 4200	-
Sisma	-	106 0000		3700 0000	

AEROGENERATORI **Profondità fondale h=23.00 m Diametro palo D=3.00 m**

CARICHI IN FONDAZIONE - SEA BED					
	F_V [N]	$F_{H,X}$ [N]	$F_{H,Y}$ [N]	M_X [Nm]	M_Y [Nm]



Pesi Propri	620 0000	-	-	-	-
Vento Estremo	-	80 0000		7840 0000	
Vento Normale	-	48 0000		4704 0000	
Onde Estreme	-	62 3091	-	1150 3200	-
Onde Normali	-	45 4201	-	730 2760	-
Onde Frangenti	-	-	-	-	-
Correnti Estreme	-	2 5580	-	18 9601	-
Correnti Normali		2 2061		16 4797	
Impatto	-	77 5600	-	1783 8800	-
Sisma	-	106 0000		3700 0000	
AEROGENERATORI					
Profondità fondale h=23.00 m Diametro palo D=4.00 m					
CARICHI IN FONDAZIONE - SEA BED					
F_V [N]	F_{H,X} [N]	F_{H,Y} [N]	M_X [Nm]	M_Y [Nm]	
620 0000	-	-	-	-	
-	80 0000		7840 0000		
-	48 0000		4704 0000		
-	102 8489	-	1704 7550	-	
-	79 8302	-	1185 2810	-	
-	-	-	-	-	
-	3 4106	-	25 2801	-	
	2 9414		21 9729		
-	77 5600	-	1783 8800	-	
-	106 0000		3700 0000		
AEROGENERATORI					
Profondità fondale h=23.00 m Diametro palo D=5.00 m					
CARICHI IN FONDAZIONE - SEA BED					
F_V [N]	F_{H,X} [N]	F_{H,Y} [N]	M_X [Nm]	M_Y [Nm]	
620 0000	-	-	-	-	
-	80 0000		7840 0000		
-	48 0000		4704 0000		

Onde Estreme	-	156 6238	-	2467 2601	-
Onde Normali	-	122 0981	-	1752 9134	-
Onde Frangenti	-	-	-	-	-
Correnti Estreme	-	4 2633	-	31 6002	-
Correnti Normali		3 6768		27 4662	
Impatto	-	77 5600	-	1783 8800	-
Sisma	-	106 0000		3700 0000	

2.9. Combinazione delle azioni

La combinazione delle azioni è stata condotta secondo quanto previsto dalle Germanischer Lloyd.
In particolare si sono considerate le seguenti:

1° Combinazione: Extreme
 $1.35*PP + 1.35*VE + 1.35*OE + 1.35*CE$

2° Combinazione: Norma
 $1.35*PP + 1.2*VN + 1.2*ON + 1.2*CN$

3° Combinazione: Abnormal
 $1.1*PP + 1.1*VN + 1.1*ON + 1.1*CN + 1.1*Impatto$

4° Combinazione: Abnormal
 $1.1*PP + 1.1*Sisma + 0.6*VN + 0.6*ON + 0.6*CN$

5° Combinazione:
 $1.0*PP + 1.0*VE + 1.0*OE + 1.0*CE$

6° Combinazione:
 $1.0*PP + 1.0*VN + 1.0*ON + 1.0*CN$

1° Combinazione – fondale h=13m – D = 5.00 m

F_V [N]	743 0000
F_{H,X} [N]	284 0000
M_X [Nm]	11465 0000

2° Combinazione – fondale h=13m – D = 5.00 m

F_V [N]	743 0000
--------------------------	----------



F_{H,X} [N]	143 0000
M_X [Nm]	6158 0000

3° Combinazione – fondale h=13m – D = 5.00 m

F_V [N]	605 0000
F_{H,X} [N]	242 0000
M_X [Nm]	6880 0000

4° Combinazione – fondale h=13m – D = 5.00 m

F_V [N]	605 0000
F_{H,X} [N]	203 0000
M_X [Nm]	7148 0000

5° Combinazione – fondale h=13m – D = 5.00 m

F_V [N]	550 0000
F_{H,X} [N]	211 0000
M_X [Nm]	8493 0000

6° Combinazione – fondale h=13m – D = 5.00 m

F_V [N]	550 0000
F_{H,X} [N]	143 0000
M_X [Nm]	5131 0000

1° Combinazione – fondale h=18m – D = 5.00 m

F_V [N]	783 0000
F_{H,X} [N]	306 0000
M_X [Nm]	12624 0000

2° Combinazione – fondale h=18m – D = 5.00 m

F_V [N]	783 0000
F_{H,X} [N]	191 0000
M_X [Nm]	6933 0000

3° Combinazione – fondale h=18m – D = 5.00 m

F_V [N]	638 0000
F_{H,X} [N]	260 0000
M_X [Nm]	8019 0000



4° Combinazione – fondale h=18m – D = 5.00 m

F_V [N]	638 0000
F_{H,X} [N]	213 0000
M_X [Nm]	7167 0000

5° Combinazione – fondale h=18m – D = 5.00 m

F_V [N]	580 0000
F_{H,X} [N]	226 0000
M_X [Nm]	9351 0000

6° Combinazione – fondale h=18m – D = 5.00 m

F_V [N]	580 0000
F_{H,X} [N]	160 0000
M_X [Nm]	5778 0000

1° Combinazione – fondale h=23m

F_V [N]	837 0000
F_{H,X} [N]	326 0000
M_X [Nm]	13958 0000

2° Combinazione – fondale h=23m

F_V [N]	837 0000
F_{H,X} [N]	209 0000
M_X [Nm]	7781 0000

3° Combinazione – fondale h=23m

F_V [N]	682 0000
F_{H,X} [N]	277 0000
M_X [Nm]	9095 0000

4° Combinazione – fondale h=23m

F_V [N]	682 0000
F_{H,X} [N]	221 0000
M_X [Nm]	7591 0000

5° Combinazione – fondale h=23m

F_V [N]	620 0000
--------------------------	----------



$F_{H,X}$ [N]	241 0000
M_X [Nm]	10369 0000

6° Combinazione – fondale h=23m

F_V [N]	620 0000
$F_{H,X}$ [N]	174 0000
M_X [Nm]	6485 0000

Gruppo T.M.E. Termomeccanica Ecologia 	Preventivo	Emesso da	Documento	Rev.
	97758	PMRE	97758TMCR002	00
			Pag. 52 di 73	

3. Dimensionamento delle fondazioni degli aerogeneratori

3.1. Criteri di Verifica

Per la verifica delle fondazioni si è tenuto conto di quanto riportato nello standard del Germanischer Lloyd, 2005, ed in particolare per la resistenza del palo ai carichi verticale e laterale si è fatto riferimento alla normativa API RP2A-LRFD;

In particolare, sono state previste le seguenti tipologie di fondazione:

Stratigrafia 1 (argille molli fino a -40m da sea bed)

Fondale h=13 metri

Fondazione su monopalo di diametro $\phi 4750 \times 60 \text{mm}$ L=60 metri + anello (in c.a. o in acciaio) intestato alla base (sea bed) $\phi 15000 \times 6000 \text{H mm}$.

Fondale h=18 metri

Fondazione su monopalo di diametro $\phi 4750 \times 60 \text{mm}$ L=60 metri + anello (in c.a. o in acciaio) intestato alla base (sea bed) $\phi 20000 \times 6000 \text{H mm}$.

Fondale h=23 metri

Fondazione su tripode con pali $\phi 2500 \times 30$ L=50m

Stratigrafia 2 (argille molli fino a -15m da sea bed)

Fondale h=13 metri

Fondazione su monopalo di diametro $\phi 4750 \times 60 \text{mm}$ L=40 metri

Fondale h=18 metri

Fondazione su monopalo di diametro $\phi 4750 \times 60 \text{mm}$ L=40 metri + anello al sea bed $\phi 15000 \times 6000 \text{H mm}$

Fondale h=23 metri

Fondazione su monopalo di diametro $\phi 4750 \times 60 \text{mm}$ L=40 metri + anello al sea bed $\phi 20000 \times 6000 \text{H mm}$

3.2. Risultati delle analisi effettuate

Nei paragrafi che seguono si riportano le principali valutazioni effettuate. Ovviamente, la progettazione esecutiva delle strutture di fondazione non potrà prescindere dall'accertamento accurato delle caratteristiche dei terreni.



Nelle figure seguenti sono riportate le sollecitazioni e le deformazioni dei pali in conseguenza delle combinazioni descritte in precedenza.

3.3. Fondazioni a monopalo

3.3.1. Stratigrafia tipo 1

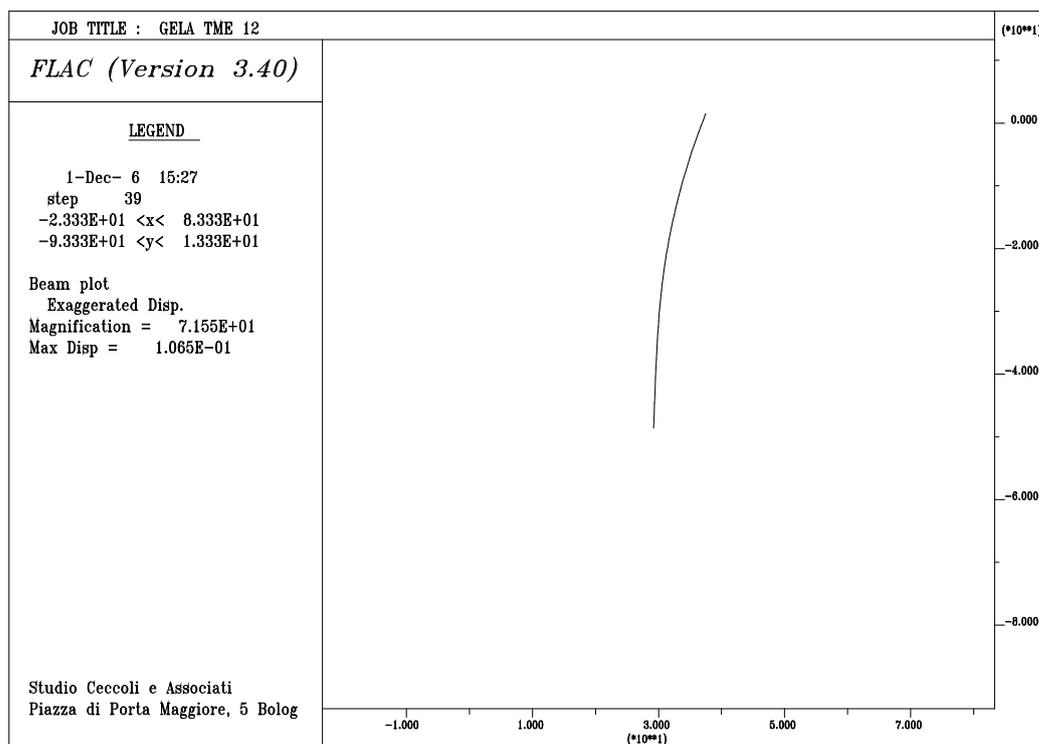
Fondazione aerogeneratori

Profondità fondale: 13 metri

Terreno: argille molli fino a -20m da sea bed

Palo: $\phi 4750 \times 60 \text{mm}$, $L=50 \text{m}$

Combinazione di carico: 6





Fondazione aerogeneratori

Profondità fondale:

13 metri

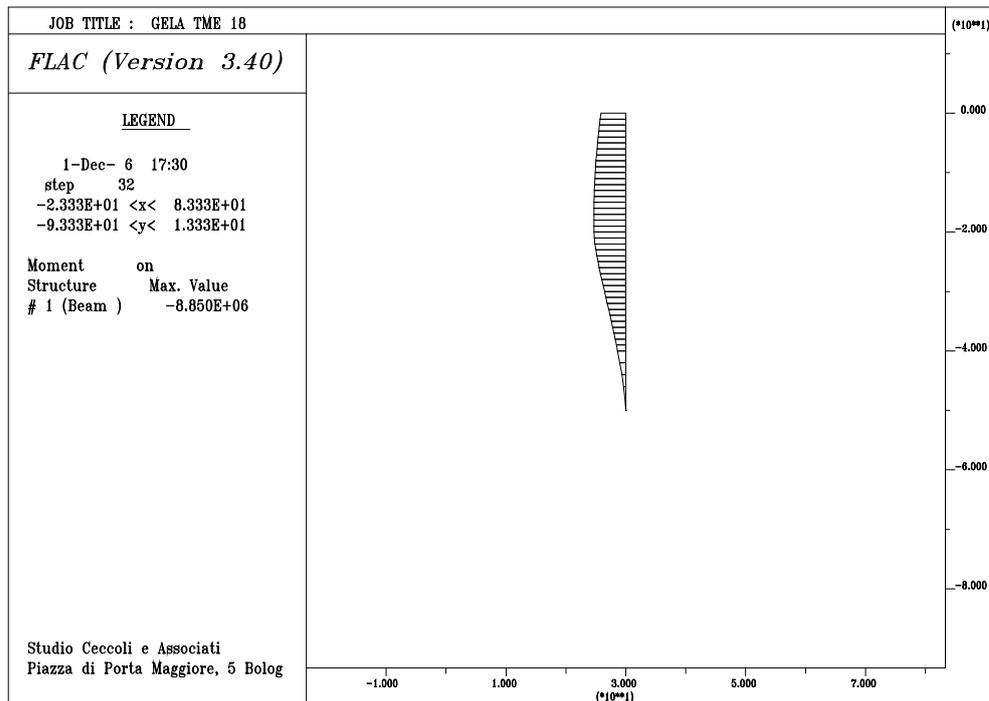
Terreno:

argille molli fino a -20m da sea bed

Palo:

φ4750x60mm, L=50m

Combinazione di carico: 3





Fondazione aerogeneratori

Profondità fondale:

13 metri

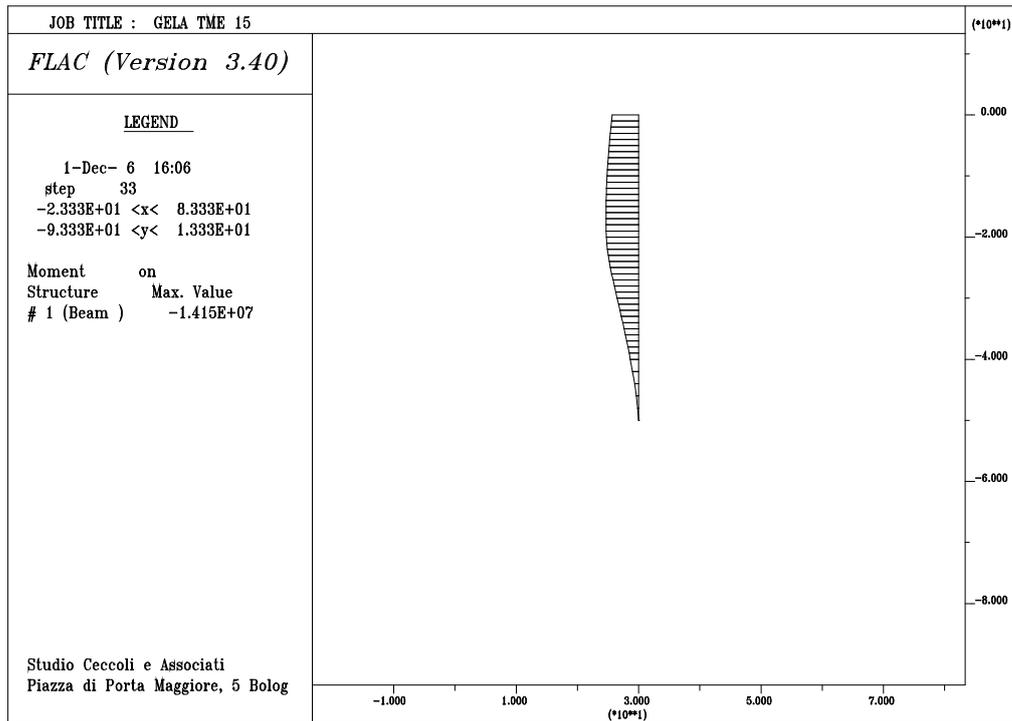
Terreno:

argille molli fino a -20m da sea bed

Palo:

φ4750x60mm, L=50m

Combinazione di carico: 1





Fondazione aerogeneratori

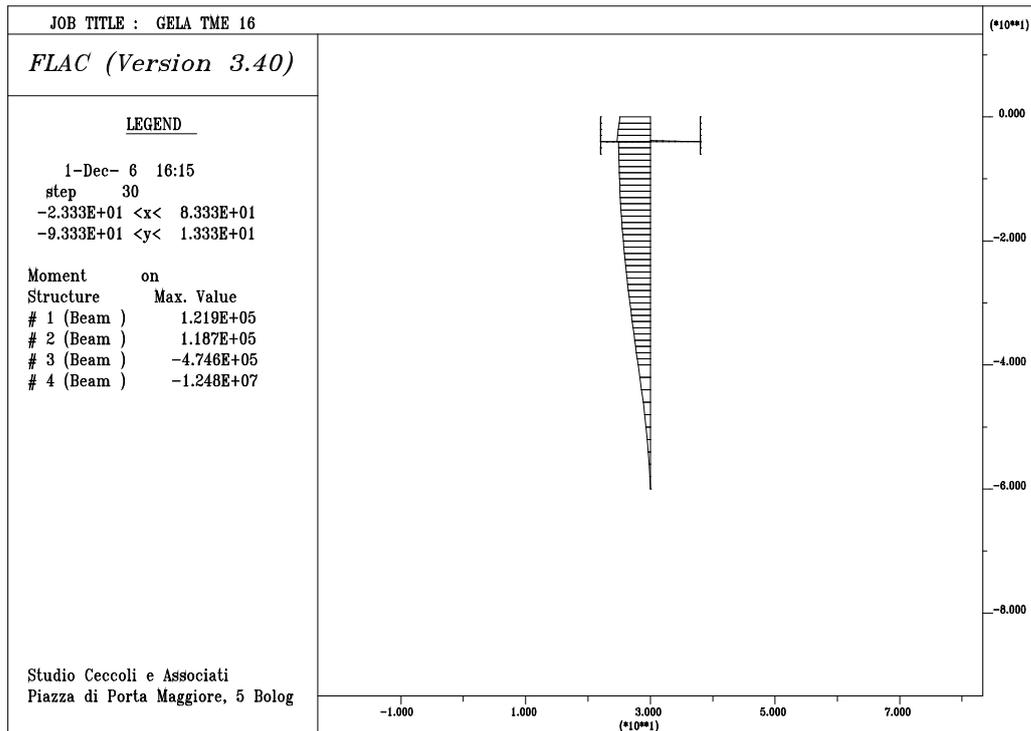
Profondità fondale: 13 metri

Terreno: argille molli fino a -40m da sea bed

Palo: $\phi 4750 \times 60 \text{mm}$, $L=60 \text{m}$

Anello (in c.a. o acciaio): $\phi 16000$, $H=6.00 \text{m}$

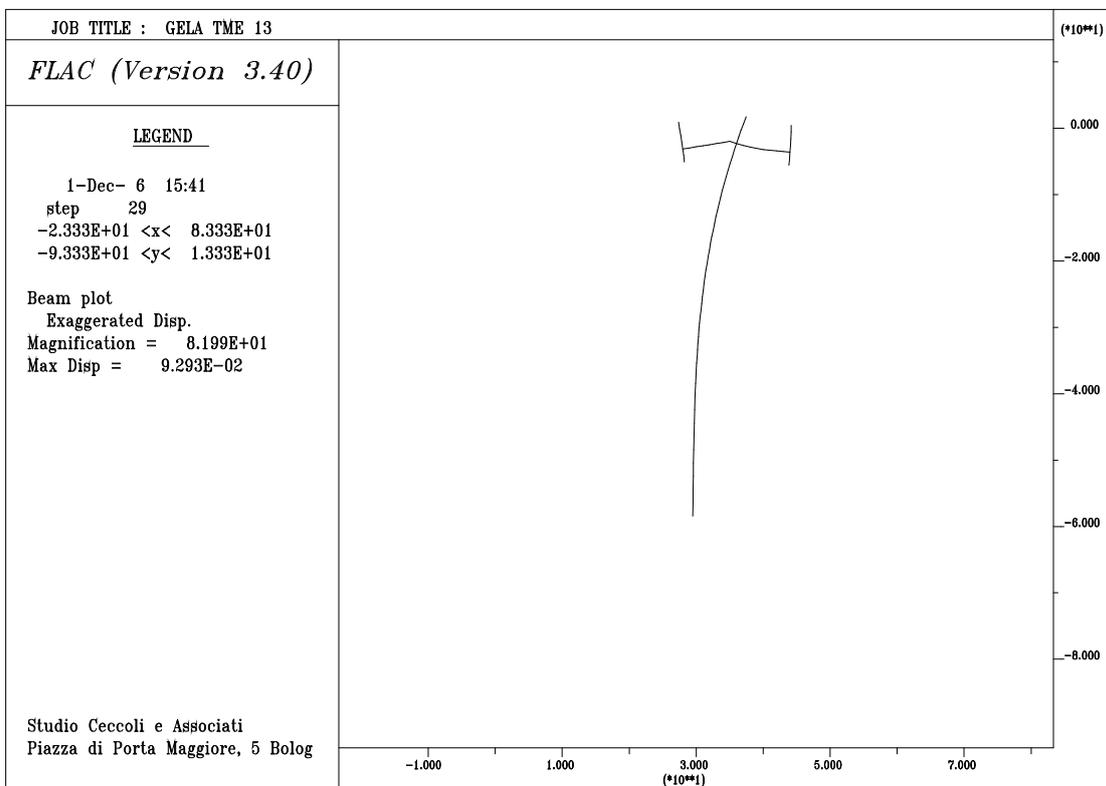
Combinazione di carico: 1





Fondazione aerogeneratori

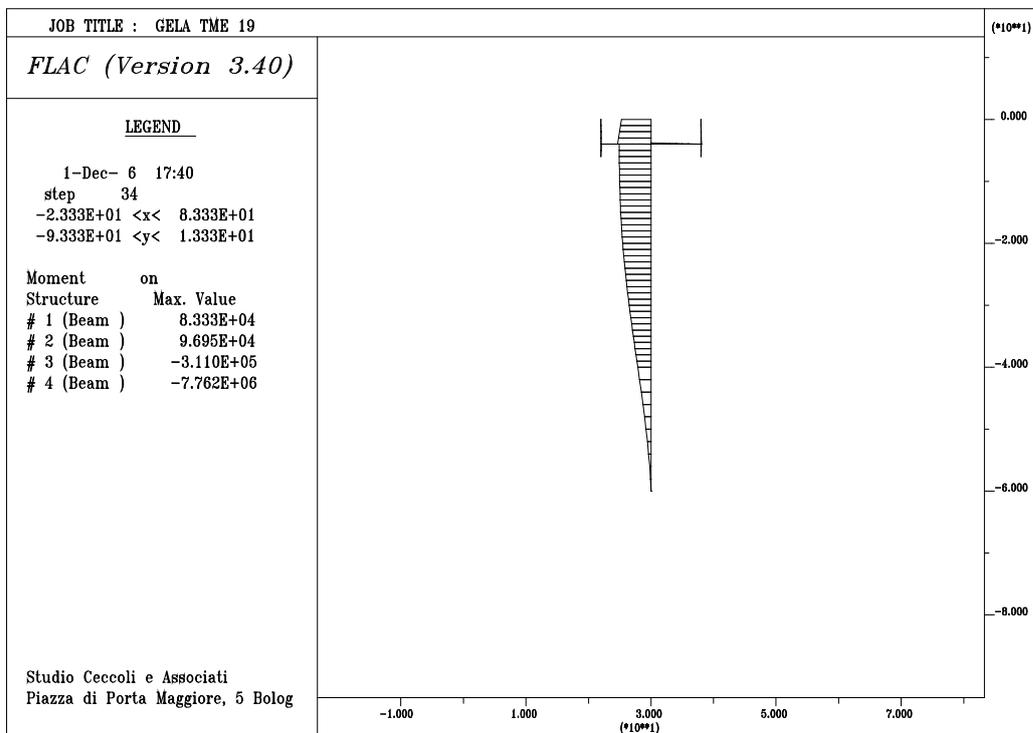
Profondità fondale: 13 metri
 Terreno: argille molli fino a -40m da sea bed
 Palo: $\phi 4750 \times 60 \text{mm}$, $L=60 \text{m}$
 Anello (in c.a. o acciaio): $\phi 16000$, $H=6.00 \text{m}$
 Combinazione di carico: 6





Fondazione aerogeneratori

Profondità fondale: 13 metri
 Terreno: argille molli fino a -40m da sea bed
 Palo: $\phi 4750 \times 60 \text{mm}$, $L=60 \text{m}$
 Anello (in c.a. o acciaio): $\phi 16000$, $H=6.00 \text{m}$
 Combinazione di carico: 3





3.3.2. Stratigrafia tipo 2

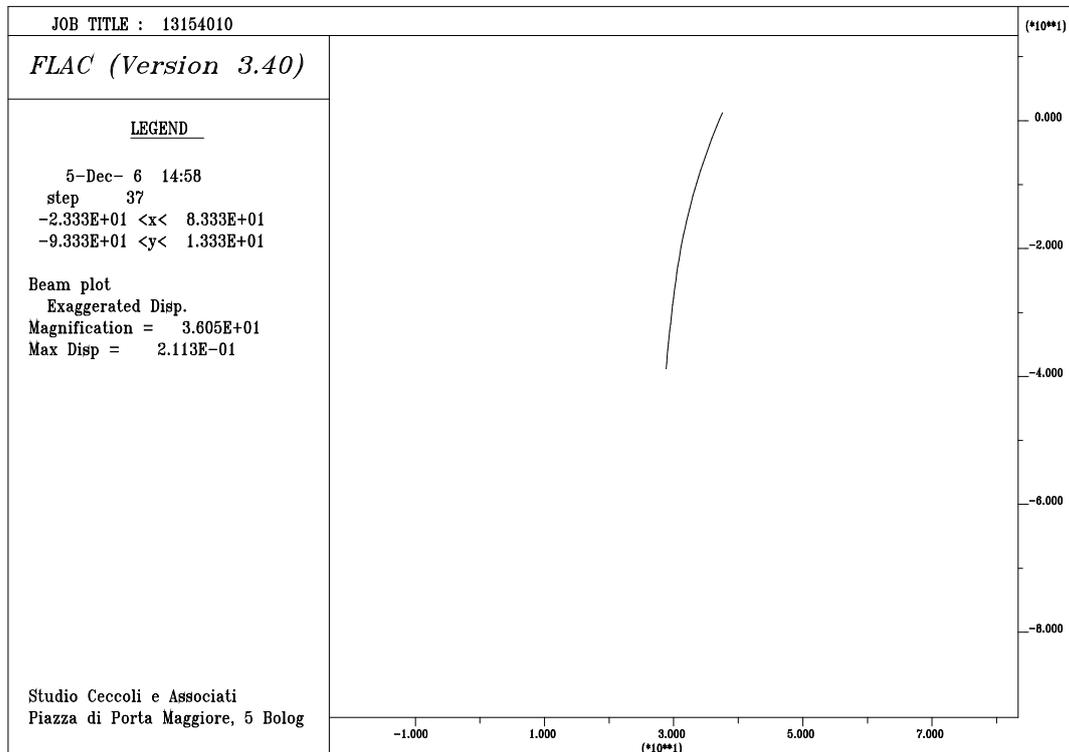
Fondazione aerogeneratori

Profondità fondale: 13 metri

Terreno: argille molli fino a -15m da sea bed (stratigrafia 2)

Palo: $\phi 4750 \times 60 \text{mm}$, L=40m

Combinazione di carico: 1



deformazione

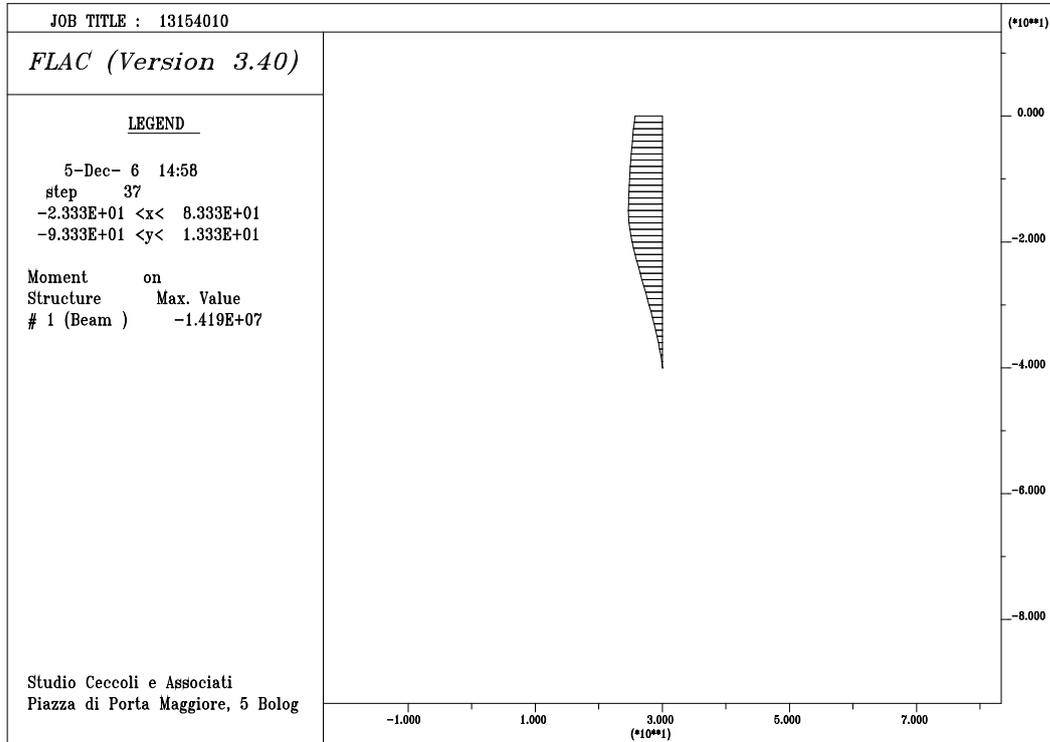


diagramma dei momenti



Fondazione aerogeneratori

Profondità fondale:

13 metri

Terreno:

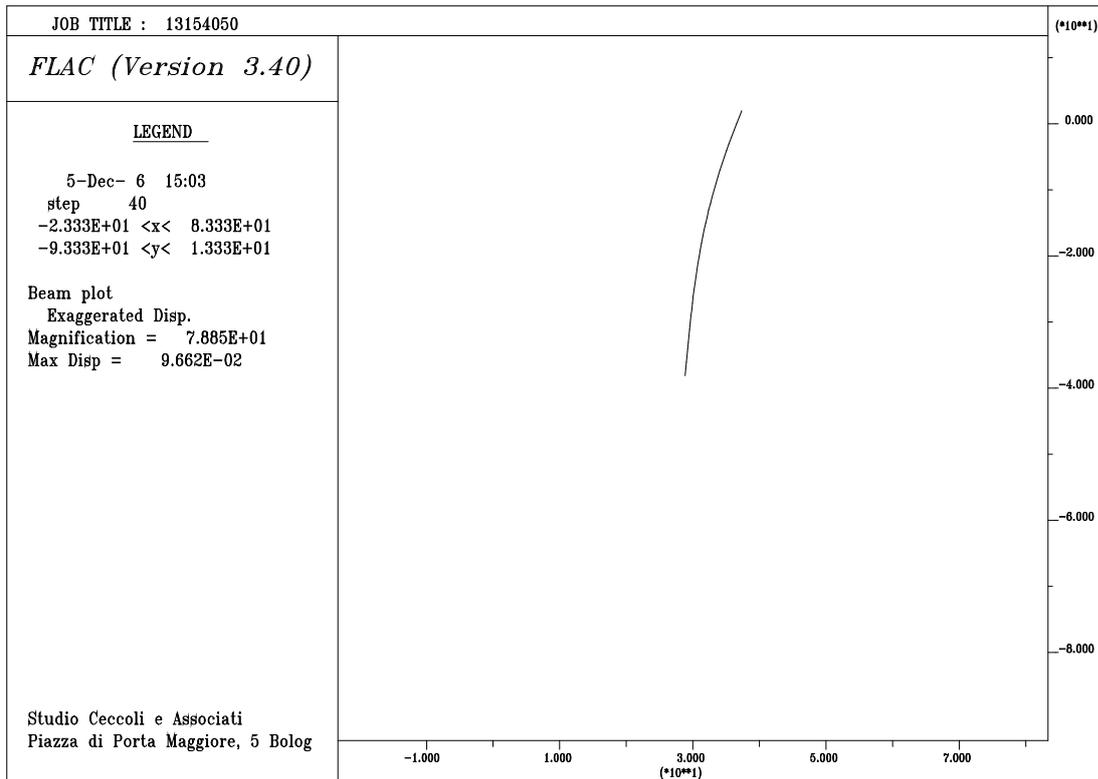
argille molli fino a -15m da sea bed(stratigrafia 2)

Palo:

φ4750x60mm, L=40m

Anello (in c.a. o acciaio): no

Combinazione di carico: 6



deformata

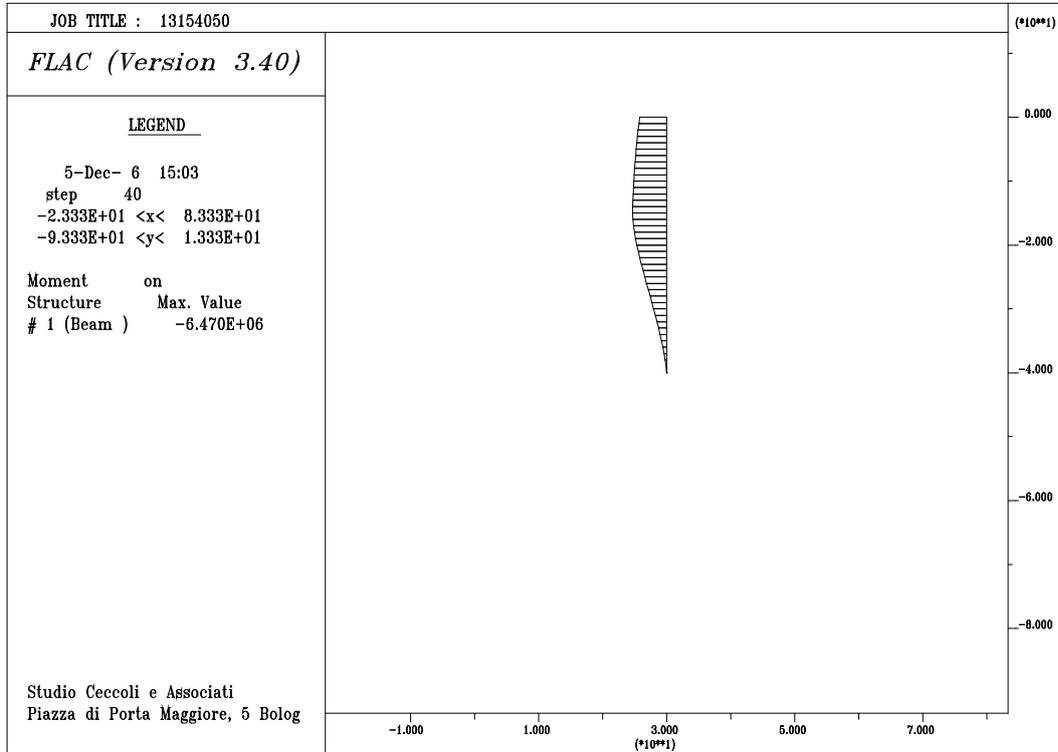


diagramma dei momenti



Fondazione aerogeneratori

Profondità fondale:

18 metri

Terreno:

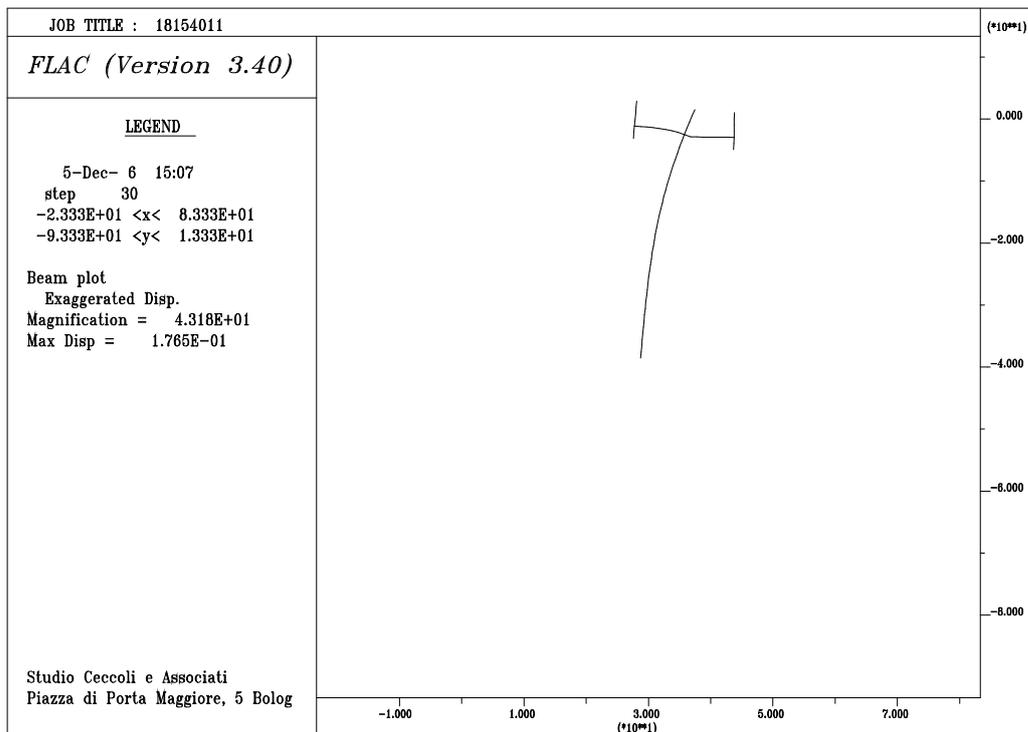
argille molli fino a -15m da sea bed(stratigrafia 2)

Palo:

φ4750x60mm, L=40m

Anello (in c.a. o acciaio): si

Combinazione di carico: 1



deformata

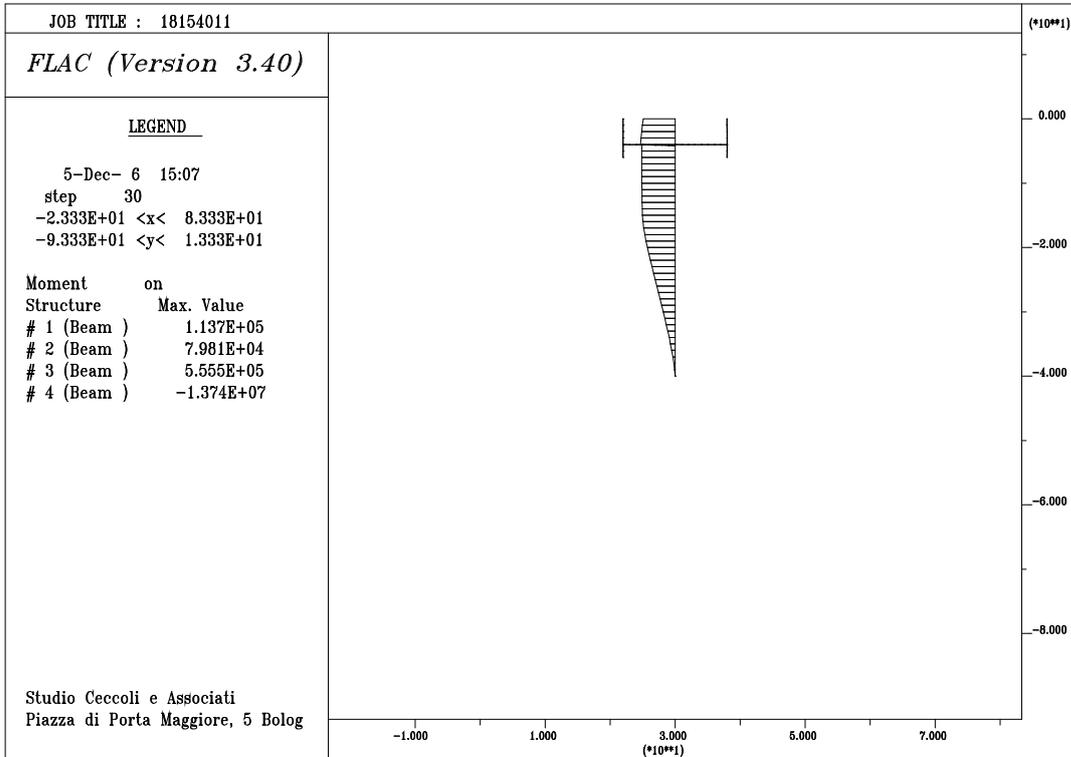


diagramma dei momenti



Fondazione aerogeneratori

Profondità fondale:

18 metri

Terreno:

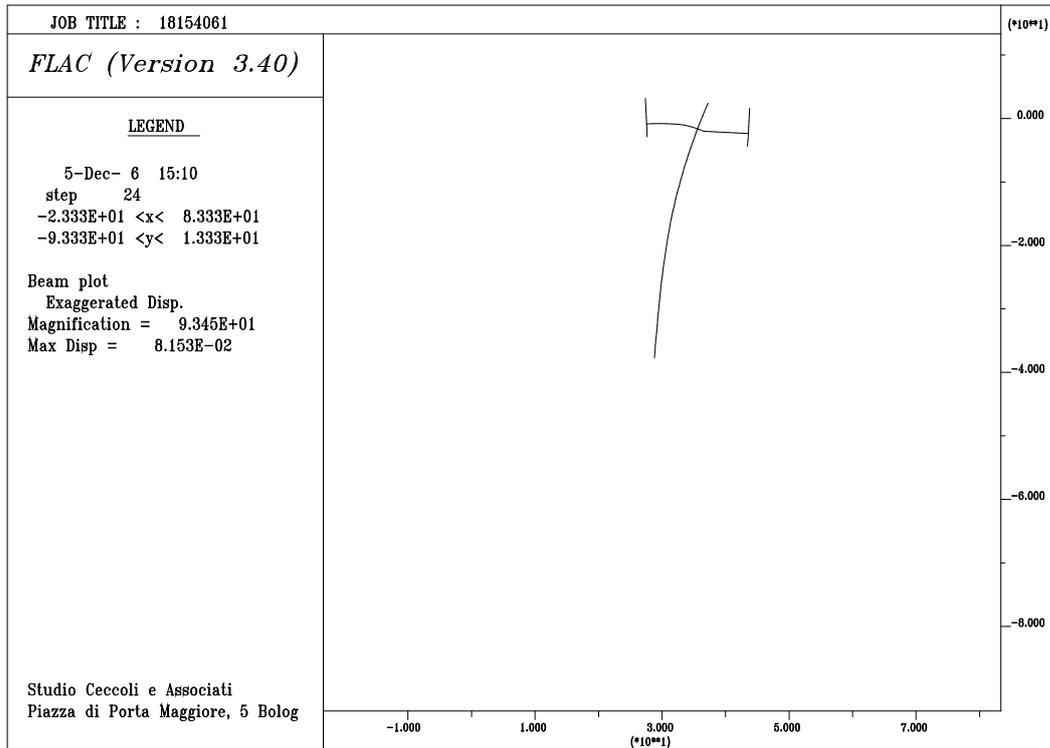
argille molli fino a -15m da sea bed(stratigrafia 2)

Palo:

φ4750x60mm, L=40m

Anello (in c.a. o acciaio): si

Combinazione di carico: 6



deformata

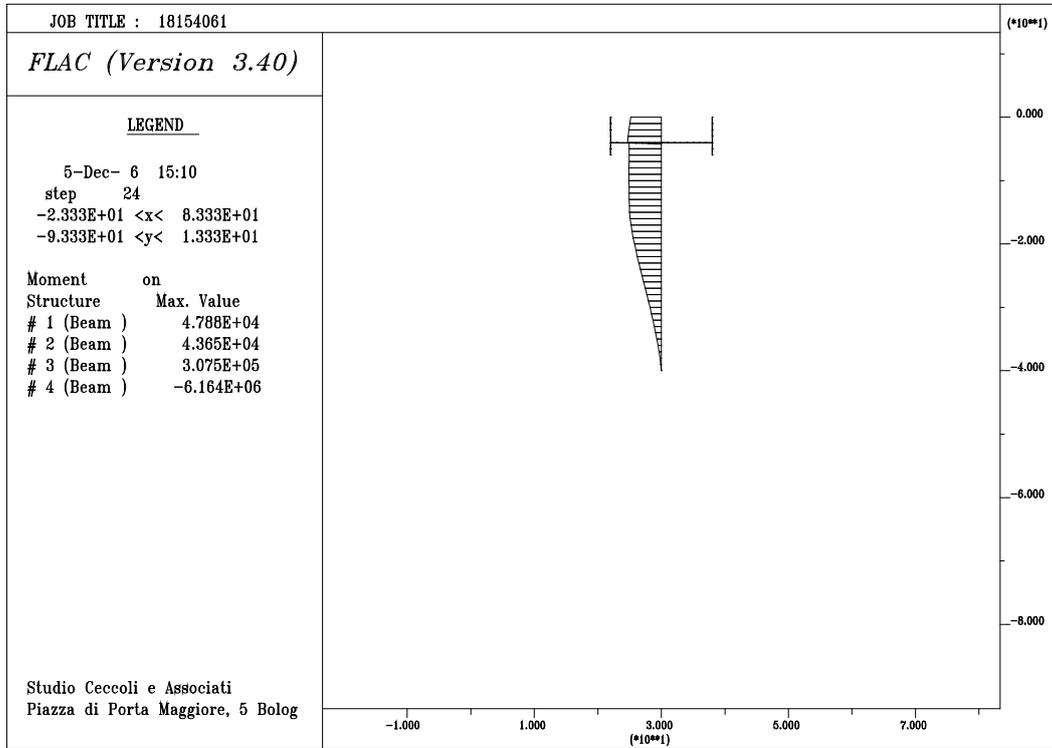


diagramma dei momenti



Fondazione aerogeneratori

Profondità fondale:

23 metri

Terreno:

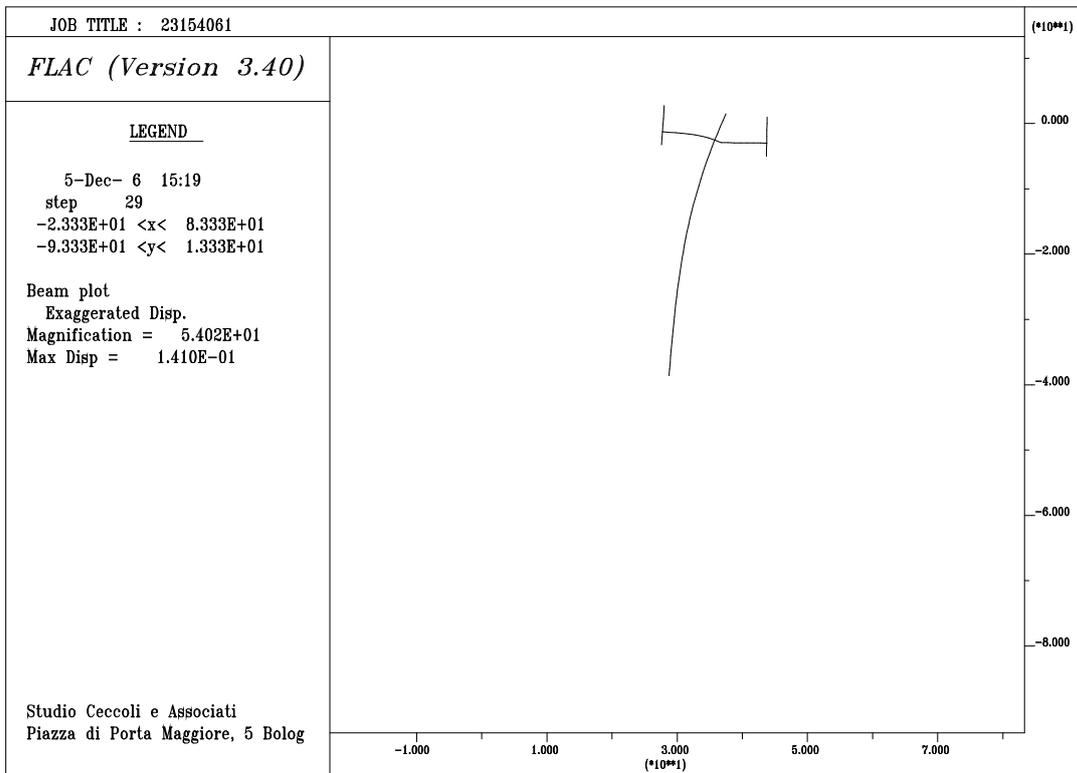
argille molli fino a -15m da sea bed(stratigrafia 2)

Palo:

φ4750x60mm, L=40m

Anello (in c.a. o acciaio): si

Combinazione di carico: 1



deformata

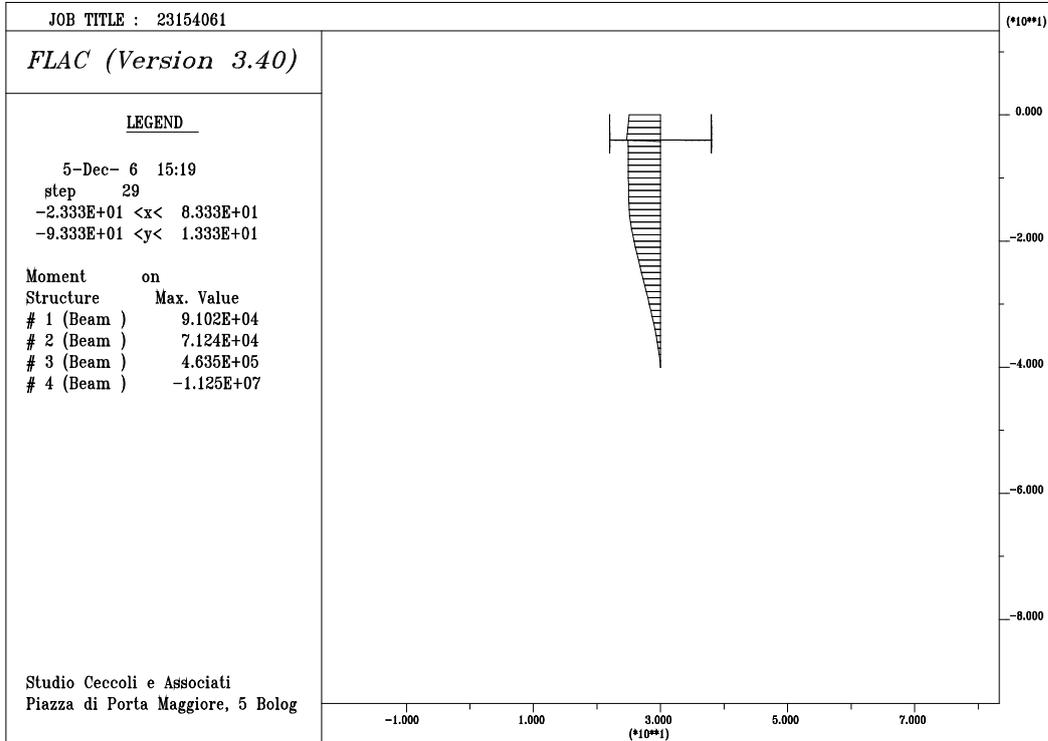


diagramma dei momenti



3.4. Fondazione a Tripode

La soluzione a tripode permette di equilibrare il momento flettente con carichi assiali di compressione e trazione sui pali. E' pertanto necessario aggiungere alla verifica dei pali a carico laterale anche quella a carico assiale. In via preliminare, si possono stimare i carichi sui singoli pali come segue:

$$F_{Vpalo\ i} = F_V/3 \pm M/\sum x_i^2 * x_i$$

$$F_{Hpalo\ i} = F_H /3$$

Per valutare le condizioni più gravose sono state considerati i seguenti casi:

- carichi agenti in corrispondenza di un lato del tripode: in questo caso il palo più penalizzato è il palo sottovento in compressione;
- carichi agenti su un vertice del tripode: in questo caso il palo più penalizzato è il palo sopravvento, in trazione.

Assumendo una dimensione del tripode alla base pari a 30 m, per la combinazione di carico n. 1 estrema, si ottengono i carichi sui singoli pali come segue:

1° Combinazione – fondale h=23m (sollecitazione al sea bed) – stratigrafia tipo 1

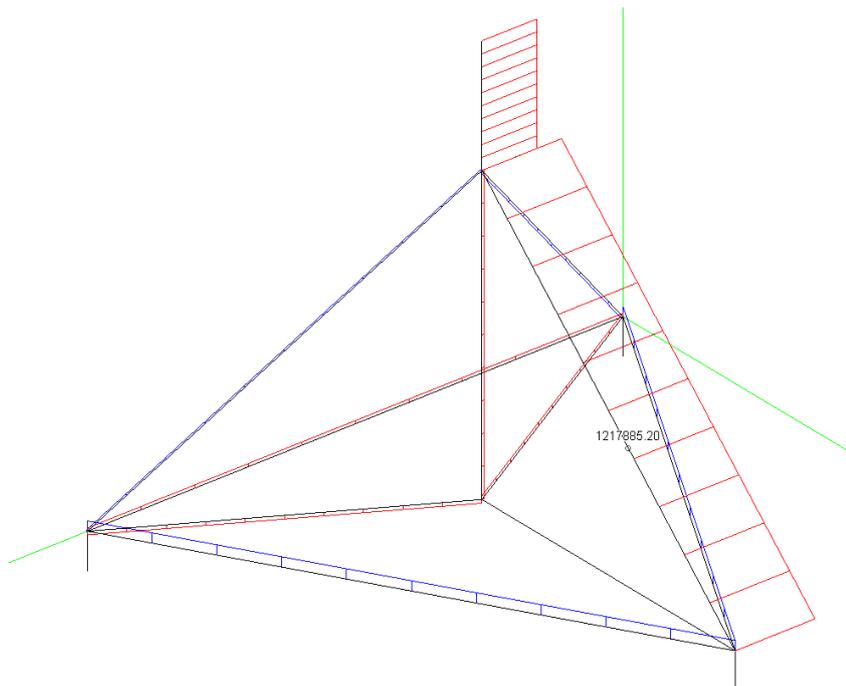
F_V [N]	837 0000 ($\gamma_f=1.35$) / 620 0000 ($\gamma_f=1$)
$F_{H,X}$ [N]	326 0000
M_x [Nm]	13958 0000

- $F_{Vpalo} = 816\ 0000$ N in compressione, $-330\ 0000$ N in trazione
- $F_{Hpalo} = 108\ 6000$ N di taglio in sommità

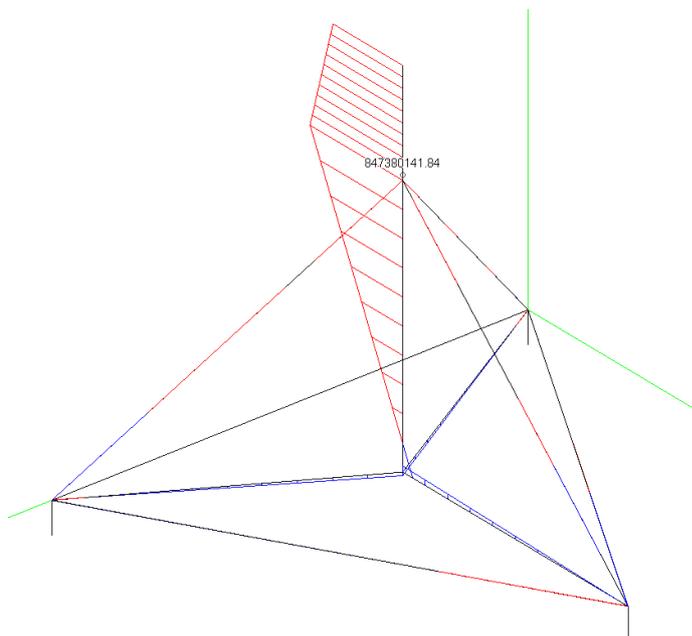


Il dimensionamento di massima è stato condotto con analisi FEM. Le aste costituenti il reticolo sono state simulate come elementi tipo beam, i vincoli di base (pali) sono stati modellati come elementi tipo bondary di opportuna rigidezza.

Nella figura seguente si riportano i risultati dell'analisi condotta sulle strutture del tripode.



lo sforzo assiale (fattorizzato)



il diagramma dei momenti (fattorizzato)

Per i carichi previsti si deve pertanto disporre di pali da 2500 mm di diametro spessore $s=35$ e lunghezza 50 m..

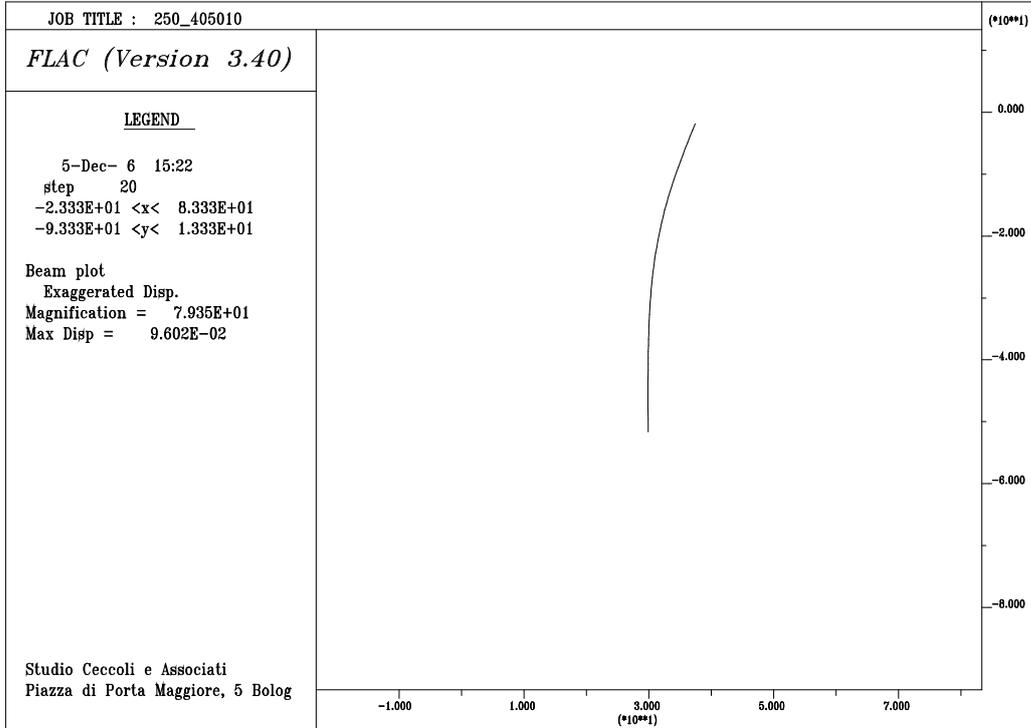
Nelle figure seguenti sono riportate la configurazione deformata e il diagramma dei momenti del palo.

Fondazione aerogeneratori - tripode

Profondità fondale: 23 m

Terreno: argille molli fino a -40m da sea bed

Palo: $\phi 2500 \times 35 \text{ mm}$, $L=40 \text{ m}$



deformata

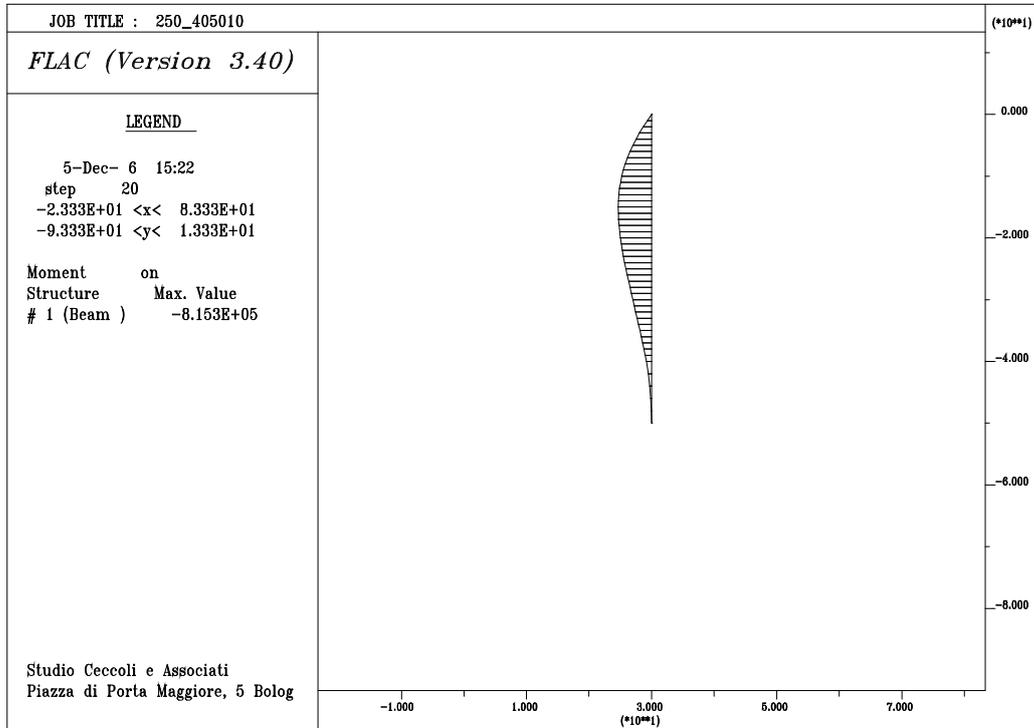


diagramma dei momenti

---000---

Bologna, 05 dicembre 2006

Ing. Franco Baroni

Ing. Diego Cantagallo