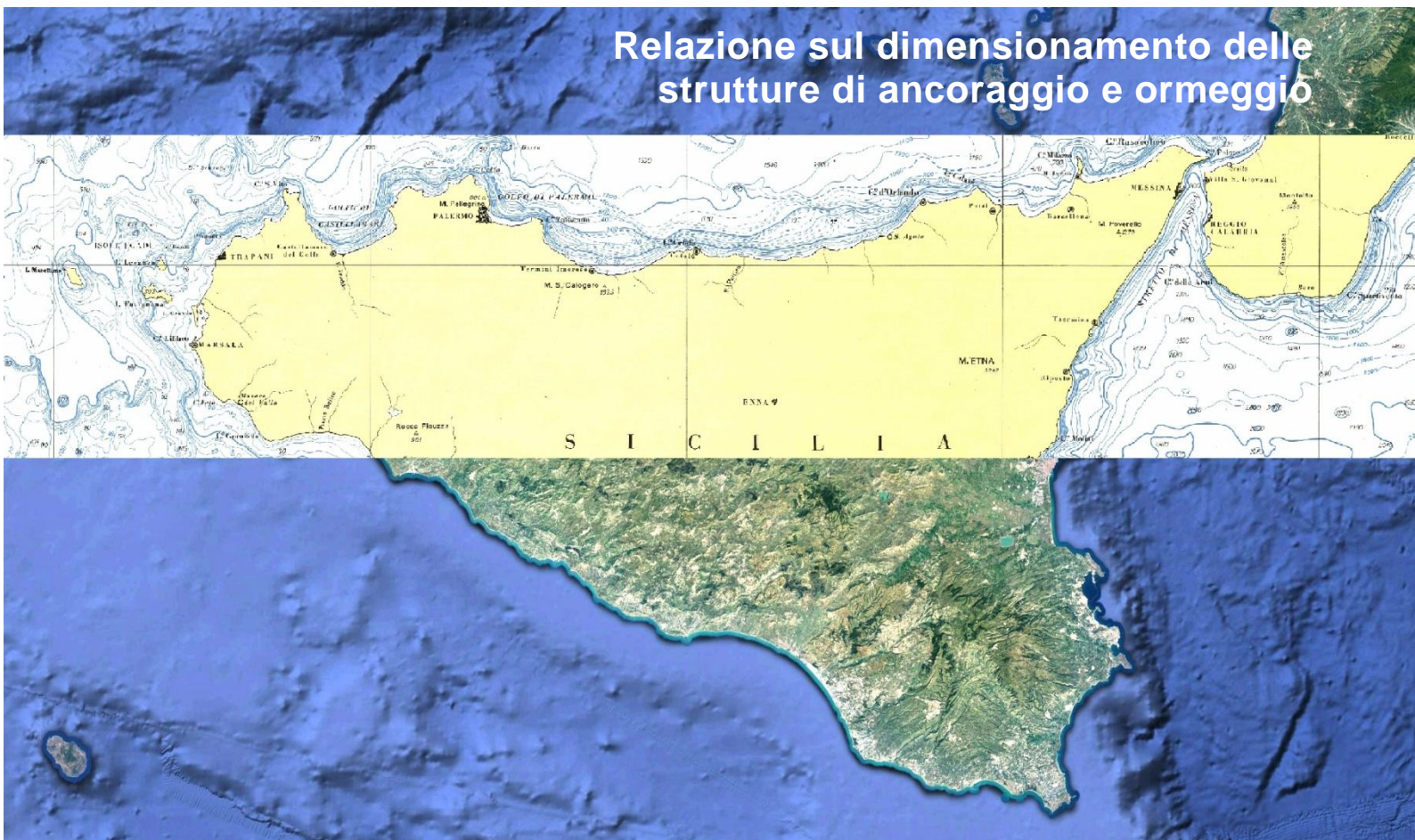


Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
Domanda di Autorizzazione Unica ex art. 12 DLgs 387/2003

Ministero dell'Ambiente
Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale ex DLgs.152/2006

**PROGETTO PRELIMINARE
PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO
OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA**

**Relazione sul dimensionamento delle
strutture di ancoraggio e ormeggio**



Progetto

Dott. Ing. Luigi Severini

Elaborazioni

iLStudio.

Engineering & Consulting Studio

Concept & Innovations:

NiceTechnology®



R13

F0119S.R13.RELORM.00.a


00	24/07/2019	EMESSO PER APPROVAZIONE	A.Spinelli/ S. Bray	L. Severini
REV	DATA	DESCRIZIONE	DESIGNER	PLANNER

Codice:

F	0	1	1	9	S	R	0	1	3	R	E	L	O	R	M	0	0	a
NUM.COMM.		ANNO		CODSET		NUM.ELAB.			DESCRIZIONE ELABORATO					REV.		R.I.		

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 3	Di 28

1	PREMESSA E GENERALITÀ	4
2	ORMEGGIO	6
	2.1 Catenaria (Catenary Mooring).....	6
	2.2 Elementi tesi (Taut Mooring).....	8
3	ANCORAGGIO	9
	3.1 Ancora a trascinamento (Drag Anchor).....	9
	3.2 Ancora a gravità (Deadweight).....	10
	3.3 Ancora con cassoni ad aspirazione (Suction Buckets).....	12
	3.4 Ancora con pali a vite (Helical Pile)	20

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Data Luglio 2019	Pagina 4 Di 28

1 PREMESSA E GENERALITÀ

Nel progetto di costruzione del parco eolico nel Canale di Sicilia, la posizione in mare delle turbine sarà mantenuta grazie a sistemi di ancoraggio il cui dimensionamento strutturale di dettaglio sarà definito in funzione della consistenza dei fondali, determinata mediante apposite operazioni di sondaggio geotecnico e geofisico che saranno eseguite in sito.

In questa fase di progettazione preliminare viene invece definita la tecnica di ormeggio e ancoraggio assumendo come obiettivi principali la garanzia della sicurezza marittima e la minimizzazione dell'impatto ambientale sui fondali da parte di tali sistemi.

Le tecniche attuali generalmente utilizzate fanno ricorso essenzialmente a due tipologie di sistemi di ormeggio sui fondali:

- catenaria distesa sul fondale e munita di ancora terminale (Fig.1 a)
- tiro teso inclinato o verticale (Taut Mooring) con fissaggio puntuale sul fondale marino (Figg. b) e c))

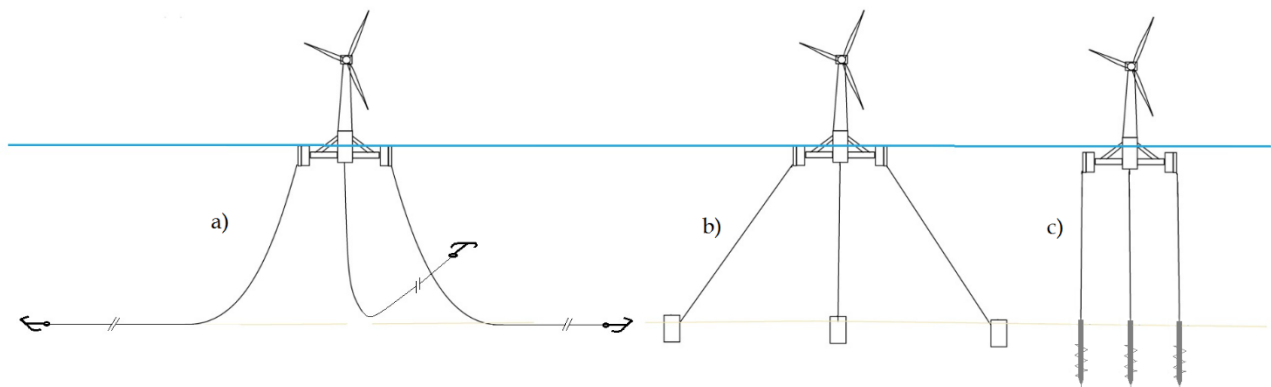




Figura 1.1 – Sistemi di ormeggio e ancoraggio al fondale

Il **sistema di ormeggio a catenaria** collega l'ancora e la piattaforma galleggiante con una linea sospesa ed utilizza il peso proprio della catenaria come sistema stabilizzante. Quando la turbina si muove dalla posizione iniziale, la catena viene sollevata man mano che aumenta la distanza tra la piattaforma e l'ancora. Ciò fa sì che il peso aggiuntivo della parte portata in sospensione provochi una forza di ripristino della posizione iniziale.

Il **sistema di ormeggio ad elementi tesi**, inclinati o verticali, collega invece la piattaforma galleggiante direttamente all'ancora utilizzando linee di ormeggio diritte. La stabilità di questo sistema è data dalle grandi forze di tensione nelle linee di ormeggio.

Al fine di minimizzare gli impatti ambientali potenzialmente generabili dagli ancoraggi degli aerogeneratori sul fondale marino, sarà verificato l'utilizzo di diversi sistemi e, di conseguenza, sarà adottato il sistema che possa garantire le migliori performance ambientali. L'individuazione del sistema di ancoraggio più idoneo avverrà simulando il comportamento oltre che del sistema con catenaria, attualmente il più diffuso nelle installazioni off-shore, anche di sistemi tecnicamente più sofisticati ad ancoraggio teso, ottenuti mediante l'utilizzo di strutture puntuali sul fondale (Corpi morti, Pali infissi, Pali

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO		Pagina 5	Di 28

aspirati, Pali a vite), descritti nei paragrafi seguenti. In tale sistema le linee di ancoraggio non si posano sul fondale, evitando così i movimenti di strisciamento su di esso.

In alternativa alla catenaria il sistema terminale di ormeggio potrà essere costituito da un grave posato sul fondale (Gravity Anchors), da cassoni ad aspirazione o suzione (Suction Buckets) oppure da pali avvitati (Screw Piles) o infissi sul fondale.

In funzione delle caratteristiche sito-specifiche dei fondali, in fase di progettazione definitiva e a seguito di accurate indagini sarà individuata la soluzione ottimale e calcolato il dimensionamento strutturale necessario per garantire la sicurezza della navigazione da potenziali rischi di disancoraggio.

Nell'immagine seguente viene illustrato l'assetto che la fondazione galleggiante prevista in progetto, assumerà in funzione del sistema di ancoraggio sul fondale.

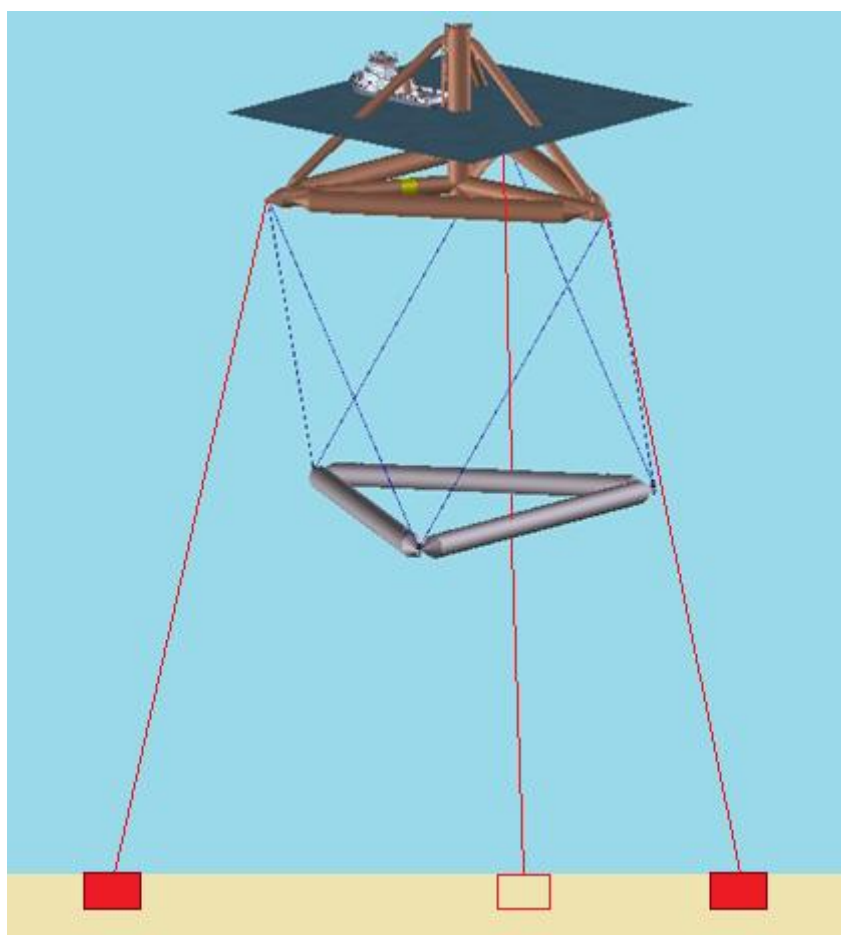



Figura 1.2 – Schema di ancoraggio ad elementi tesi

L'insieme struttura galleggiante e turbina eolica è equilibrato dalla spinta idrostatica. A questo stato di equilibrio bisogna aggiungere le azioni ambientali derivanti principalmente dall'azione delle maree ovvero la variazione dell'assetto di galleggiamento nonché l'azione del vento, delle onde e delle correnti del mare.

Tali sollecitazioni sono generalmente calcolate moltiplicando la pressione esercitata da ciascuna componente ambientale sulla superficie investita utilizzando la nota formula:

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO		Pagina 6	Di 28

$$q=1/2*\rho*v^2$$

dove q è la pressione unitaria, ρ la densità del fluido e v è la velocità massima del fluido considerato.

Tali azioni si trasformano in sollecitazioni agenti sulle linee di ormeggio e sugli ancoraggi di fondazione che saranno opportunamente verificati con specifici software sia per quanto riguarda la verifica geotecnica della risposta dei terreni e del sistema ancora–terreno sia per quanto riguarda il calcolo e la verifica delle linee di ormeggio delle piattaforme eoliche galleggianti.

2 ORMEGGIO

2.1 Catenaria (Catenary Mooring)

Il sistema di ormeggio con configurazione a catenaria presenta collegamenti (catene e cavi) alla struttura galleggiante, sospesi liberamente nell'acqua. Il tratto che giace sul fondale marino generalmente termina con un'ancora soggetta a forze orizzontali.

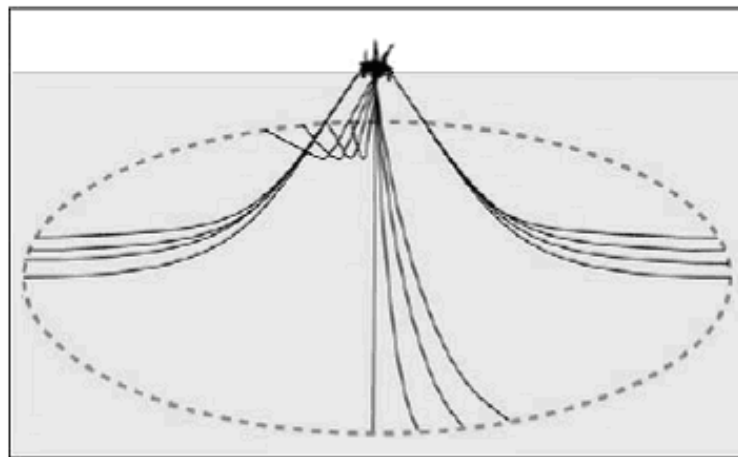




Figura 2.1 – Schema di ormeggio con catenaria

La rigidità prodotta dalla catenaria è dovuta alla variazione della sua geometria. In posizione di equilibrio, un ampio segmento della catenaria di ormeggio giace sul fondale del mare mentre il resto della catenaria rimane sospesa. Quando la struttura galleggiante si allontana dalla sua posizione di equilibrio a causa delle sollecitazioni ambientali, la lunghezza della linea sospesa della linea di ormeggio aumenta mentre diminuisce la lunghezza del segmento. Questa variazione della geometria origina una forza di ripristino dovuta al peso della catenaria che riporta il sistema in posizione di equilibrio. Questo sistema prevede l'installazione di catene pesanti alla quale possono essere aggiunti pesi nella sezione del punto di contatto del fondo marino. Inoltre le catene possono essere implementate in combinazione con altri materiali con lo scopo di aumentare il peso nella sezione che giace sul fondale e ridurre il peso della linea sospesa.

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 7	Di 28

2.1.1 Predimensionamento della catenaria

L'ormeggio con catenaria assume nell'acqua la forma tipica della catenaria. La curva della catenaria ha quindi una configurazione geometrica uguale al grafico di un coseno iperbolico.

La figura seguente rappresenta una linea di ancoraggio a catenaria dove X è la distanza tra ancoraggio e aggancio alla piattaforma, x è la distanza tra punto di fonda della catena e aggancio alla piattaforma, l_s è la lunghezza della linea sospesa.

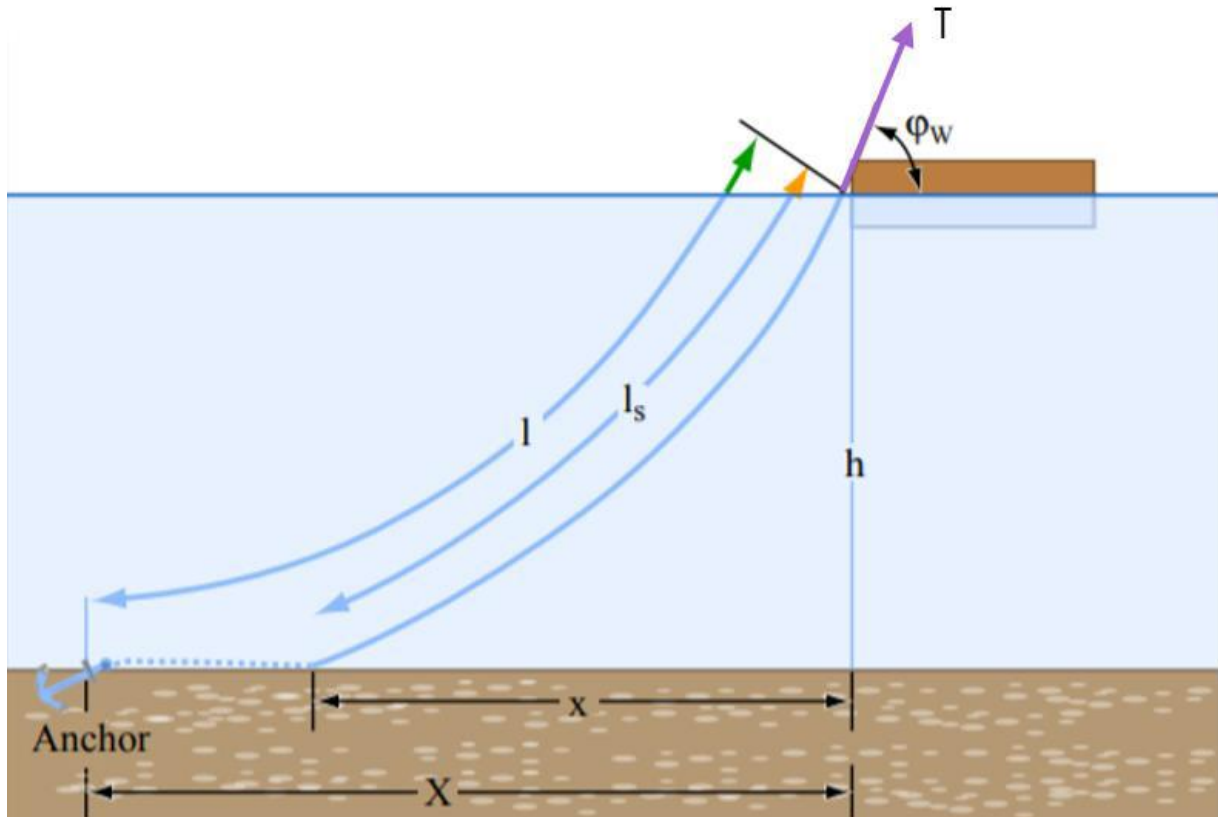


Figura 2.2 – Rappresentazione grafica della catenaria



Trascurando le forze idrodinamiche e assumendo un cavo anelastico, le equazioni di forma della catenaria possono essere scritte come

$$l_s = h \cdot \sqrt{\left(\frac{2T_H}{Wh} + 1\right)}.$$

dove la profondità dell'acqua è h [m], il peso del cavo di ormeggio è W [t/m], il carico orizzontale applicato alla linea di ormeggio è T_H [t] e la lunghezza della linea di ormeggio sospesa è l_s [m].

La distanza orizzontale (x) tra il collegamento alla piattaforma galleggiante e il punto di contatto della linea di ormeggio sul fondo del mare, può essere calcolata seguendo l'equazione:

$$x = \frac{T_H}{W} \cosh^{-1} \left(1 + \frac{Wh}{T_H} \right).$$

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 8	Di 28

Pertanto, combinando le equazioni precedenti la distanza tra l'ancora e la piattaforma può essere calcolata con l'equazione:

$$X = l - h \cdot \sqrt{\left(\frac{2T_H}{Wh} + 1\right)} + \frac{T_H}{W} \cosh^{-1}\left(1 + \frac{Wh}{T_H}\right).$$

La forza di ripristino di un sistema di ancoraggio a catenaria si ricava con l'equazione seguente:

$$C_{11} = \frac{\partial T_H}{\partial X} = W \left[\frac{-2}{\sqrt{\left(1 + 2\frac{T_H}{Wh}\right)}} + \cosh^{-1}\left(1 + \frac{Wh}{T_H}\right) \right]^{-1}.$$

Come si può osservare, la forza di ripristino dipende principalmente dal peso del cavo quindi nel sistema a catenaria è utile aumentare il peso della linea di ormeggio. L'opzione più economica è quella di aumentare il peso solo nel punto di contatto del fondo marino. Pertanto, quando il carico ambientale sposta la FOWT, il peso si solleva aumentando l'inerzia della linea sospesa e la forza di ripristino aumenta.

Con la formula vista in precedenza può essere calcolata la lunghezza della linea di ormeggio sospesa l_s [m] in funzione della profondità del fondale, del peso della linea di ormeggio e note le forze applicate alla linea di ormeggio derivanti dalle sollecitazioni ambientali sulla turbina.

2.2 Elementi tesi (Taut Mooring)

L'ormeggio ad elementi tesi collega la piattaforma galleggiante all'ancora utilizzando linee di ormeggio diritte. I sistemi con ormeggio teso forniscono le forze di ripristino dal modulo elastico del materiale della linea di ormeggio. L'ancoraggio di un sistema di ormeggio ad elementi tesi deve essere progettato per gestire grandi carichi verticali e orizzontali.



Tali sistemi richiedono un pretensionamento in modo che la tensione nelle linee di ormeggio sia sufficientemente grande da tenerle dritte e contemporaneamente fornire la giusta forza di ripristino.

La stabilità di questo sistema è data dalle grandi forze verticali che si generano nelle linee di ormeggio e che mantengono la piattaforma galleggiante in posizione nonostante le forze di spinta. Con il sistema di ormeggio ad elementi tesi piccoli spostamenti di oscillazione si traducono in grandi sforzi di ripristino e tuttavia questo sistema di ormeggio ha l'impronta più piccola possibile e può essere utilizzato per ridurre l'ingombro del sistema di ormeggio.

2.2.1 Predimensionamento degli ormeggi ad elementi tesi

Le proprietà meccaniche del materiale sono ciò che differenzia questi tipi di collegamenti e le principali di queste proprietà sono: la resistenza a trazione, la rigidità assiale e il peso [DNV - Position Mooring - Offshore Standard DNV-OS-E301].

Il dimensionamento di tali ormeggi avviene secondo le comuni formule della scienza delle costruzioni e deriva principalmente dalle forze di pretensione e di trazione che sono ad essi applicati a causa delle sollecitazioni. Sono particolarmente adatti a questa soluzione gli ormeggi realizzati con cavi costituiti da materiali che hanno una implicita capacità di assorbire elasticamente gli sforzi di deformazione.

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO		Pagina 9	Di 28

3 ANCORAGGIO

La profondità del fondale e le caratteristiche geotecniche del terreno sono parametri chiave nella progettazione dei sistemi di ancoraggio.

Diversi tipi di ancore sono validi nel settore offshore e l'individuazione del sistema di ancoraggio più idoneo per lo specifico progetto avverrà simulando il comportamento oltre che del sistema con catenaria, attualmente il più diffuso nelle installazioni off-shore, anche di sistemi tecnicamente più sofisticati ad ormeggio teso con l'utilizzo di strutture puntuali collegate al fondale (Ancore a trascinamento, Corpi morti, Pali infissi, Pali aspirati, Pali a vite), descritti nei paragrafi seguenti.

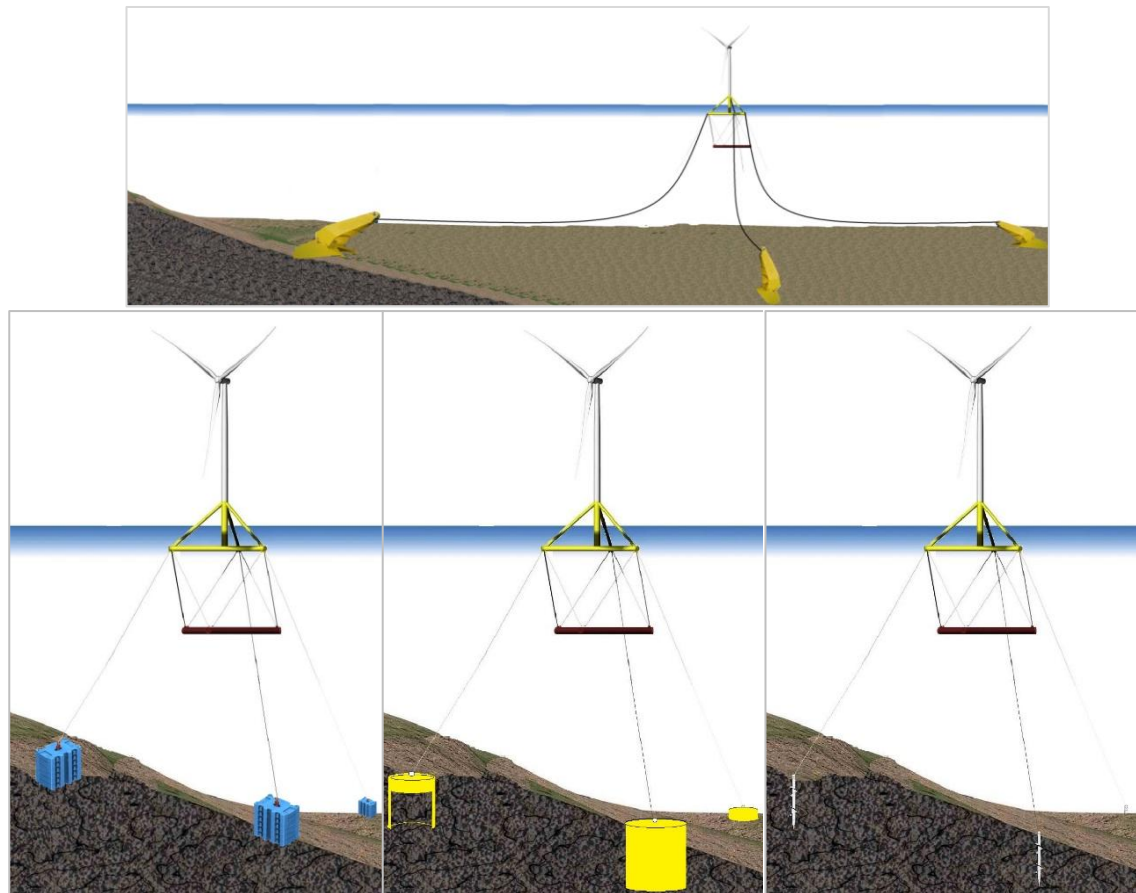




Figura 3.1 – Sistemi di ancoraggio

La classificazione del suolo è utile per la selezione dell'ancora e per il progetto sono richiesti test in situ.

3.1 Ancora a trascinamento (Drag Anchor)

Le ancore a trascinamento presentano dimensioni superiori alle 60 t e vengono normalmente impiegate nei sistemi di ormeggio con catenarie. L'ancora a trascinamento è un tipo di sistema generalmente costituito da una sezione di testa (ad uncino) che agisce contro il terreno nel quale penetra ed un fusto che porta la resistenza al tiro derivante dall'interazione

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO		Pagina 10	Di 28

sezione di testa-terreno lungo la linea di ancoraggio e garantendo l'adeguato funzionamento della sezione di testa.

Molte tipologie di queste ancore possiedono un sistema stabilizzante che previene la rotazione e lo sfilamento delle stesse all'esterno del terreno.



Figura 3.2 – Illustrazione di ancora a trascinarsi

3.2 Ancora a gravità (Deadweight)


L'ancora a gravità è la soluzione più semplice. Consiste in un oggetto pesante posto sul fondale marino per resistere a carichi verticali e/o orizzontali. La capacità di tenuta deriva principalmente dal peso dell'ancora e in parte dall'attrito tra l'ancora e il suolo. Di solito sono fabbricate in cemento e/o in leghe metalliche. Sono comunemente usate perché sono poco costose da produrre ed efficaci per qualsiasi tipo di fondale marino e condizione di carico. Rispetto ad altri ancoraggi sono più pesanti e ciò determina importanti vincoli per l'installazione e i relativi costi.

La loro geometria può essere più o meno complessa e geometrie più complesse vengono prodotte con lo scopo di aumentare il coefficiente di attrito tra ancoraggio e terreno o per permettere l'infissione della stessa nel terreno.

3.2.1 Ancora a gravità semplice

L'ancora a semplice gravità può essere realizzata in calcestruzzo o in lega metallica. Questa seconda opzione viene generalmente preferita per il ridotto volume impiegato. La ghisa, ad esempio, avendo una densità maggiore del calcestruzzo permette una riduzione di ca. 4 volte del volume. La densità della ghisa è pari a ca. $7,15 \text{ ton/m}^3$ e, quando è immersa nel mare che ha una densità di $1,03 \text{ ton/m}^3$, fornisce un peso di $6,12 \text{ ton/m}^3$ che equivale ad un volume di $1,64 \text{ m}^3$ per 10 tonnellate di peso.

Il comportamento della ghisa in ambiente marino è comparabile al comportamento dei materiali impiegati per la realizzazione delle restanti strutture della turbina galleggiante e può considerarsi innocua per l'ambiente marino. Si registra una bassa quantità di materiale disperso poiché la corrosione sulla superficie bagnata è pari a circa 0.25 mm per anno. Per quanto concerne la messa in opera questa risulta estremamente semplice poiché può essere realizzata con i normali mezzi navali impiegati per l'installazione delle turbine e poiché tale

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Data Luglio 2019	Pagina 11

sistema di ancoraggio può essere reso modulare con piastre che possono essere impilate tra di loro tramite un supporto-guida.





Figura 3.3 – Illustrazione di ancora a gravità con piastre modulari di ghisa impilate

3.2.2 Ancora a gravità con infissione dinamica

La geometria di queste ancore permette loro una parziale infissione nel terreno del fondale sfruttando l'energia cinetica sviluppata dal rilascio controllato da una quota di altezza dal fondale stesso. Rilasciando il grave questo raggiunge la velocità limite e impatta al suolo con una penetrazione dovuta alla velocità di caduta libera causata dalla gravità. Tali ancore sono realizzate di solito in ghisa con pinne stabilizzatrici in caduta, punta conica e attacco a catena omni-direzionale in coda. Le dimensioni delle pinne sono inoltre funzionali alla capacità di tenuta necessaria poiché aumentano la capacità laterale. La capacità verticale quindi è una combinazione di peso e attrito laterale con il terreno, per cui grandi alette danno un contributo positivo. La tecnica di installazione è molto semplice e consiste in un lancio verticale dalla nave fino al fondale marino. Se per qualsiasi motivo l'installazione non è accettabile l'ancora può essere recuperata e reinstallata. Tipicamente la penetrazione è di ca. 9-15 metri al di sotto del fondale.



Figura 3.4 – Illustrazione di ancora a gravità con infissione dinamica

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO		Pagina 12	Di 28

3.2.3 Predimensionamento di un'ancora a gravità

Il predimensionamento di un'ancora a gravità serve a definire il volume ed eventualmente una geometria di massima con cui realizzare il grave. Il calcolo viene effettuato utilizzando il valore del tiro a cui deve resistere l'ancora e considerando solo il peso statico necessario a resistere a tale sollecitazione escludendo dalla trattazione la possibilità di una infissione nel terreno e del contributo attivo dell'attrito.

La sollecitazione a cui è sottoposta la fondazione può essere facilmente determinata applicando il principio di Archimede alla struttura galleggiante che supporta la turbina eolica. A questa sollecitazione verticale bisogna aggiungere le azioni ambientali dirette orizzontalmente ovvero l'azione del vento, l'azione delle maree e l'azione delle onde e delle correnti del mare.

3.3 Ancora con cassoni ad aspirazione (Suction Buckets)

I cassoni ad aspirazione (Suction Buckets) vengono infissi nel fondale del mare fino a raggiungere la profondità desiderata aspirando l'acqua e creando depressione all'interno del cassone che in tal modo affonda. Le caratteristiche meccaniche del suolo sono il vincolo principale per questa soluzione che può essere utilizzata in argilla morbida o media, in sabbie addensate, ma non in argille dure e fratturate o rocce compatte.

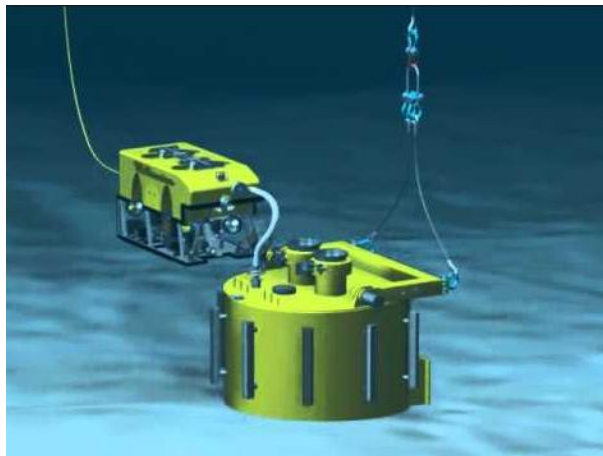




Figura 3.5 – Illustrazione di ancora tipo Suction Bucket

3.3.1 Convenzioni

Per l'esecuzione dei calcoli di dimensionamento dei cassoni a suzione, si adottano le seguenti convenzioni:

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 13	Di 28

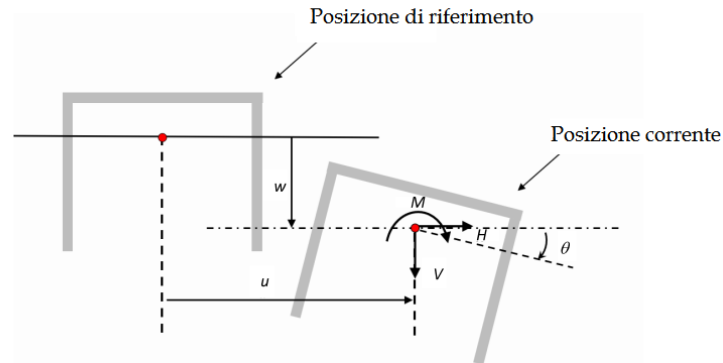


Figura 3.6 – Convenzione sui segni per i carichi e gli spostamenti


Dove:

- V Carico verticale
- H Carico orizzontale
- M Momento ribaltante
- w Spostamento verticale
- u Spostamento orizzontale
- θ Rotazione

Nota: gli spostamenti mostrati in figura sono stati esagerati per chiarezza. I carichi sono indicati come carichi applicati dal cassone al fondale.

3.3.2 Abbreviazioni

BH	Pozzo
CPT	Cone Penetration Test
DLC	Casi di carico
FEA	Analisi agli elementi finiti
GBS	Strutture a gravità
LAT	Marea Astronomica più bassa
MSL	Livello Medio Mare
OSS	Sottostazione Offshore
SICF	Installazione degli ancoraggi Suction Bucket
WTG	Turbine eoliche
VHM	Momento Verticale-Orizzontale
V_{ult}, H_{ult}	Massima resistenza per un carico uniassiale puro (es. H_{ult} è la massima resistenza quando $V = M = 0$)
$V_{max}, H_{max}, M_{max}$	Massima resistenza per traslazione o rotazione pura (ad es. H_{max} è la resistenza massima per $w = \theta = 0$)
A	Area
a	Rapporto tra la pressione dei pori in eccesso sulla base del cassone e sotto la base del cassone
D	Diametro del cassone $\approx (D_i + D_o)/2$
G_0, G_{max}	Modulo di taglio a bassa deformazione



	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 14	Di 28

h	Profondità di installazione del cassone
h_w	Profondità dell'acqua
K	Fattore relativo alla sollecitazione orizzontale e alla sollecitazione verticale
k	Permeabilità del terreno
k_f	Fattore di attrito nel metodo di installazione CPT
k_p	Fattore alla punta nel metodo di installazione CPT
L	Lunghezza della parete laterale del cassone
m	<i>Fattore moltiplicativo del diametro al di sopra del quale la sollecitazione verticale migliora</i>
N_c	Fattore di capacità portante
N_{c*}	Fattore di capacità portante per il sollevamento di una base circolare infissa
N_q	Fattore di capacità portante
N_y	Fattore di capacità portante
p_a	Pressione atmosferica (ca. 100kPa)
q_c	Resistenza alla punta derivante dalla prova CPT
R	Resistenza
s_u	Resistenza non drenata del terreno
s_{u1}	Resistenza media non drenata del suolo alla profondità della superficie laterale del cassone
s_{u2}	Resistenza non drenata del terreno alla base del cassone
s	Aspirazione applicata durante l'installazione (differenza di pressione tra esterno e interno del cassone)
S_t	Sensibilità del suolo
t	Spessore della parete del cassone
t_{thix}	Incremento della resistenza del terreno tixotropico nel tempo
V, V'	Carico verticale, carico verticale effettivo
z	Ordinata verticale sotto il fondale
Z	Fattore di miglioramento dello stress per installazione in sabbia
α	Fattore di adesione
δ	Angolo di attrito all'interfaccia
γ_f, γ_m	Fattori di sicurezza parziali
γ, γ'	Peso specifico del terreno, peso specifico effettivo del terreno
γ_w	Peso specifico dell'acqua marina (ca. 10kN/m ³)
φ'	Angolo di attrito interno del terreno
σ'	Tensione efficace

3.3.3 Predimensionamento del Suction Bucket

Il predimensionamento del Suction Bucket serve a definire il diametro del palo e la profondità di infissione che dovrà essere raggiunta. Il calcolo viene effettuato utilizzando le formule della resistenza laterale di un palo infisso.

La capacità portante per aderenza e/o attrito laterale per un palo di diametro D e lunghezza L è per definizione fornita dalla seguente relazione:

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 15	Di 28

$$Q_s = \pi \cdot D \cdot \int_0^L \tau_s \cdot dz$$

Le tensioni tangenziali limite di attrito e/o aderenza laterale all'interfaccia tra la superficie del palo e il terreno coesivo saturo circostante τ_s , dipendono dal grado di disturbo e dall'alterazione delle pressioni efficaci e interstiziali che le modalità di costruzione del palo producono nel terreno.

Si assume che le tensioni tangenziali limite siano una quota parte della resistenza al taglio non drenata originaria del terreno indisturbato:

$$\tau_s = \alpha \cdot C_u$$

in cui α è un coefficiente empirico di aderenza che dipende dal tipo di terreno, dalla resistenza al taglio non drenata del terreno indisturbato, dal metodo di costruzione del palo, dal tempo, dalla profondità e dal cedimento del palo. L'Associazione Geotecnica Italiana suggerisce alcuni valori di α per tipo di palo e per tipo di materiale del palo.

La sollecitazione a cui è sottoposta la fondazione è determinata come visto in precedenza.

E' necessario sviluppare un modello del terreno che integri dati geofisici e geotecnici, in particolare in caso di siti con stratificazione complessa.

In questa fase preliminare si è realizzato un modello semplificato che potesse fornire una base coerente per la caratterizzazione delle proprietà geotecniche del sito e lo sviluppo di un solido design nelle fasi progettuali successive. Una modellazione iniziale è anche importante per identificare lacune nei dati o altre incertezze che devono essere affrontate nelle indagini successive.

Il modello del terreno è particolarmente importante per le strutture ancorate con cassoni ad aspirazione a causa della loro sensibilità alle condizioni del terreno localizzate, durante l'installazione. Le indagini da eseguire devono essere specificate sulla base delle condizioni del suolo e la modellazione deve tenere conto delle possibili differenze tra le proprietà misurate nei test di laboratorio e quelle proprietà del suolo che regolano il suo comportamento in situ per lo stato limite in questione.

Il predimensionamento è quindi verificato con una simulazione FEM in cui, determinate le dimensioni del Suction Bucket, questo, attraverso una Construction Stage (ovvero una sequenza di fasi costruttive che riproducono le dinamiche palo-struttura), viene inserito in un terreno e successivamente sottoposto ad una sollecitazione applicata in un punto della testa del cassone così come avviene nella pratica applicativa e come illustrato nella seguente figura.


 SEAS med	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Data Luglio 2019	Pagina 16 Di 28
ilStudio. Engineering & Consulting Studio			



Figura 3.7 – Simulazione FEM di ancora Suction Bucket

Le verifiche con FEM mirano principalmente a verificare il comportamento dei terreni e del sistema terreno-ancora.

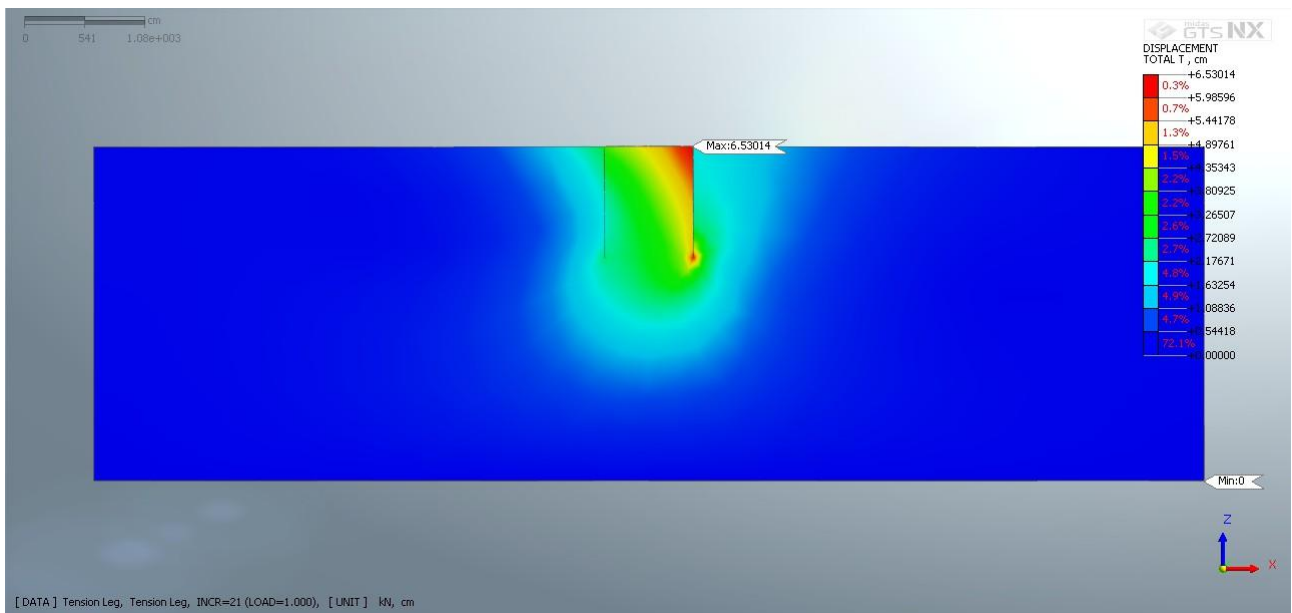



Figura 3.8 – Illustrazione delle deformazioni del terreno in una simulazione FEM con Suction Bucket

3.3.4 Progetto di installazione del Suction Bucket

Il progetto dell'installazione di un Suction Bucket è importante, al pari della progettazione per assicurare la stabilità in servizio. Alcuni aspetti del progetto di installazione possono essere supportati dai calcoli progettuali mentre altri aspetti possono essere trattati solo qualitativamente.

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 17	Di 28

L'intera installazione dovrebbe essere trattata o considerata come un processo gestionale nel quale la performance calcolata è confrontata, durante la messa in opera, con la performance effettiva registrata in continuo. I rischi devono essere anticipati nella fase di progettazione e la procedura di installazione deve essere capace di mitigarli opportunamente. La procedura di installazione dei Suction Buckets si compone come segue:

- 1) Sollevamento con gru e carico su nave;
- 2) Immersione nel punto definito;
- 3) Discesa lungo la colonna d'acqua;
- 4) Posa sul fondale;
- 5) Penetrazione per peso proprio;
- 6) Penetrazione mediante suzione alla profondità definita.

3.3.4.1 Resistenza del suolo alla penetrazione

Lo scopo principale dei calcoli di progettazione dell'installazione sono:

- a) determinare la "penetrazione per peso proprio" ovvero la risposta del terreno alla penetrazione del carico senza l'applicazione dell'aspirazione;
- b) determinare la risposta di aspirazione-penetrazione, ovvero le pressioni di aspirazione necessarie per raggiungere la profondità target;
- c) prevedere eventuali rischi specifici per un'installazione corretta e mettere in atto misure adeguate per mitigare tali rischi.



L'equazione di base per i calcoli dell'installazione è la seguente:

$$V' + s \cdot A_{caisson} = R_{inside} + R_{outside} + R_{tip}$$

Dove:

- $A_{caisson}$ Area interna alla testa del cassone;
- R Resistenza del terreno che si divide poi in: resistenza del terreno all'interfaccia esterna e interna del cassone e resistenza alla punta;
- s Depressione applicata (differenza tra pressione esterna al cassone e pressione interna);
- V' Peso effettivo (considerando il galleggiamento).

Il metodo di calcolo per l'installazione del Suction Bucket si basa sull'utilizzo delle proprietà geotecniche del suolo, determinate mediante prove in situ e prove di laboratorio. I metodi descritti di seguito rappresentano la base dei calcoli. Per i casi che coinvolgono profili del suolo complessi o situazioni particolari, sebbene siano ancora applicabili gli approcci base, è preferibile che siano ottenuti dati più estesi sul suolo e impiegati metodi di modellazione più sofisticati come l'analisi agli elementi finiti oltre che essere prese in considerazione prove pilota.

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 18	Di 28

3.3.4.2 Metodi basati sulla meccanica delle terre

I metodi basati sulla meccanica delle terre fanno riferimento ai parametri geotecnici standard, determinati da prove in sito e di laboratorio, così definiti per i diversi terreni:

- *Argille:*
 - resistenza non drenata c_u in funzione della profondità al di sotto del piede del Suction Bucket;
 - sensitività del suolo S_t o la resistenza al taglio non drenata rimodellata c_{ur} ;
 - fattore di adesione α ;
 - peso specifico del terreno γ (che ha una rilevanza minima nei calcoli).
- *Sabbie:*
 - angolo di attrito ϕ' ;
 - peso specifico efficace del terreno γ' ;
 - permeabilità del suolo k (per i calcoli della portata).

La resistenza a taglio non drenata selezionata dovrebbe tenere conto del tipo di taglio (compressione, taglio semplice diretto, estensione, ecc.). Il fattore di adesione può essere calcolato in funzione della sensitività del terreno o della resistenza al taglio rimodellata. Oltre a quanto specificato sopra, è necessario definire diversi fattori adimensionali, ad esempio i coefficienti di attrito laterale lungo la parete del Suction Bucket.

3.3.4.3 Metodo di calcolo per le argille


Il metodo di calcolo per le argille è fornito dalla trattazione di Housby e Byrne, (2005) Eq. 3 e dalla DNVGL-RP-E303 (2017), Appendice A:

$$V' + s \left(\frac{\pi D_o^2}{4} \right) = \alpha_o \pi D_o h s_{u1} + \alpha_i \pi D_i h s_{u1} + (\gamma' h + N_c s_{u2}) (\pi D t)$$

Dove:

- D Diametro del Suction Bucket $\approx (D_i + D_o)/2$
- h Profondità di installazione del Suction Bucket
- N_c Fattore di capacità portante (coesione)
- s_u Resistenza non drenata del terreno
- s_{u1} Resistenza media non drenata del terreno oltre la profondità del Suction Buckets
- s_{u2} Resistenza non drenata alla testa del palo
- t Spessore della parete del cassone
- α Fattore di adesione (a volte stimato come $\alpha = 1/S_t'$, dove S_t è la sensitività dell'argilla)
- γ' peso specifico effettivo del terreno.

Sostituendo 0 alla depressione applicata ($s = 0$) si determina la relazione tra il peso gravitazionale e la penetrazione nel terreno prima che venga applicata l'aspirazione

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 19	Di 28

(penetrazione per peso proprio); valori positive di aspirazione (s) per carichi verticali assegnati determinano la conseguente relazione tra depressione impressa e profondità raggiunta.

3.3.4.4 Metodo di calcolo per le sabbie

Nel caso delle sabbie l'installazione è più complessa a causa del contributo dell'attrito laterale e il cambiamento delle sollecitazioni effettive all'interno del cassone per i fenomeni di filtrazione indotte dalla depressione applicata. Un approccio semplificato elaborato da Houlsby e Byrne (2005) tiene conto di questi effetti e il risultato è:

$$\begin{aligned}
 V' + s \left(\frac{\pi D_i^2}{4} \right) = & \left(\gamma' + \frac{as}{h} \right) Z_o^2 \left(\exp \left(\frac{h}{Z_o} \right) - 1 - \frac{h}{Z_o} \right) (K \tan \delta)_o \pi D_o \\
 & + \left(\gamma' - \frac{(1-a)s}{h} \right) Z_i^2 \left(\exp \left(\frac{h}{Z_i} \right) - 1 - \frac{h}{Z_i} \right) (K \tan \delta)_i \pi D_i \\
 & + \left\{ \left(\gamma' - \frac{(1-a)s}{h} \right) Z_i \left(\exp \left(\frac{h}{Z_i} \right) - 1 \right) N_q + \gamma' t N_\gamma \right\} (\pi D t)
 \end{aligned}$$


Dove:

- a Rapporto tra la pressione dei pori in eccesso alla base del cassone e sotto la piastra superiore del cassone;
- N_q Fattore di capacità portante
- Z Parametro che controlla il miglioramento dello stress per l'installazione in sabbia
- δ Angolo di attrito dell'interfaccia

Sostituendo di nuovo $s = 0$ si ottiene la relazione tra carico verticale e penetrazione prima dell'applicazione dell'aspirazione e valori positivi di s (per V nota) forniscono la relazione successiva tra aspirazione applicata e profondità di infissione.

Il fattore α nel calcolo precedente determina la frazione dell'aspirazione trasmessa alla base del cassone ed è essa stessa una funzione della penetrazione del cassone e delle ipotesi sulla permeabilità del suolo. Per penetrazioni di cassoni molto superficiali nel suolo e con permeabilità uniforme, questo fattore è 0,5, riducendosi a circa 0,15 per $h / D = 1$. Il fattore può essere modificato per tenere conto dell'aumentata permeabilità all'interno del cassone a causa dell'allentamento del terreno man mano che l'installazione procede. La variabile Z tiene conto del miglioramento dello stress e dipende dall'area del suolo su cui sono trasmesse le forze di attrito sviluppate sul cassone. Per il caso di base (come indicato sopra), supponendo che:

- l'attrito interno sia trasmesso uniformemente attraverso il tappo di terreno all'interno del cassone;
- l'attrito esterno sia trasmesso uniformemente;
- si ottiene l'equazione seguente:

 SEAS med	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Data Luglio 2019	Pagina 20 Di 28
iLStudio. Engineering & Consulting Studio			

$$Z_i = \frac{D_i}{4(K \tan \delta)_i}$$

$$Z_o = \frac{D_o(m^2 - 1)}{4(K \tan \delta)_o}$$

Variazioni più complesse possono essere considerate ma non possono essere risolte analiticamente. Le previsioni dipendono in modo significativo dalla scelta del fattore m (fattore moltiplicativo del diametro) e si ritiene che il valore di circa 1,5 sia appropriato.

3.3.4.5 Metodo di analisi F.E.M. per l'installazione dei Suction Buckets

L'analisi agli elementi finiti (FEM) è utilizzata anche per la progettazione di dettaglio dell'installazione dei Suction Buckets. L'analisi FEM può anche essere utilizzata per tenere conto degli effetti di consolidamento e di altri comportamenti dipendenti dal tempo durante la fase di esercizio. Questo tipo di analisi richiede un dettaglio molto elevato ed è quindi implementata per fasi di progettazione esecutive e di verifica.

3.4 Ancora con pali a vite (Helical Pile)

I pali a vite si differenziano dai pali tradizionali in quanto sono costituiti da eliche fissate al fusto aventi spaziatura specifica e con una base appuntita per consentire una migliore penetrazione nel terreno (Arup Geotechnics, 2005). Esistono varie dimensioni di pali a vite specifiche per determinate condizioni di terreno. La figura seguente mostra gli elementi di base di un palo a vite.

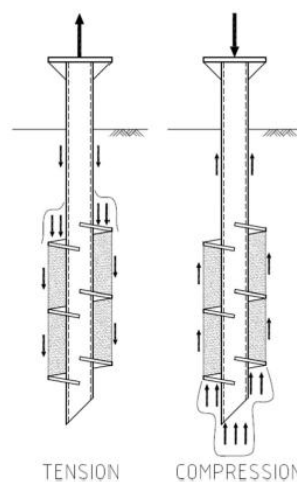



Figura 3.9 – Carichi assiali tipici

I vantaggi comuni dei pali a vite sono:

- facilità e rapidità di installazione;
- sono rimovibili e riutilizzabili;
- offrono alta resistenza a trazione e a compressione;

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 21	Di 28

- non producono rumore e producono vibrazioni minime durante l'installazione.

Gli unici terreni non indicati per i pali a vite sono i terreni rocciosi.

Negli ultimi tempi sono stati compiuti notevoli progressi per quanto riguarda il miglioramento delle capacità assiali e dei processi di installazione dei pali a vite. Poiché i pali elicoidali sono diventati più diffusi nel settore delle costruzioni, sono state sviluppate linee guida.



3.4.1 Predimensionamento dei pali a vite

Un'adeguata conoscenza degli elementi essenziali del processo di progettazione consente di comprendere cosa influenza il progetto dei pali a vite. Gli elementi che influenzano il progetto includono: il processo di installazione, il trasferimento del carico dei pali a vite caricati assialmente, l'uso dello Standard Penetration Test (SPT) e del Cone Penetrometer Test (CPT) e diversi metodi di progettazione.

Il meccanismo di trasferimento del carico dei pali a vite prevede che questo venga trasmesso al suolo circostante e la capacità massima del palo dipende dalle caratteristiche di resistenza del suolo. Questo chiarisce l'importanza di determinare le proprietà del suolo, come il peso specifico effettivo (γ'), l'angolo di attrito interno (ϕ) e il fattore di adesione (a), che influenzano tutti la resistenza del suolo. I risultati delle prove SPT e CPT sono associati alla capacità portante e alle proprietà geo-meccaniche dei suoli. Queste prove sono fondamentali nello svolgimento di un'indagine geotecnica relativa alla stratigrafia del suolo al fine di utilizzare i risultati per la progettazione del palo a vite.

3.4.1.1 Metodo del modulo di taglio cilindrico

Il metodo di taglio cilindrico è stato introdotto per pali a vite infissi nella sabbia, in limo e in argilla. Consente la stima della loro capacità assiale. Questo metodo presuppone che si formi una superficie cilindrica di rottura a taglio che collega l'elica superiore e inferiore come mostrato nella figura seguente. La capacità assiale è pari alla somma della resistenza al taglio lungo la superficie di taglio cilindrica sopra l'elica inferiore e l'attrito del fusto al di sopra dell'elica superiore.

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 22	Di 28

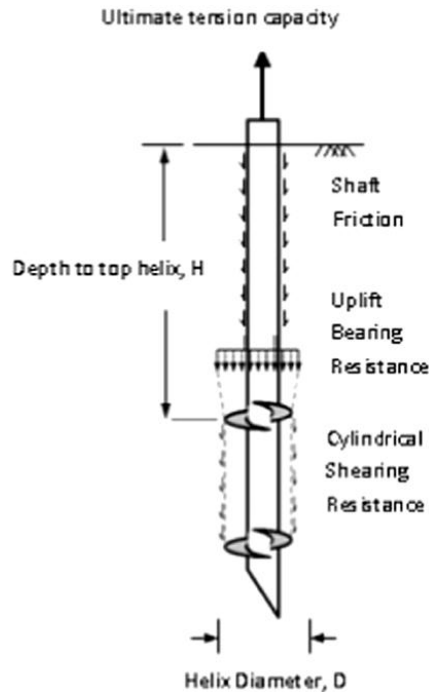


Figura 3.10 – Superficie di rottura a taglio cilindrica

Le equazioni relative al metodo di taglio cilindrico dipendono dal numero di eliche, dalla geometria del palo, dalle condizioni del suolo e dalla distanza tra le eliche.



Sono state derivate numerose equazioni per il metodo di taglio cilindrico che differiscono in base al fatto che il terreno sia coesivo o non coesivo.

Alcuni parametri e proprietà comuni utilizzati nel calcolo della capacità portante sono i seguenti:

- H profondità di infissione;
- D diametro dell'elica;
- d diametro del fusto del palo;
- H_{eff} lunghezza del palo sopra l'elica superiore;
- α fattore di adesione;
- c_u resistenza al taglio non drenata del terreno;
- γ' peso effettivo del terreno;
- N_q fattore di capacità portante per terreni non coesivi;
- F_q fattore di rottura per terreni non coesivi in strati superficiali;
- F_{q*} fattore di rottura per terreni non coesivi in strati profondi;
- N_c fattore di capacità portante a compressione/trazione per terreni coesivi;
- N_u fattore di capacità portante allo sfilamento;
- φ angolo di attrito interno.

Il fattore di capacità portante di sollevamento, N_u può essere determinato con l'equazione seguente:

$$N_u = 1.2 \frac{H_1}{D} \leq 9$$

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO		Pagina 23	Di 28

dove H_1 è la profondità dell'elica superiore.

Nei terreni non coesivi, il valore di N_q è un fattore adimensionale che varia a seconda dell'angolo di attrito interno del terreno. I fattori di rottura F_q e F_q^* per terreni non coesivi in fondazioni profonde e poco profonde dipendono anche dall'angolo di attrito interno. La lunghezza effettiva del fusto H_{eff} è ridotta ulteriormente del valore del diametro dell'elica di base per tenere in conto l'"effetto ombra" di perdita di adesione del fusto sopra l'elica, sia per i terreni coesivi che per quelli non coesivi.

3.4.1.1.1 Suoli coesivi sottoposti a trazione

L'equazione che esprime la resistenza alla trazione dei pali a vite in terreni coesivi è la seguente:

$$Q_t = Q_{helix} + Q_{bearing} + Q_{shaft}$$

La capacità di trazione di un palo prevede che le proprietà del suolo nelle applicazioni a trazione saranno le proprietà del suolo disturbato.

Così,

$$Q_t = S_f(\pi DL_c)c_u + A_H \left(c_u N_u + \gamma' H \right) + \pi d H_{eff} \alpha c_u$$

dove Q_t è la capacità massima a trazione dei pali a vite. Quando l'attrito del fusto è trascurabile sarà quindi ridotta a

$$Q_t = S_f(\pi DL_c)c_u + A_H \left(c_u N_u + \gamma' H \right)$$

Il metodo di taglio cilindrico è riportato anche nell'equazione a seguire come proposta da Lutnegger (2009). In questo caso l'equazione mostra che la massima capacità di sollevamento ha una dipendenza dalla resistenza a taglio non drenata dei pali a vite:

$$Q_u = Q_s + Q_e + W_s + W_a$$

dove:

Q_s = resistenza al taglio cilindrica;

Q_e = capacità portante dell'elica superiore;

W_s = peso del suolo tra le eliche;

W_a = peso dell'acciaio.


$$Q_s = (\pi DL_c)c_u$$

$$Q_e = A_e \rho c_u$$

A_e = area della piastra portante dell'elica.

3.4.1.1.2 Suoli non coesivi sottoposti a trazione

La capacità di trazione dei pali a vite nei terreni non coesivi è presentata nelle equazioni riportate a seguire. La spaziatura tra le eliche e il rapporto di inclusione sono visti come parametri chiave nell'analisi e nella progettazione della capacità portante dei pali a vite in terreni non coesivi.

 SEAS med	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Data Luglio 2019	Pagina 24 Di 28

Il rapporto di inclusione massimo $(H/D)_{cr}$ rappresenta la delimitazione tra fondazioni superficiali e profonde ed è uguale alla distanza dalla parte superiore della piastra elicoidale superiore alla testa del palo. Differenze tipiche nell'analisi di fondazioni superficiali e profonde sono incentrate sui meccanismi di rottura. Per i pali a vite poco profondi in trazione, la zona portante si estenderà dall'elica più alta alla superficie del terreno (Narasimha Rao et al., 1993), mentre per le fondazioni profonde, la zona portante sarà contenuta sotto la superficie dell'elica.

I pali a multi-elica in condizioni superficiali: $H/D < (H/D)_{cr}$ esprimono la resistenza alla trazione con la seguente equazione:

$$Q_t = \frac{1}{2} \pi D_a \gamma' (H_b^2 - H_t^2) K_u \tan \varphi + \gamma' H A_H F_q$$

I pali a multi-elica in condizioni profonde $H/D > (H/D)_{cr}$ sono invece regolati dalla seguente relazione:

$$Q_t = \frac{1}{2} \pi D_a \gamma' (H_b^2 - H_t^2) K_u \tan \varphi + \gamma' H A_H F_q^* + \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_u \tan \varphi$$

dove K_u = coefficiente di pressione laterale del terreno in trazione per la sabbia.

3.4.1.2 Metodo della capacità portante individuale

Con il metodo della capacità portante individuale, sotto l'azione di un carico di compressione o di trazione, la capacità portante dipende dall'area dell'elica e dal terreno disturbato sopra di essa come mostrato nella figura seguente.

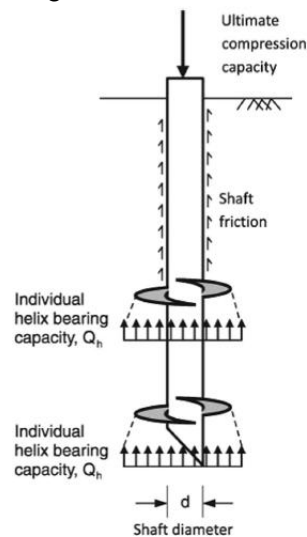




Figura 3.11 – Metodo della capacità portante individuale Didascalia Immagini

Le equazioni relative a tale metodo coinvolgono sia la resistenza di ogni singola elica sommate tra loro, sia la resistenza lungo il fusto del palo.

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 25	Di 28

3.4.1.2.1 Suoli coesivi sottoposti a trazione

L'equazione successiva descrive il metodo della capacità portante individuale per l'analisi di un palo a vite. Il metodo presume che la capacità di trazione totale di un palo a vite in terreni coesivi e non coesivi sia uguale alla somma di ogni singola capacità portante delle eliche.

$$Q_t = \sum Q_h$$

dove:

Q_t = capacità totale di ancoraggio;

Q_h = capacità portante individuale dell'elica.

$$Q_h = A_h (9c_u + qN_q) \leq Q_s$$

dove:

A_h = area proiettata dell'elica;

q = pressione effettiva di sovraccarico;

Q_s = limite superiore determinato dalla forza dell'elica.

Usando le equazioni precedenti si afferma che per i terreni coesivi in trazione, l'equazione diventa:

$$Q_h = A_h 9c_u$$

Successivamente sono state introdotte diverse equazioni che includono il valore dell'attrito all'interfaccia palo-terreno:

$$Q_t = Q_{shaft} + \sum Q_{bearing}$$

$$Q_u = nQ_e + W_s + W_a$$

dove

n = numero di eliche;

Q_e = capacità ultima di ogni singolo elica $\rightarrow Q_e = \sum A_e 9c_u$;

A_e = area di ogni elica

W_s = peso del solido tra le eliche;


W_a = peso dell'ancora.

$$Q_u = A_H \left(c_u N_c + \gamma' H \right) + P_s \alpha c_u L_f$$

dove:

L_f = lunghezza di taglio sopra l'ultima elica;

N_c è il fattore di capacità portante a compressione/trazione per cui si consiglia l'utilizzo dei valori visti precedentemente.

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 26	Di 28

3.4.1.2.2 Suoli non coesivi sottoposti a trazione

Per terreni non coesivi vale la seguente equazione:

$$Q_h = A_h q N_q = A_h \gamma' H N_q$$

3.4.2 Processo di installazione

La procedura standard comporta l'avanzamento della vite nel terreno mediante l'utilizzo di un motore che permette alle eliche di penetrare nel terreno mediante rotazioni attraverso l'applicazione di un momento di rotazione sulla testa del fusto. Quando il passo di ciascuna elica è costante, l'installazione è facilitata poiché ogni elica successiva segue lo stesso percorso di quella precedente.

L'installazione del palo a vite comporta non solo l'applicazione della coppia, ma anche l'applicazione della pressione verso il basso che facilita ulteriormente l'installazione.

3.4.2.1 Relazione tra la coppia di installazione e capacità portante

Esiste una relazione tra la resistenza torsionale che si verifica a seguito della penetrazione del palo a vite misurata durante l'installazione e la sua capacità portante in trazione. La capacità portante del terreno può quindi essere determinata con lo sforzo applicato nell'installazione secondo la relazione:

$$Q_t = K_T T$$

dove:

K_T = fattore di torsione;

T = torsione media di installazione.

Si delineano anche diverse relazioni con altri fattori relativi alla progettazione dei pali (come la resistenza del fusto etc.) che hanno portato alla seguente equazione:

$$Q_u = Q_s + Q_h$$

dove:

Q_s = resistenza di taglio;

Q_h = capacità portante dell'elica.

Così si ha:

$$Q_u = \frac{2T_s}{d} + \frac{2T_h}{d_c \tan(\theta + \delta_r)}$$

dove:

T_s = momento resistente sulla parete del fusto;

T_h = momento resistente sulle eliche;



d_c = diametro del cerchi corrispondente all'area dell'elica;

θ = angolo dell'elica rispetto all'orizzontale;

δ_r = angolo di attrito residuo tra elica e sabbia.

Al contrario,

$$T = T_h + T_s$$

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO		Pagina 27	Di 28

dove:

T = momento torcente per l'installazione del palo.

Quindi si ha:


$$T = \frac{Q_s d}{2} + \frac{Q_h d_c \tan(\theta + \delta_r)}{2}$$

Quando la resistenza lungo il fusto non è significativa si ha:

$$K_T = \frac{2}{d_c \tan(\theta + \delta_r)}$$

Quando la resistenza è invece significativa:

$$K_T = \frac{2}{\left(\frac{Q_s}{Q_u}\right) d + \left(\frac{Q_h}{Q_u}\right) d_c \tan(\theta + \delta_r)}$$

	PARCO EOLICO OFFSHORE NEL CANALE DI SICILIA	Documento F0119S.R13.RELORM.00.a	
iLStudio. Engineering & Consulting Studio	PROGETTO PRELIMINARE	Data Luglio 2019	
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	Pagina 28	Di 28

Il presente documento, composto da n. 28 pagine è protetto dalle leggi nazionali e comunitarie in tema di proprietà intellettuali delle opere professionali e non può essere riprodotto o copiato senza specifica autorizzazione.

Taranto, Luglio 2019

Dott. Ing. Luigi Severini