

REGIONE
SICILIANA



Comune
di Ragusa



Comune
di Modica



Comune
di Pozzallo



Comune
di Chiaramonte
Gulfi



Il Committente:

NP Pozzallo Wind

NP POZZALLO WIND S.R.L
Via San Marco 21 - 20121 Milano (MI)
C.F./ Part. IVA 12502530962
Pec: nppozzallowind@legalmail.it

Il Progettista:

Agon engineering **Entrope** srl **Seahorse Wind**



dott. ing. VITTORIO RANDAZZO
dott. ing. VINCENZO DI MARCO
dott. ENRICO FORCUCCI

Titolo del progetto:

PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"

Documento:

PROCEDURA DI SCOPING

N. Documento:

REL 09

ID PROGETTO:

TIPOLOGIA:

FORMATO: **A4**

TITOLO:



RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO

FOGLIO:

SCALA:



NA:

Rev:	Data	Descrizione Revisione	Redatto	Controllato	Approvato
0			A.M.	V.D.	V.R.

	PARCO EOLICO OFFSHORE “POZZALLO”			
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO		28/06/2022	REV.0

INDICE

1	PREMESSA	3
2	SISTEMI DI ORMEGGIO	6
2.1	SISTEMA A CATENARIA (CATENARY MOORING).....	6
2.2	SISTEMA AD ELEMENTI TESI (TAUT MOORING).....	10
3	SISTEMI DI ANCORAGGIO.....	11
3.1	ANCORAGGIO A GRAVITÀ (DEADWEIGHT)	11
3.2	ANCORAGGIO A TRASCINAMENTO (DRAG ANCHOR).....	13
3.3	ANCORAGGIO CON CASSONI AD ASPIRAZIONE (SUCTION BUCKETS)	14
3.3.1	<i>METODI BASATI SULLA MECCANICA DELLE TERRE</i>	20
3.4	ANCORAGGIO CON PALI A VITE (HELICAL PILE).....	24
3.4.1	METODO DEL MODULO DI TAGLIO CILINDRICO	25
3.4.2	PROCESSO DI INSTALLAZIONE.....	33

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 3</p>

1 PREMESSA

Su incarico di Seahorse Wind, la società AGON Engineering S.r.l. ha redatto il progetto relativo alla realizzazione di un impianto eolico offshore composto da 54 aerogeneratori di una potenza complessiva di 800 MW, ubicato nel canale di Malta di fronte alla costa sud-orientale della Sicilia, ad una distanza di circa 55 km dal comune di Pozzallo, 49 km da Ispica e 40 km dalla costa di Porto Palo.

Lo scopo della presente relazione è quello di valutare i possibili sistemi di ormeggio ed ancoraggio che possono essere utilizzati per il progetto in esame. In questa fase della progettazione, la scelta dei sistemi di ormeggio-ancoraggio è più orientata alla valutazione della sicurezza marittima e all'impatto ambientale. Infatti, per adottare scelte tecnico-esecutive sarà necessario effettuare dei sondaggi geotecnici e geofisici che restituiscano le caratteristiche dei fondali (demandati ad una progettazione futura).

Per ciò che concerne le tecniche di ormeggio sui fondali, generalmente è possibile fare riferimento a due sistemi, ossia il sistema di **catenaria distesa sul fondale** e munita di ancora terminale, ed il sistema di **tiro teso inclinato o verticale**, che viene effettuato con fissaggio puntuale sul fondale marino.

Il primo sistema, che collega la piattaforma galleggiante dell'aerogeneratore con l'ancora, sfrutta il peso proprio della catenaria come sistema, infatti 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.

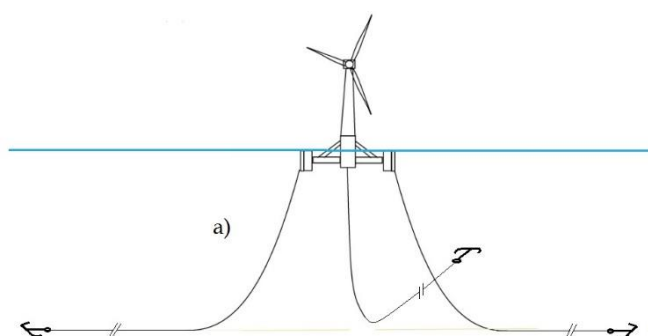


Figura 1 - Sistemi di ormeggio e ancoraggio al fondale con catenaria distesa sul fondale

Il secondo sistema invece sfrutta delle linee di ormeggio che si comportano come aste tesse e collegano l'ancora alla piattaforma galleggiante, mantenendo la stabilità mediante le tensioni generate nelle linee di ormeggio. Una delle principali criticità rappresentate da tali sistemi è il potenziale impatto ambientale causato sui fondali marini, in quanto gli elementi di ancoraggio potrebbero interferire con l'ecosistema dei fondali marini. Per questo motivo, si stanno sviluppando dei sistemi puntuali come pali infissi, pali aspirati o pali a vite che minimizzano l'area di interferenza. Altri sistemi sono costituiti da corpi a gravità (Gravity Anchors) adagiati sul fondale marino, da cassoni ad aspirazione o suzione (Suction Buckets).

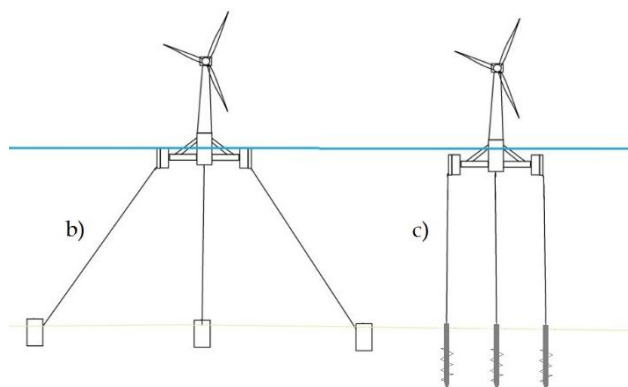



Figura 2 - Sistemi di ormeggio e ancoraggio al fondale con Tiro teso inclinato e verticale

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 5</p>

Alla base del funzionamento statico di una turbina eolica offshore vi è la spinta idrostatica, che garantisce l'equilibrio all'intero sistema. Inoltre bisogna tenere in considerazione l'azione delle maree, delle correnti e delle onde, e l'azione del vento. In tal contesto, le sollecitazioni generate da tali azioni possono essere calcolate moltiplicando la pressione esercitata da ciascuna componente ambientale sulla superficie investita, sfruttando l'espressione:


$$q = \frac{1}{2} * \rho * v^2$$

q = Pressione unitaria

ρ= Densità del fluido

v= Velocità del fluido

Le azioni considerate vengono dunque trasformate in sollecitazioni sulle linee di ormeggio e sugli ancoraggi. Questi ultimi dovranno essere opportunamente verificati in ambito geotecnico, di risposta meccanica dei terreni, e di dimensionamento rispetto alle piattaforme eoliche e di ormeggio.

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022 REV.0 Pag. 6</p>

2 SISTEMI DI ORMEGGIO

Per ormeggio si intende un sistema che garantisce alla piattaforma dell'aerogeneratore offshore di impedire gli spostamenti mantenendo in equilibrio ed in posizione il dispositivo. Si riportano di seguito i principali meccanismi di funzionamento.

2.1 SISTEMA A CATENARIA (CATENARY MOORING)

Il sistema a catenaria possiede dei collegamenti, le "catene", che sono liberamente sospese in acqua e sono collegate alla piattaforma galleggiante da un lato ed alle ancore dall'altro. In corrispondenza del tratto su fondale marino, generalmente le catene e le ancore sono sottoposte ad azioni orizzontali.

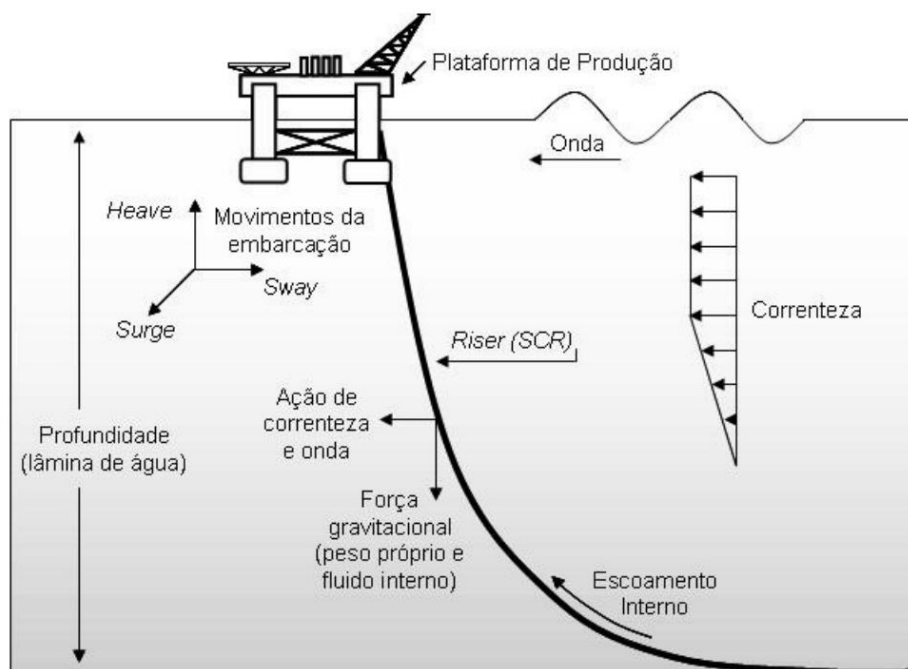



Figura 3 - Schema statico di funzionamento della catenaria

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 7</p>

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.

Per ciò che concerne il predimensionamento della catenaria, è necessario assumere delle condizioni. Infatti la curva disegnata dall'elemento catenaria assume la stessa configurazione del 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.

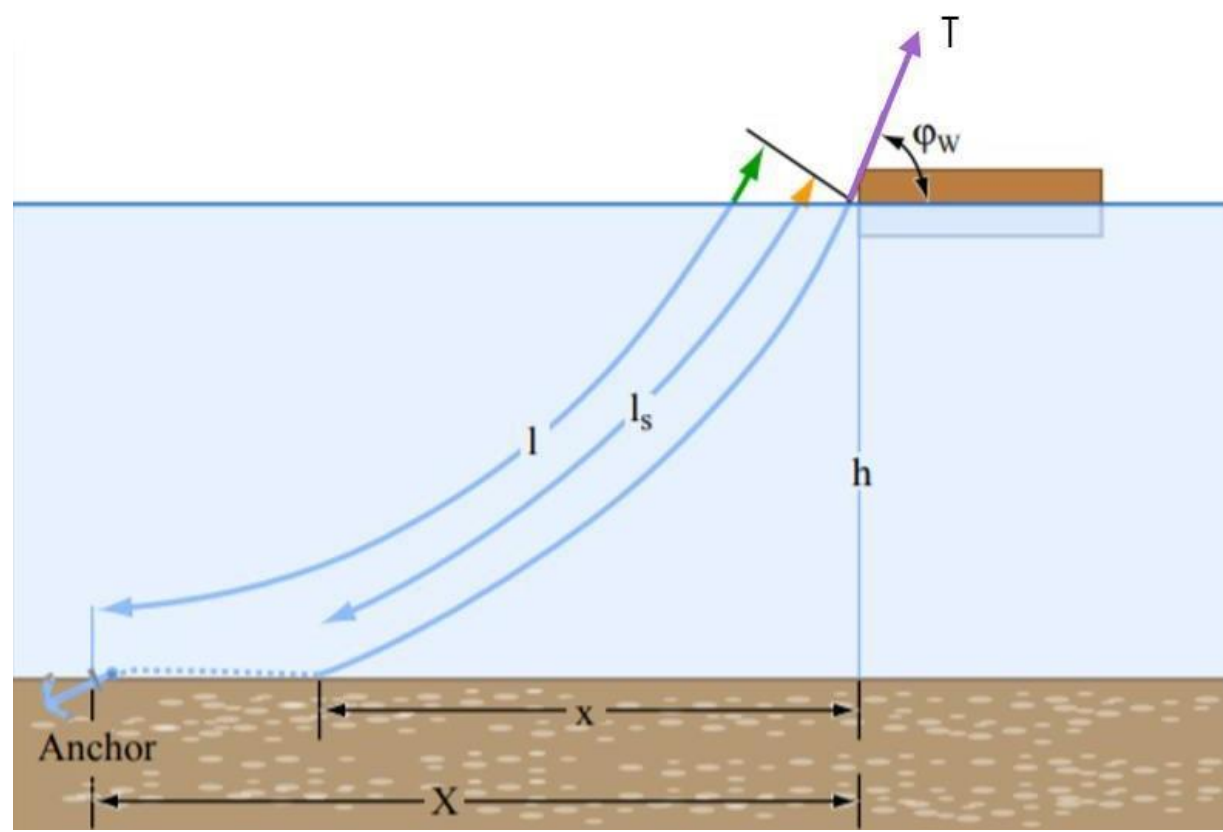



Figura 4 - Schema statico di funzionamento della catenaria

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 TH [t] e la lunghezza della linea di ormeggio sospesa è l_s [m].

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 9</p>

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:

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

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.

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 10</p>


2.2 SISTEMA AD 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.

Per quanto concerne il predimensionamento della struttura, di fondamentale importanza risulta essere la determinazione di alcune grandezze tra cui:

- la resistenza a trazione;
- la rigidità assiale;
- 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.

NP Pozzallo Wind	PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"	  
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	13/09/2022 REV.0 Pag. 11

3 SISTEMI DI ANCORAGGIO

Nella progettazione dei sistemi di ancoraggio, di fondamentale importanza risulta essere la conoscenza delle caratteristiche geotecniche del fondale e la sua profondità. Sulla base di queste caratteristiche è possibile scegliere il sistema più idoneo per il progetto. Di seguito si riportano i principali sistemi di ancoraggio attualmente utilizzati.



Figura 5 - Principali sistemi di ancoraggio

3.1 ANCORAGGIO 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.

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 12</p>

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. Esistono due tipologie di ancore a gravità: quella a "gravità semplice" e quella a "gravità con inflessione dinamica".

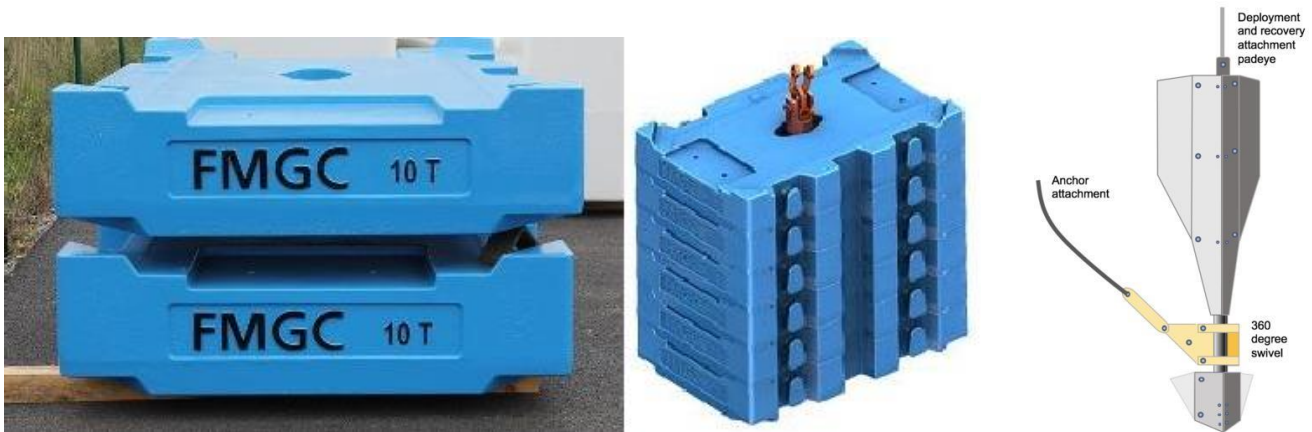




Figura 6 - Illustrazione di ancora a gravità con piastre modulari di ghisa impilate a sinistra. Ancora a gravità con infissione dinamica a destra.

La 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 ton/m³ e, quando è immersa nel mare che ha una densità di 1,03 ton/m³, fornisce un peso di 6,12 ton/m³ che equivale ad un volume di 1,64 m³ 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

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 13</p>

realizzata con i normali mezzi navali impiegati per l'installazione delle turbine e poiché tale sistema di ancoraggio può essere reso modulare con piastre che possono essere impilate tra di loro tramite un supporto-guida.

La seconda tipologia permette 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.

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.

3.2 ANCORAGGIO 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

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 14</p>

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 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 7 - Esempio di ancora a trascinamento

3.3 ANCORAGGIO 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.

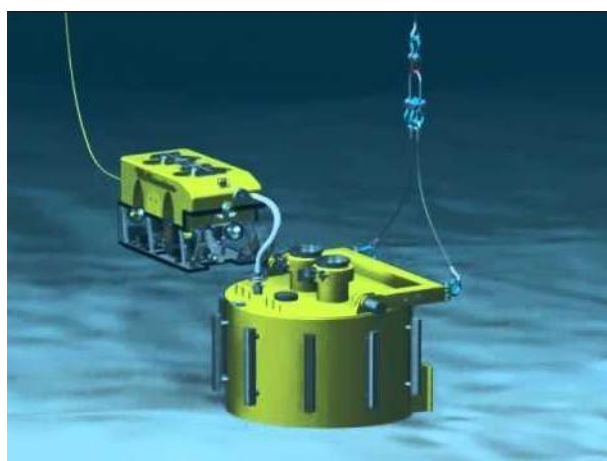


Figura 8 - Illustrazione di ancora tipo Suction Bucket

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

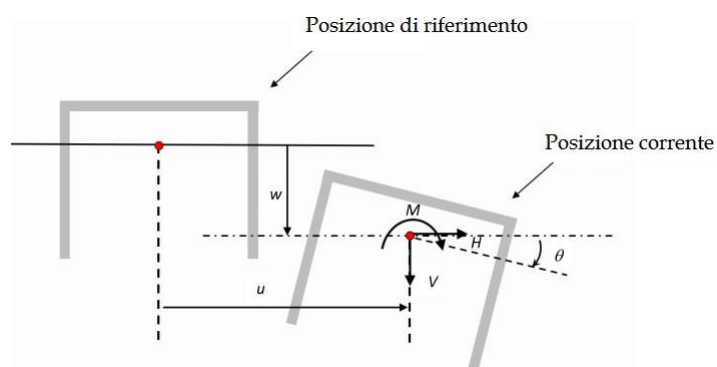


Figura 9 - Convenzione sui segni per i carichi e gli spostamenti

Dove:

V Carico verticale

H Carico orizzontale

M Momento ribaltante

w Spostamento verticale

u Spostamento orizzontale

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 16</p>

θ Rotazione

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

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:

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


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:

$$TS = \alpha * Cu$$

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.

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 17</p>

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.

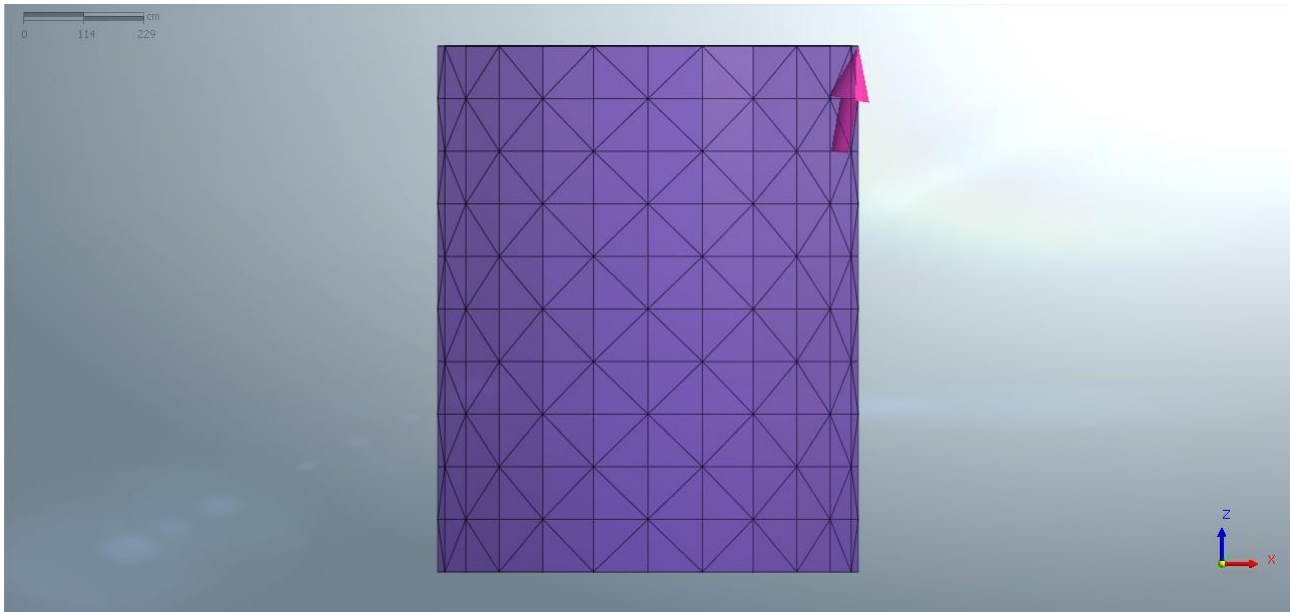


Figura 10 - Simulazione FEM di ancora Suction Bucket

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

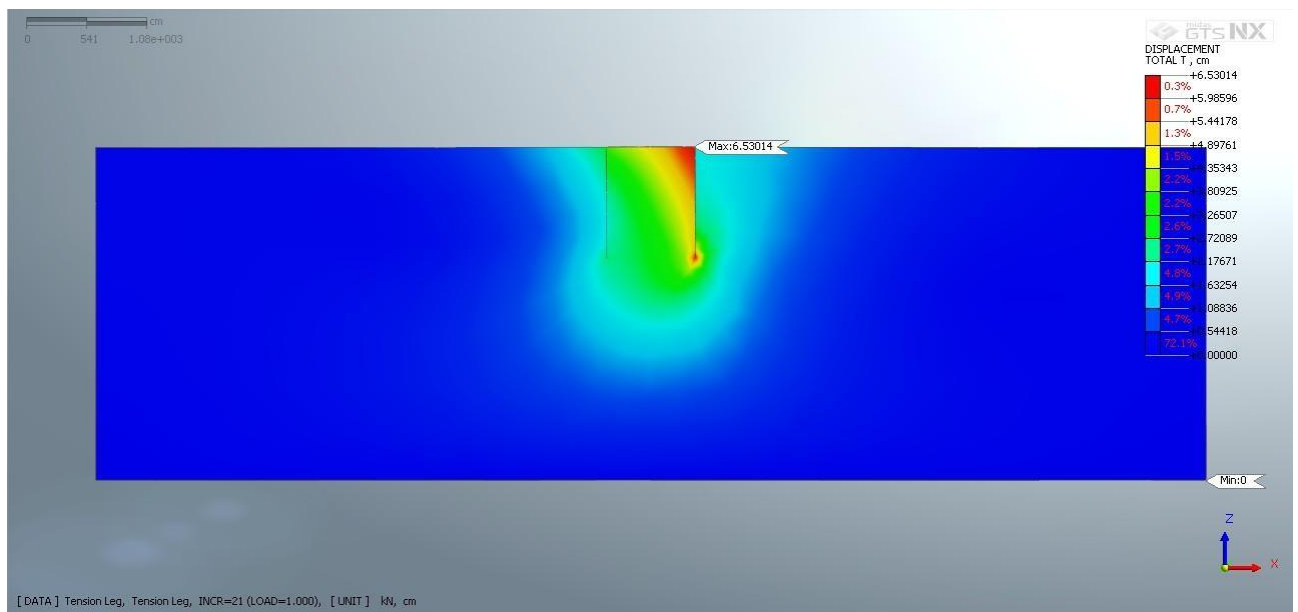


Figura 11 - Illustrazione delle deformazioni del terreno in una simulazione FEM con Suction Bucket

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 19</p>



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. 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.

Si procede con la determinazione della 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:

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 20</p>

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

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.

3.3.1 METODI BASATI SULLA MECCANICA DELLE TERRE

I metodi basati sulla meccanica delle terre fanno riferimento ai parametri geotecnici standard, determinati da prove in situ 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

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 21</p>

- 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.

3.3.1.1 METODO DI CALCOLO PER LE ARGILLE

Il metodo di calcolo per le argille è fornito dalla trattazione di Houlsby 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 $\alpha = 1/St'$, dove St 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

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022 REV.0 Pag. 22</p>

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

3.3.1.2 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 Houlby 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

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 23</p>

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:


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

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

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.

3.3.1.3 METODO DI CALCOLO PER LE SABBIE

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.

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022 REV.0 Pag. 24</p>

3.4 ANCORAGGIO 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.

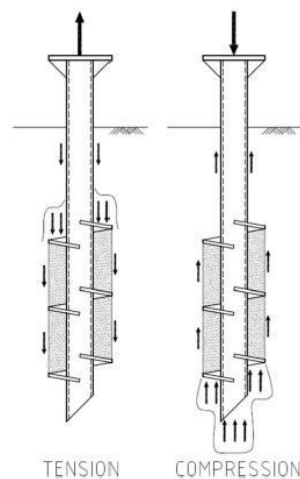



Figura 12 - Carichi assiali tipici

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;
- non producono rumore e producono vibrazioni minime durante l'installazione. Gli unici terreni non indicati per i pali a vite sono i terreni rocciosi.

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 25</p>

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.

Per il 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 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.

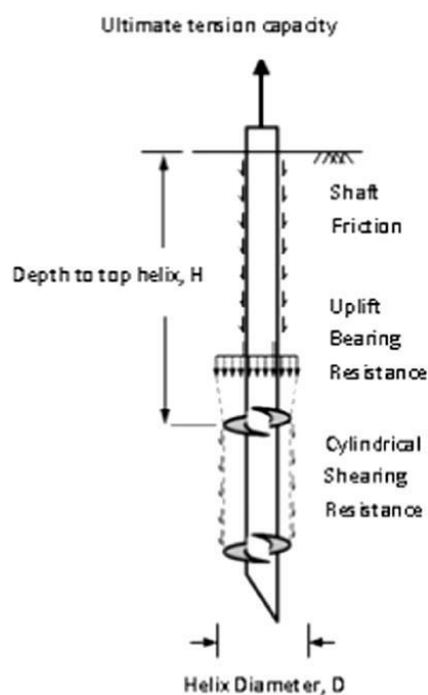


Figura 13 - Superficie di rottura a taglio cilindrica

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;

	PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"	  		
	RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO	13/09/2022	REV.0	Pag. 27

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:

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



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 SUOLI COESIVI SOTTOPOSTI A TRAZIONE

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

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

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 28</p>

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

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

Così,

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

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

Il metodo di taglio cilindrico è riportato anche nell'equazione a seguire come proposta da Lutenegger (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:

dove:

Q_s = resistenza al taglio cilindrica;

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

Q_e = capacità portante dell'elica superiore;


W_s = peso del suolo tra le eliche;

W_a = peso dell'acciaio.

A_e = area della piastra portante dell'elica

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

$$Q_e = A_e 9c_u$$

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 29</p>

3.4.1.2 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.

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:

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

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

3.4.1.3 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.

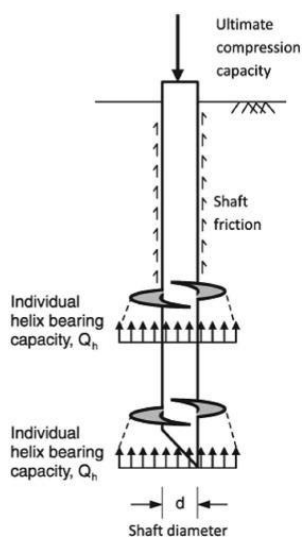




Figura 14 - Metodo della capacità portante individuale Didascalia Immagini

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.

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022 REV.0 Pag. 31</p>

3.4.1.4 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:

dove

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

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022 REV.0 Pag. 32</p>

$$Q_u = nQ_e + W_s + W_a$$

n=numero di eliche;

Q_e=capacità ultima di ogni singolo elica

$$Q_e = \sum A_e \rho c_u$$

A_e =area di ogni elica

W_s =peso del solido tra le eliche; W_a =peso dell'ancora.


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.

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  		
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022</p>	<p>REV.0</p>	<p>Pag. 33</p>

3.4.1.5 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.

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022 REV.0 Pag. 34</p>

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,

$$T = T_h + T_s$$

dove:

T = momento torcente per l'installazione del palo.

Quindi si ha:

	<p>PARCO EOLICO OFFSHORE "POZZALLO"</p>	  
	<p>RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E ORMEGGIO</p>	<p>13/09/2022 REV.0 Pag. 35</p>

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

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:

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