



Atis Floating Wind s.r.l.

Progetto Parco Eolico Offshore - Atis

Relazione descrittiva delle strutture di ancoraggio e ormeggio

Doc. No. ATI-RIN-TEC-MOR-RPT-0001-R00 - Luglio 2023

Rev.	Descrizione	Preparato da	Controllato da	Approvato da	Data
00	Prima Emissione	F. Depalo/E. Ponzoni	I. Mazza	A. Rossi	19/07/2023

Tutti i diritti, traduzione inclusa, sono riservati. Nessuna parte di questo documento può essere divulgata a terzi, per scopi diversi da quelli originali, senza il permesso scritto di RINA Consulting S.p.A.

INDICE

LISTA DELLE FIGURE	2
ABBREVIAZIONI E ACRONIMI	3
1 PREMESSA	4
2 SCOPO DEL DOCUMENTO	5
3 SISTEMI DI ORMEGGIO	6
3.1 CATENARIA	6
3.1.1 Predimensionamento della Catenaria	7
3.2 ELEMENTI TESI 'TAUT MOORING'	8
3.2.1 Predimensionamento degli Elementi Tesi	8
4 SISTEMI DI ANCORAGGIO	10
4.1 ANCORE A TRASCINAMENTO (DRAG ANCHORS)	12
4.2 ANCORI A GRAVITÀ (GRAVITY BASE ANCHORS)	13
4.3 ANCORE A PIASTRA (PLATE ANCHORS)	14
4.4 PALI ASPIRATI (SUCTION PILES)	15
4.5 PALI INFISSI (DRIVEN PILE ANCHORS)	15
4.6 PALI ELICOIDALI (HELICAL PILE ANCHORS)	16
5 CONCLUSIONI	17
REFERENZE	18

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1-1: Inquadramento generale del progetto Atis	4
Figura 3-1: Tipici di strutture galleggianti standard per eolico offshore	6
Figura 3-2: Sistema di ormeggio con catenaria	7
Figura 3-3: Sistema di ormeggio con catenaria	7
Figura 3-4: Sistema di ormeggio a elementi tesi	8
Figura 4-1: Geometria tipica di una DEA	13
Figura 4-2: Schema di installazione di ancore a trascinamento DEA	13
Figura 4-3: Schema Semplificato di Ancore a gravità piene (sinistra) o cave con zavorra (destra)	14
Figura 4-4: Esempio schematico di ancora a piastra	15

ABBREVIAZIONI E ACRONIMI

ABS	American Bureau of Shipping
API	American Petroleum Institute
BV	Bureau Veritas
DEA	Drag Embedded Anchors
DEPLA	Dynamically Embedded PLate Anchors
DNVGL	Det Norske Veritas
NAVFAC	Naval Facilities Engineering Command
REB	Reverse End Bearing capacity
ROV	Remotely Operated Vehicle
SEPLA	Suction Embedded PLate Anchors
VLA	Vertical-Load Anchors
C₁₁	Forza di ripristino del sistema di ormeggio a catenaria
d	Distanza della chiglia del galleggiante dal pelo libero dell'acqua
hm	Distanza orizzontale fra passacavo del galleggiante e l'ancora
L	Lunghezza
OD	Diametro esterno
t	Spessore
T_{m,h}	Carico orizzontale applicato alla linea di ormeggio
V_m	Distanza della chiglia del galleggiante dal fondale
w	Peso unitario della linea di ormeggio in acqua
x	Distanza orizzontale fra passacavo e punto in cui la catenaria tocca il fondale

1 PREMESSA

L'oggetto della presente relazione è la descrizione del sistema di ancoraggio e ormeggio del Parco Eolico Offshore Flottante denominato "Atis". La relazione è parte del pacchetto documentale di Progettazione Preliminare elaborato per il progetto. Il progetto è proposto dalla società Atis Floating Wind Srl, nata dalla joint venture tra le società Eni Plenitude e Simply Blue Group.

Il progetto "Atis" sarà costituito da un parco eolico di No. 48 turbine da circa 18 MW ciascuna, per una capacità complessiva pari a 864 MW, localizzato nel Mar Tirreno ad una distanza di circa 17 km dall'Isola di Gorgona, 22 km dall'isola di Capraia e 50 km dalla costa toscana.

L'energia prodotta dal parco eolico sarà trasportata per mezzo di cavidotti sottomarini per i quali è previsto l'approdo a sud del Comune di Rosignano Marittimo (LI). Per la connessione al punto di consegna Terna si prevede la realizzazione di un cavidotto terrestre interrato (di lunghezza pari a circa 5 km) e di una sottostazione utente in prossimità del punto di consegna. La connessione dell'impianto è ipotizzata presso la Stazione Elettrica Roselectra 380 kV.

La connessione dell'impianto sarà in ogni caso prevista sul punto indicato in STMG da Terna S.p.A.

L'area dove è localizzato il parco eolico ha una profondità del fondale compresa indicativamente tra 300 e 600 m di profondità.

L'inquadramento generale del parco eolico è rappresentato in Figura 1-1.

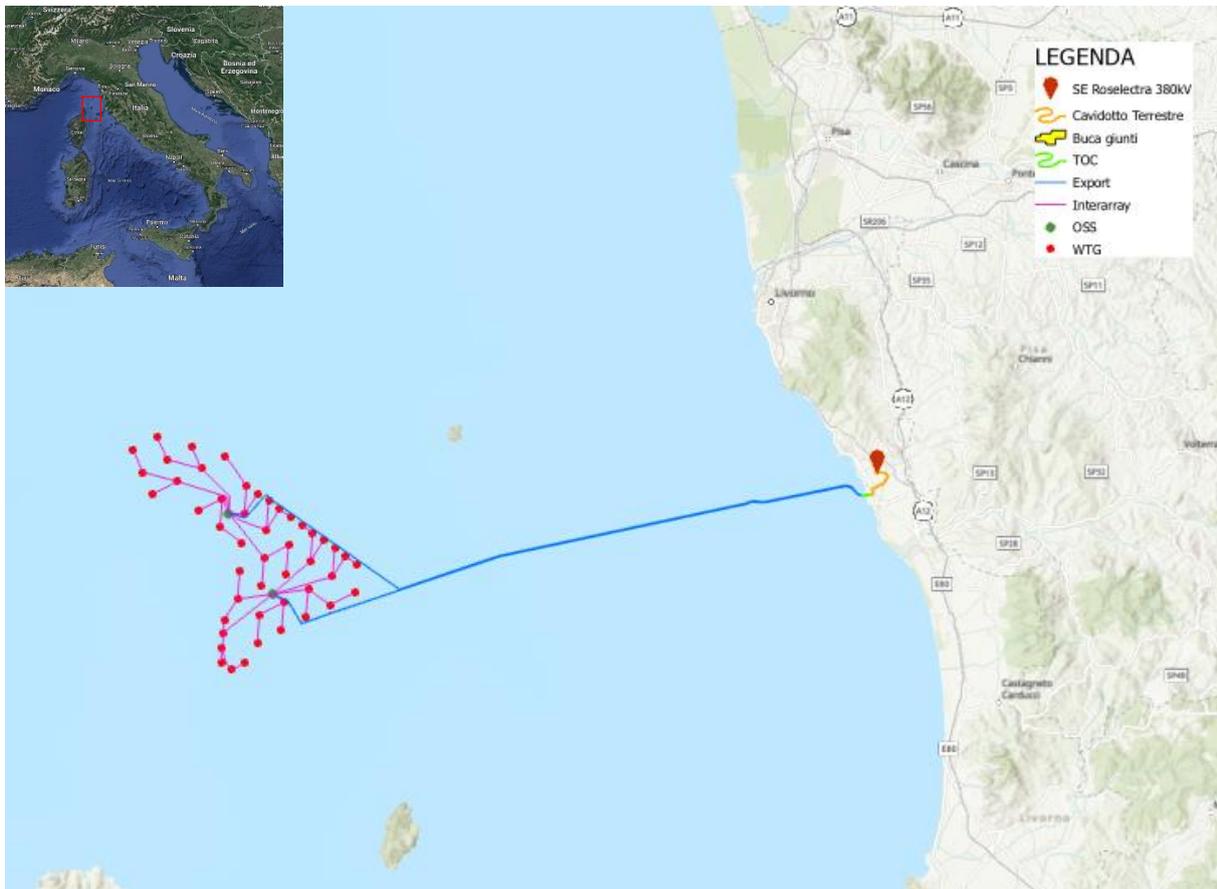


Figura 1-1: Inquadramento generale del progetto Atis

2 SCOPO DEL DOCUMENTO

Lo scopo del presente documento è quello di presentare le soluzioni attualmente disponibili sul mercato circa le strutture di ancoraggio e ormeggio che andranno installate nel parco eolico offshore flottante denominato "Atis", posizionato nel Mar Tirreno ad una distanza di 50 km dalla costa toscana, a circa 17 km dall'Isola di Gorgona ed a circa 22 km dall'isola di Capraia.

La descrizione delle strutture di ancoraggio e ormeggio sarà basata sulle informazioni pubbliche disponibili su database internazionali e da contatti con i principali fornitori di tali soluzioni.

La presente relazione non includerà alcun tipo di dimensionamento della struttura stessa, che verrà sviluppata in fasi successive e più dettagliate del progetto.

3 SISTEMI DI ORMEGGIO

In linea di principio la scelta fra l'installazione di una struttura fissa e di una struttura galleggiante dipende dalla profondità dell'acqua al sito di interesse. Come linea guida generale, per profondità superiori ai 100 m, come per il sito di interesse, si prediligono le strutture galleggianti, le quali diventano convenienti oltre i 70-80 m di profondità.

La caratteristica principale richiesta alle strutture galleggianti che ospitano le turbine eoliche è la stabilità e di conseguenza la capacità di ridurre le oscillazioni del sistema al fine di minimizzare il fenomeno di fatica a cui sono soggette le varie componenti. In generale, due fattori importanti che contribuiscono ad incrementare la stabilità sono la quota del centro di gravità del sistema ed il sistema di ormeggio. Sono presenti varie tipologie di strutture per il supporto delle turbine eoliche e di soluzioni per il mantenimento delle stesse in posizione basate sulle conoscenze sviluppate nell'ambito dei progetti offshore per l'estrazione di prodotti petroliferi.

Va notato che, nonostante entrambe le soluzioni siano galleggianti, esistono notevoli differenze nella configurazione e nelle esigenze delle turbine eoliche rispetto alle installazioni per l'estrazione e la raffinazione di prodotti petroliferi. Infatti, nel settore petrolifero sono necessarie poche grandi strutture, mentre nel settore eolico si richiedono numerose strutture più piccole. Questa distinzione ha un impatto significativo sulle fasi di progettazione, costruzione, installazione e funzionalità delle strutture stesse.

Nella figura successiva si riportano le soluzioni concettuali principalmente applicate ad oggi per i vari parchi eolici offshore con struttura galleggiante nel mondo. Va comunque evidenziato che è pratica comune sviluppare una progettazione ad hoc per la struttura galleggiante in base alle specifiche necessità di progetto ed alle strutture disponibili per costruzione ed installazione al sito.

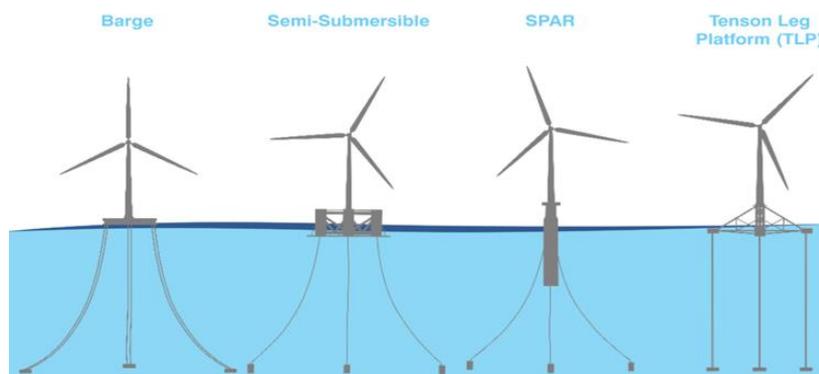


Figura 3-1: Tipici di strutture galleggianti standard per eolico offshore

La struttura galleggiante è soggetta a diverse forze esterne agenti sul sistema e, per poter rimanere in posizione, deve essere ormeggiata tramite linee di ormeggio e fondazioni nel fondale marino.

Per quanto concerne il sistema di ormeggio, le soluzioni comunemente applicate ed applicabili sono le seguenti:

- ✓ Catenaria;
- ✓ Elementi tesi ('taut mooring').

Il dimensionamento dei sistemi di ormeggio ed ancoraggio per la specifica installazione sarà sviluppato nelle fasi successive del progetto, a seguito di sondaggi geotecnici e geofisici per identificare le caratteristiche del terreno.

3.1 CATENARIA

Per i sistemi di ormeggio a catenaria (Figura 3-2), la stessa ha la funzione di collegare la struttura galleggiante al sistema di ancoraggio posizionato sul fondale marino. La stabilità del sistema è garantita dal peso proprio della linea di ormeggio, che è solitamente caratterizzata da una sezione di catena ed una di cavo. La parte di cavo, che è tipicamente composta da materiali sintetici o acciaio, costituisce la sezione di catenaria che si trova sospesa in acqua. La sezione di catena invece, grazie alla sua alta resistenza all'abrasione con il fondale, costituisce il tratto di linea appoggiato sul fondo.

Quando la struttura galleggiante è in equilibrio, gran parte della catenaria giace sul fondale del mare mentre la restante parte è sospesa. Solitamente il tratto orizzontale è tra le 5 e le 20 volte superiore al tratto verticale.

Quando la struttura si sposta orizzontalmente dalla sua posizione di equilibrio, il punto A si sposta fra A1 e A4, la lunghezza della parte di catenaria appoggiata sul fondo si riduce. La tensione è proporzionale alla parte sospesa della catenaria, pertanto il progressivo aumento di linea sospesa comporta un incremento di tensione.

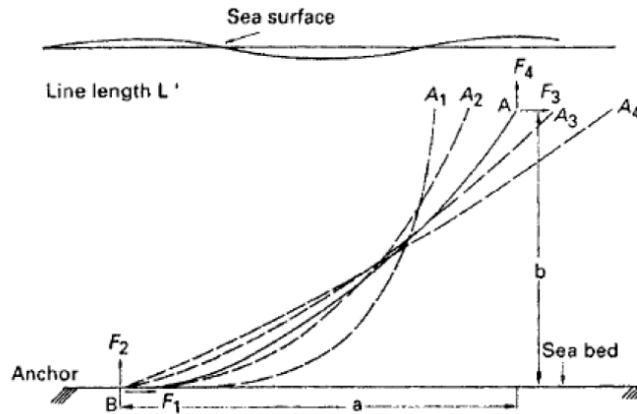


Figura 3-2: Sistema di ormeggio con catenaria

3.1.1 Predimensionamento della Catenaria

Il comportamento della linea di ormeggio è descritto tramite l'equazione della catenaria la cui forma tipica ha un andamento analogo al grafico del coseno iperbolico (Figura 3-3).

In funzione della profondità dell'acqua, del peso della linea di ormeggio e della forza applicata sulla linea in corrispondenza del passacavo e nell'ipotesi di trascurare le forze idrodinamiche e considerando il cavo anelastico, la lunghezza di linea sospesa L_s può essere calcolata come segue:

$$L_s = (v_m + d) \sqrt{\left(\frac{2T_{m,h}}{w(v_m + d)} + 1\right)}$$

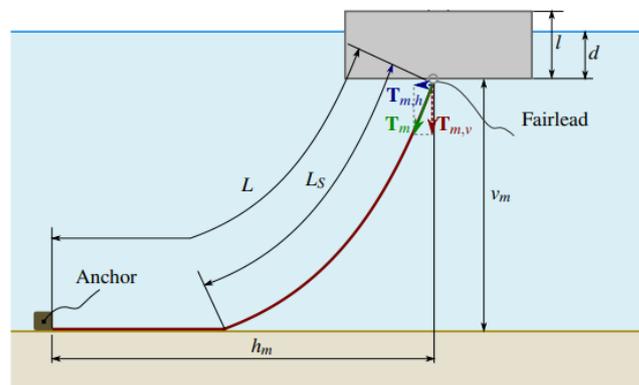


Figura 3-3: Sistema di ormeggio con catenaria

Nella figura sopra viene rappresentata la catenaria dove:

- ✓ v_m è la distanza della chiglia del galleggiante dal fondale marino;
- ✓ d è la distanza della chiglia del galleggiante dal pelo libero dell'acqua;
- ✓ w è il peso unitario della linea di ormeggio in acqua;
- ✓ $T_{m,h}$ è il carico orizzontale applicato alla linea di ormeggio.

Inoltre, x è la distanza orizzontale fra il passacavo e il punto in cui la catenaria tocca il fondale marino e può essere calcolata con la formula seguente:

$$x = \frac{T_{m,h}}{w} \cosh^{-1}\left(1 + \frac{w(v_m + d)}{T_{m,h}}\right)$$

Mentre h_m è la distanza orizzontale fra il passacavo del galleggiante e l'ancora e si calcola con la formula:

$$h_m = L_s - (v_m + d) \sqrt{\left(\frac{2T_{m,h}}{wh} + 1\right)} + \frac{T_{m,h}}{w} \cosh^{-1}\left(1 + \frac{w(v_m + d)}{T_{m,h}}\right)$$

La forza di ripristino del sistema di ormeggio a catenaria si ricava con l'equazione di seguito:

$$C_{11} = \frac{\partial T_{m,h}}{\partial X} = w \left[\frac{-2}{\sqrt{\left(1 + 2 \frac{T_{m,h}}{w(v_m + d)}\right)}} + \cosh^{-1}\left(1 + \frac{w(v_m + d)}{T_{m,h}}\right) \right]^{-1}$$

L'ingombro del sistema di ormeggio con catenaria è direttamente proporzionale alla profondità dell'area in cui il sistema verrà installato. In una fase di progetto preliminare come quella in essere, in cui non è ancora stato effettuato un dimensionamento delle strutture galleggianti per il sostegno della turbina così come i sistemi di ancoraggio ed ormeggio, si può ipotizzare una lunghezza della linea di ormeggio compresa fra 3 e 5 volte la profondità del fondale.

3.2 ELEMENTI TESI 'TAUT MOORING'

Per quanto concerne il sistema di ormeggio con cavi tesi inclinati o verticali (Figura 3-4), la struttura galleggiante viene connessa al sistema di ancoraggio, posizionato sul fondale marino, tramite linee di ormeggio in tensione. La stabilità del sistema è fornita dalle forze di tensione agenti nelle linee di ormeggio.

Il sistema di ormeggio con cavi tesi prevede la necessità di un pretensionamento delle linee. Il valore della pretensione deve essere tale da tenere le linee dritte e fornire al contempo la forza di ripristino necessaria per far tornare il sistema nella sua posizione di equilibrio, qualora sia sottoposto ad una perturbazione.

Mentre nei sistemi a catenaria le ancore sono soggette a soli carichi orizzontali, i sistemi di ormeggio con cavi tesi inclinati o verticali, come quello rappresentato nella figura sottostante, devono prevedere un sistema di ancoraggio progettato per gestire sia carichi orizzontali che verticali.

Il principale vantaggio di questo tipo di sistemi di ancoraggio è rappresentato da un contenuto impatto in termini di occupazione del fondale che, oltre a rappresentare un vantaggio da un punto di vista di impatto ambientale, permette di ridurre la distanza tra i galleggianti.

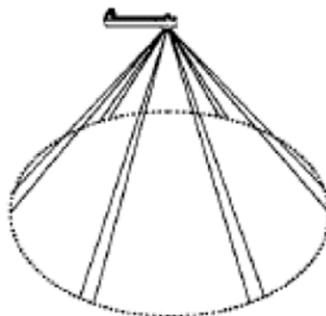


Figura 3-4: Sistema di ormeggio a elementi tesi

3.2.1 Predimensionamento degli Elementi Tesi

Le proprietà meccaniche dei materiali sono un fattore determinante nel dimensionamento dei sistemi di ormeggio.

In particolare, le caratteristiche di peso, rigidità assiale e resistenza alla trazione sono fondamentali per questo tipo di ancoraggi, per i quali si prediligono materiali caratterizzati da elevate capacità di assorbimento elastico degli sforzi di deformazione.

Per quanto concerne specificatamente il dimensionamento degli elementi tesi si fa riferimento alle formule relative alla scienza delle costruzioni per il calcolo delle forze di trazione e pretensione a seguito di sollecitazioni esterne.

L'ingombro del sistema di ormeggio con elementi tesi è ridotto rispetto ad una soluzione con ormeggio a catenaria. In una fase di progetto preliminare come quella in essere, in cui non è ancora stato effettuato un dimensionamento delle strutture galleggianti per il sostegno della turbina così come i sistemi di ancoraggio ed ormeggio, si può ipotizzare una lunghezza della linea di ormeggio pari a circa 1.4 volte la profondità del fondale. Infatti si può considerare un'inclinazione della linea di ormeggio rispetto al fondale pari a 45°.

4 SISTEMI DI ANCORAGGIO

Nell'industria offshore esistono svariate soluzioni di ancoraggio per natanti o strutture galleggianti. Nel caso delle strutture galleggianti di supporto per l'installazione di turbine eoliche, l'individuazione del sistema più idoneo è subordinata ad una serie di condizioni al contorno, come ad esempio le dimensioni della turbina, la tipologia di supporto flottante, la soluzione di ormeggio, nonché le caratteristiche geotecniche, geomorfologiche e ambientali del sito specifico. Tra queste caratteristiche vi sono ad esempio la profondità del fondale marino, le caratteristiche meccaniche dei depositi in corrispondenza dei punti di ancoraggio, nonché l'eventuale presenza di determinati vincoli ambientali (e.g. morfologia del fondale, presenza di colonie di mammiferi nella zona in esame). Campagne di indagini geofisiche e geotecniche, atte all'identificazione delle tipologie e della natura dei fondali, e analisi ambientali, si rendono dunque necessarie per la scelta delle tecniche di ormeggio e ancoraggio più opportune sia da un punto di vista strutturale che ambientale.

Le principali soluzioni di ancoraggio comunemente impiegate per turbine eoliche flottanti sono:

- ✓ Ancore a Gravità ('Deadweight' or 'Gravity Anchors');
- ✓ Pali: 'Suction Piles' (i.e. pali di grande diametro chiusi in testa e installati tramite applicazione di depressione interna), Pali Infissi ('Driven Pile Anchors'), Pali Gettati in Opera ('Drilled and Grouted Anchors'), Pali Elicoidali ('Helical Pile Anchors');
- ✓ Ancore a Trascinamento ('Drag Embedded Anchors');
- ✓ Ancore a Piastra ('Plate Anchors').

Le tipologie di fondale in cui possono essere installate le diverse tipologie di ancore sopra indicate vengono sinteticamente presentate in Tabella 4-1.

Tabella 4-1: Tipologie di fondale e sistemi di ancoraggio

Sistema di ancoraggio	Caratteristiche deposito di fondazione					
	Argille medio/bassa consistenza	Argille medio/alta consistenza	Sabbie sciolte	Sabbie medio/alta densità	Fondali rocciosi	
ANCORE A GRAVITÀ						Applicabile /Ottimale
'SUCTION PILES'				*		Potenzialmente Applicabile
PALI INFISSI						Non Applicabile
PALI GETTATI IN OPERA						
PALI ELICOIDALI						
'DRAG ANCHORS'						
ANCORE A PIASTRA						

Note:

- *L'installazione dei suction piles risulta particolarmente efficace in terreni soffici a bassa permeabilità, ma può essere eseguita anche in sabbie di media densità.
- In questa tabella semplificata, l'applicabilità o meno di una soluzione dipende dalle sole caratteristiche del fondale. L'impiego di un determinato sistema di ancoraggio è però dipendente non solo dalla tipologia dei terreni di fondazione ma anche da altri aspetti, quali ad esempio sistema di ormeggio (Tabella 4-2), carichi in gioco, valutazioni economiche, particolari vincoli di installazione, caratteristiche ambientali del sito, etc.

Come anticipato, la scelta dell'ancoraggio dipenderà anche dalla tipologia e dalla configurazione di ormeggio selezionate. Nel caso di configurazione di ormeggio a catenaria vengono spesso scelte ancore installate mediante trascinamento, in grado di gestire il carico orizzontale, ma in generale qualsiasi tipologia di ancora può essere adattata a questa tipologia di ormeggio. Nel caso di ormeggi di tipo 'taut' vengono tipicamente impiegati pali infissi, 'suction piles' o ancore a gravità, per garantire una sufficiente resistenza a sfilamento necessaria a contrastare la componente verticale del carico, tipicamente non trascurabile per questa tipologia di ormeggio. Gli ormeggi di tipo 'taut' possono essere o obliqui o verticali, in quest'ultimo caso si parla di ormeggi 'tension leg'.

Esistono poi ormeggi di tipo 'semi-taut' che presentano pertanto caratteristiche comuni ad entrambe le tipologie di ormeggio sopra descritte. Nei sistemi 'semi-taut', le linee di ancoraggio hanno tipicamente una configurazione a catenaria in condizioni operative, mentre in situazioni di carico straordinario queste possono subire 'uplift', modificando pertanto le condizioni di carico sull'ancora.

In Tabella 4-2 vengono riassunte le tipologie di ancore più indicate in funzione del sistema di ormeggio.

Tabella 4-2: Tipologie di Ormeggio e Sistemi di Ancoraggio

Sistema di ormeggio	Ancore a Gravità	Suction Piles	Pali infissi	Pali Gettati in Opera	Pali elicoidali	Drag Anchors	Ancore a piastra	
Catenaria	Applicabile / Ottimale	Applicabile / Ottimale	Applicabile / Ottimale	Applicabile / Ottimale	Potenzialmente Applicabile	Potenzialmente Applicabile	Applicabile / Ottimale	Applicabile / Ottimale
'Taut'	Applicabile / Ottimale	Applicabile / Ottimale	Applicabile / Ottimale	Applicabile / Ottimale	Applicabile / Ottimale	**	Applicabile / Ottimale	Potenzialmente Applicabile
'Tension leg'	Applicabile / Ottimale	Potenzialmente Applicabile	Applicabile / Ottimale	Applicabile / Ottimale	Applicabile / Ottimale	Non Applicabile	Potenzialmente Applicabile	Non Applicabile

Note:

- In questa tabella semplificata, l'applicabilità o meno di un sistema di ancoraggio viene fatta dipendere dalla sola tipologia di ormeggio. L'impiego di un determinato sistema di ancoraggio è però dipendente non solo da questo aspetto, ma anche da altri fattori, quali ad esempio terreni di fondazione (Tabella 4-1), carichi in gioco, valutazioni economiche, particolari vincoli di installazione, caratteristiche ambientali del sito, etc..
- **Speciali ancore a trascinamento sono state studiate per questa tipologia di ormeggio (i.e. VLA).

Ciascuna soluzione presenta inoltre particolari vantaggi e svantaggi che ne possono influenzare la scelta o sconsigliarne l'applicazione. Ad esempio, nelle ancore a gravità peso e dimensioni notevoli comportano spesso un innalzamento dei costi non solo relativo ai materiali impiegati e alla manifattura, ma anche per l'utilizzo di navi di dimensioni notevoli, con gru adatte al sollevamento di tali strutture. Per ovviare questo problema si può optare per soluzioni modulari. Le drag anchor hanno un processo di installazione particolarmente semplice e possono anche essere facilmente disinstallate, presentano però il grande limite operativo della direzione del carico, il quale deve agire orizzontalmente su di essa.

Installazione relativamente rapida, possibilità di recupero dell'ancora tramite procedura di installazione inversa e multi-direzionalità del carico sono invece tutte caratteristiche dei 'suction piles, i quali però presentano un campo di applicazione in termini di caratteristiche dei fondali piuttosto limitato in quanto la resistenza massima di infissione è limitata dalla potenza delle pompe utilizzate per indurre la depressione interna al palo e/o dalla resistenza della sezione del palo nei confronti del 'buckling'. Generalmente con il termine buckling si fa riferimento ad un fenomeno di instabilità del palo indotto da carico di punta. Tale fenomeno è classificabile in instabilità globale e instabilità locale. Nell'instabilità globale, il palo si deforma longitudinalmente portando all'instabilità laterale dell'intera struttura. Nel fenomeno di instabilità locale, la sezione trasversale del palo si deforma provocando un danno localizzato.

Carichi orizzontali o verticali possono essere applicati anche ai pali infissi, la cui installazione mediante battitura provoca però disturbo ai mammiferi marini se presenti e ne rende inoltre difficoltosa un'eventuale rimozione

Alcune delle normative normalmente impiegate per il progetto delle ancore vengono elencate in Tabella 4-3.

Tabella 4-3: Linee Guida da rispettare per il design dei sistemi di ancoraggio

Organizzazione	Tipologia di ancora	Pubblicazione
American Bureau of Shipping (ABS)	Generale	Offshore Anchor Data for Preliminary Design of Anchors of Floating Offshore Wind Turbines
American Petroleum Institute (API)	Pali	API RP 2A LRFD API RP 2A WSD
	Pali, suction piles, ancore a trascinamento (VLA) e ancore a piastra (SEPLA)	API RP 2SK
Bureau Veritas (BV)	General	NR 493 DT R03 E NR 494 DT R02 E NI 572 DT R02 E
Det Norske Veritas (DNV GL)	Generale	DNVGL-OS-E301 DNVGL -ST-0119 DNVGL -ST-0126
	Ancore a trascinamento	DNVGL-RP-E301
	Ancore a piastra	DNVGL-RP-E302
	Suction anchors	DNVGL-RP-E303
Lloyds Register	General	Guidance Notes for Offshore Wind Farm Project Certification
		Rules for the Classification of Offshore Units
Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC)	Generale, pali elicoidali e ancore a piastra posizionate con pali infissi	SP-2209-OCN

In conclusione, la scelta della migliore soluzione di ancoraggio risulta specifica del progetto e del sito preso in esame, dettata sia da scelte tecniche/progettuali, da eventuali vincoli ambientali e dalle condizioni dei terreni di fondazione, riscontrabili solo in seguito a specifiche indagini geofisiche, geotecniche e ambientali dell'area in esame.

4.1 ANCORE A TRASCINAMENTO (DRAG ANCHORS)

Le drag embedded anchors (DEA), generalmente di geometria triangolare o similare (Figura 4-1), vengono calate sul fondale e quindi trascinate fino al raggiungimento di un certo valore di penetrazione all'interno del terreno. La penetrazione richiesta viene ottenuta grazie all'orientazione della sezione di testa ('fluke') rispetto al corpo centrale dell'ancora ('shank'), la quale induce un approfondimento progressivo dell'ancora all'aumentare del tiro.

Le DEA hanno la capacità di resistere ad elevati carichi orizzontali, mentre mostrano bassa resistenza ai carichi verticali. Per questa ragione sono tipicamente utilizzate in ormeggi a catenaria. I vantaggi principali di queste tipologie di ancore sono il basso costo di fabbricazione e un facile processo di installazione. Anche il trasporto in sito può essere reso molto efficiente rispetto ad altre soluzioni, grazie anche alla possibilità che alcune drag anchors hanno di poter assemblare fusto e testa direttamente in nave. Inoltre, è possibile effettuare il recupero dell'ancora invertendo la direzione del tiro.

Il campo di applicazione di questa tipologia di ancore è molto ampio e spazia dai fondali argillosi a quelli sabbiosi, mentre non è possibile l'utilizzo in presenza di fondali rocciosi o di consistenza tale da non consentire la penetrazione dell'ancora. Nonostante l'installazione sia possibile anche in depositi stratificati, non potendo

escludere l'insorgere di problemi durante la vita utile dell'ancora, ne viene consigliato l'impiego prevalentemente in caso di strati omogenei.

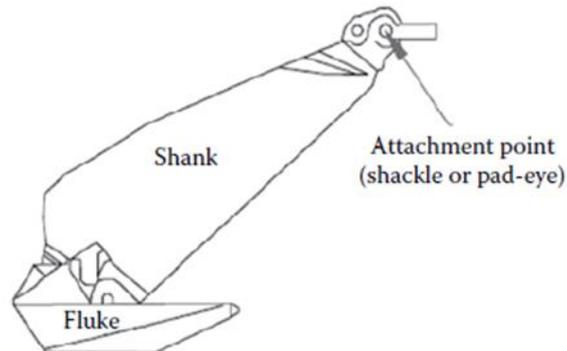


Figura 4-1: Geometria tipica di una DEA

Uno dei principali svantaggi delle DEA è invece l'impossibilità di pianificare il loro esatto posizionamento planimetrico. Queste tipologie di ancore possono richiedere anche decine di metri di trascinamento per mobilitare la capacità di carico necessaria. Anche la penetrazione stessa all'interno del terreno è caratterizzata da un certo grado di incertezza e difficilmente anticipabile. Un'accurata previsione della capacità di carico è spesso difficile in quanto richiede precisione nella stima della traiettoria di installazione e funzione della quota di installazione.

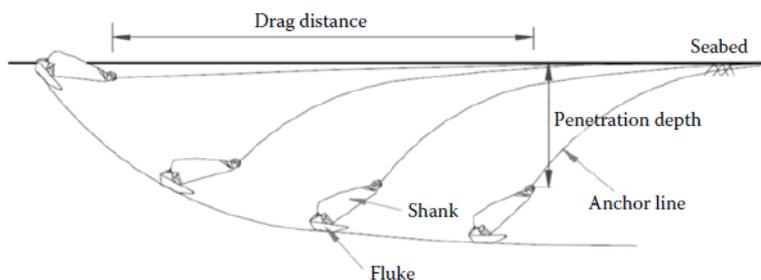


Figura 4-2: Schema di installazione di ancore a trascinamento DEA

4.2 ANCORA A GRAVITÀ (GRAVITY BASE ANCHORS)

La capacità di tenuta delle ancore a gravità a carichi verticali e/o orizzontali deriva principalmente dal peso delle ancore stesse e dall'attrito che generano con il fondale. Sono comunemente usate in quanto efficaci per diverse tipologie di fondale marino, in particolare fondali difficili da penetrare come quelli rocciosi o sabbiosi. In caso di fondali coesivi, nel corso del tempo, l'ancora può aumentare progressivamente il suo affondamento nel terreno di fondazione, incrementando così la capacità portante dell'ancora stessa, rendendone però allo stesso tempo più difficoltoso il recupero.

Generalmente sono composte da calcestruzzo o leghe metalliche pesanti (i.e. ghisa). La ghisa viene spesso preferita quale materiale di fabbricazione per la sua elevata densità, la quale permette una riduzione del volume di circa 4 volte rispetto al calcestruzzo. Da un punto di vista ambientale questa lega può considerarsi innocua per l'ambiente marino. Disperde infatti una bassa quantità di materiale e ha un comportamento comparabile a quello dei materiali impiegati per la realizzazione delle restanti parti della turbina galleggiante.

La geometria di questa tipologia di ancore può essere più o meno complessa allo scopo di modificare il rapporto carico/peso ed agire di conseguenza sul coefficiente di attrito tra ancoraggio e terreno.

Per le diverse tipologie di ancora a gravità, la tecnica di installazione è molto semplice e consiste nel calare il grave sul fondale marino. I costi possono risultare elevati per ancore di dimensioni e peso rilevanti, tali da richiedere l'utilizzo di mezzi non convenzionali, quali ad esempio imbarcazioni dotate di speciali sistemi di sollevamento.

Le ancore a gravità semplice possono avere una geometria cilindrica piena, oppure possono essere cave da zavorrare durante l'installazione (Figura 4-3). Questa seconda configurazione ha il vantaggio di poter essere facilmente trasportata in sito, mediante galleggiamento, per poi essere posizionata sul fondo aumentando progressivamente e in maniera controllata la zavorra interna (ad esempio pompando acqua all'interno). I principali vantaggi delle ancore a gravità sono il costo relativamente basso di realizzazione/progettazione, la capacità di riprendere la propria capacità portante anche se mosse dalla posizione originale in conseguenza a carichi straordinari (e.g. causa forti tempeste), nonché la loro versatilità per quanto riguarda le tipologie di fondale.

Uno degli svantaggi principali della loro applicazione nel caso di parchi eolici flottanti resta il costo di installazione dato le dimensioni e i pesi in gioco. Soluzioni modulari possono essere impiegate nel tentativo di diminuire tali costi.

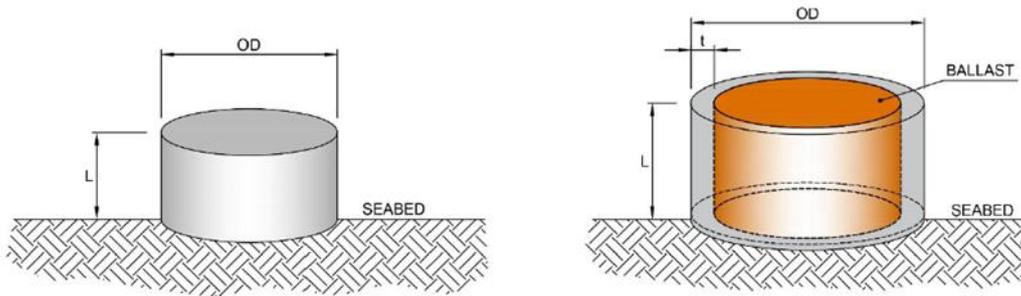


Figura 4-3: Schema Semplificato di Ancore a gravità piene (sinistra) o cave con zavorra (destra)

4.3 ANCORE A PIASTRA (PLATE ANCHORS)

Le ancore a piastra sono elementi con geometria planare triangolare o rettangolare che possono supportare sia carichi verticali che inclinati (Figura 4-4), rendendone adatto l'uso in combinazione con ormeggi di tipo 'taut-leg' o verticali. Questa tipologia di ancore si divide in due macrocategorie a seconda del metodo di installazione, che può essere a infissione diretta o mediante palo guida. Quest'ultima può avvenire ad esempio posizionando la 'plate anchor' (SEPLA) alla punta di un 'suction pile', detto follower, procedendo poi alla rimozione del palo una volta che l'ancora è stata infissa alla profondità desiderata. Il palo in questo caso funge solo da mezzo guida per l'installazione della 'plate anchor'. Una volta rimosso il follower, la catena di ormeggio viene messa in tensione nella direzione di progetto, provocando così la rotazione ed il fissaggio della piastra stessa nella posizione ('keying process').

I vantaggi di questa soluzione sono la capacità già menzionata di portare carichi verticali, o di diverse inclinazioni, e la buona precisione di posizionamento nel caso di infissione mediante palo guida, oltre che il basso costo di fabbricazione. Il principale svantaggio di questo tipo di ancore è invece legato al fatto che il loro utilizzo è limitato a fondali di materiale coesivo a bassa-media consistenza, anche se recentemente sono stati sviluppati dei modelli potenziale installabili in sabbie sciolte. La consistenza del terreno gioca un ruolo fondamentale nella scelta o meno di questa tipologia di ancora, in quanto se il carico necessario ad indurre il meccanismo di 'keying' della piastra risultasse simile o addirittura maggiore rispetto ai carichi di progetto l'utilizzo è sconsigliato.

Altro elemento che ne potrebbe limitare l'utilizzo è che non tutte le ancore a piastra disponibili sul mercato possono essere rimosse. Nei costi è necessario considerare anche l'attrezzatura necessaria a movimentare il follower. Ad esempio, nel caso venisse impiegato un 'driven pile' come guida, risulterà necessario considerare la mobilitazione di un martello di dimensioni e capacità adeguate alla battitura del follower stesso considerare la mobilitazione di un martello di dimensioni e capacità adeguate alla battitura del follower stesso.

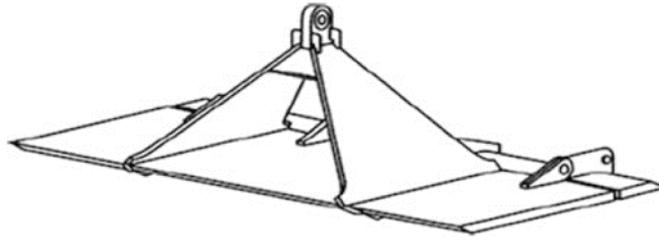


Figura 4-4: Esempio schematico di ancora a piastra

4.4 PALI ASPIRATI (SUCTION PILES)

I 'suction piles' sono una tipologia di fondazione costituita da tubi cilindrici di grandi dimensioni, aperti sul fondo e chiusi in sommità. Una volta parzialmente penetrato il palo nel fondale per peso proprio, l'installazione dei 'suction piles' avviene aspirando l'acqua dall'interno del cilindro mediante una pompa collegata ad una apposita valvola posta in sommità. La depressione all'interno del cilindro così creata consente all'ancora di affondare nel terreno. L'ormeggio viene collegato al palo mediante un anello detto 'pad-eye', la cui posizione lungo il palo viene ottimizzata in funzione del sistema di ormeggio scelto.

Il 'pad-eye' è posizionato a circa due terzi della lunghezza del palo, tipico posizionamento di un ormeggio a catenaria. La capacità ultima di questi ancoraggi è data dalla somma di diverse componenti, quali la resistenza a sfilamento dovuta all'attrito tra palo e terreno, la resistenza passiva del terreno circostante e dal meccanismo di capacità portante inversa mobilitato grazie alla depressione interna ('Reverse End Bearing capacity').

Grazie ad un'installazione poco invasiva e dai costi contenuti, dove i fondali lo consentono, questa tipologia di ancore viene spesso preferita ad altre soluzioni. Ad esempio, i 'suction piles' sono spesso considerati come alternativa ai pali infissi laddove questi non possono essere installati a causa di vincoli ambientali legati al rumore generato durante l'attività di battitura. La possibilità di rimozione si aggiunge ai vantaggi di queste ancore. Il vincolo principale dell'utilizzo dei 'suction piles' è rappresentato dalla condizione del fondale; questa soluzione non si addice infatti a fondali con argille dure, rocce compatte o sabbie sciolte, mentre può essere impiegata in depositi omogenei di argille morbide o di media consistenza, o sabbie di media densità. Il campo di applicazione in termini di caratteristiche dei fondali risulta quindi piuttosto limitato in quanto la resistenza massima di infissione è limitata dalla potenza delle pompe utilizzate per indurre la depressione interna al palo, dalla capacità del terreno a sostenere tale depressione (i.e. permeabilità), e/o dalla resistenza della sezione del palo nei confronti del 'buckling'. Aspetto di particolare importanza parchi in parchi eolici con presenza di molteplici turbine e relativi sistemi di ormeggio/ancoraggi, è la grande accuratezza del posizionamento durante l'installazione.

Una corretta modellazione del terreno e dell'interazione con il palo risulta particolarmente importante per queste tipologie di ancore. Diametro del palo e profondità di infissione dello stesso vengono generalmente determinate per diverse condizioni, spesso incorporando nel design la possibilità che il contributo della depressione interna alla capacità dell'ancoraggio possa venire meno nel corso della sua vita utile.

4.5 PALI INFISSI (DRIVEN PILE ANCHORS)

Grazie alla capacità di portare carichi anche molto elevati, questa soluzione è stata spesso utilizzata nell'industria oil and gas. Pali generalmente di geometria tubolare vengono infissi nel terreno mediante battitura o vibrazione, modalità di installazione queste che rappresentano anche il più grande limite all'impiego della soluzione tecnologica stessa a causa dei costi elevati e di potenziali vincoli ambientali legati al rumore indotto. A seconda del dimensionamento i pali infissi sono particolarmente efficaci a resistere sia a carichi orizzontali che verticali, grazie all'attrito palo-terreno e alla resistenza passiva del terreno stesso.

I 'driven piles' possono essere impiegati per diverse tipologie di terreno, e questa caratteristica li rende particolarmente adatti anche nel caso di depositi eterogenei, per i quali le altre tecniche di ancoraggio risultano di difficile applicazione. Possibili limitazioni all'installazione di pali per infissione sono rappresentate dalla presenza di orizzonti cementati o litificati e/o trovanti di grandi dimensioni, i quali possono determinare lo snervamento e successiva deformazione progressiva della sezione del palo. Anche in assenza di tali ostacoli il numero di colpi necessari all'installazione del palo stesso può diventare eccessivo a seconda delle caratteristiche del martello

impiegato e della resistenza offerta dal terreno penetrato. Per questa ragione, prima di procedere all'installazione è necessario eseguire un'analisi di 'battibilità' del palo, simulando la propagazione dell'onda d'urto indotta dal martello ed il conseguente avanzamento dello stesso.

I principali vantaggi di questa soluzione sono sicuramente la precisione di posizionamento, la capacità di resistere a carichi elevati e la possibilità di installarli in un ampio range di terreni. Gli svantaggi da sottolineare sono invece il disturbo dato dalla battitura o dalle vibrazioni necessarie all'infissione del palo stesso, gli alti costi di installazione e la difficile rimozione (spesso impraticabile).

4.6 PALI ELICOIDALI (HELICAL PILE ANCHORS)

I pali elicoidali consistono in un fusto tubolare di acciaio lungo il quale sono saldate delle eliche aventi dimensioni e spaziatura calibrati in base alla tipologia di terreno ed alla capacità ultima richiesta.

I principali vantaggi sono sicuramente facilità, rapidità e bassi costi di installazione; tuttavia, la dimensione delle eliche risulta limitata dai limiti tecnologici della strumentazione utilizzata in fase di installazione per applicare al palo la coppia torcente necessaria a raggiungere l'infissione completa.

Questa tipologia di ancoraggio risulta molto efficace per carichi prevalentemente di trazione, mentre la resistenza offerta nei confronti di carichi orizzontali è limitata. Per questo motivo i pali elicoidali sono particolarmente efficienti quando utilizzati in concomitanza di ormeggi di tipo 'tension leg' di natanti di piccole dimensioni.

5 CONCLUSIONI

Nella presente relazione sono state descritte ed esaminate le diverse soluzioni di ancoraggio e ormeggio disponibili sul mercato ed applicabili al progetto in esame. Si sottolinea che tali sistemi sono aspetti piuttosto critici per il successo di qualsiasi progetto marittimo. Essi consentono infatti alle installazioni di resistere alle forze ambientali e ai carichi operativi, garantendone una posizione stabile e sicura. Per questo motivo la scelta del sistema di ancoraggio ed ormeggio, il quanto più possibile affidabile ed efficiente, risulta di cruciale importanza per poter garantire la massima sicurezza, stabilità ed il corretto funzionamento delle strutture offshore in esame.

Tenendo conto della fase di progettazione attuale la scelta definitiva sul sistema di ancoraggio e ormeggio e il successivo dimensionamento strutturale di dettaglio potranno però essere eseguiti [CG1] solo in una fase successiva del progetto, una volta che studi più approfonditi e apposite campagne di indagine, tra le quali quelle geotecniche e geofisiche, e analisi di dettaglio saranno disponibili.

Tali studi verranno condotti in una fase più avanzata del progetto analizzando la soluzione migliore sia in termini tecnologici che in termini di impatto ambientale. Quest'ultimo aspetto è infatti fortemente vincolante per la scelta dell'ancoraggio, vista la necessità di minimizzarlo e allo stesso tempo garantire la sicurezza della navigazione da potenziali rischi di disancoraggio.

Il dimensionamento e le successive verifiche verranno eseguite considerando le sollecitazioni agenti sulle linee di ormeggio e di conseguenza sugli ancoraggi di fondazione, come ad esempio pretensione dei cavi, fluttuazione del livello del mare in funzione delle maree, ovvero variazione dell'assetto di galleggiamento, azione delle onde e delle correnti del mare e azione del vento.

REFERENZE

- [1] Chakrabarti, Subrata. Handbook of Offshore Engineering (2-volume set). Elsevier Science, 2015
- [2] API RP 2SK, 3rd Edition, 2005 - Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures
- [3] RINA Guide for Certification of Floating Offshore Wind Turbine Installations (RINA GUI41), August 2021
- [4] Castro-Santos, L., Diaz-Casas, V., 2016. Floating Offshore Wind Farms. Green Energy and technology, Editors Springer
- [5] American Bureau of Shipping (ABS), Corporate Offshore Technology, Renewables, 2013. Offshore Anchor Data for Preliminary Design of Anchors of Floating Offshore Wind Turbines
- [6] API, 2019. API RP 2A LRFD, Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms—Load and Resistance Factor Design; Second Edition, American Petroleum Institute, API Publishing Services, Washington, DC
- [7] API, 2020. API RP 2A WSD, Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design; Twenty-Second Edition; Reaffirmed, September 2020, American Petroleum Institute, API Publishing Services, Washington, DC
- [8] API, 2015. API RP 2SK, Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures; Third Edition; Reaffirmed, June 2015, American Petroleum Institute, API Publishing Services, Washington, DC
- [9] Bureau Veritas, 2015. Rule Note NR 493 DT R03 E, Classification of mooring systems for permanent and mobile offshore units
- [10] Bureau Veritas, 2006. Rule Note NR 494 DT R02 E, Rules for the classification of offshore loading and offloading buoys
- [11] Bureau Veritas, 2019. Rule Note NI 572 DT R02 E, Classification and certification of floating offshore wind turbines
- [12] DNVGL, 2018. Offshore Standard DNVGL-OS-E301, Position Mooring, Det Norsk Veritas, Hovik, Norway
- [13] DNVGL, 2018. Standard DNVGL -ST-0119, Floating wind turbine structures, Det Norsk Veritas, Hovik, Norway
- [14] DNVGL, 2018. Standard DNVGL-ST-0126, Support structures for wind turbines, Det Norsk Veritas, Hovik, Norway.
- [15] DNVGL, 2017. Recommended practice DNVGL-RP-E301, Design and Installation of Fluke Anchors, Det Norsk Veritas, Hovik, Norway
- [16] DNVGL, 2017. Recommended practice DNVGL-RP-E302 Design and Installation of Plate Anchors in Clay, Det Norsk Veritas, Hovik, Norway
- [17] DNVGL, 2017. Recommended practice DNVGL-RP-E303 Geotechnical Design and Installation of Suction Anchors in Clay, Det Norsk Veritas, Hovik, Norway
- [18] Lloyds Register, 2019. Guidance Notes for Offshore Wind Farm Project Certification
- [19] Lloyds Register, 2020. Rules for the Classification of Offshore Units
- [20] NAVFAC, 2012, SP-2209-OCN Handbook for Marine Geotechnical Engineering, Naval Facilities Engineering Command, Engineering Service Center, Port Hueneme, USA

-
- [21] White D.J., C.Y. Cheuk and M.D. Bolton, 2008. The Uplift Resistance of Pipes and Plate Anchors Buried in Sand, *Géotechnique*, 58, No. 10, 771–779
 - [22] Chow S.H., J. Le, M. Forsyth and C.D. O'Loughlin, 2018. Capacity of Vertical and Horizontal Plate Anchors in Sand Under Normal and Shear Load, *Physical Modelling in Geotechnics – McNamara et al. (Eds)*, Taylor & Francis Group, London
 - [23] Dickin E.A., 1988. Uplift Behavior of Horizontal Anchor Plates in Sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, No. 114, 1300-131
 - [24] Charles Aubeny, 2018. *Geomechanics of Marine Anchors*. CRC Press, Taylor & Francis Group
 - [25] Ehlers CJ, Young AG, and Chen J-H, 2004. Technology assessment of deepwater anchors. *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, OTC 16840, pp 1–17 (electronic format), doi:10.4043/16840-MS
 - [26] NCEL, 1987. *Drag Embedment Anchors for Navy Moorings*. Techdata Sheet 83-08R, Port Hueneme, California: Naval Civil Engineering Laboratory
 - [27] Fulton, T.M., Stewart, W.P., 1994. Vertical Loads on Drag Embedment Anchors. *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, OTC-7491-MS, <https://doi.org/10.4043/7491-MS>



RINA Consulting S.p.A. | Società soggetta a direzione e coordinamento amministrativo e finanziario del socio unico RINA S.p.A.
Via Cecchi, 6 - 16129 GENOVA | P. +39 010 31961 | rinaconsulting@rina.org | www.rina.org
C.F./P. IVA/R.I. Genova N. 03476550102 | Cap. Soc. € 20.000.000,00 i.v.