

COMMITTENTE



# ND-SEA ONE S.r.l.

piazza Europa, 14 - 87100 Cosenza (ITALIA) - p.iva 03796230781

PROGETTO

## PROGETTO PRELIMINARE PER LA REALIZZAZIONE E L'ESERCIZIO DI UN IMPIANTO IBRIDO EOLICO E FOTOVOLTAICO OFFSHORE FLOTTANTE CON SISTEMA DI ACCUMULO UBICATO NEL MAR JONIO

PROGETTAZIONE

**ISO 9001**  
**BUREAU VERITAS**  
Certification

Piazza Europa, 14  
87100 Cosenza  
Tel. +39.0984.35246  
PEC: newdevelopmentsrsl@pec.it



**E3 ENVIRONMENT  
EARTH  
ENGINEERING**

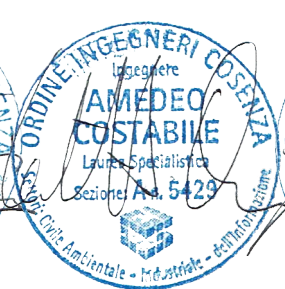
via Pietro Bucci, Cubo 15b  
Arcavacata di Rende (CS)  
Tel. +39.0984.35246  
e-mail: e3coop@gmail.com



progettisti:



dott. ing. Giovanni Guzzo Foliaro



dott. ing. Amedeo Costabile



dott. ing. Francesco Meringolo



Prof. Geol. Rocco Dominici

gruppo di lavoro:

- dott. Geol. Giuseppe Cianflone
- dott. ing. Giuseppe Maradei
- dott.ssa Jasmine De Marco
- dott. ing. Raffaele Ciotola
- dott.ssa ing. Irene Colosimo
- dott.ssa Arch.ga Ghiselda Pennisi
- dott.ssa Arch.la Teresa Saitta
- dott.ssa ing. Denise Di Cianni
- dott.ssa Geol Martina Petracca

ELABORATO

Titolo:

### RELAZIONE PRELIMINARE SUL DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE DI ANCORAGGIO E DI ORMEGGIO

Tav:

## R\_0010

Codice elaborato: PP\_R\_0010-Relazione\_preliminare\_ancoraggio\_e\_ormeggio.pdf

Scala: --

REV.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORAZIONE	VERIFICA	APPROVAZIONE
00	01/2023	prima emissione	ND	ND	ND

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 1 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormezzo ed Ancoraggio</b>		

## Indice dei Contenuti

1	Premessa	4
2	Tipologie di Turbine Eoliche Offshore Flottanti ( <i>Floating Offshore Wind Turbines, FOWT</i> )	5
2.1	FOWT di Tipo Spar	8
2.2	FOWT di Tipo Semi-Submersible	10
2.3	FOWT di Tipo Tension Leg Platform (TLP)	12
2.4	Alcuni Concetti Ibridi di FOWT	13
2.5	Confronto tra le Diverse Tipologie di FOWT	16
3	Tipologie di Sistemi di Ormezzo per FOWT	20
3.1	Classificazione Geometrica dei Sistemi di Ormezzo	20
3.2	Classificazione Funzionale dei Sistemi di Ormezzo	21
4	Tipologie di Sistemi di Ancoraggio per FOWT	24
4.1	Ancore a Gravità ( <i>Dead Weight Anchors, DWA</i> )	26
4.2	Pali Infissi ( <i>Driven Pile Anchors</i> )	27
4.3	Ancore a Trascinamento ( <i>Drag Embedded Anchors, DEA</i> )	27
4.4	Pali a suzione ( <i>Suction Piles or Suction Buckets</i> )	29
4.5	Ancore installate a gravità ( <i>Gravity Installed Anchors</i> )	31
4.6	Ancore Caricate Verticalmente ( <i>Vertically Loaded Anchors, VLA</i> )	32
5	Sistemi di Ormezzo-Ancoraggio Realizzati in Precedenti Progetti di FOWT	33
5.1	Sistema di Ormezzo-Ancoraggio per FOWT di tipo Spar	33
5.2	Sistema di Ormezzo-Ancoraggio per FOWT di tipo Semi-Submersible	35
5.3	Sistema di Ormezzo-Ancoraggio per FOWT di tipo TLP	36
6	Metodologia di dimensionamento del Sistema Ormezzo-Ancoraggio di una FOWT	38
6.1	Il 'Design Basis' del Sistema Ormezzo-Ancoraggio	40
6.2	Fasi della progettazione	42
6.2.1	Definizione della Tipologia di Ormezzo	42
6.2.2	Definizione del Profilo dell'Ormezzo	42
6.2.3	Definizione del Layout dell'Ormezzo	45
6.2.4	Scelta dei Materiali delle Linee di Ormezzo	48
6.2.5	Scelta del Tipo di Ancoraggio	49
7	Criteri di dimensionamento delle Linee di Ormezzo	50

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 2 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

7.1	Standard Internazionali di Progettazione	50
8	Conclusioni	54
	Referenze	56

## Indice delle Figure

Figura 1 -	Turbine eoliche a fondazione flottante (Floating Offshore Wind Turbines, FOWT) [4]	6
Figura 2 -	Rappresentazione schematica dei tre principali meccanismi di stabilità idrostatica utilizzati per turbine eoliche galleggianti. "MR" Momento Raddrizzante, "MI", Momento Inclinante. [4].	8
Figura 3 -	FOWT di tipo Spar. In alto a sinistra: schema indicativo dei principali componenti della struttura [5]; in alto a destra: modello 3D del sistema Spar con ancoraggio a catenaria [3]; in basso: Spar Hywind installato in Scozia dal 2017 [5].	10
Figura 4 -	Immagine a sinistra: Illustrazione grafica del Semi-Submersible e dei principali componenti della struttura [9]; Immagine a destra: Windfloat Semisubmersible Farm di Principle Power [10]	12
Figura 5 -	Tipologia di FOWT stabilizzato con ormeggi. Immagine a sinistra: TLP conceptual scheme [16]. Immagine centrale: Pelastar TLP [17]; Immagine a destra: Eco TLP [18].	13
Figura 6 -	Esempi di FOWT di tipo ibrido. Immagine a sinistra: Tetrastar TLP [21]; Immagine di destra SBM TLP [22]	14
Figura 7 -	Hexafloat concept. Immagine a sinistra: struttura della piattaforma flottante esagonale e del sistema di ormeaggio-ancoraggio. Immagine a destra: prototipo di Hexafloat in scala 1:6.7 installato presso il laboratorio MareLAB in Campania [23].	15
Figura 8 -	Concetti di struttura flottante in fase di sviluppo [23]	16
Figura 9 -	Immagine di Sinistra: Floatgen installato in Francia dal 2018 (2 MW), ad una profondità di 33 m [25]; Immagine s Destra: HIBIKI, seconda piattaforma di BW-Ideol installata in Giappone dal 2018 ad una profondità di 55 m (3 MW) [25].	16
Figura 10 -	I diversi metodi di Installazione per: Spar (immagine in alto); Semi-Submersible (immagine centrale) e TLP (immagine in basso) [26]	18
Figura 11 -	Classificazione dei sistemi di ormeaggio in base alla geometria. Immagine a sinistra: Ormeaggio di tipo Spread generalmente applicato nelle FOWT di tipo Spar e Semi-Submersible. Immagine a destra: sistema Single-Point applicato nel concept X1Wind [27].	21
Figura 12 -	Classificazione dei sistemi di ormeaggio in base alla funzionalità. Da sinistra: Sistema lasco (Catenaria), sistema ad elementi semi-tesi (Semi-Taut), sistema ad elementi tesi (Taut) e sistema ad elementi tesi verticali (Tension Leg Platform) [29]	23
Figura 13 -	Tipologie di ancore utilizzabili per FOWT a diverse profondità [28].	25
Figura 14 -	Immagine a sinistra: Modello di ancora a gravità per strutture TLP [45]; Immagine a destra: Schema di ancora a gravità con Shear Keys con indicazione di forze e momenti da tenere in conto nel dimensionamento [31].	26
Figura 15 -	Ancora a trascinalamento (Drag Embedded Anchor). La linea di ormeaggio è in parte infissa nel suolo, in parte appoggiata sul suolo per ridurre i carichi sull'ancora. [32]	28
Figura 16 -	Differente capacità di penetrazione del suolo di una DEA in funzione dell'angolo di apertura del fluke ( $\beta$ ) ed in funzione delle diverse caratteristiche del suolo. Immagine in alto: $\beta=32^\circ$ in suolo sabbioso ad alta densità. Immagine in basso: $\beta=32^\circ$ in suolo limoso-argilloso a bassa densità [32].	29

Progetto	<b>Preliminare</b>	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	<b>E3 soc. coop</b>		Elab	<b>R_0010</b>
Data	<b>Dicembre 2022</b>		Pag.	<b>Pag. 3 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

Figura 17 - Ancore o Pali a Suzione (Suction Piles or Buckets). Immagine a sinistra: fase 1 dell'installazione del palo a suzione tramite caduta del corpo sul fondo. Immagine a destra: fase 2 dell'installazione del palo a suzione tramite sistema di aspirazione [33] .....	30
Figura 18 - Ancora installata a gravità OMNI-Max, sviluppata da Delmar Systems [33]. .....	32
Figura 19 - Ancora caricata verticalmente (Vertically Loaded Anchor, VLA).....	33
Figura 20 - Parco eolico flottante Hywind Scotland, produttivo dal 2017. Sistema di ormeaggio a 3 linee orientate reciprocamente a 120° [37]. .....	34
Figura 21 - Sistema di ormeaggio adottato nel progetto OC3-Hywind di Equinor [36] .....	35
Figura 22 - Sistema di Ormeaggio ed Ancoraggio previsto analizzato in fase di progettazione per la wind farm Fukushima Mirai. Immagine in alto a sinistra: possibili tipi di ancoraggio (DEA non condivisi e Suction Buckets condivisi) [38]. Immagine in alto a destra: visualizzazione 3D della condivisione di sistemi di ancoraggio. In basso a sinistra: Analisi ad Elementi Finiti delle linee di ancoraggio sollecitate ad azione di vento ed onde [39,40]. .....	36
Figura 23 - Sistema di ormeaggio e ancoraggio per TLP. Immagine in alto a sinistra: struttura galleggiante e turbina eolica con indicazione delle lunghezze principali del corpo centrale (Hull) [41]. Immagine in alto a destra: principali elementi costitutivi del sistema TLP e layout dell'ancoraggio (3 linee, 120°) [40]. In basso due immagini di ancoraggi adottati per TLP: ancore a gravità e pali a suzione [42,43]. .....	38
Figura 24 - Schema semplificato utilizzato per il pre-dimensionamento di una catenaria [44] .....	44
Figura 25 - Rapporto R/D, con R=raggio dell'ancora e D=profondità all'aumentare della profondità (NB unità di misura della profondità in "feet"). rapporto R/D per diverse profondità d'acqua sulla base dei dati di progetti in ambito O&G. [47] .....	46
Figura 26 - Possibili configurazioni di ormeaggio nel caso di un Semi-Submersible. Da sinistra verso destra si incrementa la ridondanza delle linee [46].....	47
Figura 27 - Sistemi di Ormeaggio Distribuiti o Raggruppati. In colore grigio: sistema "clustered" 3x4 con i 3 gruppi aventi una distanza reciproca di 120° (immagine a sinistra) e sistema diffuso 12x1 con angolo di diffusione 30° (immagine a destra). .....	48

## Indice delle Tabelle

Tabella 1 - Vantaggi e Svantaggi delle tre tipologie di FOWT analizzate: Spar, Semi-Submersible e TLP [21] .....	19
Tabella 2 - Principali caratteristiche a confronto del sistema di ormeaggio a catenaria e del sistema ad elementi tesi [20]. .....	23
Tabella 3 - Tipologie di ormeaggio utilizzate in alcune turbine flottanti. Si indica il nome del progetto, la tipologia di FOWT e la profondità di installazione [20]. .....	24
Tabella 4 - Fattore di Sicurezza per le Forze sugli Ancoraggi secondo lo Standard API RP 2SK ( <i>Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures</i> ) [11, 44].....	52
Tabella 5 - Periodi di ritorno associati ai carichi ambientali d'onda, vento, corrente e corrente con riferimento agli stati limite [48] 53	
Tabella 6 - Coefficienti di sicurezza riferiti alla tensione statica e dinamica da considerare nella verifica delle linee di ormeaggio [50]. .....	54

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 4 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

## 1 Premessa

La proposta progettuale è finalizzata alla realizzazione e all'esercizio di un impianto ibrido costituito da 28 aerogeneratori eolici offshore e due aree da destinare a piattaforme solari, sempre offshore, posizionati ad una distanza di circa 16 km delle coste di Corigliano-Rossano (CS), per una potenza complessiva dell'impianto è quantificata in 540 MW. Inoltre è parte d'opera un sistema di accumulo elettrochimico onshore posto all'interno del sedime della stazione di elevazione ubicata in prossimità della SE "Rossano" di proprietà Terna S.p.a. nel territorio del Comune di Corigliano-Rossano (CS).

Le profondità del fondale marino, in prossimità della zona di installazione, variano tra i 250 ed i 300 m.

Con questo documento si intende fornire una descrizione il più possibile esaustiva, ed allo stesso tempo sintetica, delle tecnologie ad oggi disponibili per la realizzazione di parchi offshore flottanti per la produzione di energia eolica e fotovoltaica in acque profonde. In particolare, si descrivono le tipologie di turbine flottanti (*Floating Offshore Wind Turbines, FOWT*) ad oggi sviluppate, citando gli aspetti critici emersi dalle installazioni già in atto, e le tipologie dei sistemi di ormeaggio ed ancoraggio ad esse applicabili, tenendo conto, anche in tal caso, dei vantaggi e degli svantaggi fino ad oggi riscontrati.

Nel presente documento, si introducono inoltre gli standard richiesti dalle regolamentazioni internazionali nel processo di progettazione dei sistemi di ormeaggio-ancoraggio di turbine eoliche offshore, quale parte dimensionante delle strutture e ovviamente ripercorribile per le piattaforme solari. Il dimensionamento di tali opere prevede la conoscenza di caratteristiche geotecniche del suolo che devono essere rilevate tramite opportune indagini *in-situ*. Nella presente fase di analisi preliminare, pertanto, si avanzano alcune ipotesi per la scelta del sistema *turbina-galleggiante-ormeaggio-ancoraggio*, sulla base delle informazioni disponibili.

La progettazione di piattaforme galleggianti per la produzione di energia eolica e fotovoltaica, inevitabilmente coinvolge settori molto diversi, e richiede indagini ed interventi mirati non solo a minimizzare gli impatti ambientali associati all'installazione di tali tecnologie, ma anche, ove possibile, a creare un valore aggiunto per gli ecosistemi acquatici che le ospitano. Il design di piattaforme per la produzione di energia rinnovabile offshore richiede un approccio multidisciplinare, che include studi ed indagini di diversa natura: analisi di tipo geologico (essenziali alla selezione del sistema di ancoraggio), analisi del clima meteo-marino (necessarie alla valutazione delle sollecitazioni idrodinamiche sulle strutture), analisi anemometriche ed aerodinamiche (volte rispettivamente alla quantificazione dell'energia producibile e delle spinte agenti sulla sovrastruttura), analisi di tipo biologico (indispensabili per valutare le interazioni con gli ecosistemi acquatici),

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 5 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

analisi dinamiche dei sistemi di ormeggio e ancoraggio (che determinano la resistenza alle azioni aerodinamica del complesso *turbina-galleggiante-ormeggi-ancoraggi*).

Per un'analisi preliminare del tipo di struttura flottante, e del relativo sistema di ormeggi ed ancoraggi, si tiene conto dei seguenti fattori emersi dalle indagini preliminari effettuate sull'area in esame:

- La profondità media nella zona di installazione è tra 250 e 350 m;
- Le pendenze dei fondali sono comprese tra 1 e 4%;
- Le analisi del clima meteomarinò hanno rilevato che: a) circa il 90% delle onde che transitano nell'area d'interesse hanno un'altezza inferiore a 1; b) l'altezza significativa dell'onda associata ad un periodo di ritorno di 50 anni è 4.83 m;
- Gli effetti dell'installazione dell'impianto sugli ecosistemi acquatici devono essere minimizzati;

## 2 Tipologie di Turbine Eoliche Offshore Flottanti (*Floating Offshore Wind Turbines, FOWT*)

Il settore dell'eolico offshore ha subito una rilevante crescita negli ultimi decenni, con lo sviluppo di numerosi parchi eolici costituiti da turbine installate su fondazioni fisse ([Figura 1](#)). In prossimità di zone costiere caratterizzate da basse profondità (< 60 m) - come quelle europee del Mare del Nord - si sono raggiunti ambiziosi obiettivi di produzione energetica da fonti rinnovabili grazie a tali tecnologie. Nel bacino del Mediterraneo invece, come nel Mar del Giappone, le turbine eoliche su fondazioni fisse non hanno trovato applicazione in quanto le profondità sono relativamente alte (> 60 m) a poca distanza dalla costa. È un'eccezione, per l'Italia, il parco eolico offshore *Baleolico* di Taranto, il primo parco eolico offshore a fondazioni fisse di tutta l'area mediterranea, inaugurato nel 2022. Il parco è composto da 10 turbine per una capacità complessiva di 30 MW, in grado di assicurare una produzione di oltre 58.000 MWh annui, pari al fabbisogno di circa 60.000 abitazioni.

Le turbine eoliche a fondazione fissa sono state ampiamente utilizzate fino ad una profondità limite (ben nota in letteratura) di 60 m. Recenti avanzamenti della tecnologia in questo settore, tuttavia, hanno consentito di spingere l'utilizzo di fondazioni fisse (più specificatamente di tipo *Tripodes*, non riportato in figura) fino a profondità di 90-100 m ([1],[2],[3]). Oltre questa profondità, le fondazioni galleggianti



Progetto	Preliminare	Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 6 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

costituiscono alternative generalmente più competitive sia dal punto di vista strutturale che economico. In [Figura 1](#) sono rappresentate tre tipologie di turbine flottanti (FOWT) che sono state, e sono tuttora, oggetto di avanzate ricerche da parte della comunità scientifica internazionale. Le *Floating Offshore Wind Turbines* (FOWT) sono costituite da tre componenti principali: la *sovrastruttura*, che consiste nell'aerogeneratore (torre, rotore e navicella); la *struttura galleggiante*, il cui principio di funzionamento varia a seconda della tipologia di FOWT, ed infine la *sottostruttura*, ossia il sistema di ormeggio e ancoraggio ([Figura 1](#)).

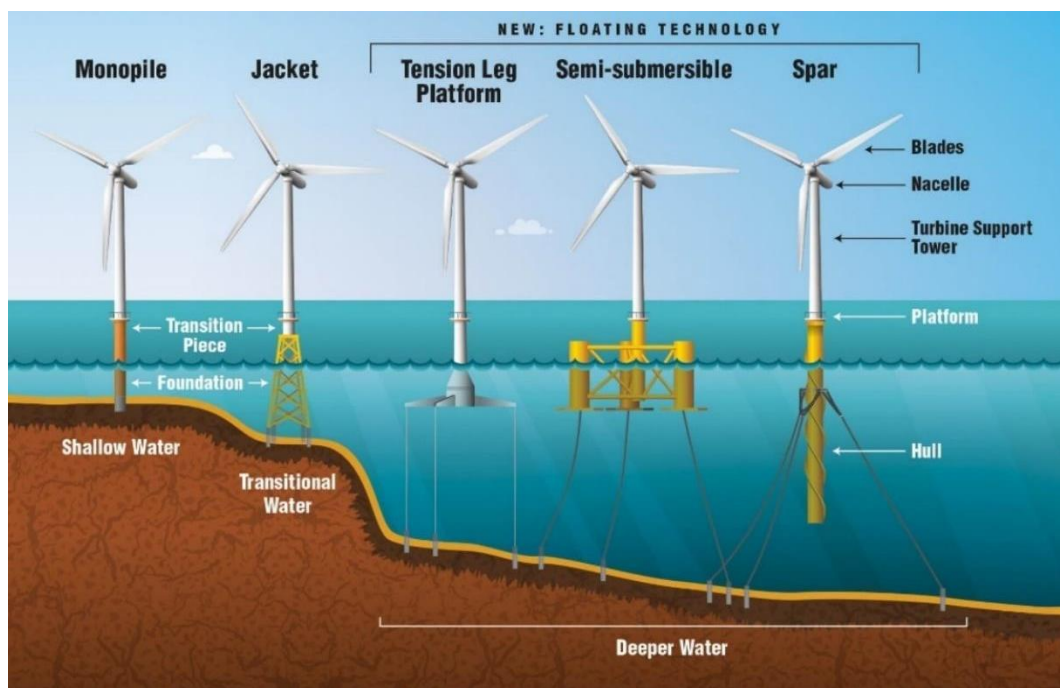


Figura 1 – Turbine eoliche a fondazione flottante (Floating Offshore Wind Turbines, FOWT) [4]

Le strutture galleggianti di sostegno agli aerogeneratori possono essere concettualmente suddivise in funzione della modalità adottata per “stabilizzarle”, ossia per generare il *momento raddrizzante* che contrasta il *momento inclinante* dovuto alle azioni aerodinamiche agenti sulla struttura sovrastante ([Figura 2](#)).

- *Stabilizzazione con figura di galleggiamento* (“*Buoyancy Stabilized*” o “*Waterplane area Stabilized*”), con contrasto alla spinta aerodinamica tramite un’ampia chiatta galleggiante. Il momento raddrizzante (MR) è generato principalmente dal momento d'inerzia della figura di galleggiamento. Quando la piattaforma è inclinata, la forza di galleggiamento della parte della piattaforma sottovento aumenta, mentre diminuisce per la parte sopravvento, creando il momento raddrizzante (MR) che equilibra il momento inclinante (MI).

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab.	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 7 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

- *Stabilizzazione con peso* (o “*Ballast Stabilized*”), con contrasto alla spinta aerodinamica tramite una zavorra posizionata nella zona inferiore della struttura galleggiante. Il momento raddrizzante viene generato principalmente attraverso l'abbassamento del baricentro dell'intera piattaforma, utilizzando materiale ad alta densità nella parte inferiore della piattaforma. Ciò garantisce che la forza del peso e la forza di galleggiamento creino il momento raddrizzante (MR) necessario per contrastare il momento inclinante (MI), aumentando la distanza verticale tra il centro di massa e il centro di galleggiamento. Il tipo di piattaforma più utilizzato di questa categoria è noto come *Spar*. La fondazione di una piattaforma *Spar* ha una forma allungata (da cui il nome *Spar*, che in italiano è tradotto come “*Longherone*”) con diametro uguale - o simile - a quello della turbina eolica, costituendone in sostanza il suo prolungamento.
- *Stabilizzazione con tiranti* (“*Mooring Line Stabilized*” o “*Tension Leg Platform*”), con contrasto alla spinta aerodinamica tramite tiranti verticali disposti ai vertici della struttura galleggiante. La struttura è fissata al fondale tramite una serie di linee (spesso tubi) pretensionati dalla forza di galleggiamento, che è superiore alla forza peso. Quando la piattaforma è inclinata, la/e linea/e sopravvento si estende/estendono, mentre la linea/e sottovento si contrae/contraggono, imponendo quindi alla piattaforma una tensione maggiore nella linea sopravvento che nella linea sottovento, creando il momento raddrizzante.



Progetto	Preliminare	Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab.	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 8 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

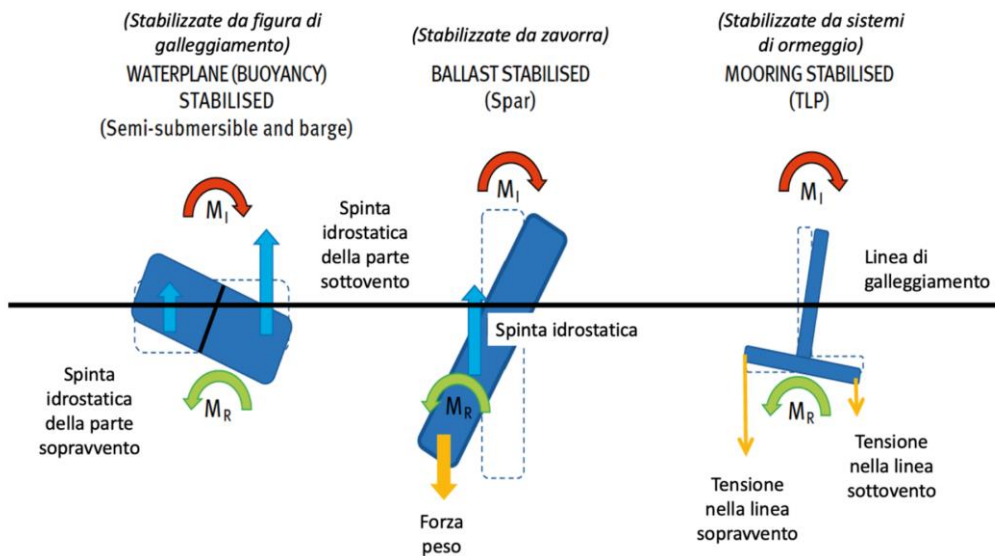


Figura 2 - Rappresentazione schematica dei tre principali meccanismi di stabilità idrostatica utilizzati per turbine eoliche galleggianti. “MR” Momento Raddrizzante, “MI”, Momento Inclinante [5].

Nel seguito si entra in maggiore dettaglio rispetto a ciascuna delle tre tipologie di piattaforme, per procedere successivamente alla loro comparazione ([Sezione 2.5](#)), alla descrizione dei possibili sistemi di ormeaggio ed ancoraggio ([Sezione 4](#) e [Sezione 5](#)) ed infine alla selezione di una o più alternative progettuali per il parco eolico in fase di studio di fronte le coste di Corigliano-Rossano ([Sezione 8](#)).

## 2.1 FOWT di Tipo Spar

La turbina eolica offshore di tipo *Spar* appartiene alla categoria ‘*Ballast Stabilized*’ in quanto è costituita da un cilindro in acciaio, o cemento, riempito con una zavorra di acqua e ghiaia per mantenere il centro di gravità al di sotto del centro di galleggiamento. Viene così garantito che la turbina eolica galleggi in mare e rimanga in posizione verticale ([Figura 3](#)).

Il pescaggio della fondazione galleggiante è solitamente maggiore (o almeno uguale) all'altezza della torre al di sopra del livello del mare. Considerando che le odierne turbine eoliche (e ancor di più quelle che si andranno ad installare nei prossimi anni), con potenze uguali o superiori a 10 MW, sono caratterizzate da torri che raggiungono gli 80-100 m, si intuisce che i sistemi di tipo *Spar* sono applicabili solo a profondità elevate (>100-150 m).

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab.	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 9 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

La procedura di installazione dei sistemi *Spar* prevede che la fondazione galleggiante viene trainata in posizione orizzontale e, raggiunto il sito, viene capovolta e stabilizzata con il sistema di ormeaggio-ancoraggio ([Figura 10](#)). In seguito, la torre e il gruppo rotore-navicella vengono montati da una nave-gru a posizionamento dinamico. Questo sistema di assemblaggio rende le operazioni di installazione, manutenzione e dismissione delle turbine di tipo *Spar* particolarmente costose rispetto ad altri tipi di FOWT, soprattutto se si tiene in considerazione che alcune imbarcazioni devono essere appositamente realizzate in funzione della lunghezza della torre.

Solitamente, questo tipo di FOWT utilizza sistemi di ormeaggio di tipo spread a catenaria (*Spread Catenary Mooring System*), ma non sono stati esclusi dalle sperimentazioni sistemi di tipo *Taut* e *Semi-Taut* (ossia sistemi di ormeaggio ibridi, a sostegno attivo-passivo, descritti in dettaglio in [Sezione 3](#)), che ad elevate profondità possono rappresentare un ottimo compromesso costo-stabilità-resistenza a condizioni estreme [5]. *Equinor Hywind* è uno dei pionieri delle FOWT di tipo *Spar* ([Figura 3](#)). Altri concept di FOWT di tipo *Spar* sono, ad esempio, *Sway* [7] e *Advanced Spar* [8].

Progetto	Preliminare	Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 10 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

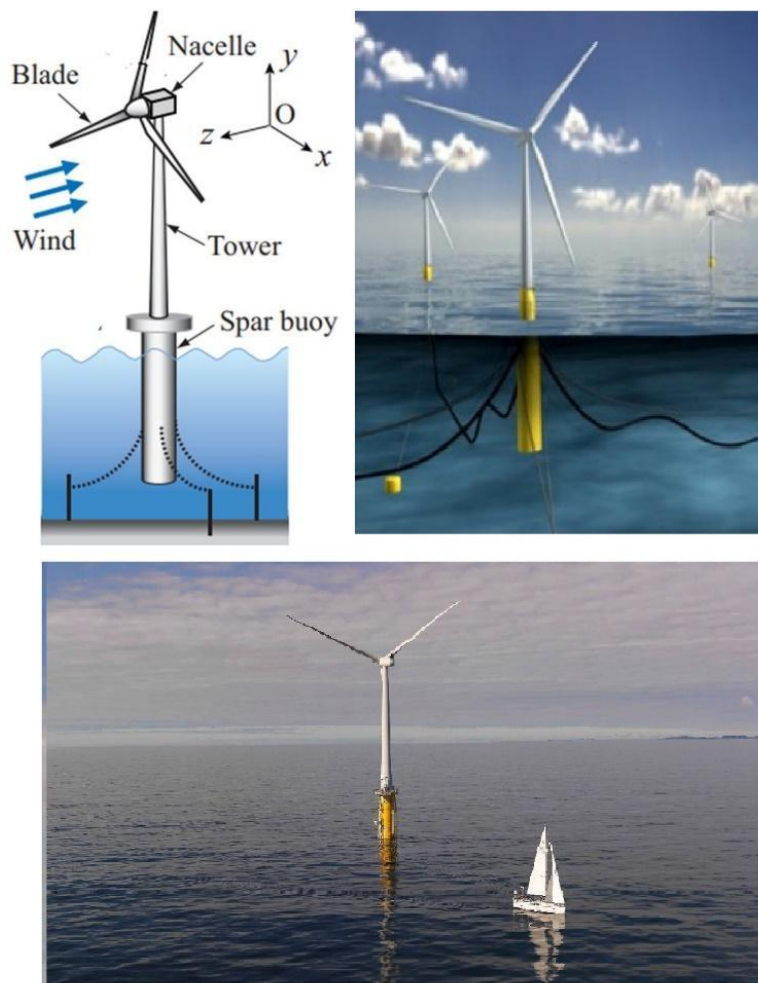


Figura 3 - FOWT di tipo Spar. In alto a sinistra: schema indicativo dei principali componenti della struttura [5]; in alto a destra: modello 3D del sistema Spar con ancoraggio a catenaria [11]; in basso: Spar Hywind installato in Scozia dal 2017 [5].

## 2.2 FOWT di Tipo Semi-Submersibile

Tra i diversi tipi di FOWT, il concetto di semisommersibile è probabilmente il più versatile. La fondazione galleggiante è costituita da grandi colonne cave, collegate tra loro da elementi tubolari (Figura 4). Le colonne forniscono la stabilità al galleggiante, e la piattaforma occupa una superficie relativamente ampia, quindi il tipo Semi-Submersibile è noto come *waterplane stabilized* o *column stabilized*. Una turbina eolica può essere posizionata su una delle colonne o, in alternativa, può essere posizionata al centro geometrico delle colonne e supportata da controventi laterali.

Il materiale generalmente usato per la costruzione è l'acciaio, ma non mancano esempi di applicazione del calcestruzzo armato (per la parte sommersa che fornisce la spinta di galleggiamento). Il livello di affondamento può essere variato agendo sul grado di riempimento della parte sommersa.

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 11 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

Uno dei vantaggi di questo tipo di FOWT è che la struttura flottante può essere assemblata a terra (o in una 'offshore dry dock', ossia una struttura galleggiante temporanea sulla quale sono garantite condizioni secche simili alla terraferma) e rimorchiata al sito di installazione, eliminando la necessità di imbarcazioni molto ampie e dotate di gru (Figura 10). I costi legati alle operazioni di manutenzione, grazie a questa semplicità nel trasporto, sono modesti rispetto ad altri tipi di FOWT, in quanto la piattaforma può essere scollegata dai suoi ormeggi e rimorchiata in cantiere. Un altro vantaggio è rappresentato dal fatto che il pescaggio è relativamente basso, consentendo dunque le installazioni anche in acque molto basse (<60 m, come ad esempio l'*Eolink* francese, installato a 30 m di profondità [8]).

Lo svantaggio di questo tipo di FOWT risiede nel fatto che queste strutture occupano una superficie relativamente grande e sono pertanto intrinsecamente esposte al forte carico delle onde. Inoltre, i periodi naturali di sollevamento, beccheggio e rollio possono avvicinarsi ai periodi di eccitazione dell'onda, con conseguente esercizio di carico dinamico sulla struttura. Questo effetto è spesso contrastato impiegando piastre di sollevamento nella parte inferiore delle colonne, che garantiscono una maggiore massa idrodinamica aggiuntiva e quindi rendono la risposta del sistema più lenta. Ad ogni modo, tipicamente, si cerca di evitare per quanto possibile che i tre periodi propri di oscillazione della struttura ricadano nell'intervallo prevalente dei periodi propri delle onde di mare (4-20 s).

Come nel caso del concetto della FOWT di tipo Spar, il *Semi-Submersible* viene tipicamente ormeggiato con un sistema a catenaria.

Esempi di semisommersibili sul mercato includono la fondazione *WindFloat* di *Principle Power* [10, 11] e, sebbene spesso classificata come una *barge*, il concetto di *Damping Pool* di *IDEOL* [13]. Altri semisommersibili includono il galleggiante *Shimpuu* del consorzio *Fukushima FORWARD* [14] e l'*OO-Star* di *Olav Olsen* [15].

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 12 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

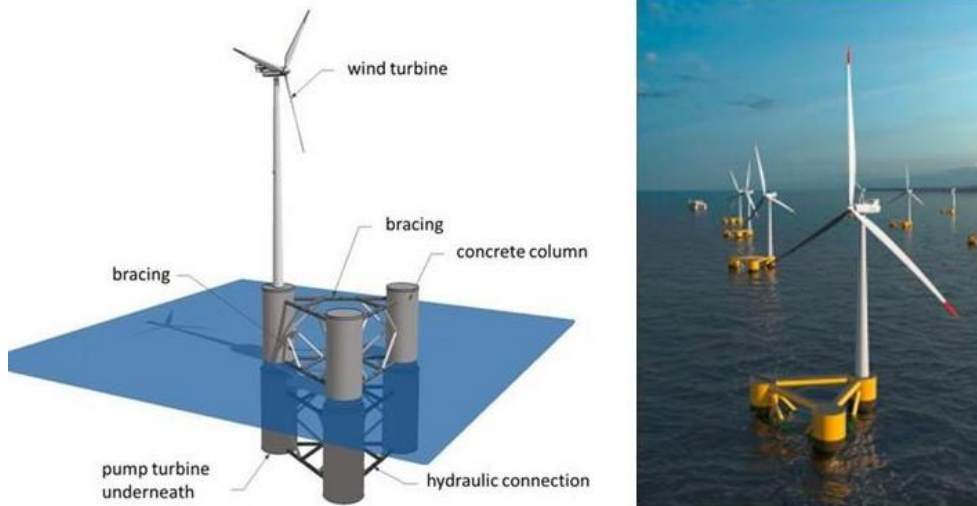


Figura 4 - Immagine a sinistra: Illustrazione grafica del Semi-Submersible e dei principali componenti della struttura [10]; Immagine a destra: Windfloat Semisubmersible Farm di Principle Power [11]

### 2.3 FOWT di Tipo Tension Leg Platform (TLP)

La turbina flottante di tipo *Tension Leg Platform* ottiene la sua stabilità direttamente dal sistema di ormeggio ed appartiene pertanto alla categoria *Mooring-Line Stabilized*. Nell'ingegneria offshore questo tipo di piattaforma viene utilizzata quando il posizionamento della piattaforma (*Station Keeping*) è il requisito fondamentale per il suo funzionamento. Differentemente dai sistemi a catenaria utilizzati nelle FOWT di tipo *Semi-Submersible* e *Spar*, infatti, i sistemi TLP garantiscono uno spostamento (*offset*) della piattaforma considerevolmente inferiore (circa il 5% della profondità).

Le TLP hanno una struttura simile alle FOWT di tipo *Semi-Submersible*, ma sono ancorate al fondo marino da linee di ancoraggio verticali (in pratica, tubi d'acciaio saldati di notevole spessore) mantenute in tensione dall'eccesso di spinta della piattaforma, che è forzata al di sotto del normale livello di galleggiamento. Questo meccanismo si traduce in un sistema molto stabile, con buone proprietà statiche e dinamiche.

Poiché la FOWT di tipo TLP non fa affidamento sulla forma e sulle dimensioni delle sue parti strutturali, consiste in una struttura notevolmente più leggera rispetto alle piattaforme di tipo *Spar* o *Semi-Submersible* (Figura 5), per cui i costi di fabbricazione possono risultare relativamente bassi. Tuttavia, gli oneri derivanti dall'installazione e manutenzione degli ormeggi e dei montanti-guida (noti come *Risers*) rendono le TLP una delle tipologie di piattaforme offshore più onerose.

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 13 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

La struttura più snella della TLP ha il vantaggio di essere meno suscettibile all'azione delle onde, rispetto, ad esempio, al *Semi-Submersible*. Poiché la FOWT di tipo TLP non è intrinsecamente stabile come il *Semi-Submersible*, tuttavia, un cedimento dei tiranti o degli ancoraggi provoca il collasso del sistema. Per essere in grado di resistere ai grandi carichi verticali, gli ancoraggi installati tramite trascinalimento (DEA, [Sezione 4.3](#)) non sono sufficienti, e sono richiesti sistemi più dispendiosi da un punto di vista economico ed ambientale, come i pali infissi (*Driven Piles*) o pali a suzione (*Suction Buckets*); talvolta, tuttavia, anche le ancore a gravità, meno impattanti, possono essere applicate.

Infine, similmente al *Semi-Submersible*, il sistema TLP prevede una procedura di assemblaggio a terra (o in una 'offshore dry dock') delle sue diverse componenti; successivamente la piattaforma è trainata al sito di installazione da opportune imbarcazioni ([Figura 10](#)).

Una turbina eolica di tipo TLP è stata installata al largo della costa pugliesi da *Blue H Technologies BV* [16]. Altri concetti di FOWT di tipo TLP sono *PelaStar* sviluppato da *Glosten* [17], *Eco TLP* [18] e *GICON-SOF* [19].



Figura 5 - Tipologia di FOWT stabilizzato con ormeggi. Immagine a sinistra: TLP conceptual scheme [16]. Immagine centrale: PelaStar TLP [17]; Immagine a destra: Eco TLP [18].

## 2.4 Alcuni Concetti Ibridi di FOWT

Ciascuna delle tre tipologie di FOWT analizzate, è caratterizzata da una serie di vantaggi e svantaggi. Con lo scopo di combinare le caratteristiche vantaggiose dei diversi modelli di FOWT, sono stati proposti svariati



Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 14 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

concetti ibridi. Due tecnologie che hanno dimostrato buone caratteristiche di stabilità sono *TetraSpar* di *Stiesdal Offshore Technologies* [21] e *SBM Offshore Wind Floater* [22] (rappresentati in [Figura 6](#)).

La FOWT di tipo *TetraSpar* mira a combinare le proprietà idrodinamiche dello Spar, con la bassa massa strutturale delle TLP, pur mantenendo il basso pescaggio di installazione del *Semi-Submersible*. Queste caratteristiche vengono ottenute tramite l'inserimento di una 'chiglia sospesa' ([Figura 6](#)) che può essere abbassata e zavorrata in modo incrementale durante il traino e l'installazione della fondazione, passando efficacemente da un *Semi-Submersible* a un tipo *Spar*.

Questo approccio è applicato anche nel concept *SBM Offshore TLP* [22]. Per annullare i problemi di instabilità dell'operazione di traino di un *TLP*, *SBM* ha optato per l'adeguamento del design in modo tale che la piattaforma si comporti come un *Semi-Submersible* durante il traino e passi a un sistema stabilizzato con tiranti solo quando arriva al sito di installazione. Anche in questo caso, tuttavia, si riducono i costi di fabbricazione, in quanto la struttura è molto leggera, ma si innalzano i costi di installazione e manutenzione del sistema di ormeggio-ancoraggio.

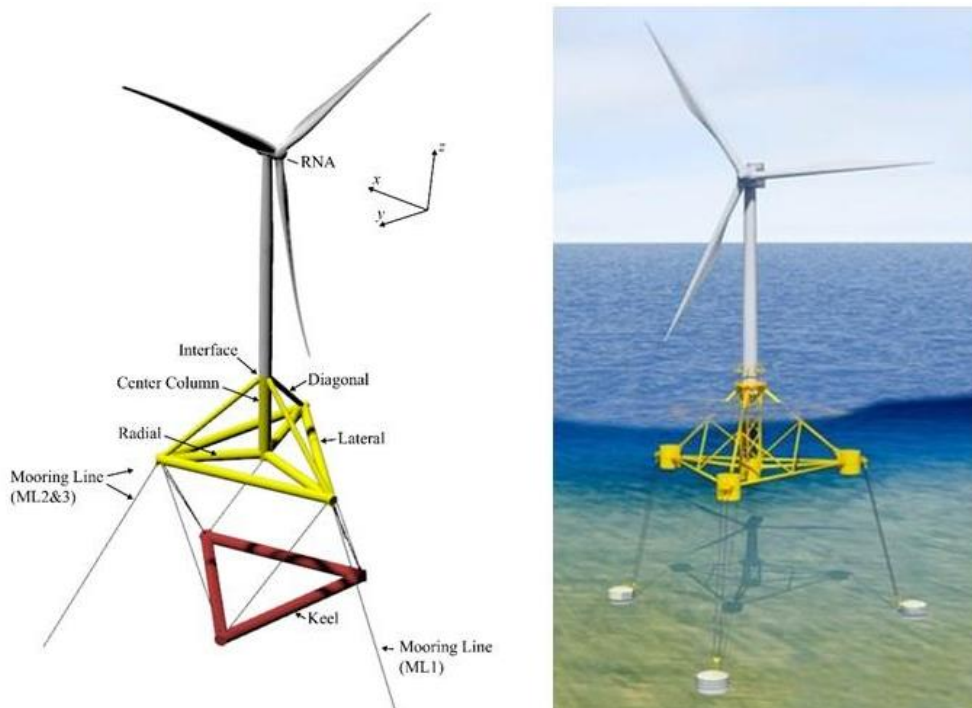


Figura 6 - Esempi di FOWT di tipo ibrido. Immagine a sinistra: TetraStar TLP [21]; Immagine di destra SBM TLP [22]

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 15 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormezzo ed Ancoraggio</b>		

Saipem e il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) portano avanti gli studi su un altro concept ibrido, noto come *Hexafloat*, del quale, nel 2021, è stato installato un prototipo in scala 1:6.7 presso il *MaRELab* (*Marine Renewable Energy Laboratory*) co-gestito dall'Università degli Studi della Campania e dal CNR ([Figura 7](#)).



Figura 7 - Hexafloat concept. Immagine a sinistra: struttura della piattaforma flottante esagonale e del sistema di ormezzo-ancoraggio. Immagine a destra: prototipo di Hexafloat in scala 1:6.7 installato presso il laboratorio MareLAB in Campania [23].

*Hexafloat* ha una struttura leggera, a pendolo, composta da: un galleggiante sommergibile costituito da elementi tubolari, un contrappeso collegato al galleggiante con elementi tesi, ed un ormezzo a catenaria con ancoraggio a trascinamento. La struttura è quindi *ballast-stabilized* come lo *Spar*, ma occupa una superficie relative ampia, similmente al *Semi-Submersible*, prevede l'utilizzo di un sistema spread a catenaria, ma include anche elementi tesi che sostengono il contrappeso. Sono stati proposti diversi altri concept ibridi per la struttura della base flottante, alcuni dei quali sono riportati in [Figura 8](#).

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 16 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

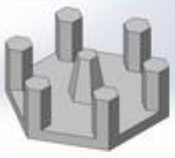
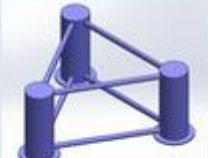



Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 4	Concept 5
				
Sea Flower	WindFloat	HyWind	Hexafloat	New concept

Figura 8 - Concetti di struttura flottante in fase di sviluppo [25]

Un altro concept promettente è la *Barge* proposta da BW-Ideol ([Figura 9](#)). Questa piattaforma appartiene alla categoria *buoyancy-stabilized* in quanto la stabilità è garantita dalla ampia superficie e dalla particolare forma ad anello della stessa [12, 25]. Dal 2018 sono in operazione due turbine flottanti progettate secondo questo concept, la *FLOATGEN* (2 MW) installata in acque francesi profonde 33 m e la *HIBIKI* (3 MW) installata in acque giapponesi ad una profondità di 55 m.

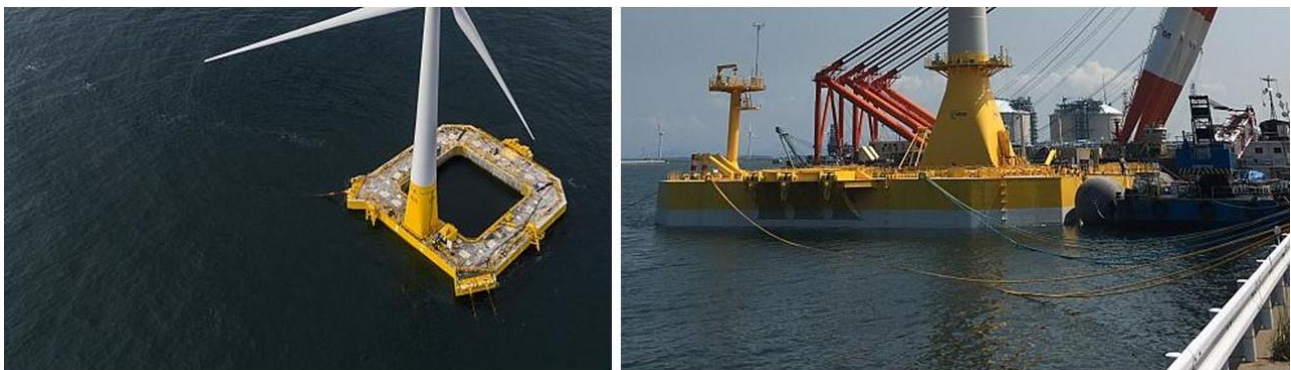


Figura 9 - Immagine di Sinistra: Floatgen installato in Francia dal 2018 (2 MW), ad una profondità di 33 m [24]; Immagine s Destra: HIBIKI, seconda piattaforma di BW-Ideol installata in Giappone dal 2018 ad una profondità di 55 m (3 MW) [24].

## 2.5 Confronto tra le Diverse Tipologie di FOWT

Nelle sezioni precedenti, si sono illustrate e discusse diverse tipologie di turbine flottanti, classificate principalmente secondo il loro meccanismo di stabilizzazione. In questa sezione, si opera un confronto riassuntivo tra le medesime. Le informazioni relative al confronto tra le tre tipologie di piattaforme sono riassunte in [Tabella 1](#).

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 17 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

Dal confronto tra le tre principali tipologie - *Spar*, *Semi-Submersible* e *TLP* - emerge che:

- Da un punto di vista strutturale, la FOWT di tipo *Spar* è la più snella ed è notevolmente più semplice del *Semi-Submersible* e del sistema *TLP*. L'aumento delle dimensioni delle turbine eoliche richiede un aumento della dimensione delle torri e delle sottostrutture, per cui spesso si richiede la realizzazione di mezzi di trasporto ad hoc per questo tipo di flottanti. Il trasporto in strada, la logistica nelle aree portuali, ed il trasporto delle turbine in mare, nonché la tecnica di installazione offshore, diventano pertanto fasi sempre più onerose. Questo ha particolarmente effetto sulle fondazioni di tipo *Spar*, ma anche sulle restanti tipologie. La struttura *TLP*, è particolarmente leggera rispetto alle restanti, ma la riduzione dei costi di fabbricazione è compensata da maggiori costi di installazione.
- La FOWT di tipo *Spar* ha un processo di installazione particolarmente costoso, in quanto la turbina è trasportata da apposite imbarcazioni di notevoli dimensioni, e messa in asse ed assemblata solo quando ha raggiunto il sito di installazione. Il *Semi-Submersible* e la *TLP* invece sono invece assemblati onshore e trainati al sito di installazione, dove vengono direttamente ormeggiati. Da questo punto di vista, le ultime due tipologie sono pertanto da preferirsi (come illustrato in [Figura 10](#)).
- I sistemi *Spar* e *Semi-Submersible* hanno in comune il sistema di ormeggio di tipo a catenaria, che ha il vantaggio di essere relativamente semplice nel design e ridotto nel costo del materiale. Tuttavia, il costo di questo sistema di ancoraggio diventa rilevante ad elevate profondità, ed occupa una superficie di fondale (footprint) più grande di quella effettivamente occupata dalla struttura flottante. Al contrario, il sistema *TLP* è caratterizzato da un sistema di ancoraggio a tiranti verticali, tale per cui la footprint sul fondale è circa pari alla superficie del flottante. In tale aspetto, pertanto, potrebbe essere preferibile un sistema *TLP* per un minor disturbo dei fondali.
- Il rischio associato al *failure* di un sistema *TLP* è più alto di quello associato ad un flottante ancorato con un sistema passivo a catenaria. La ridondanza nella progettazione dei sistemi di ormeggio è un aspetto rilevante da tenere in considerazione (come discusso in [Sezione 6.2.3](#)).
- Il sistema *TLP* assicura minori *offset* ed oscillazioni della piattaforma rispetto ai restanti sistemi. È resistente ai carichi associati all'azione delle onde, ma non è adatto a zone a rilevante escursione mareale; di conseguenza reagisce bene alle azioni ondose ma non bene allo *storm-surge*, ossia all'innalzamento medio marino durante le mareggiate.

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 18 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

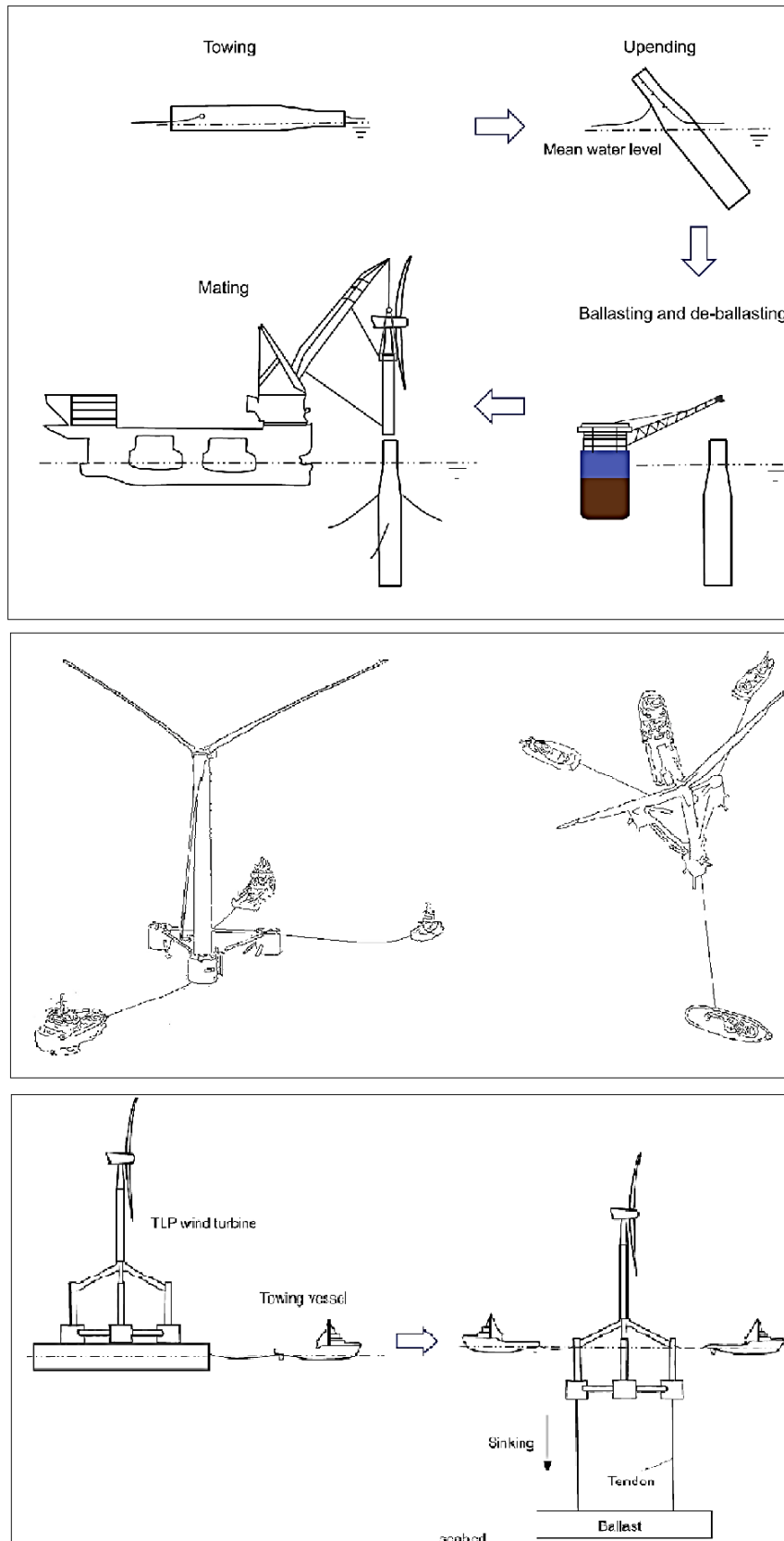


Figura 10 - I diversi metodi di Installazione per: Spar (immagine in alto); Semi-Submersible (immagine centrale) e TLP (immagine in basso) [26]

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 19 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeggio ed Ancoraggio</b>		

Tabella 1 - Vantaggi e Svantaggi delle tre tipologie di FOWT analizzate: Spar, Semi-Submersible e TLP [21]

	Vantaggi	Svantaggi
<b>Spar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Stabilità intrinseca</li> <li>✓ Buona resistenza alle condizioni meteomarine estreme</li> <li>✓ Buona adattabilità a diversi tipi di suolo</li> <li>✓ Semplici ed economici sistemi di ancoraggio</li> <li>✓ Bassi rischi operativi</li> <li>✓ Poco suscettibile a corrosione</li> <li>✓ Struttura semplice</li> <li>✓ Facili operazioni di produzione e mantenimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Offset relativamente ampio</li> <li>✗ Non adatto in acque poco profonde</li> <li>✗ Ampia <i>footprint</i> sul fondale marino</li> <li>✗ Lunghe catenarie possono avere un effetto rilevante sui costi</li> <li>✗ Complesso assemblaggio in acque profonde</li> <li>✗ Installazione complessa e costosa</li> <li>✗ La struttura è molto lunga e pesante, dunque, il trasporto è molto complesso e costoso</li> <li>✗ Fatica alta alla base della <i>torre</i></li> </ul>
<b>Semi-Submersible</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Applicabile ad un ampio range di profondità</li> <li>✓ Buona adattabilità a diversi tipi di suolo</li> <li>✓ Semplici ed economici sistemi di ancoraggio</li> <li>✓ Bassi rischi operativi</li> <li>✓ Assemblaggio a terra o in bacino di carenaggio flottante</li> <li>✓ Semplice installazione</li> <li>✓ Le piastre poste alla base delle colonne riducono il sollevamento del flottante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Ampio offset ed ampie oscillazioni di rollio e beccheggio</li> <li>✗ Sensibilità al carico delle onde</li> <li>✗ Ampia <i>footprint</i> sul fondale marino</li> <li>✗ Lunghe catenarie possono avere un effetto rilevante sui costi</li> <li>✗ Soggetto a corrosione</li> <li>✗ Strutture grandi e complesse comportano non semplici operazioni di manifattura e manutenzione</li> <li>✗ Costo della struttura alto</li> <li>✗ La turbina subisce maggiori carichi per via del sollevamento della piattaforma durante condizioni di mareggiata</li> </ul>
<b>TLP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ottima stabilità, offset ed oscillazioni minime</li> <li>✓ Buona resistenza ai carichi dovuti alle onde</li> <li>✓ Buona resistenza alle condizioni meteomarine estreme</li> <li>✓ Adatto anche a profondità intermedie</li> <li>✓ Ridotta footprint sul fondale marino</li> <li>✓ Lunghezze ridotte delle linee di ormeggio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Bassa resistenza a forti correnti di marea e all'innalzamento del livello marino durante le condizioni estreme</li> <li>✗ Non adatto a basse profondità</li> <li>✗ Non adatto a tutte le condizioni e tipologie di suolo</li> <li>✗ Complesso e costoso sistema di ormeggio ed ancoraggio</li> <li>✗ Gravi rischi legati al <i>failure</i> di una linea di ormeggio</li> </ul>



Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 20 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

	<input checked="" type="checkbox"/> Poco suscettibile alla corrosione <input checked="" type="checkbox"/> Struttura relativamente semplice e leggera, di facile mantenimento <input checked="" type="checkbox"/> Assemblaggio a terra o in bacino di carenaggio flottante	<input checked="" type="checkbox"/> Installazione e dismissione dell'impianto complesse e costose <input checked="" type="checkbox"/> Alti carichi esercitati sugli ancoraggi, ormeggi, e struttura flottante durante tutta la vita utile dell'impianto
--	---	--

### 3 Tipologie di Sistemi di Ormeaggio per FOWT

Le linee di ormeggio per FOWT si classificano in base alla geometria o in base alla funzionalità, come descritto nel seguito.

#### 3.1 Classificazione Geometrica dei Sistemi di Ormeaggio

Un aspetto fondamentale nella progettazione del sistema ormeggi-ancoraggi è la configurazione geometrica degli stessi, ossia il *layout* del sistema di ancoraggio, scelto non solo in funzione del tipo di piattaforma ma anche in funzione delle sollecitazioni idrodinamiche agenti sulla stessa e delle caratteristiche geologiche del fondale. Nel definire il layout degli ancoraggi, si definisce il numero di linee di ormeggio ed il loro orientamento rispetto alla direzione di maggior sollecitazione idrodinamica (risultante dalla combinazione di onde e correnti nel sito di installazione).

La classificazione secondo la geometria distingue ormeggi di tipo diffuso (o *Spread*) ed ormeggi a punto singolo (*Single-Point*). In [Figura 11](#) si riportano le illustrazioni relative ai due sistemi. Il sistema *Spread* è caratterizzato da molteplici linee di ormeggio connesse alla piattaforma flottante in diversi punti della stessa. Il sistema di ormeggio di tipo *Single Point* invece prevede molteplici linee connesse ad un unico punto del flottante. In tal caso gli ormeggi connettono il centro di rotazione del flottante al fondale marino.

Con un sistema di tipo *Spread* si consente un movimento orizzontale del corpo flottante che viene limitato nella fase di design in funzione delle necessità funzionali della piattaforma. Il sistema di tipo *Single Point* (che ha anche altre sottocategorie qui non elencate) permette una maggiore mobilità del flottante sulla superficie del mare, in quanto lo stesso è libero di ruotare attorno al centro di rotazione, in funzione del vento e delle azioni idrodinamiche.

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 21 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeggio ed Ancoraggio		

Per le FOWT sono principalmente utilizzati sistemi di tipo *Spread*; un esempio invece di FOWT ormeggiata con metodo *Single-Point* è la *X1Wind* (immagine di destra in [Figura 11](#)), noto anche come *Pivot Buoy*, del quale un prototipo in scala 1:3 è stato recentemente installato nelle acque delle isole Canarie (Spagna), in particolare al sito noto come *Plocan (Plataforma Ocenica de Canarias)*.



Figura 11 - Classificazione dei sistemi di ormeggio in base alla geometria. Immagine a sinistra: Ormeggio di tipo Spread generalmente applicato nelle FOWT di tipo Spar e Semi-Submersible. Immagine a destra: sistema Single-Point applicato nel concept X1Wind [27].

### 3.2 Classificazione Funzionale dei Sistemi di Ormeggio

I sistemi di ormeggio delle strutture galleggianti per aerogeneratori assumono compiti differenti in funzione del metodo adottato per mantenere stabili le stesse strutture. Nei casi delle strutture galleggianti *stabilizzate con peso o con forma* (cioè *Ballast-stabilized* come la tipologia Spar o *Buoyancy-stabilized* come la tipologia *Semi-Submersible*) le linee di ormeggio hanno fundamentalmente il compito di garantire che le stesse strutture mantengano la loro posizione seppure con ampi movimenti, mentre la stabilità delle medesime è garantita rispettivamente dalla distribuzione del loro peso e dalla loro forma. In questi casi, si adotta generalmente un sistema di ormeggio lasco (o 'passivo'). Viceversa, nel caso delle strutture galleggianti stabilizzate dalle linee di ormeggio (*Mooring Stabilized*), gli ormeggi hanno il compito sia di stabilizzare la

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 22 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

struttura galleggiante che di garantire che la stessa mantenga la sua posizione: è questo il caso della FOWT di tipo *TLP* che pertanto utilizza ormeggi di tipo 'attivo'.

La classificazione funzionale degli ormeggi, pertanto, distingue ([Figura 12](#)):

- Ormeaggio di tipo lasco o '*Slack*'

Le linee di ormeaggio sono lasche e permettono alla piattaforma flottante un certo grado di oscillazione e traslazione. Questo sistema è noto come ormeaggio 'a catenaria', in quanto è caratterizzato dall'utilizzo di catene in acciaio il cui peso mantiene in posizione la piattaforma galleggiante. Le lunghe catenarie sono in parte appoggiate sul fondale per ridurre i carichi orizzontali agenti sulle ancore. Sebbene il peso delle cime di ormeaggio limiti le risposte di movimento della piattaforma galleggiante, essa ha una maggiore libertà di movimento rispetto alle altre configurazioni. La procedura di installazione del sistema di ormeaggio a catenaria è relativamente semplice rispetto all'installazione di un sistema ad elementi tesi.

- Ormeaggio ad elementi tesi o '*Taut*'

Sono utilizzati quando vi è la necessità di minimizzare il movimento della piattaforma: in tal caso le linee di ormeaggio sono tese e fungono da tiranti. Il tipo di sollecitazioni cui sono sottoposti i tiranti, rispetto alle catenarie, è molto differente; pertanto, sia i criteri di dimensionamento che le caratteristiche geometriche ed i materiali utilizzati sono diversi. La procedura di installazione richiede la fase di 'pretensionamento' dei cavi, che include particolari e costose operazioni (NB: si definisce 'pretensione', la tensione nelle linee di ormeaggio in un 'ambiente zero', ossia in assenza di vento, onde e correnti).

- Ormeaggio ad elementi semi-tesi o '*Semi-Taut*'

I sistemi ibridi di tipo *Semi-Taut* sono caratterizzati da una buona resistenza sia a carichi orizzontali (similmente ai sistemi *Slack*) che verticali (similmente ai sistemi '*Taut*'). In alcuni casi si realizzano tramite l'utilizzo di catenarie semi-tese: si mantiene quindi il materiale tipico dei sistemi *Slack*, con una pretensione delle linee tipica della tipologia *Taut*.

- Ormeaggio ad elementi tesi verticali o '*Tension Leg*'

Un caso particolare di ormeaggio *Taut* è il sistema ad elementi tesi verticali, che è un sistema di tipo *Spread* (quindi le linee di ormeaggio sono connesse a diversi punti del flottante) con linee di ormeaggio

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 23 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeggio ed Ancoraggio		

tese verticalmente verso il fondale marino. Questo caso di ormeggio è quello utilizzato dalla *Tension Leg Platform (TLP)*, al punto che questo sistema di ormeggio è spesso denominato proprio “*Sistema di Ormeggio TLP*”.

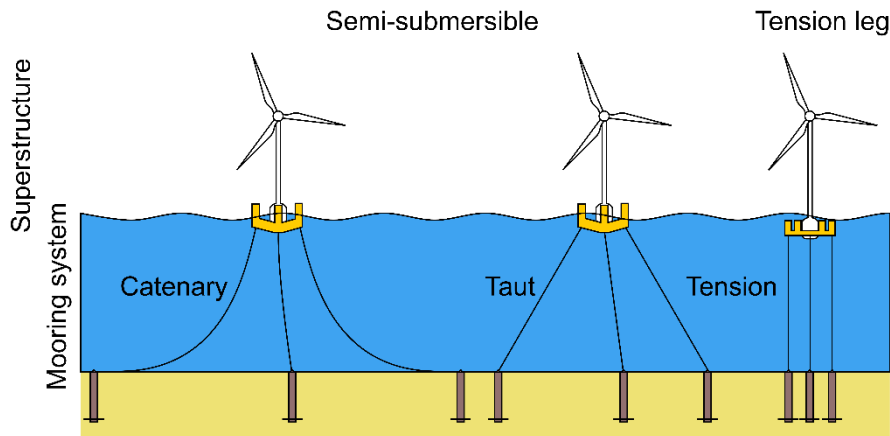


Figura 12 - Classificazione dei sistemi di ormeggio in base alla funzionalità. Da sinistra: Sistema lasco (Catenaria), sistema ad elementi semi-tesi (Semi-Taut), sistema ad elementi tesi (Taut) e sistema ad elementi tesi verticali (Tension Leg Platform) [29]

Una differenza evidente tra i diversi tipi di ormeggio elencati è la superficie di fondale marino (footprint) occupata dal sistema. Escludendo i casi di configurazione *Single Point*, la configurazione TLP vanta, da questo punto di vista, il minor disturbo al fondale. Tuttavia, come analizzato in dettaglio in [Sezione 4](#), l'ormeaggio di tipo TLP richiede talvolta (in funzione delle caratteristiche geologiche del fondale) l'utilizzo di ancoraggi che disturbano di più rispetto agli ancoraggi utilizzati nel caso dei sistemi a catenaria. Dunque, anche dal punto di vista ambientale, la selezione del sistema ormeaggio-ancoraggio richiede specifiche analisi che tengano in conto di una moltitudine di variabili ed alternative progettuali.

Le principali caratteristiche dei sistemi di tipo *Slack* e *Taut* sono sinteticamente rappresentate in [Tabella 2](#), mentre esempi di applicazione di sistemi di ormeggio per FOWT sono riportati, con le relative profondità di installazione, in [Tabella 3](#) [20].

Tabella 2 - Principali caratteristiche a confronto del sistema di ormeggio a catenaria e del sistema ad elementi tesi [20].

	Ormeggio a Catenaria (Slack)	Ormeggio ad Elementi Tesi (Taut)
Connessione al fondo	Orizzontale	Orizzontale e Verticale

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 24 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormezzo ed Ancoraggio</b>		

<b>Carichi sugli ancoraggi</b>	Bassi, direzione orizzontale	Alti, sia in direzione orizzontale, che verticale
<b>Forza stabilizzante</b>	Peso degli ormezzi	Elasticità degli ormezzi
<b>Gradi di libertà</b>	Consentito offset orizzontale	Offset orizzontale quasi assente
<b>Disturbo del fondale</b>	Disturbo sul fondale da appoggio catenaria; ampia area interessata	Disturbo da sistema di ancoraggio; ristretta area interessata
<b>Materiali</b>	Catene o funi in acciaio	Fibre o funi sintetiche
<b>Applicazioni tipiche</b>	<i>Spar &amp; Semi-Submersible</i>	<i>TLP</i>
<b>Principale vantaggio</b>	Basso costo degli ormezzi-ancoraggi	Ridotta footprint ed adattabilità in acque molto profonde
<b>Principale svantaggio</b>	Ampia footprint sul fondale	Alto costo degli ancoraggi
<b>Esempio industriale</b>	<i>Hywind (Statoil)</i>	<i>Floatgen (Ideol)</i>

Tabella 3 - Tipologie di ormezzo utilizzate in alcune turbine flottanti. Si indica il nome del progetto, la tipologia di FOWT e la profondità di installazione [20].

Progetto	Tipo di FOWT	Profondità di Installazione (m)	Tipo di Ormezzo
Kinkardine	Semi-Submersible	70	Spread a Catenaria
Fukushima Mirai	Semi-Submersible	120	Spread a Catenaria
Fukushima Shimpuu	Semi-Submersible	120	Spread a Catenaria
X1 Wind	Semi-Submersible	50	Single-Point a Catenaria
Hywind Scotland	Spar	100-120	Spread a Catenaria
Sea Twirl S1	Spar	35	Spread a Catenaria
Goto	Spar	97	Spread a Catenaria
Fukushima Kizuna	Spar	100-120	Spread a Catenaria
Fukushima Hamakaze	Spar	120	Spread a Catenaria
Hywind Norway	Spar	186-204	Spread a Catenaria
Floatgen	Barge	33	Spread Semi-Teso
Hibiki	Barge	55	Spread a Catenaria

## 4 Tipologie di Sistemi di Ancoraggio per FOWT

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 25 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

La selezione ed il dimensionamento dei sistemi di ancoraggio per turbine eoliche offshore richiede la considerazione di molteplici aspetti, che includono le caratteristiche geometriche della turbina, la tipologia di struttura flottante, la soluzione di ormeaggio ed i carichi cui esso è soggetto, le caratteristiche geomorfologiche e stratigrafiche del suolo ed in particolare dei punti in cui verranno posizionati gli ancoraggi stessi. Come per il caso degli ormeaggi, il design degli ancoraggi di una FOWT richiede un adattamento delle tecniche e tecnologie già utilizzate nell'ambito dell'*O&G Industry*.

I tipi di ancoraggio comunemente utilizzati nell'*O&G Industry* sono illustrati in [Figura 13](#). L'ordine è indicativo dell'applicabilità di tali sistemi per crescenti profondità [28].

1. *Ancore a Gravità (Dead Weight Anchors)*
2. *Pali Infissi (Driven Pile Anchors)*
3. *Ancore a Trascinamento (Drag Embedded Anchors, DEA)*
4. *Pali a Suzione (Suction Pile Anchors)*
5. *Ancore Installate a Gravità (Gravity installed Anchors)*
6. *Ancore Caricate Verticalmente (Vertically loaded Anchors, VLA)*

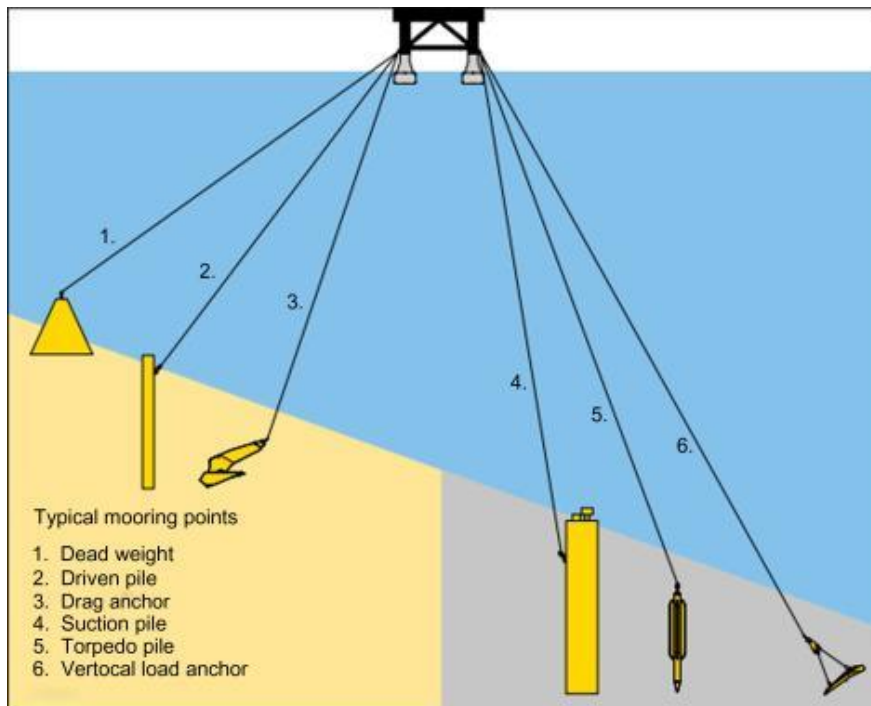


Figura 13 - Tipologie di ancore utilizzabili per FOWT a diverse profondità [28, 33].



Progetto	Preliminare	Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 26 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

#### 4.1 Ancore a Gravità (*Dead Weight Anchors, DWA*)

L'ancora a gravità (Peso Morto o *Dead Weight Anchor, DWA*) è la soluzione di ancoraggio più semplice in quanto consiste in un oggetto pesante, connesso alla linea di ormeaggio, poggiato sul fondale marino. Questo tipo di ancoraggio resiste, in generale, sia ai carichi verticali che orizzontali trasmessi dalla linea di ormeaggio. La capacità di tenuta delle *DWA* a tali carichi deriva principalmente dal peso dell'ancora stessa e dall'attrito che essa genera con il fondale. Le *DWA* sono tipicamente realizzate in calcestruzzo.

Un'ancora a gravità è realizzata generalmente in calcestruzzo. Uno dei vantaggi di questo tipo di ancoraggio è legato al fatto che non si necessitano perforazioni del fondale per l'installazione; questo comporta tre ulteriori vantaggi: a) un minimo impatto ambientale nel processo di installazione degli ancoraggi; b) una facile (dunque economica) operazione di recupero dell'ancora dal sito di installazione e c) l'adattabilità a tutti i tipi di fondale, incluso fondali rocciosi.

Ad oggi esistono tipi di ancore a gravità che hanno diverse caratteristiche strutturali a seconda che siano utilizzate per FOWT che esercitano spinte principalmente verticali sugli ancoraggi (come le TLP, vedi immagine a sinistra di [Figura 14](#)) oppure per FOWT con ormeaggio a catenaria, come i Semi-Submersible, che subiscono principalmente spinte orizzontali. In tal caso sono talvolta aggiunte le cosiddette *shear keys* (immagine a destra di [Figura 14](#)), che aumentano il coefficiente di attrito tra ancora e suolo e dunque la capacità di tenuta laterale [31].

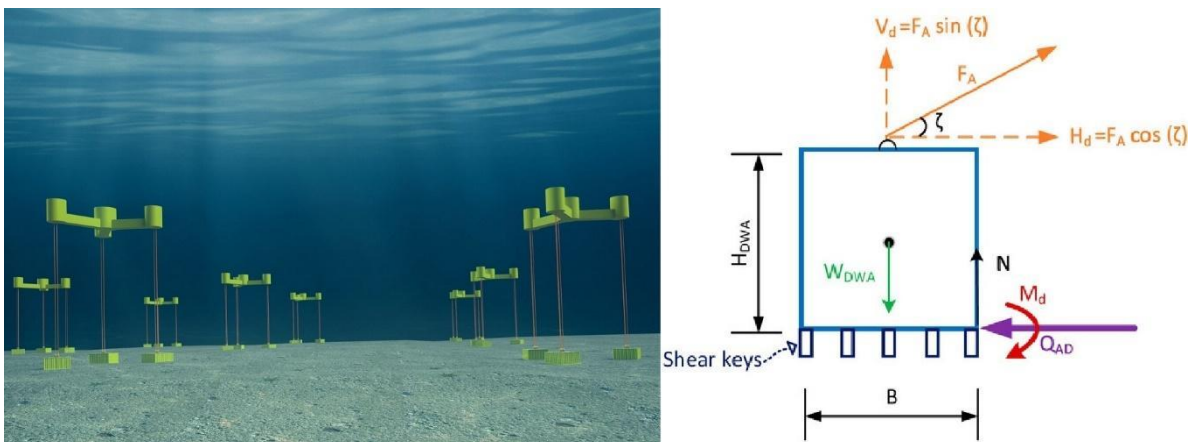


Figura 14 - Immagine a sinistra: Modello di ancora a gravità per strutture TLP [45]; Immagine a destra: Schema di ancora a gravità con Shear Keys con indicazione di forze e momenti da tenere in conto nel dimensionamento [31].

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 27 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

Utilizzando un processo iterativo, è possibile valutare la dimensione dell'ancoraggio (cuboidale o cilindrico) e delle shear keys necessarie perché l'ancora possa resistere allo scorrimento  $Q_{AD}$ , e il *Momento Ribaltante*,  $M_d$  (Figura 14), come illustrato sinteticamente da Bañuelo-Garcia et al., "A Design Procedure for Anchors of Floating Ocean Current Turbines on Weak Rock" [31].

#### 4.2 Pali Infissi (*Driven Pile Anchors*)

I pali battuti sono tubi di grande diametro (1–3 m), relativamente semplici da fabbricare. Possono essere installati in un'ampia gamma di condizioni del suolo, e garantiscono resistenze a carichi molto elevati. Pertanto, in linea di principio, sono adatti per il supporto di FOWT di tipo *TLP*, ma avendo anche un'alta resistenza ai carichi orizzontali, sono una buona opzione anche per il sistema di ormeaggio a catenaria, e dunque per le FOWT di tipo *Semi-Submersible* e *Spar*. La procedura di infissione dei pali aumenta di complessità per profondità crescenti.

I limiti di questa tecnologia risiedono principalmente nel disturbo all'ambiente marino generato durante l'installazione dei pali e nella difficile rimozione degli stessi, nonché ai costi legati proprio a queste due operazioni. Di contro, questa soluzione è tra le più affidabili, raggiungendo resistenze di sollevamento dell'ordine di migliaia di tonnellate.

#### 4.3 Ancore a Trascinamento (*Drag Embedded Anchors, DEA*)

Le *Drag Embedded Anchors (DEA)* sono così definite perché il posizionamento avviene posando l'ancora sul fondale marino, e trascinando la stessa fino ad un certo grado di penetrazione del fondale, che garantirà la resistenza ai carichi applicati. La struttura dell'ancoraggio comprende una sezione di testa ad uncino (detta *fluke*) che penetra nel fondo per via della spinta esercitata dalla linea di ormeaggio sulla sua parte centrale (detta *shank*) (Figura 15). Molte tipologie di *DEA* possiedono inoltre un sistema stabilizzante, che previene la rotazione e lo sfilamento delle stesse all'esterno del fondale marino [32].

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 28 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

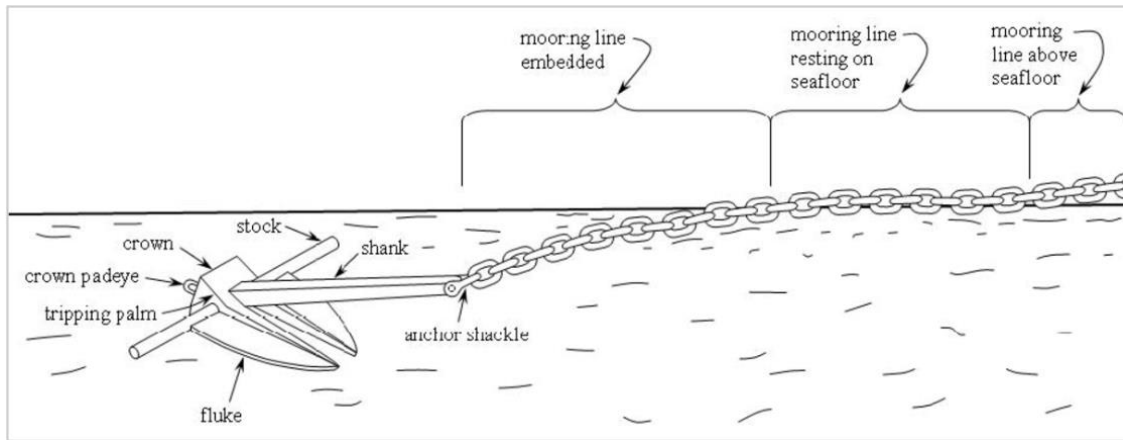


Figura 15 - Ancora a trascinamento (Drag Embedded Anchor). La linea di ormeggio è in parte infissa nel suolo, in parte appoggiata sul suolo per ridurre i carichi sull'ancora. [32]

Il trascinamento della DEA avviene su una distanza che dipende dalla geometria dell'ancora stessa dipende sia dall'angolo di apertura del *fluke* (indicato con  $\beta$  in [Figura 16](#)) sia dalle caratteristiche del fondale. La penetrazione del *fluke* nel fondale si interrompe quando si è raggiunto un equilibrio tra la tensione nella linea di ormeggio e la capacità di tenuta nel suolo [32]. Ne deriva una maggiore capacità di penetrazione delle DEA in fondali limosi-argillosi rispetto a fondali sabbiosi, a parità di distanza di trascinamento, come illustrato in [Figura 16](#).

Le DEA presentano alte resistenze ai carichi orizzontali, rendendosi particolarmente adatte ai tipi di ormeggio a catenaria.

Gli svantaggi di questo tipo di ancoraggio consistono, da un lato, nell'impossibilità di calcolare in anticipo il preciso posizionamento finale dell'ancora, dall'altro nella scarsa applicabilità in terreni a medio-alta consistenza, nei quali le ridotte penetrazioni del sistema *fluke-shank* si traducono in basse capacità di carico.

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 29 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

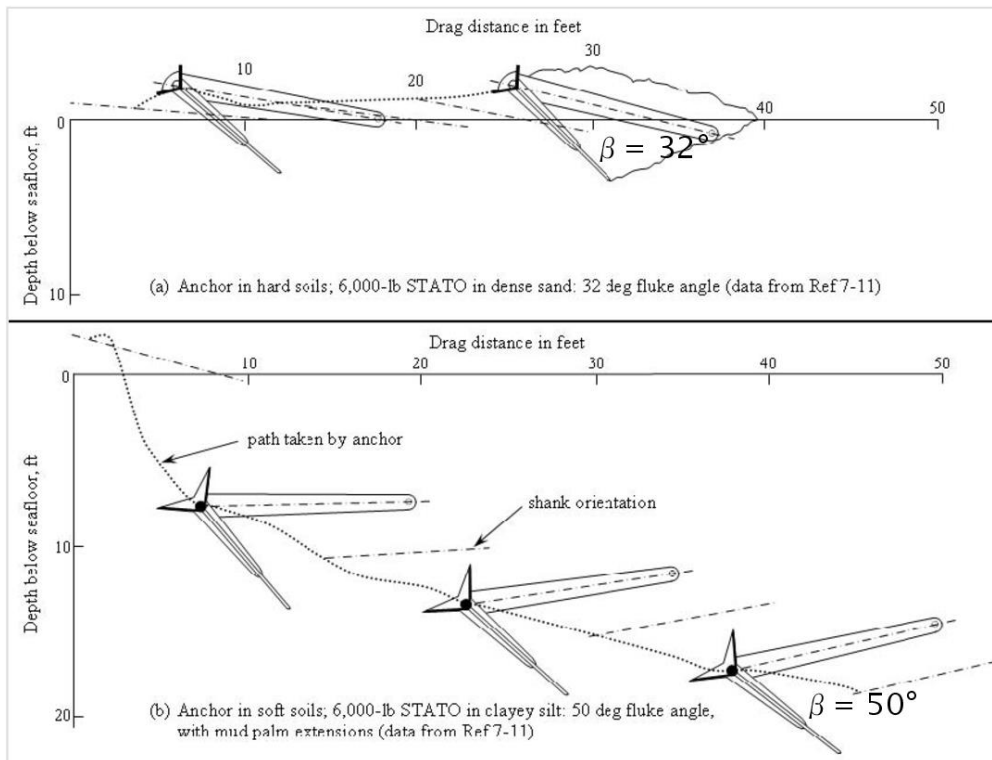


Figura 16 - Differente capacità di penetrazione del suolo di una DEA in funzione dell'angolo di apertura del fluke ( $\beta$ ) ed in funzione delle diverse caratteristiche del suolo. Immagine in alto:  $\beta=32^\circ$  in suolo sabbioso ad alta densità. Immagine in basso:  $\beta=32^\circ$  in suolo limoso-argilloso a bassa densità [32].

#### 4.4 Pali a suzione (*Suction Piles or Suction Buckets*)

I pali a suzione (detti anche cassoni a suzione o *Suction Buckets*) sono ancoraggi cilindrici cavi, di grande diametro (fino a 4-6 m), che vengono installati sul fondo mediante una prima fase di penetrazione parziale nel substrato, ed una seconda fase in cui l'acqua intrappolata nella parte superiore del palo viene "aspirata" tramite una valvola posta sulla parte superiore (Figura 17).

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 30 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

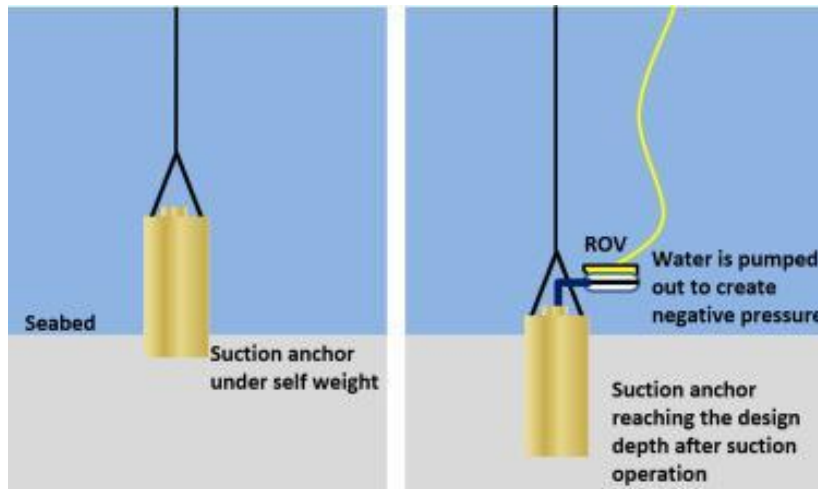


Figura 17 - Ancore o Pali a Suzione (Suction Piles or Buckets). Immagine a sinistra: fase 1 dell'installazione del palo a suzione tramite caduta del corpo sul fondo. Immagine a destra: fase 2 dell'installazione del palo a suzione tramite sistema di aspirazione [33]

Nel caso di pali a suzione, a differenza dei pali infissi, la procedura di installazione non comporta un grave disturbo all'ambiente marino, in quanto il palo penetra principalmente per via del proprio peso, come illustrato in figura.

Le proporzioni del palo (rapporto tra lunghezza e diametro) sono tipicamente nei seguenti intervalli:

- Per sabbie dense: meno di 1,5
- Per argille rigide, tra 1,5 e 3
- Per argille morbide, maggiore di 5

Lo spessore del materiale costituente le pareti laterali dei *Suction Buckets* è relativamente sottile. I rapporti tipici tra diametro e spessore della parete sono compresi tra 125 e 160, in contrasto con 10-40 per i pali infissi. Questo tipo di ancoraggio è stato utilizzato sia per piattaforme del tipo TLP [33, 34], che per sistemi di ormeggio a catenaria.

Con il pre-dimensionamento del *Suction Bucket* si definisce 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 è per definizione fornita dalla seguente relazione:

$$Q_s = \pi \cdot D \int_0^L \tau_z \cdot dz \quad [\text{Eq. 1}]$$

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 31 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

Dove  $D$  è il diametro del palo,  $L$  è la lunghezza del palo (nonché la profondità di infissione),  $z$  è la coordinata verticale e  $\tau_z$  è la tensione tangenziale di attrito all'interfaccia tra il palo e il terreno coesivo saturo circostante, al variare della quota verticale  $z$ . La tensione dipende dall'alterazione delle pressioni efficaci e interstiziali che le modalità di infissione del palo producono nel terreno. Si assume che le tensioni tangenziali limite siano una quota parte della resistenza al taglio non drenata ( $c_u$ ) originaria del terreno indisturbato:

$$\tau_z = \alpha \cdot c_u \quad [\text{Eq. 2}]$$

in cui  $\alpha$  è un coefficiente empirico di aderenza, che varia tra 0 ed 1, e che dipende dal tipo di terreno, dalla resistenza al taglio non drenata del terreno indisturbato, dal metodo di costruzione del palo, dalla profondità e dal cedimento del palo.

#### 4.5 Ancore installate a gravità (Gravity Installed Anchors)

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 peso, questo raggiunge la velocità limite e impatta al suolo con una penetrazione dovuta alla velocità di caduta libera causata dalla gravità. Se per qualsiasi motivo la profondità di installazione non si ritiene sufficiente, l'ancora può essere recuperata e reinstallata. Tipicamente la penetrazione può raggiungere i 9-15 metri nel substrato del fondale.

L'ancora *OMNI-Max*, sviluppata da *Delmar Systems* ([Figura 18](#)) è una tipologia di ancora a gravità che può essere installata in alternativa ai *Suction Buckets*, offrendo prestazioni simili e costi molto ridotti. L'ancora viene prima abbassata da un *AHV* (*Anchor Handling Vessel*, ossia un'imbarcazione che esegue specificatamente la funzione di supporto alla installazione di ancoraggi) ad un'altezza predefinita. Una volta che l'ancora si trova alla corretta elevazione dal fondale, viene azionato un attuatore di rilascio remoto e l'ancora viene lasciata cadere sul fondale. Dopo essere stata tirata dalla cima di ormeaggio, l'ancora ruota e penetra ancora più in profondità nel terreno, raggiungendo la capacità di tenuta verticale e orizzontale desiderata.



Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab.	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 32 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

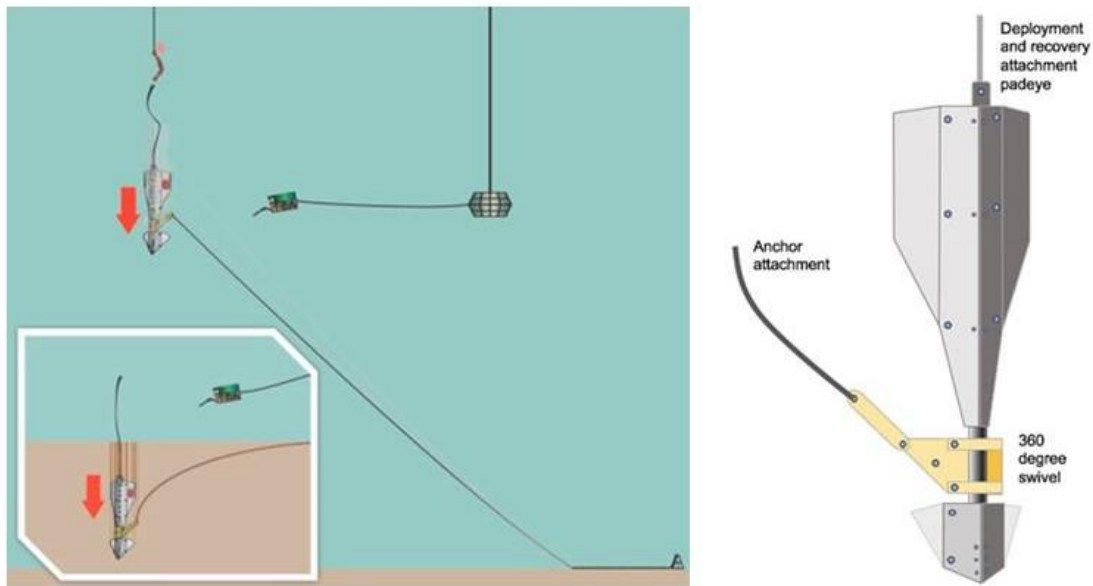


Figura 18 - Ancora installata a gravità OMNI-Max, sviluppata da Delmar Systems [33].

Ci sono diversi vantaggi relazionati all'utilizzo di questa tipologia di ancora:

- ✓ È un'ancora di dimensioni relativamente piccole. Rispetto ai *Suction Buckets* è circa il 50% più piccola.
- ✓ Ha un braccio di attacco per ormeggio omnidirezionale, facilitando notevolmente anche le operazioni di installazione.
- ✓ Grazie alle alette regolabili, l'attrito laterale che può essere raggiunto può essere notevolmente maggiore rispetto ai *Suction Buckets*.
- ✓ Per recuperare l'ancora, l'argano della nave tira una apposita cima di recupero attaccata alla parte superiore dell'ancora stessa.

#### 4.6 Ancore Caricate Verticalmente (*Vertically Loaded Anchors, VLA*)

Le *Vertically Loaded Anchors (VLA)* sono un tipo di *Ancore a Trascinamento (DEA)* realizzate per raggiungere elevate resistenze ai carichi verticali. Le *DEA* - in particolare in terreni argillosi a bassa consistenza - non raggiungono profondità di installazione tali da garantire la sicurezza a tali carichi.

La differenza nella struttura di una *VLA* con una *DEA* è che il corpo centrale dell'ancora (*Shank*) è libera di ruotare attorno al punto di connessione (*Pin Connection*) con la parte anteriore (*Fluke*), come illustrato in

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 33 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormezzo ed Ancoraggio		

[Figura 19](#). Questo permette al sistema di sopportare non solo carichi orizzontali (come le *DEA*) ma anche notevoli carichi verticali (perpendicolari al *Fluke*).

Per questo motivo la tipologia VLA è un'opzione valida nel caso di ancoraggi a carico verticale, come quelli della FOWT di tipo TLP nelle quali l'angolo tra il fondale ed il sistema di ormeggio è pari a 90°.

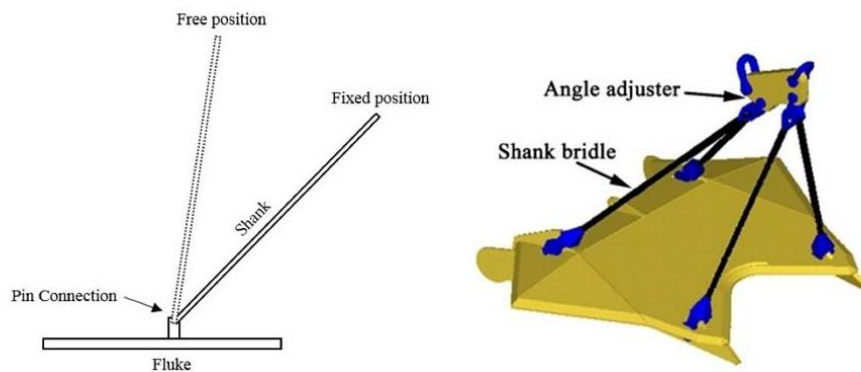


Figura 19 - Ancora caricata verticalmente (Vertically Loaded Anchor, VLA).

## 5 Sistemi di Ormezzo-Ancoraggio Realizzati in Precedenti Progetti di FOWT

### 5.1 Sistema di Ormezzo-Ancoraggio per FOWT di tipo Spar

Come accennato nelle sezioni precedenti, la piattaforma di tipo Spar è generalmente abbinata a sistemi di ormeggio passivo a catenaria. Le numerose sperimentazioni basate su modelli fisici e numerici, per questo tipo di FOWT, hanno tuttavia sperimentato diverse configurazioni e tipologie di ormeggio, incluso sistemi *Taut* ed ibridi di tipo *Semi-Taut*.

Il sistema di ormeggio delle FOWT di tipo Spar può comprendere sei linee di ormeggio per un design con ridondanza ( $3 \times 2$ , tre gruppi con due linee per gruppo) o tre linee di ormeggio ( $3 \times 1$ ) per un design senza ridondanza.

Il primo parco eolico galleggiante, *Hywind Scotland* realizzato da *Equinor* ed installato circa 25 km a largo delle coste di *Peterhead* [33] include 5 turbine da 6 MW ciascuna, disposte reciprocamente come indicato in [Figura 20](#), occupando complessivamente un'area di 4 km<sup>2</sup>. Il parco, che è entrato in fase produttiva nell'Ottobre del 2017, alimenta circa 20.000 unità abitative. La profondità di installazione è compresa tra i 95

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 34 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

ed i 120 m ed il pescaggio massimo (maximum *drift*) è di 78 m, ossia circa il 65% della profondità. Il cavo elettrico di trasmissione dell'energia ha una lunghezza totale di circa 30 km.

Il sistema di ormeaggio è di tipo Spread a catenaria e prevede 3 linee orientate reciprocamente a 120° di distanza angolare. Le lunghe linee di ormeaggio sono ancorate al fondo tramite *Suction Piles* [6]. Come si nota in figura, i sistemi di ancoraggio non sono condivisi da più turbine flottanti, caratteristica invece che contraddistingue il più recente parco eolico flottante di *Equinor*, noto come *Hywind Tampen* (88 MW), installato a profondità che raggiungono i 300 m, a largo delle coste Norvegesi [37].

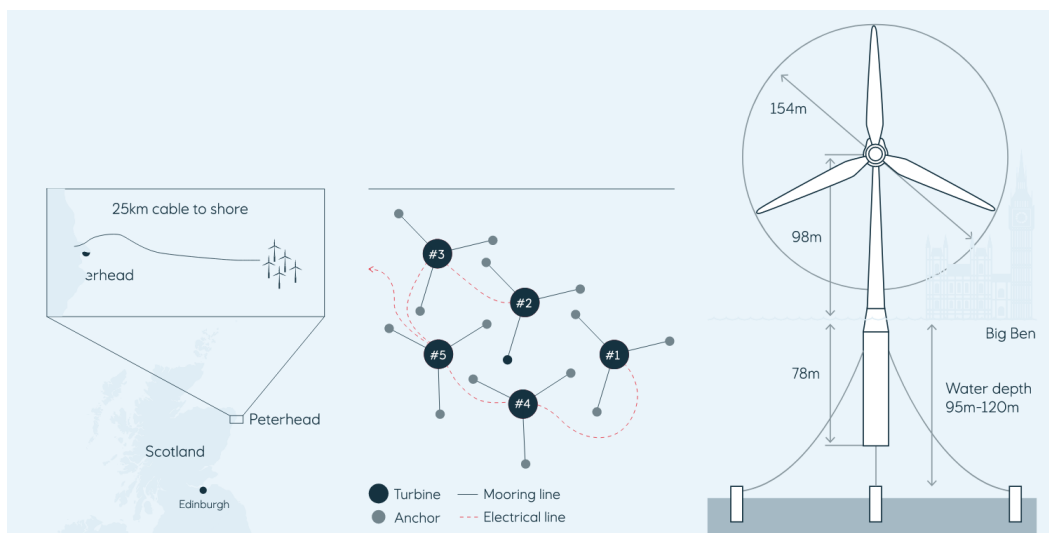


Figura 20 - Parco eolico flottante Hywind Scotland, produttivo dal 2017. Sistema di ormeaggio a 3 linee orientate reciprocamente a 120° [6].

Due ulteriori Spar ancorati secondo tale schema sono la *OC3-Hywind* e la *UMaine-Hywind* [30, 35, 36]. Il primo è installato ad una profondità di installazione di 320 m, mentre il secondo a 200 m. I dati in [Figura 21](#) si riferiscono al *OC3-Hywind* e come si nota, ad una profondità di 320 m, adottando una turbina (NREL 5 MW) di 90 m di altezza, il pescaggio della struttura è pari a 120 m, quindi circa il 38% della profondità. La definizione del pescaggio medio durante le condizioni di operatività del sistema è essenziale anche per la scelta del punto di attacco delle linee di ormeaggio alla piattaforma flottante, come indicato in [Figura 21](#) (immagine in alto a destra) [36]. Si evidenzia inoltre in figura la scelta dell'orientazione delle tre linee di ormeaggio rispetto alla direzione principale del vento e del moto ondoso. Il raggio delle ancore di *OC3-Hywind* (distanza *dc* in figura) è di 854 m mentre il diametro della catenaria è di 9 cm. La base flottante ha un diametro che varia dai 6.5 ai 9.4 m ed includendo la zavorra l'intera piattaforma flottante ha un peso di circa 7500 T.

Progetto	Preliminare	Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 35 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

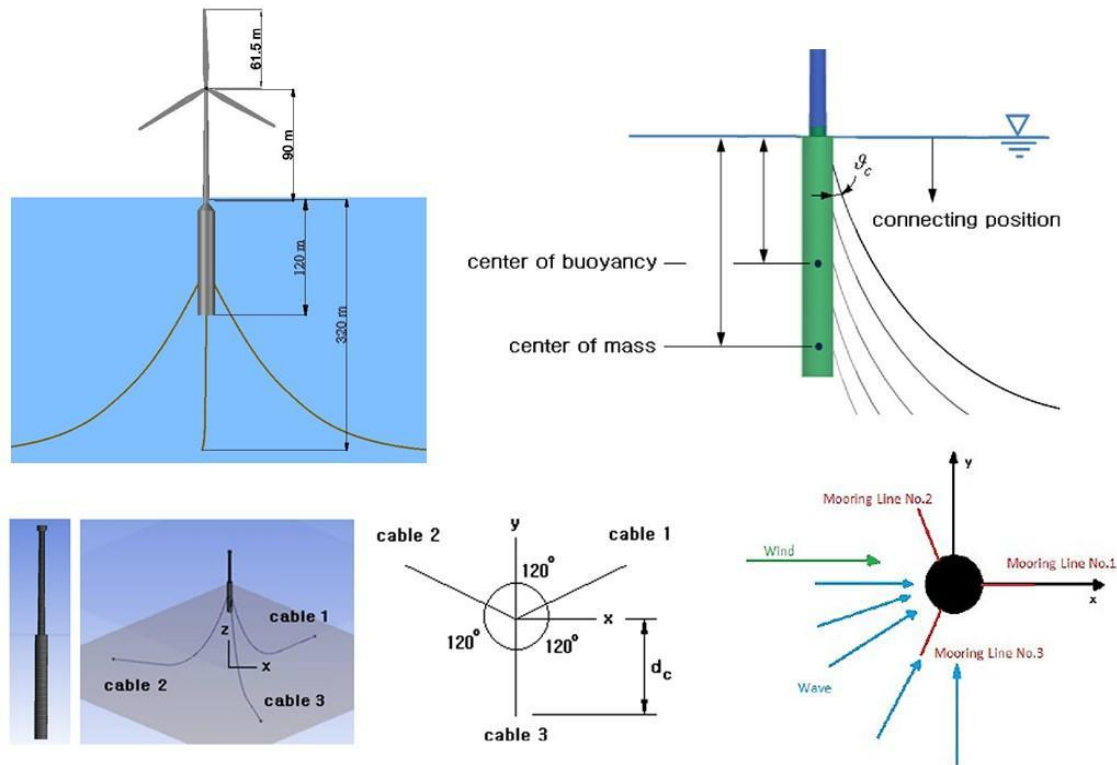


Figura 21 - Sistema di ormeggio adottato nel progetto OC3-Hywind di Equinor [36]

## 5.2 Sistema di Ormeaggio-Ancoraggio per FOWT di tipo Semi-Submersibile

Lo studio dei sistemi ormeggio-ancoraggio delle FOWT di tipo Semi-Submersibile a tre colonne ha portato alla definizione di due possibili configurazioni, entrambe di tipo *Spread* a catenaria. Il più comunemente adottato sistema a tre linee di ormeggio prevede una linea connessa a ciascuna colonna galleggiante, come illustrato in Figura nel caso del parco eolico Fukushima Mirai, realizzato in Giappone [39, 40]. La seconda configurazione possibile è a quattro linee asimmetricamente distribuite. Due linee di ormeggio collegate alla colonna che sostiene la turbina, ed una linea connessa a ciascuna delle restanti colonne.

Inoltre, sono state realizzate diverse configurazioni anche per quello che attiene agli ancoraggi. Il design più comune prevede l'utilizzo di ancore a trascinarsi (*DEA*) non condivise dalle diverse turbine flottanti. Viceversa, la metodologia più recente prevede la condivisione di pali a suzione (*Suction Piles or Buckets*), come illustrato in [Figura 22](#). La figura riporta inoltre i risultati di una modellazione ad elementi finiti (*FEM*) sulle linee di ormeggio per ottimizzarne il dimensionamento. In tale modellazione si considerano i carichi ambientali legati al vento ed alle onde (con periodo di ritorno di 50 anni) per valutare la lunghezza ottimale

Progetto	Preliminare	Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab.	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 36 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeggio ed Ancoraggio		

delle diverse linee di ormeggio. Lo studio preso in esame in [Figura 22](#) riporta una configurazione finale della wind farm, che prevede distanze tra le turbine comprese tra le 9 e le 12 volte il diametro della turbina stessa; secondo una stima approssimata, la condivisione dei *Suction Buckets* prevederebbe una riduzione del 30-40% dei costi di ancoraggio rispetto alla configurazione con *DEA* che non ne prevede la condivisione [38, 39].

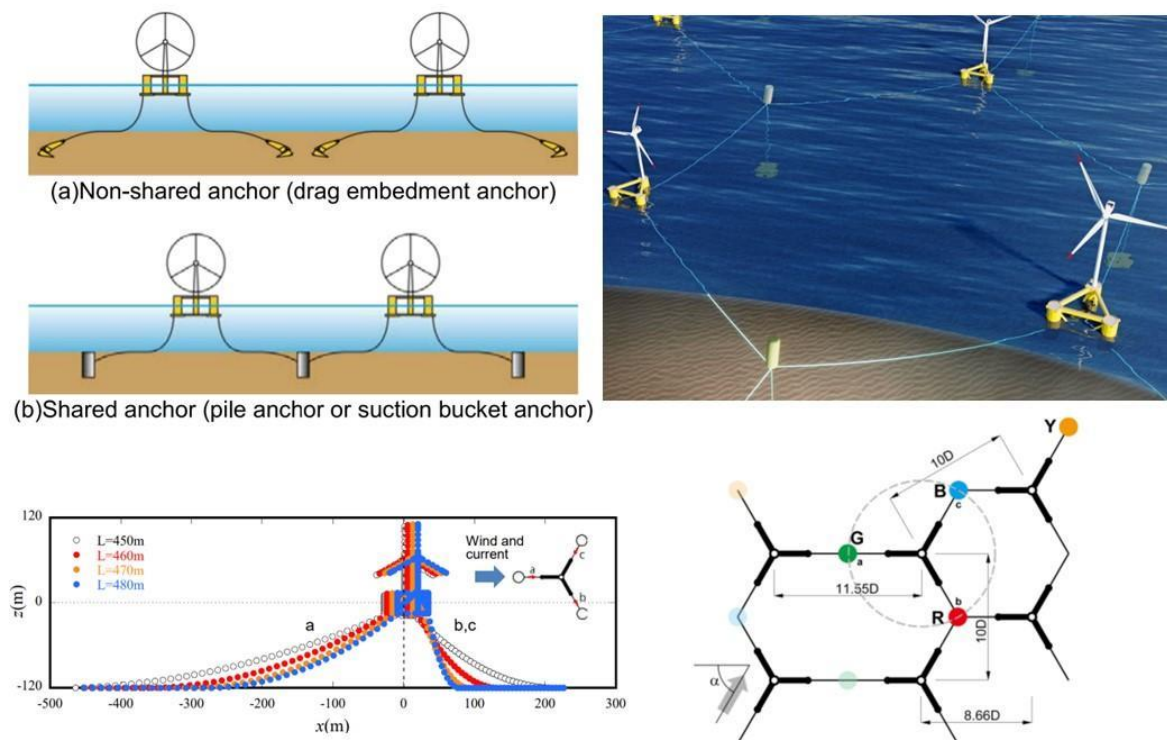


Figura 22 - Sistema di Ormeggio ed Ancoraggio analizzato in fase di progettazione per la wind farm Fukushima Mirai. Immagine in alto a sinistra: possibili tipi di ancoraggio (DEA non condivisi e Suction Buckets condivisi) [38]. Immagine in alto a destra: visualizzazione 3D della condivisione di sistemi di ancoraggio. In basso a sinistra: Analisi ad Elementi Finiti delle linee di ancoraggio sollecitate ad azione di vento ed onde [39].

### 5.3 Sistema di Ormeggio-Ancoraggio per FOWT di tipo TLP

La piattaforma flottante di tipo TLP mantiene la sua stabilità attraverso un sistema di ormeggio composto da elementi tesi o *tiranti* (*tendons*, in [Figura 23](#)). La posizione della struttura è garantita dalla tensione sulle linee di ormeggio causata dall'alta galleggiabilità della struttura stessa.

Il design del sistema ormeggi-ancoraggi deve essere tale da garantire che la tensione sulle linee di ormeggio non sia inferiore ad un certo limite. Per evitare il fenomeno di *'slacking'*, il design preliminare deve infatti prevedere un attento controllo del pretensionamento sui cavi. Perché sia garantita l'assenza di tale

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 37 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

fenomeno, secondo il regolamento *DNV (2008)*, i cavi devono essere dimensionati secondo gli Stati Limite Ultimi (*Ultimate Limit State, ULS*):

$$\gamma_0 S_0 - \gamma_E S_E \geq 0 \quad [\text{Eq. 3}]$$

Dove:  $\gamma_0$  e  $\gamma_E$  sono fattori di sicurezza che per i tiranti di una *TLP* sono rispettivamente 1.2 e 0.7;  $S_0$  è la forza di pretensione assiale e  $S_E$  è la forza assiale dovuta ai carichi ambientali. Per assicurare il pretensionamento di progetto, durante le operazioni di installazione il contrappeso presente alla base della sottostruttura (*Hull* in [Figura 23](#)) può essere opportunamente regolato. Sono stati proposti diversi modelli per tale sottostruttura, quello in figura si riferisce ad un modello di *TLP* con turbina *DTU 10 MW* da installare ad una profondità del fondale di 100 m, avente un *Hull* con un diametro ( $D_1$ ) di circa 20 m, un'altezza ( $h_1$ ) di circa 37 m ed un raggio ( $r_p$ ) di circa 40 m avente uno spessore di 9 m. I tiranti in acciaio hanno un raggio esterno di 1.35 m ed uno interno di 1.26 m. La pretensione su ciascuna delle tre linee di ormeaggio (orientate reciprocamente a 120°) è di circa 28000 kN.

I sistemi di ancoraggio per *TLP* sono di tipo a gravità (*Dead Weights Anchors*) oppure di tipo a suzione (*Suction Piles or Buckets*), come illustrato in [Figura 23](#). Recenti applicazioni propongono anche l'utilizzo delle *VLA*. Questi tipi di ancoraggi, infatti, hanno una buona resistenza alle spinte verticali di sollevamento esercitate dalle linee di ormeaggio sulle ancore, specialmente in condizioni di set-up del livello medio marino. La scelta del tipo di ancoraggio non è operata solo in funzione delle azioni esercitate sulle linee di ormeaggio, in quanto dipende anche strettamente dalle caratteristiche del fondale.



Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab.	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 38 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

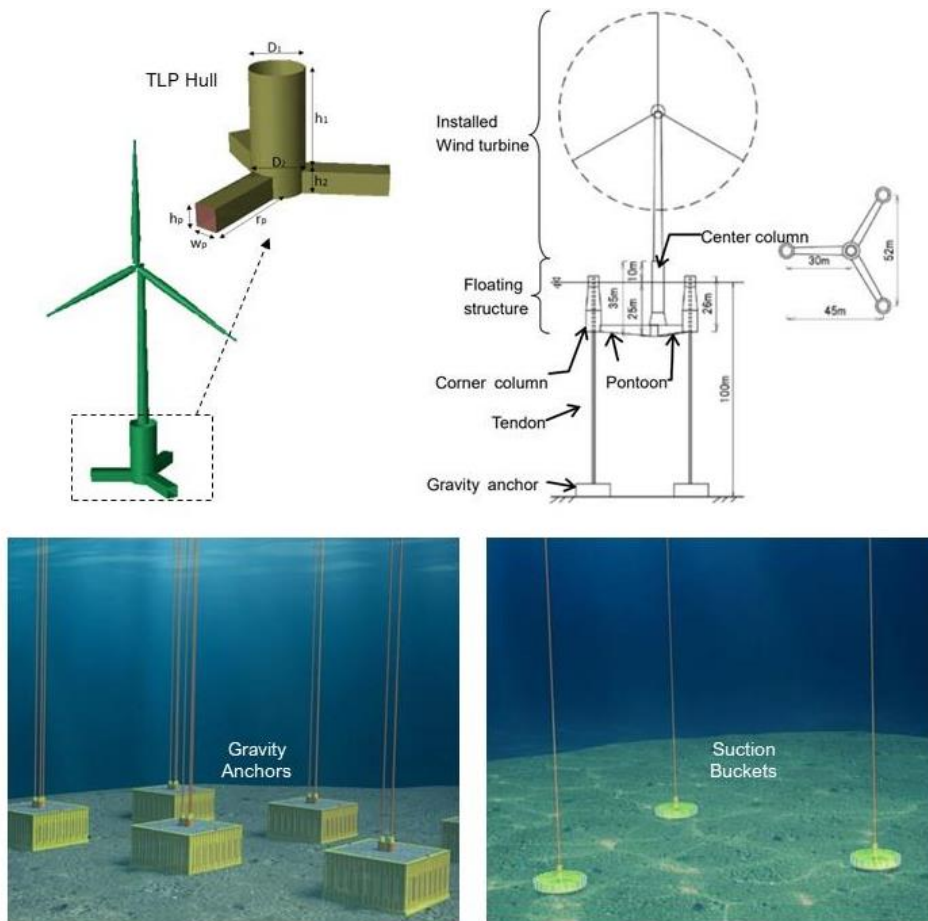


Figura 23 - Sistema di ormeaggio e ancoraggio per TLP. Immagine in alto a sinistra: struttura galleggiante e turbina eolica con indicazione delle lunghezze principali del corpo centrale (Hull) [41]. Immagine in alto a destra: principali elementi costitutivi del sistema TLP e layout dell'ancoraggio (3 linee, 120°) [40]. In basso due immagini di ancoraggi adottati per TLP: ancore a gravità e pali a suzione [42,43].

## 6 Metodologia di dimensionamento del Sistema Ormeaggio-Ancoraggio di una FOWT

Nelle sezioni precedenti si è presentata una rassegna delle principali tecnologie di piattaforme flottanti per l'installazione di turbine eoliche in acque profonde, nonché dei sistemi di ormeaggio ed ancoraggio ad esse applicabili, e si sono infine riassunti alcuni dati geometrici di progetti di FOWT già realizzati.

In questa fase di analisi preliminare per la realizzazione del parco eolico flottante sito in Corigliano-Rossano, è possibile fare una cernita delle tipologie di FOWT e dei sistemi di ormeaggio-ancoraggio applicabili, ma, per via della mancanza di dati specifici sulle caratteristiche geotecniche del fondale, non è possibile operare un dimensionamento delle strutture flottanti e degli annessi sistemi di ormeaggio ed ancoraggio.

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 39 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

Tuttavia, si ritiene utile, già in questa sede, indicare la metodologia oggi applicata per la progettazione di sistemi eolici flottanti, facendo riferimento non solo all'esperienza accumulata in questo ambito nell'ultimo decennio, ma anche alla regolamentazione internazionale in esercizio. Tale regolamentazione viene progressivamente adattata e modificata a partire dall'esperienza nell'ambito dell'*O&G Industry* e si evolve inevitabilmente all'avanzare delle tecnologie disponibili nell'ambito delle FOWT.

Nella presente e nella successiva sezione, si illustrano dunque, rispettivamente, le fasi della progettazione delle FOWT ed i criteri da applicare nel dimensionamento del sistema ormeaggio-ancoraggi secondo alcuni degli standard internazionali di riferimento.

Si premette, innanzitutto, che la progettazione delle linee di ormeaggio-ancoraggio deve garantire il verificarsi di una serie di condizioni:

- Il sistema di ormeaggio ed ancoraggio deve garantire il mantenimento della struttura galleggiante in stazionamento (*station keeping*) entro le tolleranze specificate, sia in condizioni di carico di esercizio che nelle condizioni di carico estremo legato ad eventi meteorologici aventi un dato periodo di ritorno;
- Il sistema di ormeaggio deve essere in grado di resistere alle sollecitazioni generate dal *carico ambientale* sulla struttura flottante e sulla sovrastruttura, e deve essere progettato in maniera tale da minimizzare le forze che agiscono sugli ancoraggi e sulle stesse cime di ormeaggio;
- L'escursione consentita alla piattaforma deve essere tale da non generare carichi di tensione nei cavi di trasmissione elettrica;
- L'ormeaggio deve essere sufficientemente flessibile da accogliere l'escursione di marea e l'innalzamento del livello medio del mare durante le mareggiate, e sufficientemente rigido da consentire l'attracco per l'ispezione e la manutenzione;
- Il sistema di ormeaggio deve essere progettato in maniera tale da richiedere la minima ispezione e manutenzione possibile durante la vita utile del dispositivo. Dovrebbe essere possibile rimuovere le turbine eoliche galleggianti dal sito e prevedere tecniche che ne permettano una facile reinstallazione, senza danneggiare alcuna delle sue componenti;
- L'ormeaggio deve avere una resistenza a fatica tale da garantire l'operabilità e l'affidabilità dell'intero sistema flottante;
- Il design del sistema di ormeaggio e di ancoraggio deve limitare il più possibile l'impatto sugli ecosistemi acquatici. La "footprint", ossia la superficie del fondo del mare "coperta" dagli ormeaggi, deve essere minimizzata, ed uno studio accurato deve precedere le operazioni di installazione dei cavi e dei sistemi di ancoraggio con il fine di ridurre al minimo il disturbo alla flora e fauna ittica.

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab.	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 40 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

- Il design del sistema ormeggi-ancoraggi deve essere ottimizzando per ridurre al minimo il numero e la lunghezza delle cime di ormeggio ed il numero di ancoraggi, prevedendo, ove possibile, la condivisione dei medesimi tra più strutture flottanti.

Nel seguito ([Sezioni 6.1](#) e [6.2](#)) si evidenziano, in via prettamente qualitativa, i principali step della progettazione del sistema di ormeggio-ancoraggio.

## 6.1 Il 'Design Basis' del Sistema Ormeaggio-Ancoraggio

La progettazione del sistema ormeggio-ancoraggio è un processo iterativo che richiede un approccio sistematico ed integrato. Il processo di progettazione prevede un numero di processi decisionali (dettagliati nella seguente [Sezione 6.2](#)) effettuati sulla base di un "pacchetto" di informazioni di base, noto come "Design Basis" (in genere fornito dal Committente del Progetto) che include [46, 47]:

### a) Informazioni sulla progettazione del sistema di ormeggio-ancoraggio:

- Posizione della piattaforma e profondità dell'acqua;
- Geometria della piattaforma flottante e condizioni di carico;
- Condizioni meteo-oceaniche e casi di carico di progetto;
- Software di analisi da utilizzare nel progetto.

### b) Vincoli di progettazione del sistema di ormeggio-ancoraggio:

- Disposizione delle infrastrutture sottomarine presenti in prossimità del sito (come i gasdotti);
- Mappatura del fondale marino che include gli habitat marini sensibili presenti in prossimità del sito.

### c) Criteri di progettazione del sistema di ormeggio-ancoraggio:

- Vita utile;
- Standard di progettazione;
- Limite di scostamento della piattaforma ("*Offset Limit*");
- *Strenght Criteria*;
- *Fatigue Criteria*;
- *Corrosion Allowance*;
- Requisiti di progettazione degli ancoraggi.

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 41 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormezzo ed Ancoraggio</b>		

d) Documenti da produrre per la consegna al Committente della progettazione del sistema di ormezzo-ancoraggio.

Per avviare la progettazione del sistema di ormezzo, è necessario raccogliere i dati “base” di input che includono i parametri caratteristici della struttura galleggiante, le condizioni ambientali di progettazione e i requisiti operativi della struttura flottante. Questi parametri di input possono essere classificati nei seguenti gruppi:

**1. Natura dell'operazione**

- Tipo di operazione: struttura presidiata o non presidiata (*manned or unmanned*);
- Vita utile di progetto.

**2. Condizioni ambientali**

- Profondità dell'acqua;
- Caratteristiche batimetriche;
- Le condizioni di vento, onde (altezza massima e significativa, periodo di picco), correnti (velocità media in superficie e coefficienti di marea) e la loro direzionalità, con i relativi tempi di ritorno;
- Distribuzione a lungo termine delle condizioni ambientali, incluso il diagramma di dispersione delle onde;
- Velocità di crescita di macro-bio-fouling (“*Marine Growth*”).

**3. Proprietà della piattaforma galleggiante**

- Dimensioni della struttura galleggiante, incluso le sezioni trasversali;
- Lo spostamento consentito alla piattaforma, la posizione del baricentro, il peso, il momento di inerzia per tutti i pescaggi rilevanti.

**4. Informazioni sul sito**

- Informazioni geotecniche, ad esempio proprietà del suolo derivate da carotaggi;
- Posizione geografica;
- Impianti o infrastrutture esistenti in superficie e sul fondale

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 42 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeggio ed Ancoraggio</b>		

## 6.2 Fasi della progettazione

La progettazione del sistema di ormeggio-ancoraggio include le seguenti fasi decisionali:

1. *Definizione della tipologia dell'ormeaggio*
2. *Definizione del profilo dell'ormeaggio*
3. *Definizione del layout dell'ormeaggio*
4. *Scelta dei materiali delle linee di ormeaggio*
5. *Scelta della tipologia del sistema di ancoraggio*

Tali fasi non sono necessariamente eseguite cronologicamente nell'ordine citato; la definizione delle scelte progettuali richiede un approccio iterativo in quanto gli aspetti tecnici e funzionali da analizzare sono intrinsecamente correlati tra loro.

### 6.2.1 Definizione della Tipologia di Ormeaggio

La definizione della tipologia del sistema di ormeaggio prevede la scelta, in sostanza, della geometria dell'ormeaggio. In questa fase, pertanto, si sceglie se l'ormeaggio è di tipo Spread o Single Point [46].

Nel caso delle FOWT questa scelta è di normalmente orientata verso sistemi di tipo Spread. Esistono pochi casi di sistemi di ormeaggio Single Point, come ad esempio il citato *X1Wind Floating Concept* [27].

### 6.2.2 Definizione del Profilo dell'Ormeaggio

La definizione del profilo dell'ormeaggio implica la scelta tra un sistema a catenaria o un sistema ad elementi tesi. Nell'industria dell'O&G sono quattro i tipi di profili tipicamente selezionati: [46]

- a) Sistema a catenaria con un set-up di tipo *all-chain* (catenaria per tutta la lunghezza della linea di ormeaggio);
- b) Sistema a catenaria con set-up di tipo *chain-wire-chain* (catenaria nella parte superiore connessa alla piattaforma flottante e nella parte inferiore connessa all'ancoraggio e funi di acciaio nella parte centrale);

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 43 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

- c) Sistema ad elementi tesi con set-up *chain-wire-chain* (catenaria nella parte superiore connessa alla piattaforma flottante e nella parte inferiore connessa all'ancoraggio e funi di acciaio nella parte centrale);
- d) Sistema ad elementi tesi con set-up *chain-polyester-chain* (catenaria nella parte superiore connessa alla piattaforma flottante e nella parte inferiore connessa all'ancoraggio e funi in poliestere nella parte centrale).

La scelta di un sistema di ormeaggio tecnicamente fattibile ed economicamente sostenibile si basa in primo luogo sulla profondità del sito di installazione [47]. Nell'industria dell'O&G si usano i seguenti intervalli di riferimento:

- Per profondità dell'acqua **inferiori a 500 m**, i sistemi a catenaria sono la scelta più conveniente. Si considerano quindi entrambe le opzioni: *all-chain* e *chain-wire-chain*. Quest'ultima di solito risulta più conveniente per profondità superiori a 300 m.
- Per profondità dell'acqua **comprese tra 500 e 1000 m** è possibile prendere in considerazione tutte e quattro le soluzioni. I vincoli di offset imposti dal tipo di struttura flottante possono governare la selezione.
- Per profondità d'acqua **comprese tra 1000 e 2000 m**, il sistema ad elementi tesi è la scelta più conveniente. Si considerano le alternative progettuali: *chain-wire-chain* e *chain-polyester-chain*.
- Per profondità dell'acqua **superiori a 2000 m**: il sistema ad elementi tesi *chain-polyester-chain* è la scelta di solito più conveniente.

I sistemi a catenaria tendono ad essere di complessa applicazione a profondità d'acqua maggiori di 1000 m, proprio per via dei costi legati alle cime di ormeaggio che diventano estremamente lunghe. I sistemi TLP possono risultare invece relativamente più costosi in acque poco profonde, perché l'elevata rigidità delle linee porta a tensioni molto elevate che, a loro volta, richiedono componenti di ormeaggio complessi e voluminosi, anche a basse profondità [46].

L'ormeaggio a catenaria assume, nell'acqua, una configurazione geometrica corrispondente al grafico di una funzione di tipo coseno iperbolico ([Figura 24](#)).



Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 44 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

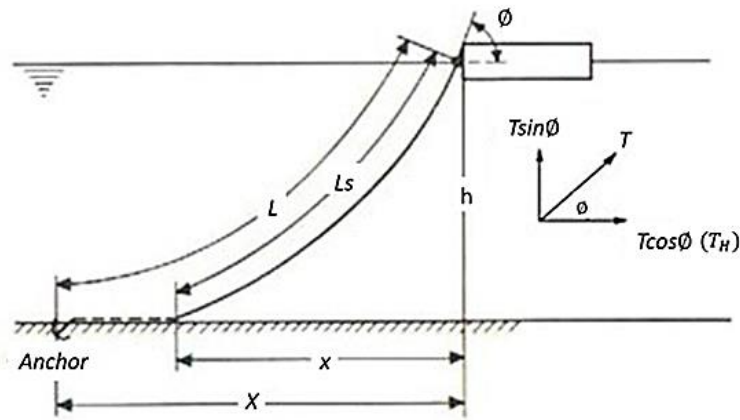


Figura 24 Schema semplificato utilizzato per il pre-dimensionamento di una catenaria [44]

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

$$L_s = h \sqrt{\left(2 \frac{T_H}{\omega h} + 1\right)} \quad [\text{Eq. 4}]$$

Dove  $L_s$  [m] è la lunghezza della linea sospesa,  $h$  [m] è la profondità dell'acqua,  $T_H$  [ton] è la componente orizzontale del carico applicato alla linea di ormeggio e  $\omega$  [ton/m] è il peso unitario del cavo di ormeggio in acqua.

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 secondo l'equazione:

$$x = \frac{T_H}{\omega} \cosh^{-1} \left(1 + \frac{\omega h}{T_H}\right) \quad [\text{Eq. 5}]$$

La distanza tra l'ancora ed il collegamento alla piattaforma può essere pertanto calcolata con l'equazione:

$$X = L - h \sqrt{\left(2 \frac{T_H}{\omega h} + 1\right)} + \frac{T_H}{\omega} \cosh^{-1} \left(1 + \frac{\omega h}{T_H}\right) \quad [\text{Eq. 6}]$$

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

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 45 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

$$F_R = \frac{\partial T_H}{\partial X} = \omega \left[ \frac{-2}{\sqrt{\left(1 + 2 \frac{T_H}{\omega h}\right)}} + \cosh^{-1} \left(1 + \frac{\omega h}{T_H}\right) \right]^{-1} \quad [\text{Eq. 7}]$$

Come si può osservare, la forza di ripristino dipende principalmente dal peso del cavo  $\omega$ , quindi nel sistema a catenaria è utile aumentare il peso della linea di ormeaggio per aumentare la resistenza del sistema alle sollecitazioni. L'opzione più economica, spesso adottata, è quella di aumentare il peso solo nel punto di contatto del fondo marino. Quando il carico ambientale induce un offset della FOWT, il carico orizzontale aumenta e con esso anche la forza di ripristino.

Con l'Equazione [4], note le forze applicate alla linea di ormeaggio derivanti dalle sollecitazioni ambientali sulla turbina, può essere calcolata la lunghezza della linea di ormeaggio sospesa  $L_s$  [m] in funzione della profondità del fondale e del peso specifico della linea di ormeaggio.

### 6.2.3 Definizione del Layout dell'Ormeaggio

La selezione del layout del sistema di ormeaggio viene tipicamente effettuata con un metodo iterativo, variando i parametri fino a quando non si trova un sistema conveniente che soddisfi i requisiti normativi e funzionali. Di seguito sono riportati i passaggi chiave del processo di design.

#### Step 1: Determinare il Raggio dell'Ancora

Per un sistema di tipo TLP in acque profonde, un buon punto di partenza per la lunghezza della linea è avere un rapporto R/D (R = raggio dell'ancora (vedi distanza "dc" in [Figura 21](#)); D = profondità dell'acqua) di 1.4. Per i sistemi a catenaria in acque poco profonde, il raggio dell'ancora è generalmente molto più grande ([Figura 25](#)). L'ampio raggio è necessario per avere una lunghezza della catena appoggiata sul fondo del mare in grado di assorbire le spinte orizzontali garantendo così l'assenza di carichi sugli ancoraggi.

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 46 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

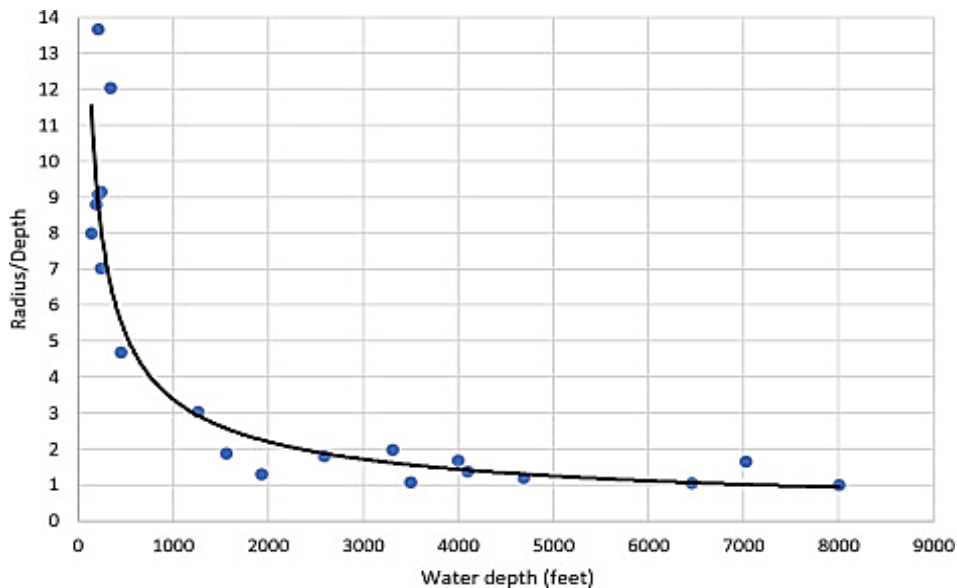


Figura 25 - Rapporto R/D, con R=raggio dell'ancora e D=profondità all'aumentare della profondità (NB unità di misura della profondità in "feet"). rapporto R/D per diverse profondità d'acqua sulla base dei dati di progetti in ambito O&G. [46]

## Step 2: Determinare il numero e la dimensione delle linee di ormeaggio

Questo passaggio consiste nell'eseguire una quantificazione del numero di linee che forniranno un sistema di ormeaggio affidabile e sostenibile dal punto di vista economico. Come regola generale, il numero di linee dovrebbe essere ridotto al minimo, in modo tale da contenere sia i costi dei materiali, che i tempi (dunque i costi) di installazione. Il numero di linee viene aumentato se il diametro della linea di ormeaggio necessario diventa eccessivamente grande, considerando che il **diametro massimo della catena** disponibile sul mercato è di circa 220 mm.

La dimensione della linea di ormeaggio deve essere verificata in modo iterativo eseguendo opportune analisi.

Una delle variabili di cui si tiene conto è il **pretensionamento** delle linee di ormeaggio, che ha un effetto diretto sulla lunghezza delle linee stesse. il pretensionamento generalmente deve essere contenuto tra il 10% e il 20% del carico minimo di rottura (*Minimum Breaking Load, MBL*). Come già specificato, la pretensione è la tensione nelle linee di ormeaggio in un ambiente zero (senza vento, senza onde e senza corrente). Nella definizione delle dimensioni delle linee di ormeaggio si cerca di trovare la condizione risultante nel pretensionamento minimo che garantisce l'offset richiesto per il funzionamento della piattaforma flottante. In linea di principio, se l'offset si riduce (caso TLP), la pretensione aumenta.

Un altro rilevante aspetto da tenere in considerazione è la **ridondanza** delle linee di ormeaggio. La [Figura 26](#) mostra layout di ormeaggio alternativi per una FOWT di tipo *Semi-Submersible*:

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 47 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

- Il layout 4x1 non sarebbe in grado di superare il 'code-check' (ossia il controllo del rispetto degli standard previsto dalla normativa internazionale) per impianti O&G, per i quali è necessario soddisfare il fattore di sicurezza nella condizione di una linea danneggiata. Tale configurazione, che pertanto non prevede alcuna ridondanza delle linee di ormeggio, può essere tuttavia un'opzione praticabile per alcune installazioni speciali con una "bassa conseguenza di guasto", come una stazione meteorologica senza equipaggio o una piattaforma di energia rinnovabile. La ridondanza, infatti, non è obbligatoria per le FOWT ma ai fattori di sicurezza da applicare in fase di progettazione di applica un "Penalty Factor", come specificato nel seguito in [Sezione 7.1](#).
- Il layout di ormeggio con più linee, come il 4x2, soddisfa invece le condizioni di sicurezza in caso di una linea danneggiata.
- Con più linee, la ridondanza aumenta quindi si garantisce la "condizione intatta" della FOWT ma il costo dell'opera aumenta notevolmente.

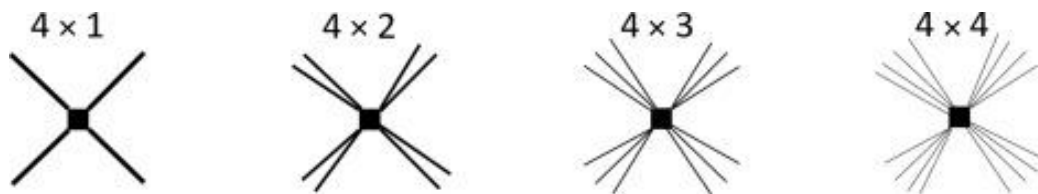


Figura 26 - Possibili configurazioni di ormeggio nel caso di un Semi-Submersibile. Da sinistra vs destra si incrementa la ridondanza delle linee [46]

### Step 3: Determinare gli angoli dell'ormeaggio ed eventuali raggruppamenti di linee (clusters)

Un sistema flottante può avere uno schema di ormeggio diffuso o raggruppato, come mostrato in [Figura 26](#). Nel sistema diffuso le linee di ormeggio sono distribuite uniformemente sui 360° (come il classico caso di Spar o Semi-Submersibile con ormeggio a 3 linee equi-distanziate a 120° ciascuna). Nel sistema raggruppato (*clustered*) le linee possono essere simmetricamente o asimmetricamente distribuite in gruppi. All'interno di ciascun gruppo si tende a mantenere la stessa distanza angolare (detta *angolo di diffusione*) tra le linee (di solito tra i 3 ed i 5 gradi).

Ad esempio, qualora si decida di utilizzare un ormeggio a 8 punti, si tende a scegliere uno schema 8x1 distribuito uniformemente rispetto allo schema "clustered" di tipo 4x2 riportato in [Figura 27](#). Quando una linea è danneggiata in uno schema 8x1, le linee adiacenti possono ancora avere la possibilità di condividere

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 48 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

il carico. Al contrario, quando una linea viene danneggiata in uno schema 4x2, la probabilità che si danneggi anche la linea adiacente è relativamente alta, perché non avrà la forza di sopportare il carico agente.

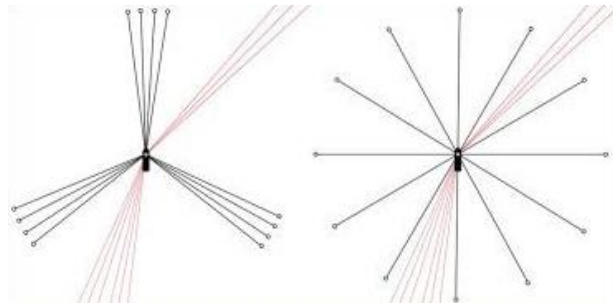


Figura 27 - Sistemi di Ormeaggio Distribuiti o Raggruppati. In colore grigio: sistema "clustered" 3x4 con i 3 gruppi aventi una distanza reciproca di 120° (immagine a sinistra) e sistema diffuso 12x1 con angolo di diffusione 30° (immagine a destra) [46].

È importante tenere conto del fatto che l'uso di un sistema di ormeaggio non uniforme o non simmetrico può ridurre il costo del sistema di ormeaggio, ma può aumentare gli sforzi ingegneristici e di installazione. Fondamentale, in questa fase progettuale, è l'identificazione di eventuali vincoli fisici al passaggio delle linee di ormeaggio, ad esempio, aree del fondale di interesse ambientale oppure altre infrastrutture flottanti o sottomarine nelle vicinanze.

#### 6.2.4 Scelta dei Materiali delle Linee di Ormeaggio

Una linea di ormeaggio comprende diversi componenti esterni alla piattaforma flottante, che in genere includono quanto segue, dall'alto verso il basso [46]:

- Argani da ormeaggio, martinetti a catena, ferma-catena;
- Passacavi;
- Catena, funi in acciaio o funi in poliestere;
- Connettori;
- Boe o zavorra (se applicabile);
- Ancore.

Come sopra citato, i materiali comunemente usati per le cime di ormeaggio sono catene, funi metalliche e funi in poliestere. In generale, la catena è molto pesante e resistente alla manipolazione e all'abrasione. In acque

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 49 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeggio ed Ancoraggio</b>		

poco profonde, il peso elevato della catena crea il cosiddetto “*effetto catenaria*” che limita l'offset e i movimenti della FOWT tramite il proprio peso. Pertanto, in acque poco profonde, la composizione della cima di ormeggio è spesso “*tutta catena*” (il sopra citato “*all-chain*”).

Per i sistemi di ormeggio in acque profonde, la catena viene generalmente utilizzata per il segmento superiore nella composizione della linea e si applicano in tal caso due possibili configurazioni per quello che riguarda i materiali: *catena-fune metallica-catena* oppure *catena-fune in poliestere-catena* (ovvero, rispettivamente, i sopra citati sistemi “*chain-wire-chain*” e “*chain-polyester-chain*”). La *fune metallica* (“*Wire Rope*”) è meno pesante della catena ma ragionevolmente resistente alle sollecitazioni, quindi, viene spesso utilizzata per la parte sospesa del profilo di ormeggio. La *fune in poliestere* viene tipicamente utilizzata per ridurre il peso proprio dell'ormeaggio e per assorbire l'allungamento della linea legato al movimento della piattaforma. È vulnerabile all'abrasione del fondo marino, quindi viene utilizzato solo per la parte sospesa della linea di ormeaggio. I segmenti di poliestere e fune metallica non dovrebbero, in generale, toccare il fondale marino, se non in condizioni estreme. Le funi in poliestere devono anche rimanere sommerse e mantenere una distanza dalla superficie del mare per evitare l'accumulo di vegetazione marina (fenomeno del “*Marine Growth*”), in quanto il peso legato a tali accumuli possono essere tali da variare i carichi di progetto.

#### 6.2.5 Scelta del Tipo di Ancoraggio

Come commentato in [Sezione 4](#), sono disponibili numerose soluzioni di ancoraggio. La scelta ed il dimensionamento delle ancore vengono tipicamente effettuati secondo due criteri di progettazione principali:

##### 1) Progettazione strutturale

Il dimensionamento dell'ancoraggio viene effettuato sulla base dei seguenti carichi:

- Carichi massimi imposti dalla linea di ormeaggio;
- Carichi massimi imposti durante il trasporto e l'installazione;
- Carichi che inducono danni da fatica nel corso della vita utile.

##### 2) Progettazione geotecnica

Il dimensionamento dell'ancoraggio viene effettuato mediante le seguenti analisi:



Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 50 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeggio ed Ancoraggio</b>		

- Analisi dell'interazione suolo-struttura, utile a determinare le reazioni del suolo che agiscono sull'ancoraggio;
- Analisi della capacità di tenuta geotecnica, utile a determinare la dimensione e la profondità di ancoraggio richieste per ottenere la capacità desiderata;
- Analisi della capacità di rimozione dell'ancora.

I sistemi di ancoraggio maggiormente applicati nei casi di turbine eoliche flottanti includono:

- Ancoraggio a trascinamento (*DEA*);
- Ancoraggio caricato verticalmente (*VLA*);
- Ancoraggio a gravità (*DWA*);
- Pali battuti (*Driven Piles*);
- Pali a suzione (*Suction Piles or Buckets*).

Nella maggior parte dei casi, i sistemi di ormeggio a catenaria vengono abbinati a sistemi di ancoraggio a trascinamento (*DEA*), mentre sistemi di tipo *Taut* utilizzano tipicamente ancore a gravità (*DWA*), pali battuti (*Driven Piles*), pali a suzione (*Suction Buckets*), oppure ancore caricate verticalmente (*VLA*).

L'installazione di turbine flottanti in *Farms* può prevedere un posizionamento strategico delle medesime, tale per cui a ciascun punto di ancoraggio siano connesse più linee di ormeggio. Utilizzando tale approccio, gli ancoraggi di tipo *Suction Buckets* possono risultare molto convenienti ed i costi legati al sistema ormeggio-ancoraggio possono essere notevolmente ridotti [46].

## 7 Criteri di dimensionamento delle Linee di Ormeggio

### 7.1 Standard Internazionali di Progettazione

Il dimensionamento dei sistemi di ormeggio e ancoraggio delle FOWT deve attenersi alle normative nazionali relative alle operazioni in ambito costiero e marittimo, nonché agli standard internazionali dettati dai maggiori players industriali. Ad esempio, l'*American Bureau of Shipping (ABS)*, la *Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd (DNV-GL)* e l'*American Petroleum Institute (API)*, già sviluppatori di standard di progettazione per l'*O&G Industry*, hanno sviluppato specifiche regolamentazioni per il design degli ormeggi-

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 51 di 59
Titolo Elaborato		Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio		

ancoraggi di FOWT [11]. La rapida espansione del mercato delle FOWT spinge inoltre ad una internazionalizzazione degli standard di progettazione, sulla quale l'*International Electrotechnical Commission (IEC)* – che nel precedente quinquennio ha concentrato i propri sforzi sullo sviluppo degli standard internazionali per impianti eolici a fondazione fissa – sta già lavorando [11].

Nel seguito sono descritti alcuni degli standard attualmente richiesti per la progettazione delle FOWT che dovranno essere adottati nella fase progettuale definitiva. Tale fase richiede una conoscenza di dettaglio del sito di installazione - dal punto di vista geologico, meteomarinico ed anemometrico - disponibile solo a seguito di precise e dettagliate indagini in-situ.

La normativa per la progettazione delle linee di ormeggio ed ancoraggio delle FOWT ricalca l'approccio utilizzato nell'industria de *Oil & Gas*, con alcune principali differenze:

- Le piattaforme realizzate per l'estrazione di idrocarburi richiedono un diverso tipo di accessibilità del personale rispetto alle FOWT (spesso *unmanned facilities*) e dunque variano gli standard operativi e di sicurezza per il personale.
- Il fallimento del sistema di ancoraggi di una turbina eolica offshore comporta rischi ambientali più contenuti rispetto a quelli legati al *failure* di una piattaforma offshore di estrazione di idrocarburi.

Per questi motivi il tempo di ritorno utilizzato nel design dei sistemi di ormeggio delle FOWT è **di 50 anni**, contro i 100 anni utilizzati come standard nel design di piattaforme flottanti permanenti di estrazione idrocarburi [11]. In linea con questo approccio, la progettazione delle FOWT utilizza fattori di sicurezza meno conservativi rispetto agli standard applicati nell'*O&G*.

Secondo gli Standard **API RP 2SK** (*Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*) [49], il dimensionamento degli ormeggi deve essere formulato tenendo conto di due principali fattori di sicurezza: il *fattore di sicurezza per la resistenza ai carichi* agenti sugli ancoraggi ed il *fattore di sicurezza per la fatica* generata sugli stessi.

- Il fattore di sicurezza per la resistenza ai carichi (noto come *Strength Safety Factor*) deve essere soddisfatto, in generale, in due condizioni differenti: nella condizione di ormeggio "intatto" (*Intact Condition*) e nella condizione in cui una linea di ormeggio è danneggiata (*One-line Damaged Condition*), come indicato in [Tabella 4](#). Considerando l'alto rischio legato allo scenario di *failure* di una linea di ormeggio di una piattaforma di produzione di idrocarburi, questi impianti necessitano

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 52 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

obbligatoriamente di linee di ormeaggio ridondanti per garantire la stabilità degli stessi in tali condizioni accidentali [11, 44].

Tabella 4 - Fattore di Sicurezza per le Forze sugli Ancoraggi secondo lo Standard API RP 2SK (*Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*) [11, 44]

Standard API RP 2SK ( <i>Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures</i> )		Factor of Safety for Strength	
		Quasistatic Analysis	Dynamic Analysis
O&G	Intact Condition	2.00	1.67
	One-Line Damaged Condition	1.43	1.25
FOWT	Intact Condition	2.40	2.00

Nel caso delle turbine eoliche flottanti, invece, la ridondanza delle linee di ormeaggio è opzionale: non si studia quindi il caso di “*One-Line Damaged*” ma si introduce un “*Penalty Factor*” del 20% al fattore di sicurezza, che da 1.67 diventa 2 nel caso di *Analisi Dinamica (Dyanmic Analysis)*” mentre da 2.00 diventa 2.4 nel caso di *Analisi Quasistatica (“Quasistatic Analysis”)*. L’analisi Quasistatica degli ormeaggi prevede fattori di sicurezza più alti in quanto non include nei calcoli la risposta dinamica degli ancoraggi a diversi tipi di sollecitazioni, che sono inclusi invece nell’*Analisi Dinamica*.

- La fatica è una grave minaccia per l'integrità dei sistemi di ormeaggio. I dati statistici relativi all'industria dell'O&G mostrano che la fatica è una delle principali cause di rottura delle linee di ormeaggio. L'esperienza suggerisce che anche negli ormeaggi delle FOWT possono verificarsi guasti alle linee di ormeaggio dovute alla fatica. Infatti, le FOWT sono soggette ad oscillazioni più severe rispetto alle unità di produzione galleggianti dell'O&G, per via delle dimensioni inferiori e delle strutture più snelle, che risultano in movimenti più attivi in risposta al moto ondoso. L'accoppiamento del carico aerodinamico delle turbine eoliche con quello idrodinamico agente sulla sottostruttura introduce ulteriori movimenti della struttura galleggiante. Tali movimenti della piattaforma creano tensioni cicliche nelle cime di ormeaggio e riducono di conseguenza la resistenza alla fatica delle stesse. Oltre ai carichi di esercizio, anche i potenziali carichi accidentali in condizioni estreme possono influire negativamente sulla durabilità degli ormeaggi. Una potenziale mitigazione consiste nel sostituire parte della catenaria con funi in fibra sintetica come HMPE o poliestere, in particolare nella parte superiore della linea, generalmente maggiormente soggetta a fatica. I fattore di sicurezza da applicare nel

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 53 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormezzo ed Ancoraggio</b>		

calcolo della fatica sopportabile dagli ormeggi (noto come *Fatigue Safety Factor*) ha valori più alti dello *Strength Safety Factor*, in quanto la rottura di un ormeggio per via delle tensioni cicliche che generano fatica, è associata a maggiori in certezze. Secondo lo *Standard API [e.g., 50]*, tale fattore deve essere pari a 3.

Il Regolamento *Design of Offshore Wind Turbine Structures, Offshore Standard DNV-OS-J101 [48]* fornisce invece le combinazioni dei carichi ambientali caratteristici d'onda, vento, corrente e marea, ognuno con assegnati periodi di ritorno, con riferimento agli stati limite:

- (i) ULS – Ultimate Limit State Design;
- (ii) ALS – Accidental Limit State Design;
- (iii) FLS – Fatigue Limit State Design.

e alle seguenti condizioni operative:

- (i) Produzione di energia;
- (ii) Produzione di energia in caso di avaria;
- (iii) Avviamento della produzione energetica;
- (iv) Arresto della produzione energetica;
- (v) Arresto di emergenza della produzione energetica;
- (vi) Turbina ferma;
- (vii) Turbina ferma in avaria.

Tali condizioni operative si applicano per la progettazione di tutti gli elementi delle FOWT, inclusi i sistemi di ormeggio, per i quali le condizioni più gravose sono [48]:

Tabella 5 - Periodi di ritorno associati ai carichi ambientali d'onda, vento, corrente e corrente con riferimento agli stati limite [48]

Condizione Operativa	STATO LIMITE	Vento	Onda	Corrente
Produzione Energetica	ULS	Valor medio	50 anni	Valor medio
Turbina Ferma	ULS	50 anni	50 anni	50 anni
Turbina Ferma in Condizioni di Avaria	ALS	1 anno	1 anno	1 anno

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab.	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 54 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

Infine, si sottolinea che la verifica dei sistemi di ormeaggio si opera a utilizzando la seguente relazione [49]:

$$\gamma_{mean} T_{c,mean} + \gamma_{dyn} T_{c,dyn} < S_c \quad [\text{Eq. 8}]$$

Con:

$\gamma_{mean}$	Coeff. Parziale di Sicurezza
$T_{c,mean}$	Tensione Statica
$\gamma_{dyn}$	Coeff. Parziale di Sicurezza
$T_{c,dyn}$	Tensione Dinamica
$S_c$	95% del Minimo Carico di Rottura

Tabella 6 - Coefficienti di sicurezza riferiti alla tensione statica e dinamica da considerare nella verifica delle linee di ormeaggio [50].

Stato Limite	Coeff. Parziale di Sicurezza	Classe di Sicurezza	
		Normale	Alta
ULS	$\gamma_{mean}$	1.30	1.50
ULS	$\gamma_{dyn}$	1.75	2.20
ALS	$\gamma_{mean}$	1.00	1.00
ALS	$\gamma_{dyn}$	1.10	1.25

## 8 Conclusioni

Il progetto in esame prevede l'installazione di 28 aerogeneratori eolici offshore e due aree da destinare a piattaforme solari, sempre offshore, posizionati ad una distanza di circa 16 km delle coste di Corigliano-Rossano (CS), per una potenza complessiva dell'impianto è quantificata in 540 MW. Inoltre è parte d'opera un sistema di accumulo elettrochimico onshore posto all'interno del sedime della stazione di elevazione ubicata in prossimità della SE "Rossano" di proprietà Terna S.p.a. nel territorio del Comune di Corigliano-Rossano (CS). Le batimetriche indicano, in prossimità della zona di installazione, profondità che variano tra i

Progetto	Preliminare	<b>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</b>	Rev	<b>00</b>
Redazione	E3 soc. coop		Elab	<b>R_0010</b>
Data	Dicembre 2022		Pag.	<b>Pag. 55 di 59</b>
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

250 ed i 350 m. A tali profondità le turbine a fondazione fissa di tipo *Monopile*, *Tripodes* o *Jackets* non possono essere applicate.

Nella presente relazione descrittiva si sono analizzate le tecnologie ad oggi disponibili per la realizzazione di piattaforme flottanti per la produzione di energia eolica in acque profonde, e le relative tipologie di ormeaggio ed ancoraggio applicabili.

Per un'analisi preliminare del tipo di struttura flottante, e del relativo sistema di ormeaggi ed ancoraggi, si tiene conto dei seguenti fattori emersi dalle indagini preliminari effettuate sull'area in esame:

- La profondità media nella zona di installazione è tra 250 e 350 m;
- Le pendenze dei fondali sono comprese tra 1 e 4%;
- Le analisi del clima meteomarinico hanno rilevato che: a) circa il 90% delle onde che transitano nell'area d'interesse hanno un'altezza inferiore a 1; b) l'altezza significativa dell'onda associata ad un periodo di ritorno di 50 anni è 4.83 m;
- Gli effetti dell'installazione del Parco Eolico sugli ecosistemi acquatici devono essere minimizzati;

Sulla base delle analisi effettuate in merito alle tipologie di strutture flottanti e degli annessi sistemi di ormeaggio-ancoraggio, si ipotizzano le seguenti alternative progettuali:

1. Strutture flottanti di tipo *Semi-Submersible* con ormeaggio a catenaria e con sistema di ancoraggio a trascinamento (DEA) o con ancore a caricamento verticale (VLA). Questo tipo di struttura flottante si adatta bene a diverse profondità del fondale e prevede una tecnica di installazione relativamente semplice rispetto alle restanti, in quanto viene assemblata a terra (o su una dry-dock) e rimorchiata al sito di installazione. Le caratteristiche del fondale di natura limoso-argillosa potrebbero richiedere l'utilizzo di ancore a piastra (tipologia VLA), qualora le DEA non forniscano una sufficiente resistenza ai carichi orizzontali. Sulla base di più specifiche analisi, si potrà inoltre vagliare anche l'ipotesi di applicazione di Pali a Suzione (*Suction Buckets*) condivisi da più strutture flottanti. Dall'esperienza si evince che tale soluzione può incrementare la resistenza ai carichi ambientali garantendo allo stesso tempo un abbattimento dei costi dei sistemi di ormeaggio-ancoraggio.
2. Strutture flottanti di tipo TLP con ancoraggio di tipo Pali a Suzione (*Suction Buckets*) o Ancore a Caricamento Verticale (VLA). Questo tipo di struttura flottante è stato meno applicato per



Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 56 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

l'installazione di turbine eoliche rispetto ai sistemi a catenaria, in quanto i costi di installazione sono ancora alti in acque relativamente basse (poche centinaia di metri) rispetto a quelle tipiche degli impianti di produzione offshore (fino a migliaia di metri). Tuttavia, le TLP per turbine eoliche sono attualmente in una fase di rapido sviluppo e si considerano le più promettenti per via di due principali vantaggi rispetto alle turbine flottanti ormeggiate con sistema a catenaria: la 'footprint' sul fondale marino e la lunghezza delle linee di ormeggio sono notevolmente ridotte. Ci si aspetta pertanto che questi due aspetti, combinati alla ottimizzazione dei costi di installazione degli elementi tesi, renderanno la tecnologia TLP tra le più sostenibili sia da un punto di vista ambientale che economico.

Le considerazioni effettuate per i sistemi di ormeggio ed ancoraggio per turbine eoliche offshore, valgono anche per le piattaforme flottanti fotovoltaiche che verranno realizzate nell'area di intervento. Ci si aspetta che tali strutture flottanti, attualmente in fase di sviluppo, richiedano un sistema di ancoraggio che riduca al minimo gli spostamenti orizzontali delle piattaforme stesse, garantendo, allo stesso tempo un certo grado di flessibilità lungo la direzione verticale, tale da resistere alle sollecitazioni ondose. Uno studio più approfondito dei sistemi di ancoraggi per piattaforme fotovoltaiche offshore sarà realizzato nella fase di progettazione successiva, in funzione, anche, delle caratteristiche tecnologiche delle piattaforme stesse, attualmente in rapido sviluppo.

## Referenze

- [1] E. I. Konstantinidis, Pantelis Botsaris (2016). Wind turbines: current status, obstacles, trends and technologies. November 2016 - IOP Conference Series Materials Science and Engineering 161(1):012079 [DOI: 10.1088/1757-899X/161/1/012079](https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012079)
- [2] Adnan Durakovic – November 2021 – website article - Fixed Bottom Offshore Wind Farms 90 meters deep? Offshoretronic Says Yes: <https://www.offshorewind.biz/2021/11/29/fixed-bottom-offshore-wind-farms-90-metres-deep-offshoretronic-says-yes/>;
- [3] Adnan Durakovic – October 2021 – website article - Norwegians Developing Monopile Foundation for 100-Metre Depths <https://www.offshorewind.biz/2022/10/19/norwegians-developing-monopile-foundation-for-100-metre-depths/>
- [4] Robert Speht, CEO and co-founder of FloatWind Ltd – WPED Contributor - Spetember 2021 - website article - <https://www.windpowerengineering.com/ready-to-float-a-permanent-cost-reduction-for-offshore-wind/>
- [5] Hannon, M., Topham, E., Dixon, J., McMillan, D., & Collu, M. (2019). Offshore wind, ready to float? Global and UK trends in the floating offshore wind market. <https://doi.org/10.17868/69501>

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 57 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

- [6] Equinor Hywind: <https://www.equinor.com/energy/hywind-scotland>
- [7] Mitra A. et al. (2021). Sway vibration control of floating horizontal axis wind turbine by modified spar-torus combination. Ocean Engineering vol 219. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108232>
- [8] Haruki Yoshimoto et al., (2013). Development of floating offshore substation and wind turbine for Fukushima FORWARD. Proceedings of the International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy Oct 28-30, 2013, Tokyo, Japan. Japan Marine United Corporation.
- [9] Eolink – Tipologia Semi-submersible – Offshore wind France <http://eolink.fr/fr/>
- [10] M. Aufleger, R. Klar and S. Lumassegger Conference Paper (2015). A Comprehensive Hydraulic Gravity Energy Storage System both for Offshore and Onshore Applications - E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 2015, The Hague, the Netherlands. [https://www.researchgate.net/profile/Robert-Klar-2/publication/307866808\\_A\\_Comprehensive\\_Hydraulic\\_Gravity\\_Energy\\_Storage\\_System\\_-\\_both\\_for\\_Offshore\\_and\\_Onshore\\_Applications/links/57c92b508aed67897036008/A-Comprehensive-Hydraulic-Gravity-Energy-Storage-System-both-for-Offshore-and-Onshore-Applications.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Robert-Klar-2/publication/307866808_A_Comprehensive_Hydraulic_Gravity_Energy_Storage_System_-_both_for_Offshore_and_Onshore_Applications/links/57c92b508aed67897036008/A-Comprehensive-Hydraulic-Gravity-Energy-Storage-System-both-for-Offshore-and-Onshore-Applications.pdf)
- [11] Kai-Tung Ma et al. (2019). Mooring System Engineering for Offshore Structures; Chapter 15 - Mooring for floating wind turbines; pages 299-315; Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818551-3.00015-6>
- [12] Windfloat Floating Offshore Wind concept: <https://www.principlepower.com/windfloat>
- [13] Ideol Floating offshore wind concept: <https://www.principlepower.com/windfloathttps://www.bw-ideol.com/en/technology>
- [14] Shimpuu Floating offshore wind concept: <https://www.evwind.es/2014/10/14/japan-eyes-wind-energy-fukushima-floating-offshore-wind-farm-demonstration-project/48063>
- [15] OO-Star Floating offshore Wind concept: [https://www.sintef.no/globalassets/project/eera-deepwind-2018/presentations/closing\\_landbo.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/project/eera-deepwind-2018/presentations/closing_landbo.pdf)
- [16] Blue H Offshore wind concept: <https://www.blueengineering.com/tablet/historical-development.html> Haoyu Wu et al. (2020).
- [17] PelaStar Floating Offshore Wind concept: <https://glosten.com/project/pelastar/>
- [18] Eco TLP Floating Offshore Wind concept: <https://ecotlp.com/>
- [19] GICON-SOF Floating Offshore Wind concept: <http://www.gicon-sof.de/en/technical-solution.html>
- [20] M Leimeister et al (2018) Critical review of floating support structures for offshore wind farm deployment Journal of Physics: Conference Series) J. Phys.: Conf. Ser. 1104 012007. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1104/1/012007/pdf>
- [21] Thomsen J.B. et al. (2021). Modeling the TetraSpar Floating Offshore Wind Turbine Foundation as a Flexible Structure in OrcaFlex and OpenFAST. *Energies* 2021, 14(23), 7866; <https://doi.org/10.3390/en14237866>
- [22] SBM Floating Offshore Wind concept: <https://www.sbmoffshore.com/creating-value/new-energies>

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 58 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

- [23] Ribuoat, J.: HEXAFLOAT – Innovative Competitive Offshore Energy Production, in: MCE Deepwater Development 2019 (MCEDD 2019), available at: <https://mcedd.com/wp-content/uploads/2019/04/MCEDD-2019-Presentation-SAIPEM-18-March.pdf>
- [24] Floatgen & Hibiki Floating Offshore Wind concept <https://www.bw-ideol.com/en/technology>
- [25] Ghigo, A.; Cottura, L.; Caradonna, R.; Bracco, G.; Mattiazzo, G. Platform Optimization and Cost Analysis in a Floating Offshore Wind Farm. J. MAR. SCI. ENG. 2020, 8, 835. <https://doi.org/10.3390/jmse8110835>
- [26] Zhiyu Jiang (2021). Installation of offshore wind turbines: A technical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 139, 110576, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110576>.
- [27] X1Wind Floating Wind Concept with single point mooring: <https://www.plocan.eu/en/x1-wind-installs-floating-platform-in-the-plocan-test-site/>
- [28] CoreWind - D2.1 Review of the state of the art of mooring and anchoring designs, technical challenges and identification of relevant DLCs. March 2020. WP2. <https://corewind.eu/wp-content/uploads/files/publications/COREWIND-D2.1-Review-of-the-state-of-the-art-of-mooring-and-anchoring-designs.pdf>
- [29] Development of screw anchors for floating Marine Renewable Energy system arrays incorporating anchor sharing Periodic Reporting for period 1 - SAFS: [https://cordis.europa.eu/docs/results/h2020/753/753156\\_PS/case-studies.png](https://cordis.europa.eu/docs/results/h2020/753/753156_PS/case-studies.png)
- [30] Yu-Hsien Lin et al 2019 - Investigation of Hydrodynamic Forces for Floating Offshore Wind Turbines on Spar Buoys and Tension Leg Platforms with the Mooring Systems in Waves <https://doi.org/10.3390/app9030608>
- [31] Bañuelos-García, F.; Ring, M.; Mendoza, E.; Silva, R. (2021). A Design Procedure for Anchors of Floating Ocean Current Turbines on Weak Rock. Energies, 14, 7347. <https://doi.org/10.3390/en14217347>
- [32] Tiffany Z. Monaco (2013). Experimental Studies of Scale Model Drag Embedment Anchors (DEAs) Subjected to Impulse Forces. Master Thesis [https://surface.syr.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1004&context=cie\\_thesis](https://surface.syr.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1004&context=cie_thesis)
- [33] Kai-Tung Ma et al. (2019). Mooring System Engineering for Offshore Structures; Chapter 8 – Anchor Selection; pages 155-174; Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818551-3.00008-9>.
- [34] [Suction Bucket Installation Procedure \(Van Oord website\): https://www.vanoord.com/en/updates/van-oord-install-innovative-suction-bucket-foundations-deutsche-bucht-offshore-wind-farm/](https://www.vanoord.com/en/updates/van-oord-install-innovative-suction-bucket-foundations-deutsche-bucht-offshore-wind-farm/)
- [35] Xue Xu, Narakorn Srinil (2015). Dynamic Response Analysis of Spar-Type Floating Wind Turbines and Mooring Lines with Uncoupled vs Coupled Models. Conference: Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, St. John's, Newfoundland, Canada. <https://doi.org/10.1115/OMAE2015-41512>
- [36] Jeon et al. (2013). Dynamic response of floating substructure of spar-type offshore wind turbine with catenary mooring cables. Ocean Engineering; volume 13; pages 356-364. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2013.07.017>

Progetto	Preliminare	<i>Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto ibrido di generazione eolica e fotovoltaica offshore flottante con sistema di accumulo e delle opere connesse ubicato nel mar Jonio</i>	Rev	00
Redazione	E3 soc. coop		Elab	R_0010
Data	Dicembre 2022		Pag.	Pag. 59 di 59
Titolo Elaborato		<b>Relazione Descrittiva della Tipologia di Piattaforma Flottante e dei Sistemi di Ormeaggio ed Ancoraggio</b>		

- [37] OC3 Hywind concept (NREL) concept: Definition of the Floating system for Phase IV of OC3. J.Jonkman from NREL. Technical report NREL/TP-500-47535. <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47535.pdf>
- [38] Shared anchoring system: <https://www.reutersevents.com/renewables/wind/shared-anchors-slice-cost-floating-wind-parts-vessels>
- [39] Kenji. Shimada et al. (2018). An empirical design formula of a shared pile anchor for a floating offshore wind turbine. Grand renewable Energy 2018 Proceedings. O-We-12-2. Pacific Yokohama, Yokohama, Japan. [https://www.istage.ist.go.jp/article/gre/1/0/1\\_159/pdf-char/ja](https://www.istage.ist.go.jp/article/gre/1/0/1_159/pdf-char/ja)
- [40] Suzuki, Koji, et al. (2010). Initial design of TLP for offshore wind farm. Proc. of Renewable Energy 2010 International Conference. [http://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/ishihara/proceedings/2010-6\\_paper.pdf](http://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/ishihara/proceedings/2010-6_paper.pdf)
- [41] Xiao Shuang Tian (2016) Design, Numerical Modelling and Analysis of TLP Floater Supporting the DTU 10MW Wind Turbine. Master Thesis, NTNU Norwegian University of Science and Technology. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2402257>
- [42] Offshore Wind Mooring: <https://www.esubsea.com/offshore-wind-mooring/>
- [43] Suction Anchors: <https://www.offshorewinddesign.com/suction-anchor-foundations/>
- [44] Huang, W.-H.; Yang, R.-Y. Water Depth Variation Influence on the Mooring Line Design for FOWT within Shallow Water Region. J. Mar. Sci. Eng. 2021, 9, 409. <https://doi.org/10.3390/jmse9040409>
- [45] Gravity Anchors and clump weights: <https://www.offshorewinddesign.com/gravity-anchors/>
- [46] Kai-Tung Ma et al. (2019). Mooring System Engineering for Offshore Structures; Chapter 4 – Mooring Design; Pages 63-83, ISBN 9780128185513, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818551-3.00004-1>.
- [47] Giovanni Aiosa do Amaral (2020). Analytical Assessment of the Mooring System Stiffness. Master Thesis' Project: Contributions to design and analysis of mooring systems. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28848.38401>
- [48] Offshore Standard DNV-OS-J101, May 2014 <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNVPM/codes/docs/2014-05/Os-J101.pdf>
- [49] Shu, Hongbo, et al. "API RP 2SK 4th Edition-An Updated Stationkeeping Standard for the Global Offshore Environment." Offshore Technology Conference. OnePetro, 2018. <https://doi.org/10.4043/29024-MS>