

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA  
PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO  
NEL MARE ADRIATICO MERIDIONALE - LUIPIAE MARIS  
35 WTG – 525 MW

**PROGETTO DEFINITIVO - SIA**

Progettazione e SIA



Indagini ambientali e studi specialistici



Studio misure di mitigazione e compensazione



supervisione scientifica



**3. STRUTTURE DI FONDAZIONE AEROGENERATORI**

**R.3.2.2 Ancoraggi**

REV.	DATA	DESCRIZIONE
01	05/23	int volon

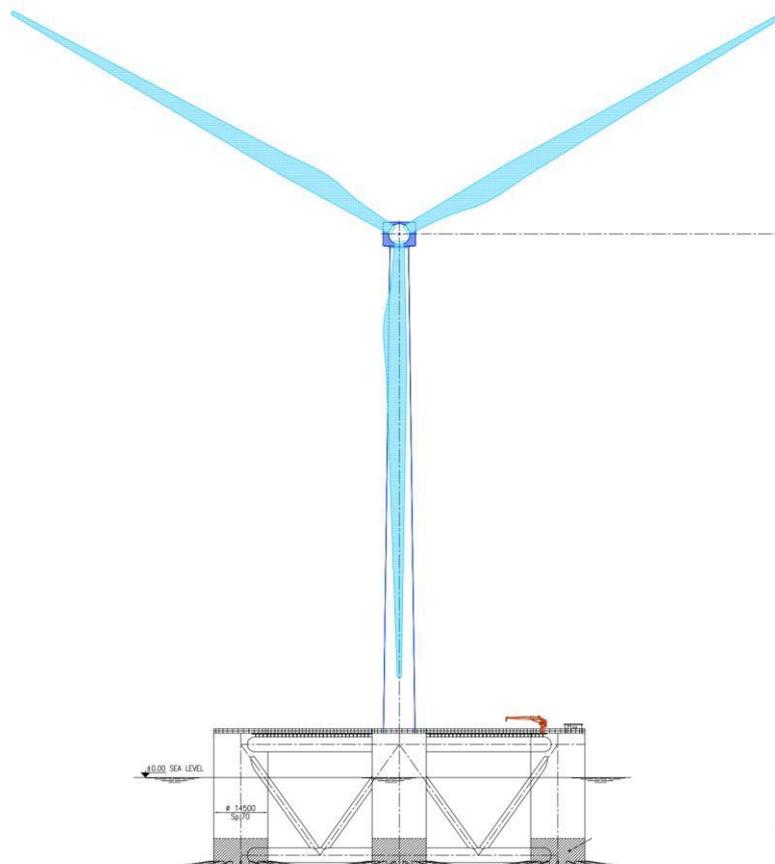


# Progetto del Parco Eolico Lupiae Maris

## AEROGENERATORI FLOTTANTI

RELAZIONE ILLUSTRATIVA DEI SISTEMI DI ANCORAGGIO

1736-MAR-REP-001-00



## Sommario

1	INTRODUZIONE.....	3
2	SCOPO DEL DOCUMENTO .....	3
3	CARATTERISTICHE DELLE TORRI EOLICHE GALLEGGIANTI.....	4
3.1	Waterplane stabilized, Semisubmersible. ....	4
4	CARATTERISTICHE DEL FONDALE .....	8
5	SISTEMI DI ANCORAGGIO COMPATIBILI.....	11
6	DESCRIZIONI DEI SISTEMI DI ORMEGGIO INDAGATI E SELEZIONATI .....	12
6.1	Punti di ancoraggio alternative e valutazioni tecniche .....	14
6.2	Sistemi di ancoraggio selezionati .....	18

## 1 INTRODUZIONE

La società di scopo Lupiae Maris S.r.l (il “Cliente”), intende realizzare un grande impianto eolico offshore, a largo di Brindisi, chiamato a sua volta Lupiae Maris.

L’impianto eolico Lupiae Maris, attualmente in fase di sviluppo, prevede 35 turbine della potenza unitaria di 15MW per un totale di 525 MW.

L’impianto eolico trasmetterà verso terra l’energia elettrica prodotta tramite collegamento in alta tensione a 380kV che si allaccerà alla rete di distribuzione nazionale. A tal proposito verrà prevista una sottostazione elettrica offshore per convogliare a terra l’energia prodotta dalle turbine eoliche tramite una connessione in cavi ad Alta Tensione.

## 2 SCOPO DEL DOCUMENTO

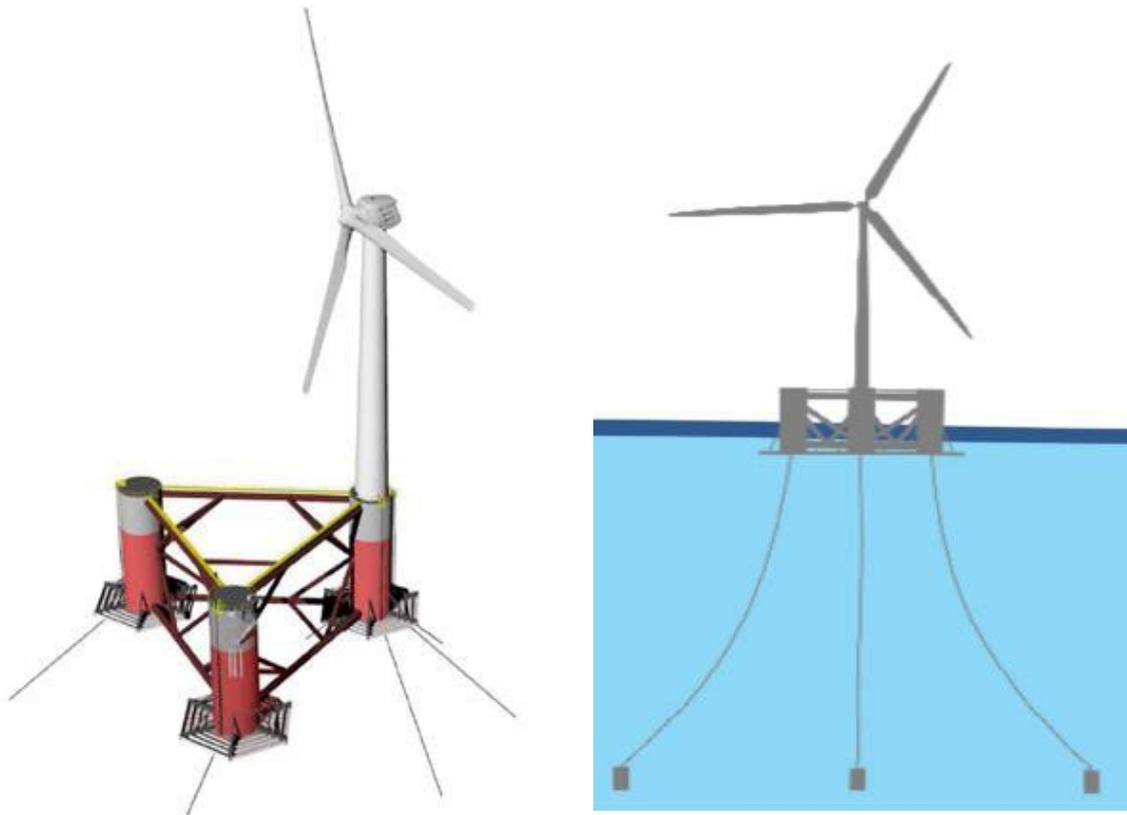
Lo scopo di questa nota tecnica è di descrivere le caratteristiche dei sistemi di ormeggio e ancoraggio delle strutture galleggianti sulla quali verranno installate le turbine per il parco eolico galleggiante di Lupiae Maris e di fornire indicazioni sulla loro modalità di installazione.

### 3 CARATTERISTICHE DELLE TORRI EOLICHE GALLEGGIANTI

Per gli aerogeneratori dell'impianto eolico Lupiae Maris sono stati selezionati due tipi strutture galleggianti.

#### 3.1 Waterplane stabilized, Semisubmersible.

Strutture in acciaio semisommersibili, composte da tre colonne, disposte ad un angolo di  $120^\circ$  tra di loro e collegate da telai di controvento tubolari. Il generatore eolico si trova generalmente su una di queste colonne.

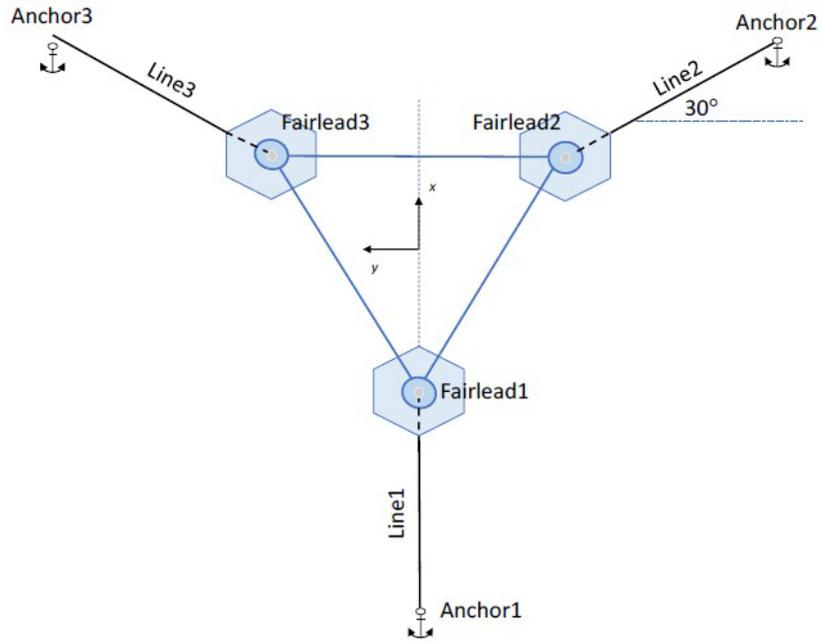


All'interno di tutte le colonne sono presenti i serbatoi per l'acqua di zavorra, che in corrispondenza della torre eolica è immagazzinata in minore quantità per motivi di assetto.

Nella parte inferiore la struttura è concepita in modo tale da "intrappolare l'acqua", determinando

così un aumento della massa aggiunta, con abbassamento delle frequenze naturali della struttura in sussulto (heave) e in beccheggio (pitch), e della resistenza viscosa, che contribuisce a diminuire la risposta globale della piattaforma.

Per quanto riguarda il sistema di ormeggio, la soluzione preliminare era di tipo a catenaria, con tre linee di ormeggio collegate a ciascuna colonna



(a) Top view of the mooring system

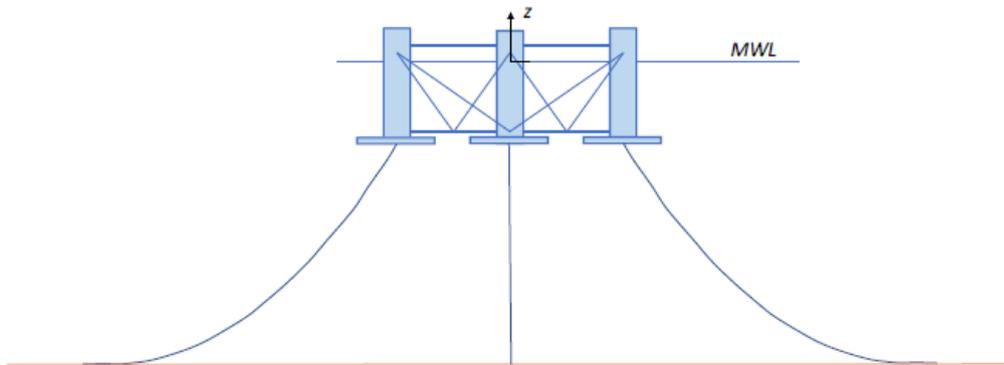
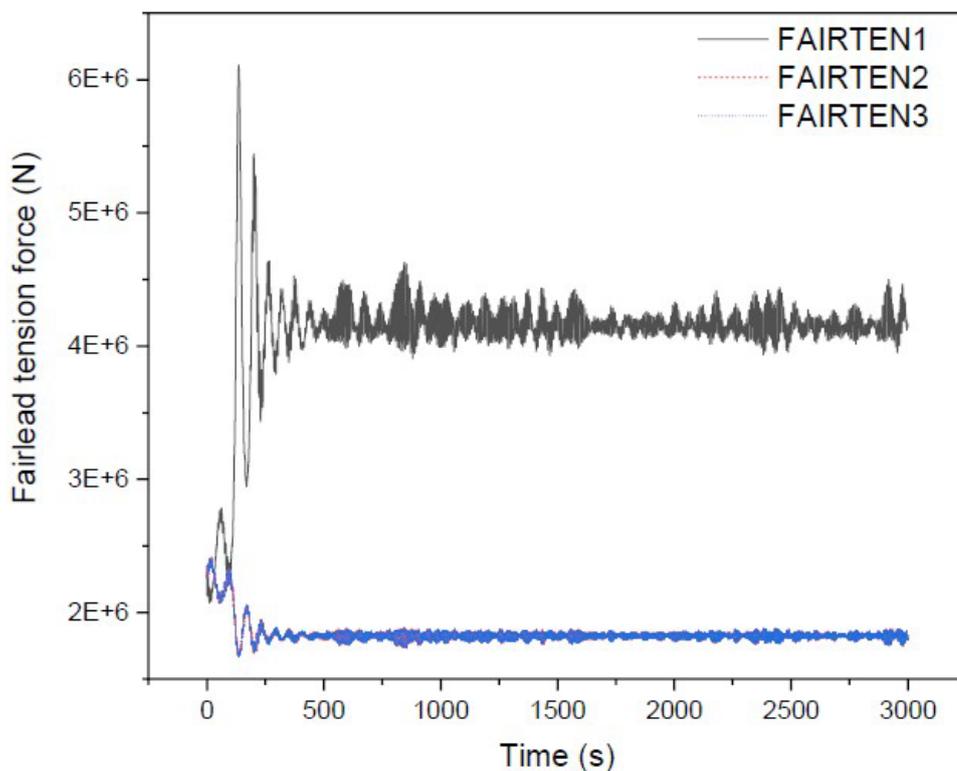


Table 27 Mooring lines properties for semi-submersible platform

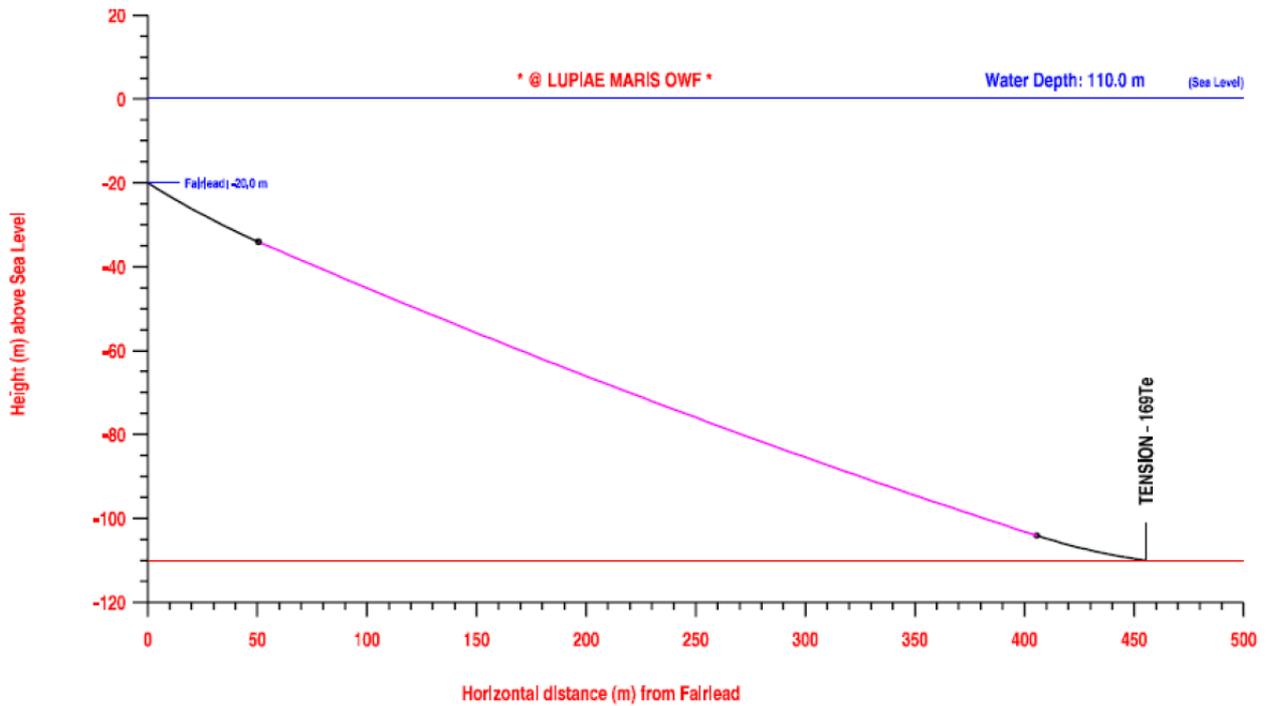
Parameter	Unit	Value
Mooring system type	-	Chain Catenary
Line Type	-	R3 Studless Mooring Chain
Line Breaking Strength	kN	22,286
Number of Lines	-	3
Anchor Depth	m	150
Fairlead Depth	m	20
Dry Line Linear Density	Kg/m	685
Diameter	m	0.333
Line length	m	600
Horizontal Restoring (static analysis)	Stiffness kN/m	6000
<b>Pre-tension force</b>	<b>kN</b>	<b>2280</b>

La figura seguente mostra le time history delle tensioni nelle tre linee di ormeggio. Il carico massimo è di circa 6100kN.

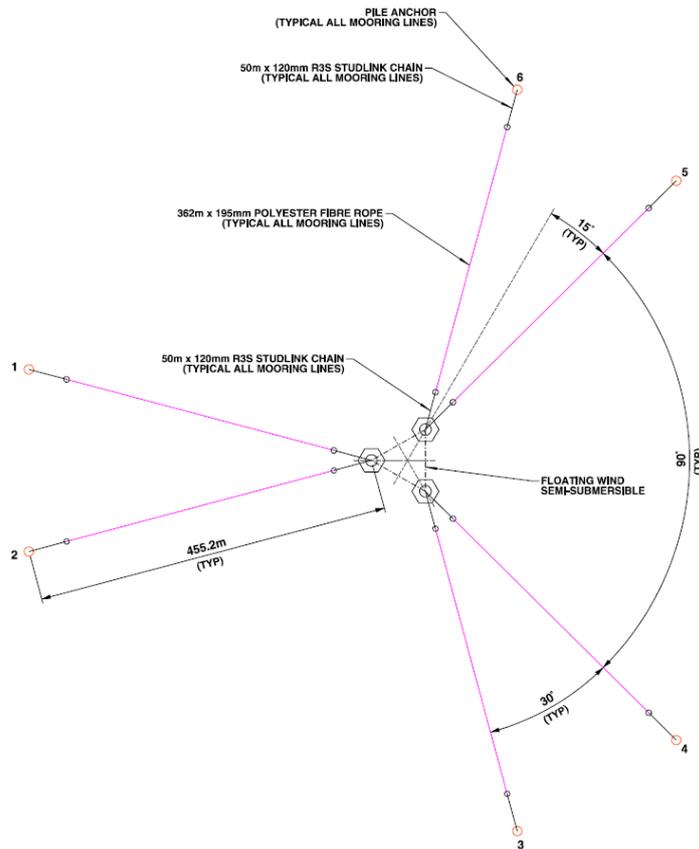


Tuttavia, nell'approfondimento degli studi sul fondale, le condizioni del sito hanno individuato delle aree con presenza di formazioni superficiali che hanno dato origine a forme di coralligeni. Pertanto, al fine di eliminare qualsiasi tipo di interferenza con queste formazioni è stato escluso l'utilizzo del sistema a catenaria (cui sono inevitabilmente associati elementi giacenti e "draganti")

sul fondale) prevedendo dei sistemi di ormeggio semi tesi (taut-leg mooring system).



Tipologia di ormeggio ipotizzato



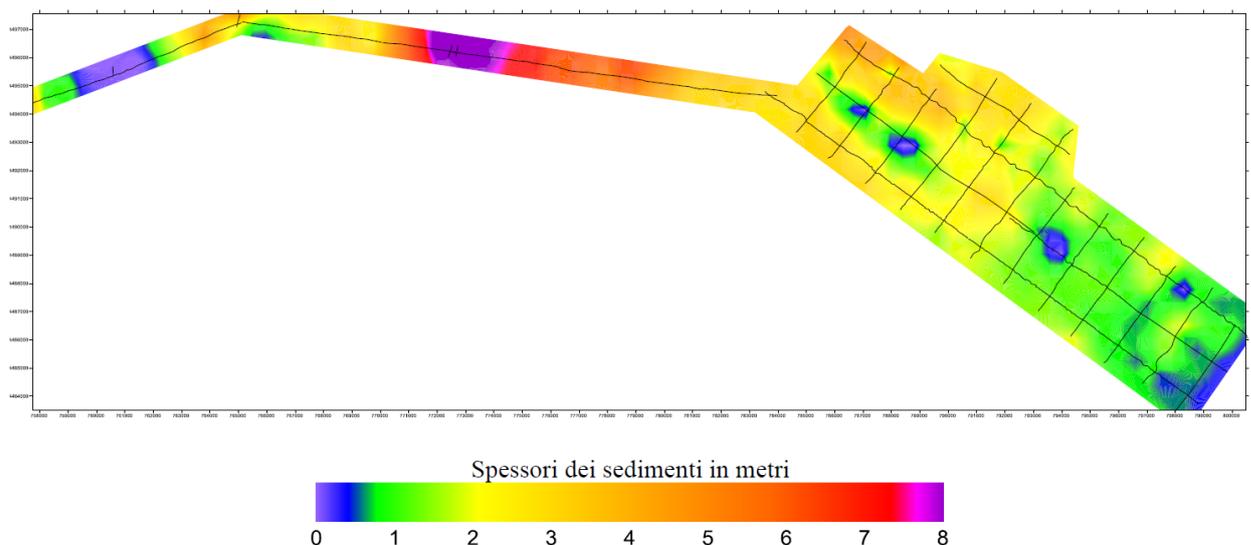
Configurazione delle sei linee di ormeggio

## 4 CARATTERISTICHE DEL FONDALE

È stata eseguita una prospezione geofisica mediante Sub Bottom Profiler per determinare la stratigrafia dei fondali nell'area di progetto. Le profondità d'acqua variano tra 100 m e 120 m circa.

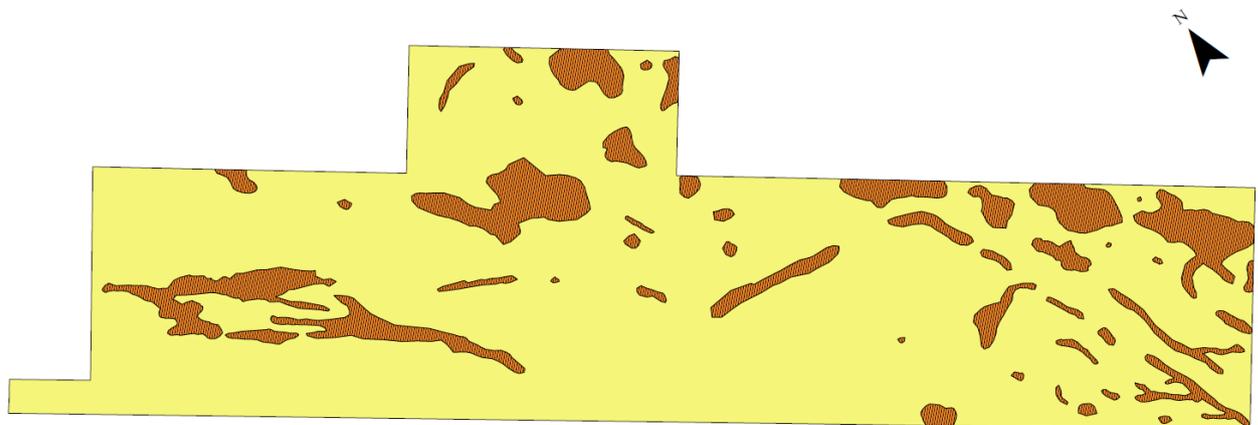
l'assetto stratigrafico atteso nell'area interessata dal progetto Lupiae Maris consiste in una sottile copertura di argilla sabbiosa/limosa molto soffice, sovrastante uno strato di sabbia limosa/argillosa di spessore variabile. Al di sotto di questo strato di sabbia sono previsti terreni di natura fine più rigidi. Non si può escludere che all'interno di queste formazioni si possano incontrare strati parzialmente litificati/cementati, sebbene non siano state riscontrate prove di cementazione entro i primi 50 m di profondità, sulla base prova penetrometrica effettuata in prossimità dell'area di progetto nell'ambito della realizzazione del progetto TAP, appena oltre il margine continentale ad una profondità d'acqua di 175 m. Il substrato roccioso è previsto a profondità comprese tra 400 e 600 m dal fondale.

Si rimanda agli elaborati ES.6.1.1\_01; R.1.3.2; ES.6.2.1\_01 per i necessari approfondimenti.



Le indagini effettuate con i rilievi Multibeam e Side Scan Sonar sono state interpretate nello studio al fine di caratterizzare le biocenosi presenti nell'area dell'impianto.

L'individuazione di una mappa della Biocenosi e del fotomosaico ottenuto mediante Side Scan Sonar ha permesso in prima analisi di redigere una caratterizzazione "ipotizzata" delle biocenosi dei fondali, confrontata con dati bibliografici a disposizione e successivamente approfondita e verificata con rilievi ROV – verità a mare.



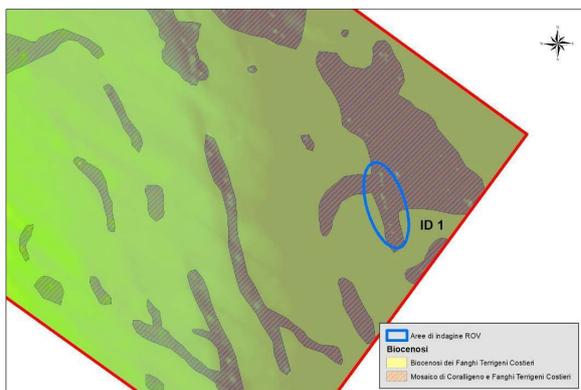
#### Biocenosi

- Biocenosi dei Fanghi Terrigeni Costieri
- Mosaico di Coralligeno e Fanghi Terrigeni Costieri

Habitat	Area_ha	Percentuale
Biocenosi dei Fanghi Terrigeni Costieri	6.407,3	86,1%
Mosaico di Coralligeno e Fanghi Terrigeni Costieri	1.034,5	13,9 %

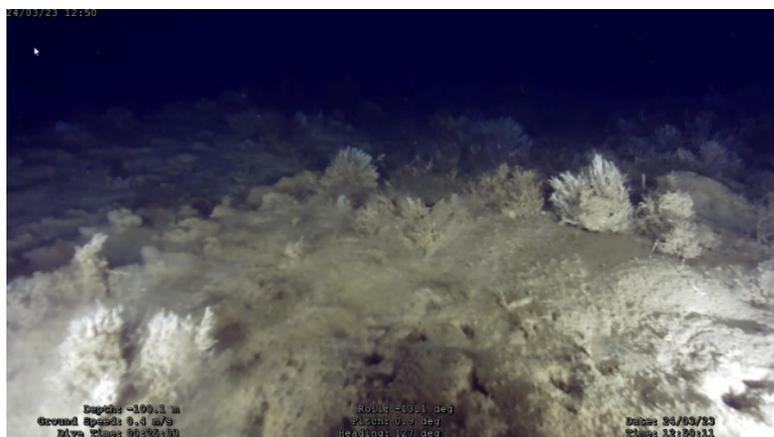
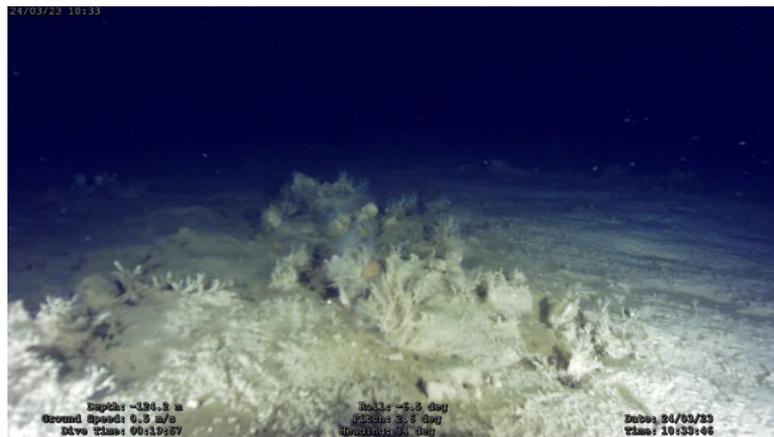
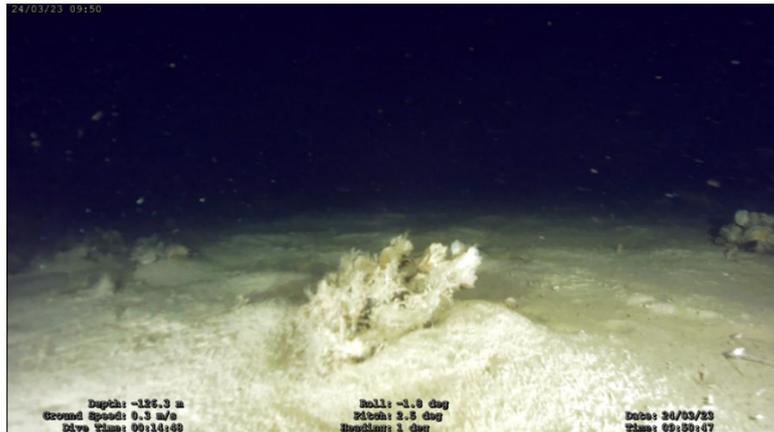
Attraverso l'utilizzo della classe "mosaico di Coralligeno e Fanghi Terrigeni costieri" si è inteso rappresentare la diversità morfologica che caratterizza alcune porzioni del fondale dell'area di studio, contraddistinte dalla presenza di strutture rocciose su fondo molle e/o di strutture di fondo duro coperte da un sottile strato di sedimento sabbioso. Le Biocenosi dei Fanghi Terrigeni Costieri (VTC) fanno parte delle biocenosi dei fondi mobili e si caratterizzano per la presenza di fanghi di origine continentale che tendono a depositarsi alle maggiori profondità del piano circalitorale e le specie che li colonizzano possono essere diverse secondo la velocità di sedimentazione.

Per l'area di impianto sulla scorta dell'analisi multibeam delle biocenosi sono stati realizzati n.6 percorsi concentrici per analizzare tramite ROV le aree individuate dalla mappa della biocenosi.



L'attività di analisi del filato e dei fotogrammi acquisiti confermano l'interpretazione dei dati geoaustici e nello specifico la presenza di un mosaico di Coralligeno di ambiente profondo e Fanghi Terrigeni Costieri.

Si evidenziano tuttavia alcune differenze fra le aree indagate



## 5 SISTEMI DI ANCORAGGIO COMPATIBILI

Nell'industria offshore esistono diverse soluzioni di ancoraggio per strutture galleggianti con ormeggi a catenaria. L'individuazione del sistema più idoneo è subordinata a una serie di condizioni a contorno, che dipendono anche dalle caratteristiche geotecniche e geomorfiche del sito. Campagne di indagine geofisiche e geotecniche sono necessarie per la selezione del punto di ancoraggio più idoneo.

Le soluzioni di ancoraggio più adatte al sito di Lupiae Maris, caratterizzato da sedimenti di natura rocciosa, o sedimenti cementati, sono illustrate sinteticamente in tabella nella tabella sottostante e descritte nel capitolo successivo.

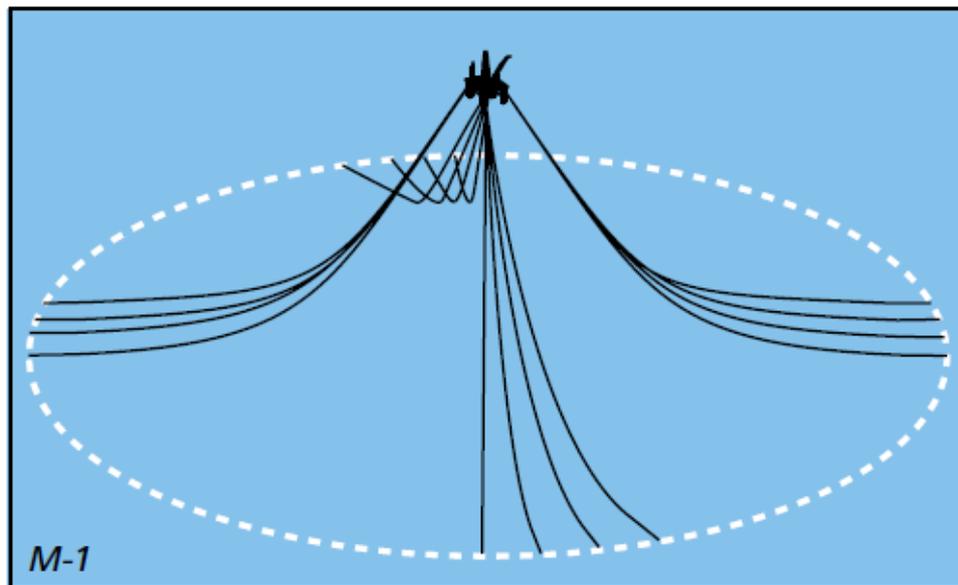
Sistema di ancoraggio	Fondale		
	Sabbie sciolte	Sabbie medio/alta densità	Fondali rocciosi
ANCORE A GRAVITA'			
PALI INFISSI			
PALI TRIVELLATI			
DRAG ANCHORS			

**LEGENDA**

	APPLICABILE
	POTENZIALMENTE APPLICABILE
	NON APPLICABILE

## 6 DESCRIZIONI DEI SISTEMI DI ORMEGGIO INDAGATI E SELEZIONATI

La soluzione prevista inizialmente per le strutture galleggianti degli aerogeneratori dell'impianto Lupie Maris prevedeva l'adozione di sistemi di ormeggio con linee a catenaria (catenary mooring system). Questi sistemi hanno la funzione di collegare la struttura galleggiante al sistema di ancoraggio posizionato sul fondale marino. Le linee di ormeggio arrivano al punto di ancoraggio orizzontalmente. Di conseguenza, il punto di ancoraggio è soggetto solo a forze orizzontali.



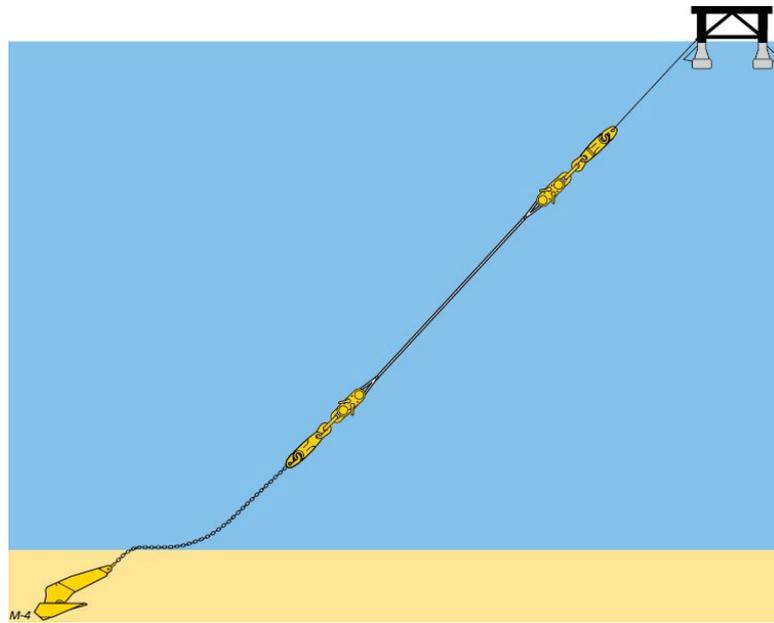
### **Sistemi di ormeggio con linee a catenaria**

La stabilità del sistema è garantita dal peso proprio della catenaria. La catenaria, che collega il galleggiante con l'ancora ed è solitamente composta da catena e cavo, si trova parzialmente sospesa in acqua. È però presente un tratto appoggiato sul fondale marino che riduce le forze verticali agenti sul sistema di ancoraggio. Quando la struttura galleggiante è in equilibrio, gran parte della catenaria giace sul fondale del mare mentre la restante parte è sospesa. Solitamente il tratto orizzontale è tra le 5 e le 20 volte superiore al tratto verticale.

Quando la struttura si sposta orizzontalmente dalla sua posizione di equilibrio, la lunghezza della parte di catenaria appoggiata sul fondo si riduce. Essendo la tensione proporzionale alla parte sospesa della catenaria, il progressivo aumento di linea sospesa comporta un incremento di tensione nella linea stessa.

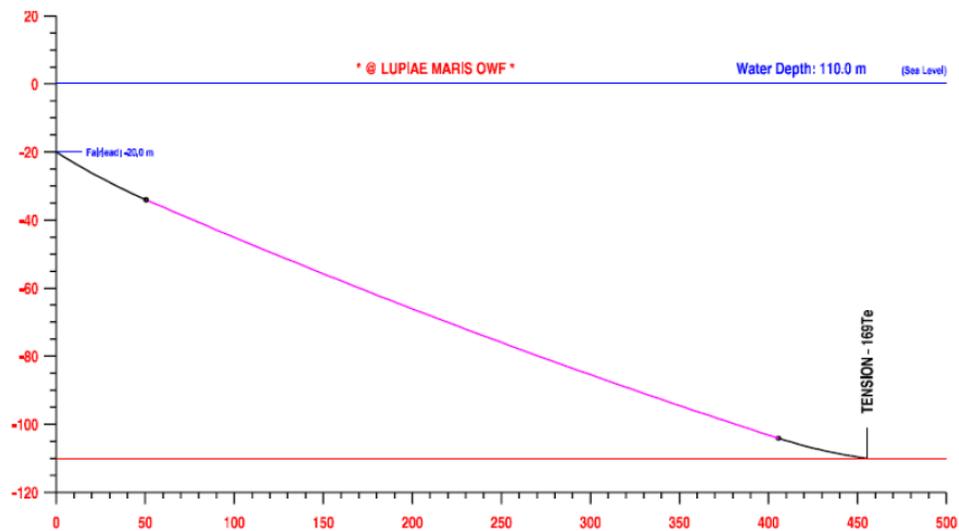
La figura seguente mostra i tre componenti fondamentali del sistema:

- la linea di ormeggio
- i connettori
- il punto di ancoraggio



**Rappresentazione schematica di una linea di ormeggio a catenaria**

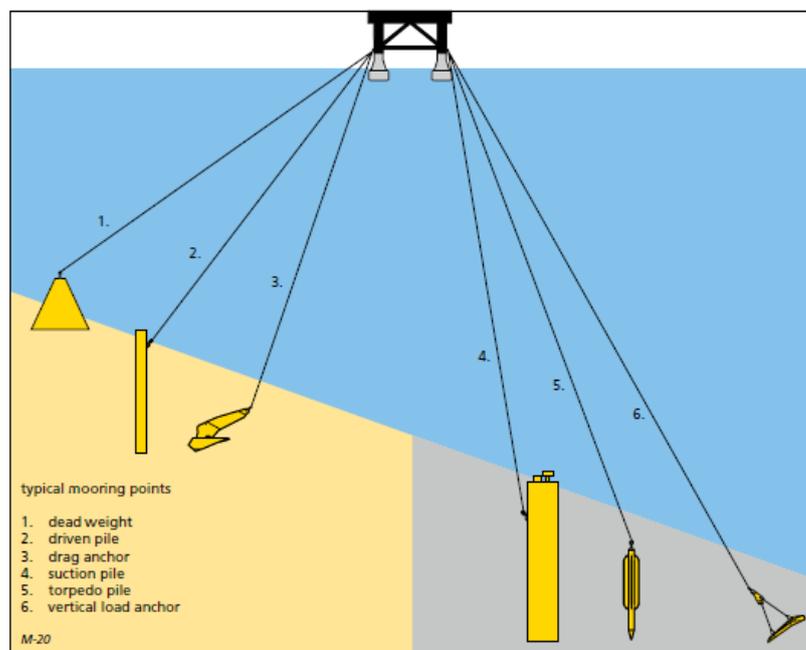
Tuttavia, nell'approfondimento degli studi sul fondale, le condizioni del sito hanno individuato delle aree con presenza di formazioni superficiali che hanno dato origine a forme di coralligeni. Pertanto, al fine di eliminare qualsiasi tipo di interferenza con queste formazioni è stato escluso l'utilizzo del sistema a catenaria (cui sono inevitabilmente associati elementi giacenti e "draganti" sul fondale) prevedendo dei sistemi di ormeggio semi tesi (taut-leg mooring system).



## 6.1 Punti di ancoraggio alternative e valutazioni tecniche

La scelta base del punto di ancoraggio è determinata principalmente dalla combinazione di profondità d'acqua, caratteristiche geotecniche e geomorfiche del fondale e carico massimo applicato. Campagne di indagini geofisiche e geotecniche, atte all'identificazione delle tipologie e della natura dei fondali, e analisi ambientali, si rendono dunque necessarie per la scelta delle tecniche di ormeggio e ancoraggio più opportune sia da un punto di vista strutturale che ambientale.

La figura seguente mostra le diverse tipologie di punto di ancoraggio al variare della profondità d'acqua (da bassa ad alta) e delle caratteristiche del suolo (da alta densità o roccioso a sciolto o con bassa consistenza).



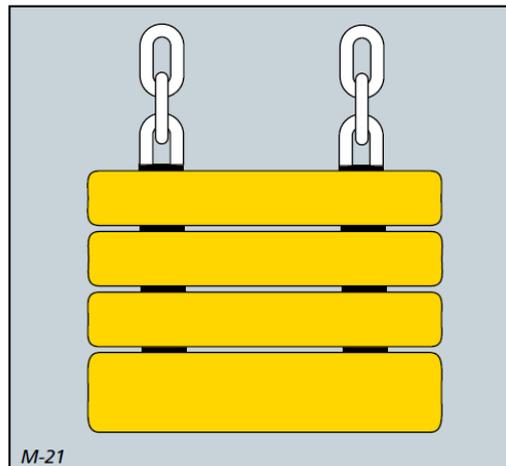
Le principali soluzioni di ancoraggio impiegabili in fondali ad alta densità e rocciosi sono descritte nelle pagine seguenti.

### 6.1.1 Ancore a gravità (dead weight)

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

Generalmente sono composte da calcestruzzo o leghe metalliche pesanti. La ghisa viene spesso

preferita quale materiale di fabbricazione per la sua elevata densità, la quale permette una riduzione del volume di circa 4 volte rispetto al calcestruzzo.

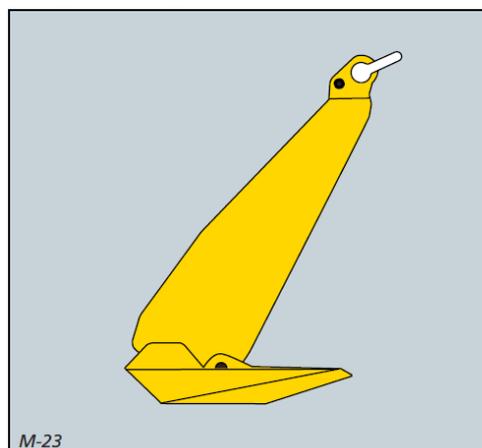


La geometria di questa tipologia di ancore può essere più o meno complessa allo scopo di modificare il rapporto carico/peso ed agire di conseguenza sul coefficiente di attrito tra ancoraggio e terreno.

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

#### 6.1.2 [Ancore a trascinamento \(Drag Embedded Anchor- DEA\)](#)

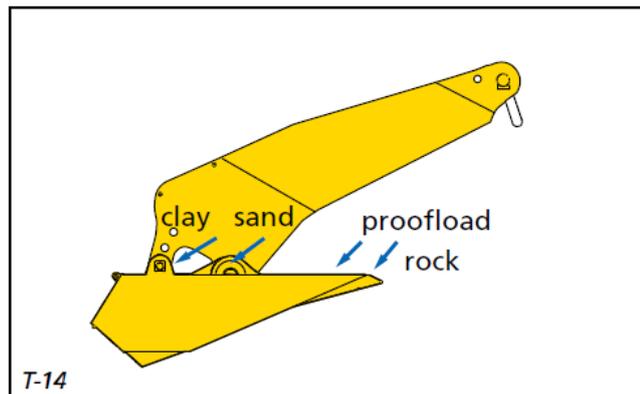
Nel caso di configurazione di ormeggio a catenaria vengono spesso scelte ancore installate mediante trascinamento (DEA), in grado di gestire il carico orizzontale.



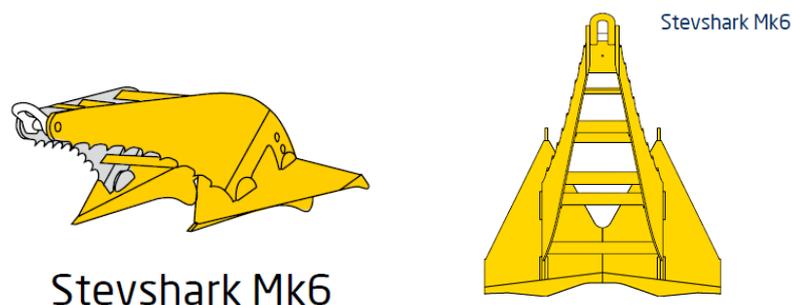
Le ancore di questo tipo, generalmente di geometria triangolare o similare, vengono calate sul fondale e quindi trascinate fino al raggiungimento di un certo valore di penetrazione all'interno del terreno. La penetrazione richiesta viene ottenuta grazie all'orientazione della sezione di testa ('fluke')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

In presenza di fondali estremamente duri, le DEA non sono in grado di penetrare in profondità.

In questo caso la resistenza si sviluppa localmente sulle unghie dell'ancora, che sono di conseguenza soggette a carichi molto alti rispetto alle condizioni sperimentabili in sabbie sciolte o argille a bassa consistenza. Per caratteristiche del fondale di questo tipo, la scelta dell'ancora deve essere indirizzata verso una tipologia che garantisca un'adeguata resistenza per carichi concentrati.



Sono disponibili sul mercato ancore dotate di marre (fluke) con punte (unghie) taglienti e fuso (shank) seghettato (tipo Stevshark Mk5 o Mk6 di Vryhof). Il peso di queste ancore può essere incrementato, aggiungendo della zavorra all'interno corpo cavo del fluke dell'ancora, accrescendolo fino al 35% in più. Questo risulta utile nei suoli molto duri per favorire la penetrazione e sviluppare una maggiore pressione di contatto sulle punte.

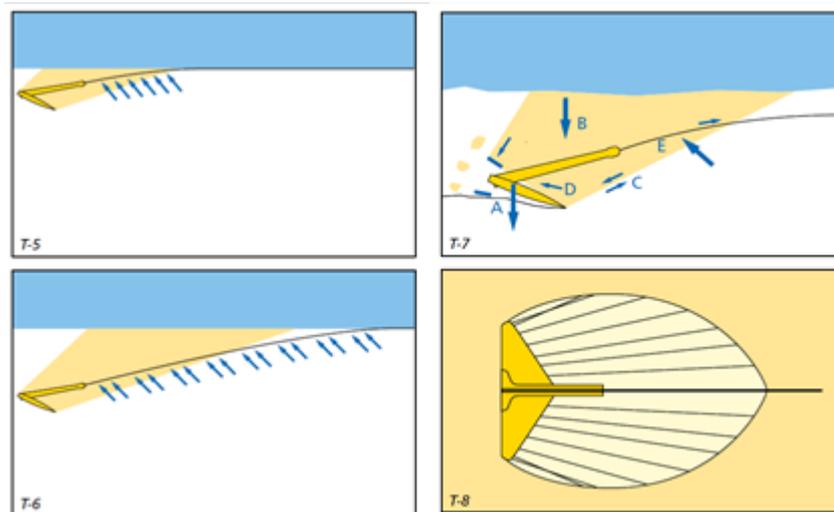


Stevshark Mk6

Le DEA offrono una elevata capacità di resistenza ai carichi orizzontali, pari a 20÷60 volte il loro peso, mentre mostrano bassa resistenza ai carichi verticali.

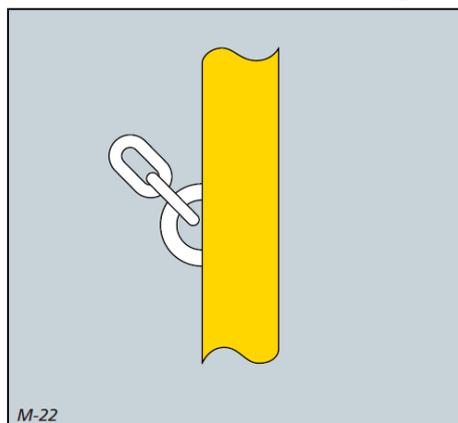
Hanno un processo di installazione particolarmente semplice e possono anche essere facilmente disinstallate, presentano però il limite operativo della direzione del carico, il quale deve agire orizzontalmente su di essa.

Uno dei principali svantaggi delle DEA è invece l'impossibilità di pianificare il loro esatto posizionamento planimetrico. Infatti, queste tipologie di ancore possono richiedere anche decine di metri di trascinamento per mobilitare la capacità di carico necessaria. Anche la penetrazione stessa all'interno del terreno è caratterizzata da un certo grado di incertezza e difficilmente anticipabile.



### 6.1.3 Pali infissi (driven piles)

Il palo è un tubo d'acciaio cavo, prefabbricato in unico pezzo, che viene infisso nel fondale per mezzo di battipalo idraulico subacqueo (hydraulic hammer) o di vibratore (vibro-hammer). La capacità di tenuta del palo è generata dalla combinazione dell'attrito del terreno lungo il fusto del palo e la resistenza passiva laterale del terreno stesso. Il palo è in grado di resistere sia ai carichi orizzontali che verticali. Grazie alla capacità di portare carichi anche molto elevati, questa soluzione è spesso utilizzata nell'industria oil and gas.



I 'driven piles' possono essere impiegati per diverse tipologie di terreno, e questa caratteristica li rende particolarmente adatti anche nel caso di depositi eterogenei. Possibili limitazioni all'installazione di pali per infissione sono rappresentate dalla presenza di orizzonti cementati o litificati e/o trovanti di grandi dimensioni, i quali possono determinare lo snervamento e successiva deformazione progressiva della sezione del palo. Anche in assenza di tali ostacoli il numero di colpi necessari all'installazione del palo stesso può diventare eccessivo a seconda delle caratteristiche del martello impiegato e della resistenza offerta dal terreno penetrato. Per questa ragione, prima di procedere all'installazione è necessario eseguire un'analisi di 'battibilità' del palo, simulando la propagazione dell'onda d'urto indotta dal martello ed il conseguente avanzamento dello stesso.

#### 6.1.4 Pali trivellati (drilled piles)

Quando l'infissione mediante battitura o vibrazione non è possibile, si può ricorrere alla trivellazione per l'installazione del palo.

I pali trivellati sono installati in tre fasi: la perforazione con asportazione del terreno, la posa del palo e l'iniezione della malta cementizia. Il primo tratto della sezione del palo (casing) è battuto mediante battipalo idraulico subaqueo attraverso i sedimenti superficiali fino al raggiungimento della sommità dello strato duro/roccioso. Questa operazione risulta necessaria principalmente per assicurare la stabilità del foro durante la perforazione. In seguito, la trivellazione avviene attraverso il casing infisso, fino al raggiungimento della profondità di progetto. I materiali risultanti da questa attività sono rimossi e riportati in superficie mediante la circolazione dei fanghi di perforazione. A questo punto si procede con la posa del palo in acciaio all'interno del foro e alla successiva iniezione di malta, mediante una linea di cementazione dedicata in uscita sul fondo del palo stesso. Al fine di garantire la resistenza a sfilamento desiderata è necessario caratterizzare correttamente non solo l'attrito all'interfaccia tra malta e terreno, ma anche quello tra malta e tubo in acciaio, in quanto quest'ultimo potrebbe in alcune circostanze governare la capacità ultima dell'ancoraggio. Per questa ragione lungo il fusto del palo vengono realizzate delle nervature circolari concentriche dette 'shear keys', al fine di aumentare l'aderenza tra armatura e malta.

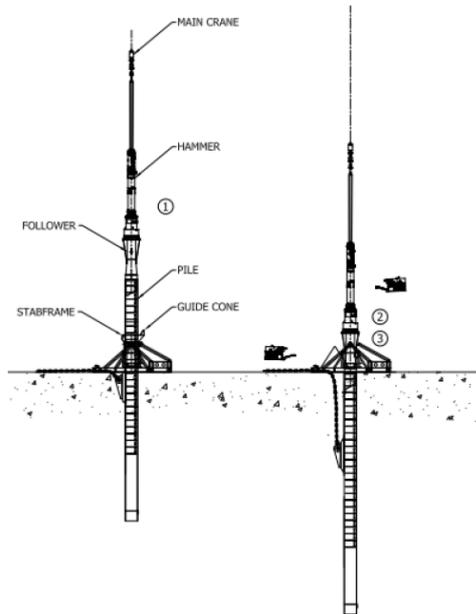
Nei pali gettati in opera la linea di ormeggio è tipicamente collegata in testa, vista l'impossibilità di realizzare un collegamento lungo il fusto del palo. Questa limitazione può determinare una minore efficacia di questo tipo di ancoraggi, rispetto ai pali infissi, quando associati ad un ormeggio a catenaria.

## 6.2 Sistemi di ancoraggio selezionati

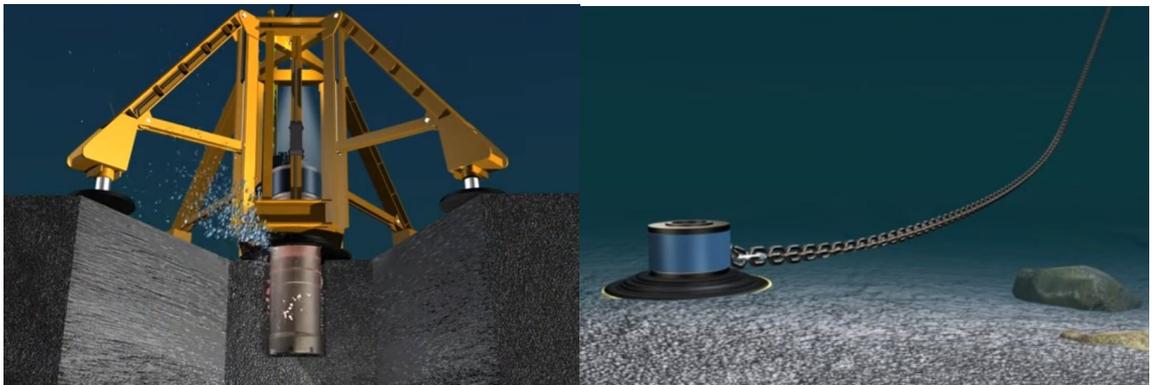
Dalle risultanze della prospezione geofisica realizzata si evince che il substrato stratigrafico atteso nell'area interessata dal progetto Lupiae Maris consiste in una sottile copertura di argilla sabbiosa/limosa molto soffice, sovrastante uno strato di sabbia limosa/argillosa di spessore variabile. Al di sotto di questo strato di sabbia sono previsti terreni di natura fine più rigidi. Non si può escludere che all'interno di queste formazioni si possano incontrare strati parzialmente litificati/cementati, sebbene non siano state riscontrate prove di cementazione entro i primi 50 m di profondità.

La successiva caratterizzazione del fondale e la presenza di formazioni superficiali riconducibili a biocenosi a coralligeno ha orientato la scelta sulle ancore con pali trivellati o battuti a seconda della consistenza del substrato marnoso/argilloso. Questa tecnica è stata preferita alle ancore a trascinamento inizialmente ipotizzate perché ritenute potenzialmente impattanti sulle biocenosi presenti (il sistema con ancore a trascinamento è infatti normalmente associato ad ormeggi a catenaria).

Per quanto riguarda la valutazione degli impatti nel SIA e negli studi specialistici, adottando un approccio prudenziale, si è fatto riferimento alla tecnologia del palo trivellato poiché ritenuta la più gravosa sotto il profilo ambientale.



***Installazione di ancoraggi con pali battuti (driven piles)***



***Installazione di ancoraggi con pali trivellati (drilled piles)***