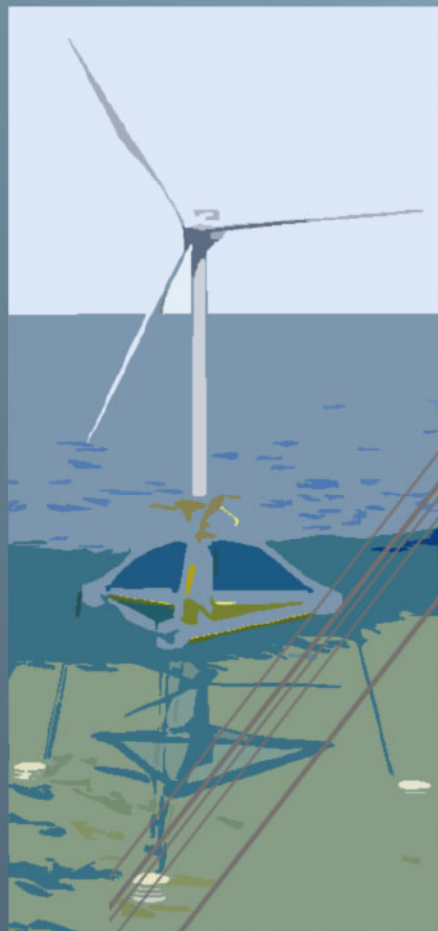




Ichnusa wind power srl

Progetto Definitivo

**PARCO EOLICO FLOTTANTE
NEL MARE DI SARDEGNA
SUD OCCIDENTALE**



SR14

C0421SR14RELFON00a

**Ministero dell'Ambiente
e della Sicurezza Energetica**

Ministero della Cultura

**Ministero delle Infrastrutture
e dei Trasporti**

*Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale
ex D.lgs. 152/2006*

*Domanda di Autorizzazione Unica
ex D.lgs. 387/ 2003*

*Domanda di Concessione Demaniale Marittima
ex R.D. 327/1942*

Relazione tecnica
**DIMENSIONAMENTO DELLA
FONDAZIONE GALLEGGIANTE**

Progetto
Dott. Ing. Luigi Severini
Ord. Ing. Prov. TA n.776

Elaborazioni
iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**





Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
I di VIII

SOMMARIO

1.	SCOPO DEL DOCUMENTO	1
2.	DESCRIZIONE SINTETICA DEL PROGETTO	2
3.	FONDAZIONI GALLEGGIANTI, STATO DELL'ARTE	4
4.	FONDAZIONE TETRASUB®	7
4.1.	Elementi costitutivi	7
4.1.1.	Elementi primari	7
4.1.2.	Elementi secondari	12
4.2.	Ingombri e dislocamento	13
4.3.	Materiali impiegati	15
4.4.	Normative e regolamenti di riferimento	15
5.	CARATTERISTICHE AMBIENTALI DEL SITO	17
5.1.1.	Clima meteomarinò	17
5.1.2.	Batimetria	22
6.	CASI DI CARICO DI PROGETTO	24
6.1.1.	Tabella di riepilogo dei DLC	24
6.1.2.	Definizione dei DLC	24
7.	ANALISI DI STABILITÀ	27
7.1.	Configurazione del sistema	27
7.2.	Metodologia di calcolo	27
7.2.1.	Requisito di stabilità di una fondazione semi-immersa (DNV-ST-0119)	27
7.2.2.	Momento raddrizzante e massimo momento sbandante accettabile	28
7.2.3.	Momento sbandante	30
7.3.	Risultati	30
7.3.1.	Momento raddrizzante e massimo momento sbandante accettabile	31
7.3.2.	Momento sbandante	35
7.4.	Analisi della stabilità della fondazione	35
8.	ANALISI DINAMICA E DEI MOTI	37
8.1.	Software di simulazione	37
8.2.	Configurazione del sistema	37
8.2.1.	Sistemi di coordinate	37
8.2.2.	Sistema turbina-fondazione	39
8.2.3.	Analisi modale	40



Ichnusa wind power srl

iLStudio.

Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
II di VIII

8.2.4. Accelerazione in testa alla torre	41
8.2.5. Moti della fondazione	42
9. VERIFICA STRUTTURALE DELLA FONDAZIONE	43
9.1. Criteri di progettazione	44
9.1.1. Verifica allo Stato Limite Ultimo.....	44
9.1.2. Verifica allo Stato Limite a Fatica	51
9.1.3. Verifica allo Stato Limite Ultimo per Azioni Eccezionali	52
9.1.4. Verifica allo Stato Limite di Esercizio.....	52
9.2. Dimensionamento strutturale	53
9.2.1. Analisi di instabilità dei componenti della fondazione	53
9.2.2. Analisi delle connessioni con perno	74
9.2.3. Conclusioni.....	78
10. PREVENZIONE DELLA CORROSIONE	80
11. ASSEMBLAGGIO ED INSTALLAZIONE.....	81
12. MANUTENZIONE IN FASE OPERATIVA.....	83



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
III di VIII

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1 – Schema concettuale dell’impianto.....	2
Figura 3.1 – Tipologie di fondazioni più comuni.....	4
Figura 3.2 – Fondazione semi-immersa.....	6
Figura 3.3 – Tipologie di piattaforma galleggiante: triangolo della stabilità.....	6
Figura 4.1 – Fondazione TetraSub.....	7
Figura 4.2 – Elementi primari della fondazione TetraSub.....	8
Figura 4.3 – Rinforzi trasversali per gli elementi cilindrici.....	9
Figura 4.4 – Vista di insieme delle connessioni con perno (sx). Visualizzazione dei bracci radiali e diagonali (in trasparenza) e della colonna centrale con indicazione della notazione sinistra/destra e superiore/inferiore dei perni (dx).....	10
Figura 4.5 – Golfari della Colonna Centrale (concettuale).....	10
Figura 4.6 – Golfari del braccio Radiale (concettuale).....	11
Figura 4.7 – Golfari del braccio diagonale e laterale (concettuale).....	11
Figura 4.8 – Vista della sezione della connessione perno/malta con le casse di zavorra.....	11
Figura 4.9 – Elementi secondari della fondazione TetraSub.....	12
Figura 4.10 – Ingombri fondazione TetraSub.....	13
Figura 4.11 – Rappresentazione della fondazione discretizzata in shell.....	14
Figura 5.1 – Ubicazione Parco eolico.....	17
Figura 5.2 – Rose dei venti annuali medi per le velocità del vento, $WS_{10,2hr}$ (sx) e $WS_{80,2hr}$ (dx).....	18
Figura 5.3 – Rosa delle onde per il periodo 1979-2000.....	19
Figura 5.4 - Scatter plot omnidirezionali $H_s - T_P$ (sx) e $H_s - WS_{10,2hr}$ (dx).....	19
Figura 5.5 – Velocità del vento (sx) e altezze d’onda significative (dx) per ogni direzione in condizioni estreme.....	21
Figura 5.6 – Batimetria nell’area di progetto.....	22
Figura 7.1 – Curve del momento raddrizzante e sbandante.....	28
Figura 7.2 – Braccio di stabilità GZ.....	29
Figura 7.3 – Direzioni di provenienza del vento. Calcolo del momento raddrizzante.....	30
Figura 7.4 – Massimo momento sbandante accettabile, fase operativa.....	31
Figura 7.5 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbandante pari a 0° , fase operativa.....	32
Figura 7.6 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbandante pari a 30° , fase operativa.....	32
Figura 7.7 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbandante pari a 60° , fase operativa.....	33



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
IV di VIII

Figura 7.8 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbandante pari a 90°, fase operativa.....	33
Figura 7.9 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbandante pari a 120°, fase operativa.....	34
Figura 7.10 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbandante pari a 150°, fase operativa.....	34
Figura 7.11 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbandante pari a 180°, fase operativa.....	35
Figura 8.1 – Sistema di coordinate globale (sx), sistema di coordinate meteomarino (dx).	37
Figura 8.2 – Sistema di coordinate della fondazione.	38
Figura 8.3 – Modo di vibrare fore-aft del sistema	41
Figura 9.1 – Curve S-N (protezione catodica).....	51
Figura 9.2 – Momento flettente risultante per la Colonna Centrale.	53
Figura 9.3 – Tensione effettiva per la Colonna Centrale.....	54
Figura 9.4 – Forza di taglio per la Colonna Centrale.....	55
Figura 9.5 – Torsione per la Colonna Centrale.	55
Figura 9.6 – Momento flettente risultante per Radiale 1.	56
Figura 9.7 – Tensione effettiva per Radiale 1.	56
Figura 9.8 – Forza di taglio per Radiale 1.	57
Figura 9.9 – Torsione per Radiale 1.....	57
Figura 9.10 – Momento flettente risultante per Radiale 2/3.	58
Figura 9.11 – Tensione effettiva per Radiale 2/3.	58
Figura 9.12 – Forza di taglio per Radiale 2/3.....	59
Figura 9.13 – Torsione per Radiale 2/3.	59
Figura 9.14 – Momento flettente risultante per Diagonale 1.	60
Figura 9.15 – Tensione effettiva per Diagonale 1.	60
Figura 9.16 – Forza di taglio per Diagonale 1.....	61
Figura 9.17 – Torsione per Diagonale 1.....	61
Figura 9.18 – Momento flettente risultante per Diagonale 2/3.....	62
Figura 9.19 – Tensione effettiva per Diagonale 2/3.....	62
Figura 9.20 – Forza di taglio per Diagonale 2/3.	63
Figura 9.21 – Torsione per Diagonale 2/3.....	63
Figura 9.22 – Momento flettente risultante per Laterale 1/2.	64
Figura 9.23 – Tensione effettiva per Laterale 1/2.	64
Figura 9.24 – Forza di taglio per Laterale 1/2.....	65



Ichnusa wind power srl

iLStudio.

Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
V di VIII

Figura 9.25 – Torsione per Laterale 1/2.....	65
Figura 9.26 – Rappresentazione della funzione di pressione idrostatica applicata.....	66
Figura 9.27 – Rappresentazione dello spessore di ogni shell e membro tubolare – ottimizzazione SLU.....	67
Figura 9.28 – Rapporti di utilizzo a buckling ottimizzati per ogni guscio (shell) della struttura. Vista frontale/superiore.....	68
Figura 9.29 – Rapporti di utilizzo a buckling ottimizzati per ogni guscio (shell) della struttura. Vista dal basso.	68
Figura 9.30 – Curva S-N C1 con protezione catodica.	69
Figura 9.31 – Rappresentazione dello spessore di ogni shell – ottimizzazione SLU / SLF.....	69
Figura 9.32 – Confronto tra ottimizzazione dello spessore SLU e SLF tramite il calcolo di un moltiplicatore.	70
Figura 9.33 – Rapporti di utilizzo e caratteristiche geometriche della Colonna centrale.	71
Figura 9.34 – Rapporti di utilizzo e caratteristiche geometriche del Radiale 1.....	71
Figura 9.35 – Rapporti di utilizzo e caratteristiche geometriche del Radiale 2 (simile per Radiale 3).....	72
Figura 9.36 – Rapporti di utilizzo e caratteristiche geometriche del Diagonale 1.	72
Figura 9.37 – Rapporti di utilizzo e caratteristiche geometriche del Diagonale 2 (simile per Diagonale 3).....	73
Figura 9.38 – Rapporti di utilizzo e caratteristiche geometriche del Laterale 1 (simile per Laterale 2).	73
Figura 9.39 – Sistema di coordinate locale delle connessioni superiori.....	74
Figura 9.40 – Forza assiale di progetto per ogni connessione.	74
Figura 9.41 – Forza radiale di progetto per ogni connessione.	75
Figura 9.42 – Massima pressione nominale (per area proiettata) sulla boccia.	75
Figura 9.43 – Tensioni della boccia (MPa) per ogni gruppo di connessione. I cerchi in rosso indicano la configurazione scelta.....	76
Figura 9.44 – Sezione della connessione con perno.	77
Figura 9.45 – Massimi rapporti di utilizzo delle connessioni con perno.	77
Figura 11.1 – Processo di assemblaggio fondazione TetraSub.....	81



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
VI di VIII

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 3.1 – Sfida progettuale per tipologia di fondazione. (S.Butterfield, 2007).....	5
Tabella 4.1 – Dimensioni degli elementi primari della fondazione TetraSub.....	13
Tabella 4.2 – Ingombri fondazione TetraSub.....	13
Tabella 4.3 – Dislocamento della fondazione TetraSub.....	14
Tabella 4.4 – Proprietà materiali dei componenti della fondazione.....	15
Tabella 4.5 – Normative di riferimento.....	15
Tabella 5.1 – Velocità corrente estrema in superficie per media profondità di 450m.....	18
Tabella 5.2 – Riepilogo delle condizioni di vento di riferimento – Altezza mozzo 165m sopra livello medio mare.....	18
Tabella 5.3 – Condizioni estreme vento-onda per un periodo di ritorno di 500 anni.....	20
Tabella 5.4 – Condizioni estreme vento-onda per un periodo di ritorno di 50 anni.....	20
Tabella 5.5 – Condizioni estreme vento-onda per un periodo di ritorno di 10 anni.....	20
Tabella 5.6 – Condizioni estreme vento-onda per un periodo di ritorno di 5 anni.....	21
Tabella 5.7 – Condizioni estreme vento-onda per un periodo di ritorno di 1 anno.....	21
Tabella 6.1 – DLC per verifica allo SLU e in condizioni ESS.....	24
Tabella 6.2 – DLC per verifica allo SLA e in condizioni ESS.....	24
Tabella 6.3 – Descrizione del DLC 1.2.....	24
Tabella 6.4 – Descrizione del DLC 6.1.....	25
Tabella 6.5 – Descrizione del DLC 6.2.....	25
Tabella 6.6 – Descrizione del DLC 10.2.....	26
Tabella 7.1 – Caratteristiche relative alla turbina NREL da 15MW.....	27
Tabella 7.2 – Momenti di sbandamento.....	35
Tabella 7.3 – Utilizzo della stabilità in fase operativa.....	36
Tabella 8.1 – Definizione del sistema di coordinate direzionali meteomarinario.....	39
Tabella 8.2 – Definizione delle direzioni relative.....	39
Tabella 8.3 – Dati riepilogativi del modello.....	39
Tabella 8.4 – Periodi naturali del TetraSub.....	40
Tabella 8.5: Frequenze naturali del sistema torre-fondazione.....	40
Tabella 8.6: Differenza tra la frequenza 3P e le prime frequenze naturali del sistema.....	40
Tabella 8.7 – Massimi valori di accelerazione dell'RNA (Rotor Nacelle Assembly) per gli specifici DLC.....	41
Tabella 8.8 – Massimi angoli di rotazione della fondazione per gli specifici DLC.....	42
Tabella 9.1 – Fattore del materiale per il calcolo di instabilità.....	44
Tabella 9.2 – Fattori parziali di sicurezza (Tabella 5-1 DNV-ST-0119:2021).....	47



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0421SR14RELFON00a	Data emissione: Marzo 2023	Pagina VII di VIII

Tabella 9.3 – Matrice dei carichi estremi.	48
Tabella 9.4 – Massimi valori di accelerazione dell'RNA (Rotor Nacelle Assembly) per gli specifici DLC	54
Tabella 9.5 – Proprietà geometriche delle connessioni con perno.	76
Tabella 9.6 – Riepilogo delle masse per ottimizzazione SLU e SLU/SLF.	78



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
VIII di VIII

INDICE DELLE VOCI

DFE	Design Fatigue Factor
DHI	Danish Hydraulic Institute
DLC	Design Load Case
DNV	Det Norske Veritas
ECM	Extreme Current Model
ESS	Extreme Sea State
EWM	Extreme Wind Model
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
NREL	National Renewable Energy Laboratory
RNA	Rotor Nacelle Assembly
SLA	Stato Limite Accidentale
SLF	Stato Limite di Fatica
SLU	Stato Limite Ultimo
SO	Stiesdal Offshore
WTG	Wind Turbine Generator



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0421SR14RELFON00a	Data emissione: Marzo 2023	Pagina 1 di 85

1. SCOPO DEL DOCUMENTO

Con il presente documento si intende descrivere la tipologia di fondazione utilizzata per supportare il sistema torre-turbina eolica ai fini del progetto per la realizzazione di un parco eolico flottante nel mare di Sardegna sud-occidentale. Oltre ad una descrizione di carattere generale e dimensionale, si riportano i principi di funzionamento e si affrontano gli aspetti più sensibili della fondazione.

Il documento presenta:

- una descrizione sintetica del progetto;
- una breve trattazione relativa alle tipologie di fondazione esistenti per il settore dell'eolico offshore;
- una descrizione della fondazione galleggiante scelta per il presente progetto, dal punto di vista dei componenti, dei materiali, delle masse e degli ingombri;
- una descrizione delle principali caratteristiche ambientali del sito;
- i casi di carico di progetto impiegati per la valutazione strutturale dei componenti;
- un'analisi di stabilità al galleggiamento per differenti condizioni di carico in fase di esercizio;
- un'analisi dinamica del sistema in termini di analisi modale e di moti del sistema;
- una trattazione relativa alla verifica di alcune delle strutture principali per differenti condizioni di carico (stato limite ultimo, stato limite a fatica);
- una descrizione delle soluzioni previste per la protezione superficiale della fondazione in riferimento alla prevenzione dalla corrosione galvanica;
- una breve descrizione delle operazioni da seguire per l'assemblaggio delle fondazioni;
- cenni relativi alla manutenzione delle strutture in fase di esercizio.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
2 di 85

2. DESCRIZIONE SINTETICA DEL PROGETTO

L'impianto di produzione eolica, a realizzarsi nel mare di Sardegna sud-occidentale nel settore geografico ovest-nord-ovest delle coste di Portoscuso e dell'isola di San Pietro, a oltre 35 km dalle più vicine coste sarde garantirà una potenza nominale massima pari a 504MW attraverso l'utilizzo di 42 aerogeneratori e 2 sottostazioni elettriche di trasformazione sostenuti da innovative fondazioni galleggianti.

L'impiego di questi sistemi consente l'installazione in aree marine profonde e molto distanti dalle coste, dove i venti sono più intensi e costanti e la percezione visiva dalla terraferma è estremamente ridotta, mitigando così gli impatti legati alle alterazioni del paesaggio tipici degli impianti realizzati sulla terraferma o in prossimità delle coste. La collocazione del parco, frutto di una approfondita conoscenza delle caratteristiche del sito, armonizza le risultanze di studi e consultazioni finalizzati alla migliore integrazione delle opere all'interno del contesto naturale e antropico pre-esistente.

L'opera in oggetto, nella sua completezza, si sviluppa secondo una componente a mare (sezione offshore), dedicata prevalentemente alla produzione di energia, ed una a terra (sezione onshore) destinata al suo trasporto e immissione nella rete elettrica nazionale.

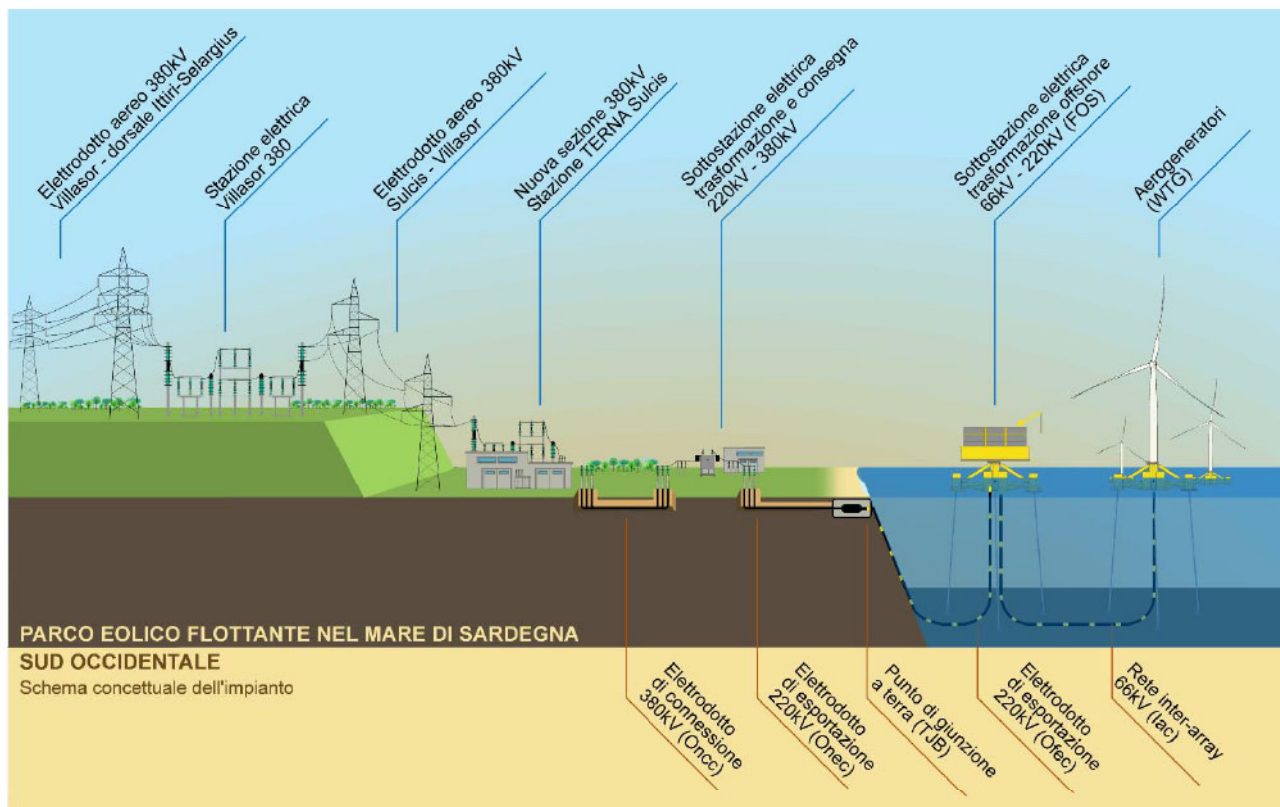


Figura 2.1 – Schema concettuale dell'impianto.

Elaborazione iLStudio.

Ciascun aerogeneratore (*Wind Turbine Generator* – WTG) sarà costituito da un rotore tripala con diametro fino a 255 m calettato su torre ad una quota sul livello medio mare fino a 155 m. L'energia elettrica prodotta dalle turbine alla tensione di 66 kV sarà collettata attraverso una rete di cavi marini inter-array (*Inter-array cable* - Iac) e convogliata verso due sottostazioni elettriche offshore galleggianti (*Floating Offshore Substation* - FOS) per l'elevazione di tensione al livello 220 kV. Il trasporto dell'energia verso la terraferma avverrà con un elettrodotto di esportazione sottomarin (*Offshore export cable* - Ofec) fino ad un punto di giunzione a terra (*Transition Junction Bay* - TJB). L'energia sarà quindi trasportata, mediante elettrodotto di esportazione interrato (*Onshore export cable* - Onc), presso una sottostazione elettrica di trasformazione e consegna in



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0421SR14RELFON00a	Data emissione: Marzo 2023	Pagina 3 di 85

località Portovesme, ove sarà effettuata l'elevazione della tensione nominale da 220kV a 380kV. Da qui, un breve elettrodotto interrato di connessione (*Onshore connection cable - Oncc*), permetterà il collegamento alla nuova sezione a 380kV all'interno della esistente stazione TERNA Sulcis.

Il progetto prevede la sostituzione dell'esistente elettrodotto aereo a 220 kV "Sulcis-Villasor" attraverso la costruzione di un nuovo elettrodotto a 380 kV che, seguendo il tracciato della linea esistente, unirà le stazioni di "Sulcis" e la nuova stazione elettrica Villasor 380 e raccorderà questa alla dorsale regionale 380 kV Ittiri-Selargius. Gli interventi di riqualificazione e ammodernamento della linea, oltre a consentire l'immissione in rete dell'energia prodotta dal parco, costituiranno anche una opportunità per ulteriori iniziative di produzione di energia da fonte rinnovabile, nonché il miglioramento dei servizi elettrici al territorio del Sulcis aumentandone l'efficienza e la fruibilità.



3. FONDAZIONI GALLEGGIANTI, STATO DELL'ARTE

L'area marina individuata per la realizzazione del parco eolico è caratterizzata da profondità del fondale comprese tra ~330 m e ~720 m; lo scenario indicato mette in risalto i limiti tecnologici di una fondazione fissa che non può raggiungere dimensioni paragonabili alle suddette profondità. È dunque necessario adottare una soluzione differente che preveda l'utilizzo di una fondazione galleggiante ancorata al fondale tramite linee di ormeggio. Un maggiore complessità tecnologica permette tuttavia un gran distanziamento del parco dalla costa (tra i 35 km e 45 km), raggiungendo l'obiettivo di ridurre, se non quasi azzerare, l'impatto visivo dell'opera dal litorale.

Le fondazioni galleggianti preposte ad assolvere alla funzione di supporto per l'aerogeneratore possono essere di diverso tipo. Una tipica classificazione è quella effettuata in base al metodo utilizzato per garantire la proprietà di stabilità della fondazione stessa, come mostrato in Figura 3.1.

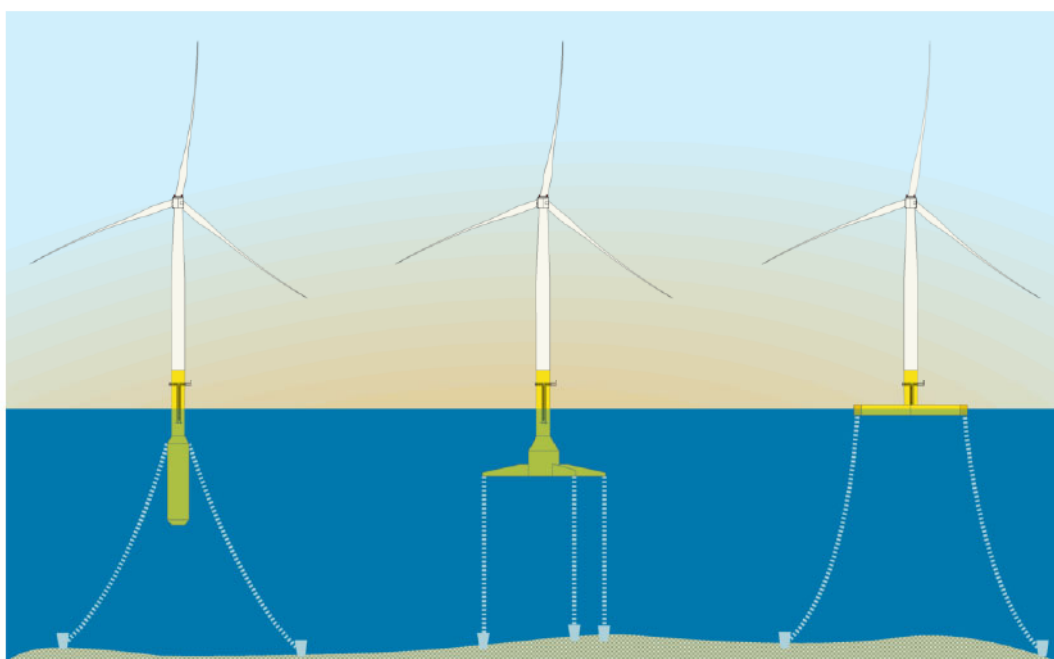


Figura 3.1 – Tipologie di fondazioni più comuni.

Elaborazione iLStudio.

Di seguito si riportano alcune caratteristiche per ogni tipologia di fondazione.

- **Fondazione ballast stabilized**, avente una struttura di forma cilindrica (a sinistra in Figura 3.1), rastremata in prossimità della linea di galleggiamento, ed usualmente ancorata al fondale tramite catenarie. Le proprietà di stabilità sono conferite da una consistente zavorra posta nella parte inferiore del galleggiante. In questo modo la posizione verticale del baricentro dell'intera struttura risulta relativamente bassa e garantisce un elevato momento raddrizzante così come un'elevata resistenza ai moti di rollio e beccheggio. La simmetria della sezione cilindrica determina moti di imbardata trascurabili rispetto a carichi idrodinamici. Lo stesso non vale per i carichi aerodinamici che si traducono nei momenti applicati alle pale dell'aerogeneratore. Le catenarie permettono infine lo stazionamento della struttura attorno al punto di progetto, contrastando i moti che avvengono sul piano orizzontale.



- **Fondazione mooring-line stabilized**, con una tipica geometria composta da una colonna centrale, a supporto della torre e dell'aerogeneratore, e da bracci laterali collegati a linee di ormeggio tese (al centro in Figura 3.1). In questo caso, le proprietà di stabilità sono garantite dalle linee di ormeggio tese che determinano l'immersione della fondazione. I moti di beccheggio e rollio risultano quindi contenuti, similmente ad una struttura a pali infissi. Ciò comporta un carico maggiore a cui è sottoposta la linea di ormeggio tesa rispetto ad una classica catenaria. In generale, il comportamento rigido della struttura si riflette sulle frequenze naturali proprie del sistema, che risultano essere alte per i moti contrastati dalle linee tese.
- **Fondazione buoyancy stabilized**, in cui rientra il classico caso di una chiatta opportunamente ancorata al fondale tramite catenaria (a destra in Figura 3.1). In questa soluzione le proprietà di stabilità sono garantite da una spinta distribuita data dal volume di carena. I moti di sussulto, beccheggio e rollio sono contrastati dalle proprietà del galleggiante e delle sua figura di galleggiamento. Di contro, i moti orizzontali e di imbardata sono limitati dalla catenaria.

Con l'intento di evidenziare le differenze tra le soluzioni suddette, si propone la Tabella 3.1 in cui sono riportati, in riferimento a parametri specifici di valutazione, giudizi di vantaggio o svantaggio di una soluzione rispetto ad un'altra.

Tabella 3.1 – Sfida progettuale per tipologia di fondazione.
(S.Butterfield, 2007).

Design fondazione	Tipo di fondazione		
	Ballast Stabilized	Mooring Stabilized	Buoyancy Stabilized
Strumenti e metodi di progettazione	-	+	-
Ormeggi: Costi/Complessità	-	+	-
Ancoraggi: Costi/Complessità	+	-	+
Resistenza alla corrosione	+	+	-
Sensibilità alle condizioni del fondale	+	-	+
Minima impronta sul fondale	-	+	-
Sensibilità a moti ondosi	+	+	-
Impatto sul design della turbina			
Altezza turbina	-	-	+
Moti in testa torre	-	+	-
Complessità controllo	-	+	-
Massimo angolo di sbandamento	-	+	-
+ : vantaggio relativo - : svantaggio relativo			

All'interno dello spazio progettuale delimitato dalle 3 tipologie di fondazione ideali, si insediano soluzioni ibride reali, con strutture più complesse, in grado di attenuare gli svantaggi esposti. Tra queste rientra la tipologia di fondazione **semi-immersa** (semi-submersible), proposta per il presente progetto.

Una fondazione **semi-immersa** (semi-submersible) possiede comunque un considerevole volume di carena. Geometricamente questa soluzione è un assemblaggio di travi e bracci metallici collegati mediante l'utilizzo di appositi nodi, disposti generalmente secondo forme tetraedriche (base triangolare) o piramidali (base quadrata). Il contributo stabilizzante può essere garantito anche da casse di zavorra e da linee di ormeggio tese o semi tese.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.

Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
6 di 85

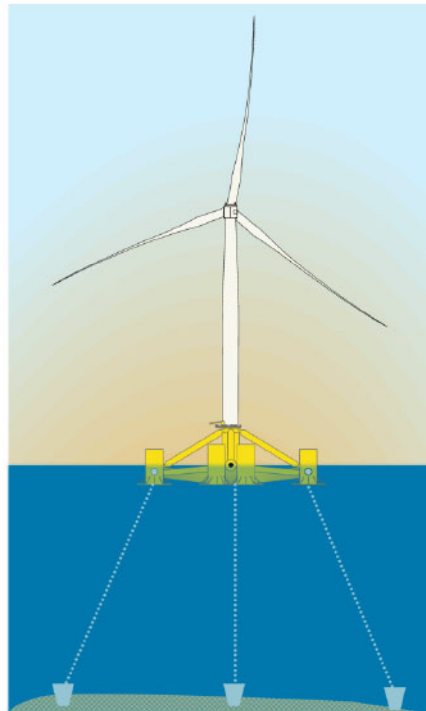


Figura 3.2 – Fondazione semi-immersa.

Elaborazione iLStudio.

Se si definisce uno spazio progettuale di tutte le possibili soluzioni, questo può essere rappresentato da un triangolo i cui vertici corrispondono ai 3 diversi modi di garantire stabilità al sistema. Si delinea così un “triangolo della stabilità” come mostrato in Figura 3.3.

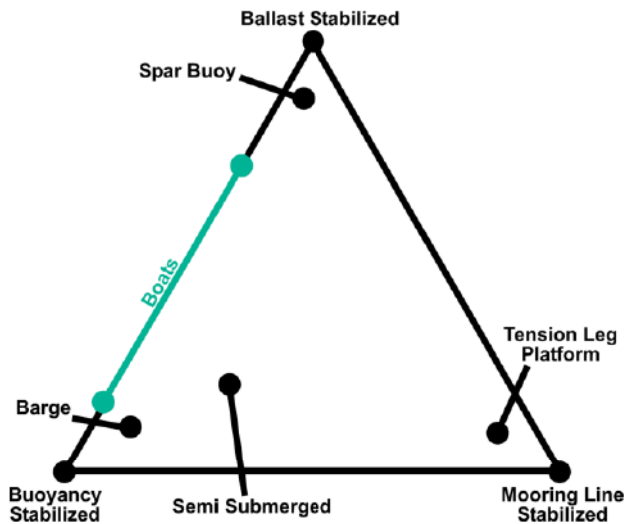


Figura 3.3 – Tipologie di piattaforma galleggiante: triangolo della stabilità.

(S.Butterfield, 2007).

Si può notare come la soluzione adottata (fondazione semi-immersa) risulti ibrida poiché è stabilizzata prevalentemente dal volume di carena, ma risente comunque del contributo stabilizzante della zavorra e delle linee di ormeggio.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

4. FONDAZIONE TETRASUB®

La scelta del tipo di fondazione galleggiante per il progetto del parco eolico nel mare di Sardegna è ricaduta sul modello TetraSub della Stiesdal Offshore (SO), una fondazione semi-immersa progettata per supportare aerogeneratori fino ad una taglia di 15 MW di potenza.

Il modello è composto da strutture tubolari opportunamente disposte a comporre un tetraedro asimmetrico, corredate da tre coppie di casse di zavorra nei vertici del triangolo di base. 6 linee di ormeggio, connesse a tali vertici, mediante appositi passacavi, consentono alla struttura di conservare la propria posizione in fase operativa. La fondazione è progettata per essere assemblata in banchina e rimorchiata in mare fino al sito di installazione, ove sono previste le operazioni di ormeggio e zavorramento ed il raggiungimento della condizione di galleggiamento di progetto.

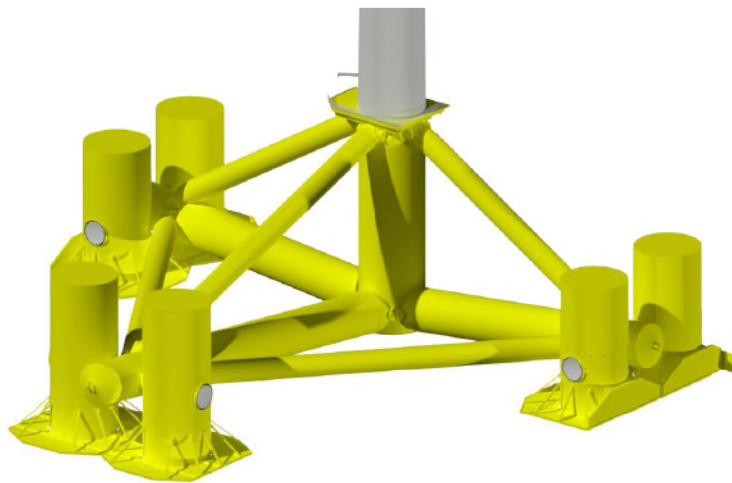


Figura 4.1 – Fondazione TetraSub.
Elaborazione SO.

La disposizione complessiva della fondazione è ibrida tra una struttura tetraedrica e piramidale, con un braccio radiale più lungo rispetto agli altri. Questo design asimmetrico consente di posizionare la colonna centrale nelle immediate vicinanze di una banchina, riducendo così la capacità della gru richiesta durante il sollevamento e il montaggio della turbina sulla fondazione.

4.1. Elementi costitutivi

Gli elementi costitutivi della fondazione possono essere divisi per semplicità in due sottogruppi.

- Elementi primari, che sviluppano ingombri maggiori, aventi generalmente una sezione circolare. Tali elementi contribuiscono attivamente alla rigidità dell'intera struttura;
- Elementi secondari, di dimensioni più contenute. Tali elementi sono prettamente accessori ed utili per le operazioni di manutenzione durante il ciclo di vita dell'opera.

4.1.1. Elementi primari

Gli elementi primari sono riportati nel seguente elenco ed indicati in Figura 4.2.

- **Colonna centrale** (*Center column*), corrispondente ad un cilindro disposto verticalmente, all'interno del quale è montata una flangia di interfaccia con la torre eolica. Il cilindro è opportunamente corredato da due nodi, utili al collegamento con gli elementi primari attigui.



- **Braccio radiale** (*Radial brace*), corrispondente ad un cilindro disposto lievemente in obliquo rispetto al piano orizzontale e connesso alla colonna centrale ad un capo, ed alle casse di spinta all'altro. In totale sono presenti 3 bracci radiali, di cui uno più lungo rispetto agli altri, conferendo così una geometria asimmetrica al galleggiante.
- **Braccio laterale** (*Lateral brace*), corrispondente ad un cilindro disposto orizzontalmente e connesso agli estremi a due bracci radiali. In totale sono presenti 2 bracci laterali di uguale lunghezza.
- **Braccio diagonale** (*Diagonal brace*), corrispondente ad un cilindro disposto in obliquo i cui estremi sono connessi al braccio radiale ed alla colonna centrale. In totale sono presenti 3 bracci diagonali, di cui uno più lungo degli altri.
- **Cassa di zavorra/spinta** (*Tank*), corrispondente ad un contenitore cilindrico a chiusure stagne. Questo durante la fase di esercizio, del parco è allagato con una predeterminata quantità di acqua di zavorra, utile ad assicurare il galleggiamento di progetto alla fondazione. Sono presenti 2 casse per ogni vertice del triangolo di base, per un totale di 6.
- **Piatto anti-sussulto** (*Heave plate*), corrispondente ad una struttura piatta in acciaio, saldata esternamente al fondo di ogni cassa di zavorra. Esso conferisce un effetto smorzante per i moti verticali della struttura (moti di sussulto).
- **Spinotto/perno al vertice** (*Tank pin*), corrispondente ad un cilindro cavo chiuso da due piatti alle basi. Tale spinotto, rigidamente collegato tramite un getto di malta cementizia di completamento, permette la connessione tra il braccio radiale e le due casse di zavorra.

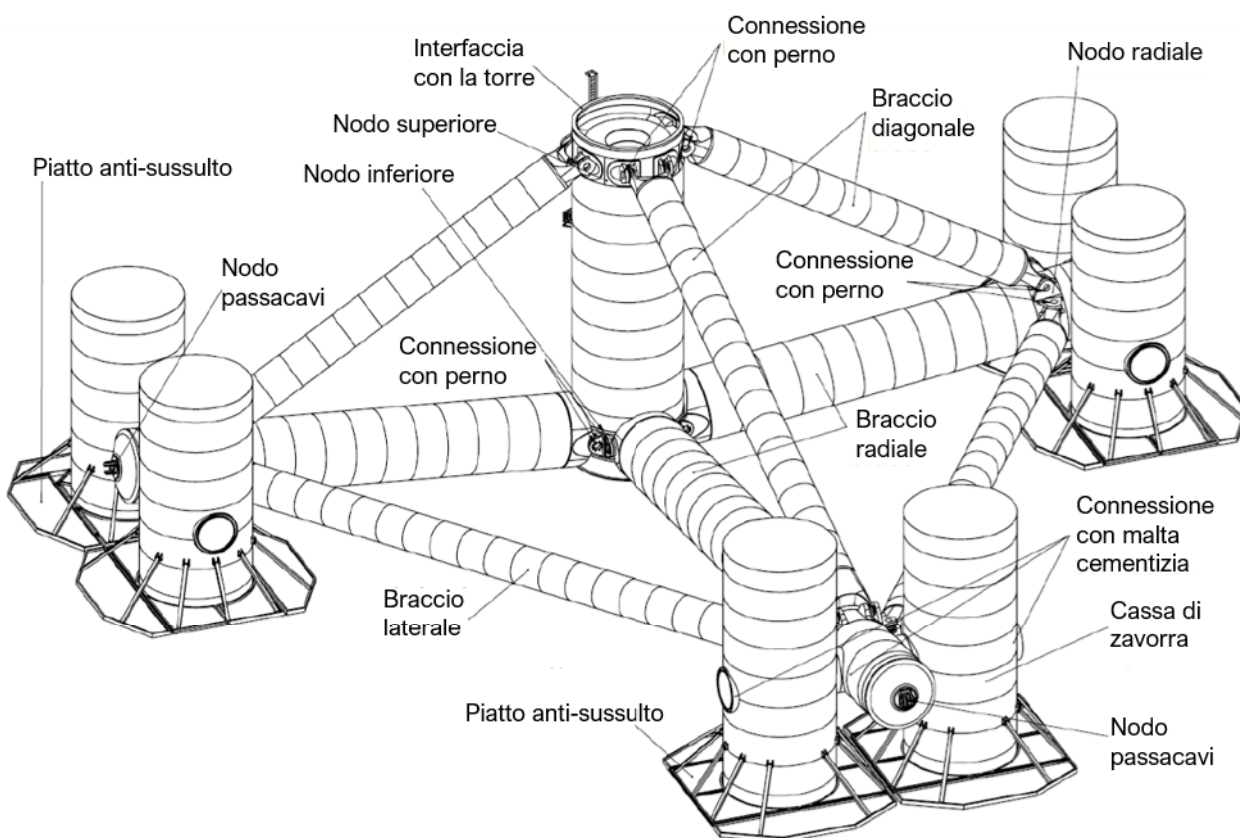


Figura 4.2 – Elementi primari della fondazione TetraSub.

Elaborazione SO.

Gli elementi cilindrici risultano opportunamente rinforzati trasversalmente da anelli di irrigidimento, distanziati secondo un intervallo di ossatura, come mostrato in Figura 4.3.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
9 di 85

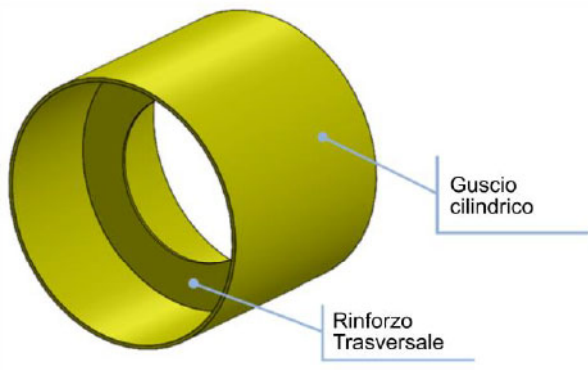


Figura 4.3 – Rinforzi trasversali per gli elementi cilindrici.

Elaborazione SO.

Tra gli elementi primari si considerano anche i nodi di collegamento. Questi sono dotati di anelli necessari per effettuare connessioni tramite spinotto. Di seguito si riportano, in numero e funzione, i nodi utilizzati per la fondazione.

- **Nodo superiore e nodo inferiore** (*top node e bottom node*), saldati alla colonna centrale e aventi funzione di collegamento tra questa e rispettivamente i bracci diagonali e radiali.
- **Nodo radiale** (*radial node*), saldato ad ogni braccio radiale, avente funzione di collegamento tra questo e i bracci diagonali e laterali.
- **Nodo di connessione alla cassa di zavorra** (*tank connection node*), saldato all'estremo esterno di ogni braccio radiale. Tale nodo contiene una manica utile per l'alloggiamento dello spinotto al vertice (*Tank pin*).
- **Nodo terminale** (*end node*), saldato all'estremo interno di ogni braccio radiale e ad entrambi gli estremi di ogni braccio diagonale e laterale.
- **Nodo passacavi** (*fairlead*), posto all'estremo esterno di ogni braccio radiale. Tale nodo è predisposto per la connessione alle linee di ormeggio;

I componenti strutturali della fondazione sono assemblati utilizzando delle connessioni con perno, per un totale di 26 collegamenti, e sono configurati come segue (Figura 4.4):

- 6 connessioni con perno collegano i bracci radiali alla parte inferiore della colonna centrale ed indicate con la dicitura **BC** (Bottom pin Connections);
- 6 connessioni con perno collegano i bracci diagonali alla parte superiore della colonna centrale ed indicate con la dicitura **TC** (Top pin Connection);
- 6 connessioni con perno collegano i bracci diagonali a quelli radiali, quindi indicate con la dicitura **DC** (Diagonal Connection);
- 8 connessioni con perno collegano i bracci laterali a quelli radiali ed indicate con la dicitura **LC** (Lateral Connection).

In Figura 4.4 viene mostrata una vista di insieme delle suddette connessioni. La convenzione per la denominazione delle connessioni è la seguente:

- le prime due lettere designano il gruppo a cui appartiene il collegamento, ovvero **BC**, **TC**, **DC** e **LC**;
- una cifra che designa il numero della connessione (**da 1 a 4**), contando i nodi in ogni gruppo di connessione partendo dal nodo sul Radiale 1 e procedendo in senso antiorario attorno alla colonna centrale;



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
10 di 85

- le ultime lettere rappresentano la posizione del perno, ovvero **L** (Left – sinistra), **R** (Right – destra), **T** (Top – superiore), **B** (Bottom – inferiore) osservando la struttura frontalmente dal Radiale 1 verso la colonna centrale. Pertanto la configurazione *Left/Right* si riferisce ad un perno orizzontale e la configurazione *Top/Bottom* si riferisce ad un perno verticale.



Figura 4.4 – Vista di insieme delle connessioni con perno (sx). Visualizzazione dei bracci radiali e diagonali (in trasparenza) e della colonna centrale con indicazione della notazione sinistra/destra e superiore/inferiore dei perni (dx).

Elaborazione SO.

Ogni connessione con perno è una *double lap connection* (doppio collegamento) con una boccola in materiale composito tra il perno e l'alloggiamento in acciaio. Lo scopo delle boccole è quello di compensare le tolleranze di fabbricazione e di installazione e di consentire le rotazioni relative in piano e fuori piano nei collegamenti.

Una parte fondamentale dei nodi è rappresentata dai golfari e dalle parti circostanti in acciaio fuso. Il collegamento con la struttura è realizzato tramite saldatura: nel caso della colonna centrale e dei bracci radiali, i golfari sono saldati alle piastre di acciaio laminato (shell) a formare i nodi cilindrici (Figura 4.5 e Figura 4.6); nel caso dei bracci diagonali e laterali, le parti terminali sono connesse all'ultima shell del componente (Figura 4.7).

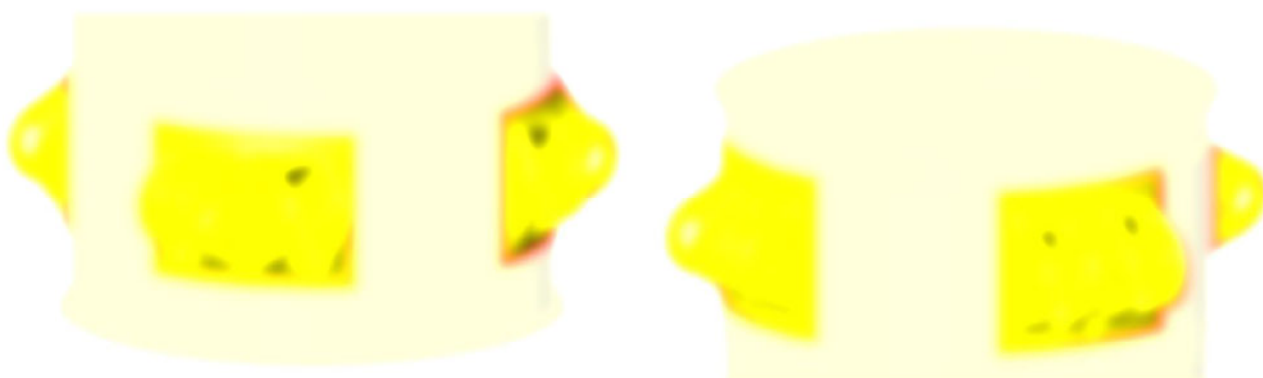


Figura 4.5 – Golfari della Colonna Centrale (concettuale).

Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
11 di 85



Figura 4.6 – Golfari del braccio Radiale (concettuale).

Elaborazione SO.



Figura 4.7 – Golfari del braccio diagonale e laterale (concettuale).

Elaborazione SO.

Il collegamento tra bracci radiali e casse di zavorra è realizzato tramite una connessione con malta cementizia tra la coppia di casse e il perno, come mostrato in Figura 4.8. Si assume che la malta riempia uno spazio cilindrico tra il manicotto della cassa e il perno avente spessore pari a ██████████.



Figura 4.8 – Vista della sezione della connessione perno/malta con le casse di zavorra

Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
12 di 85

4.1.2. Elementi secondari

Nell'elenco a seguire ed in Figura 4.9 sono riportati gli elementi secondari della fondazione.

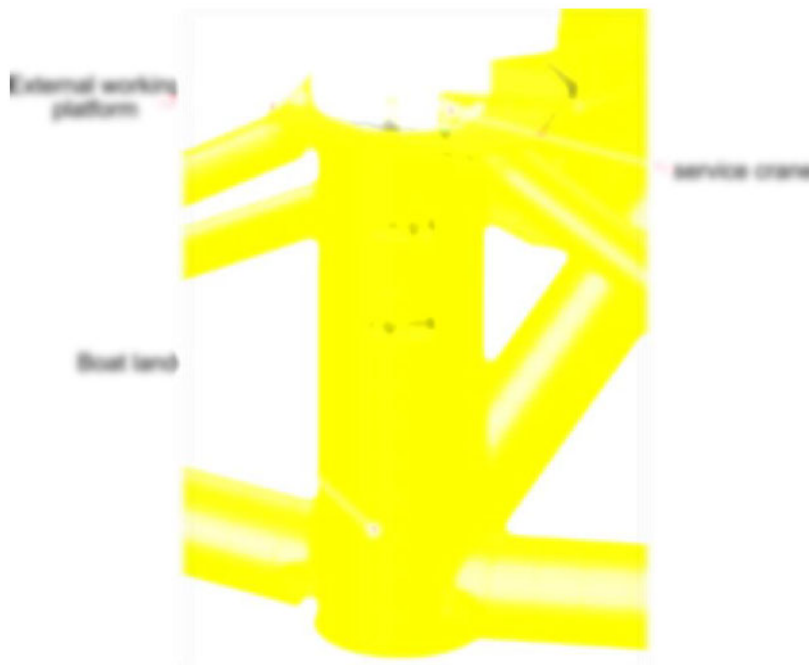


Figura 4.9 – Elementi secondari della fondazione TetraSub.

Elaborazione SO.

- **Piattaforma di lavoro esterna** (*external working platform*) per l'accesso del personale manutentore all'interno della torre. Tale struttura è collegata al nodo superiore della colonna centrale tramite collegamenti bullonati. Generalmente ogni piattaforma è dotata di una gru di servizio (*service crane*).
- **Sistema di attracco** (*Boat landing*) per le imbarcazioni deputate alle attività di manutenzione, situato in corrispondenza della colonna centrale in una posizione favorevole all'accesso del personale di servizio. Tale struttura è connessa alla colonna centrale tramite collegamenti bullonati. L'accesso alla piattaforma di lavoro esterna è garantito mediante tre scalette intervallate da due piccole piattaforme di servizio.
- **I-tube** per la protezione del cavo di potenza. Tale struttura è connessa alla colonna centrale tramite collegamenti bullonati.



4.2. Ingombri e dislocamento

Nella presente sezione si riportano in forma tabellare le dimensioni degli elementi cilindrici primari, gli ingombri e i dislocamenti dell'intera struttura. Si precisa che la lunghezza geometrica tiene conto anche dell'ingombro dei nodi.

Tabella 4.1 – Dimensioni degli elementi primari della fondazione TetraSub.

SO.

Componente	Diametro [m]	Lunghezza geometrica [m]	Lunghezza effettiva [m]
Colonna centrale	9	31	31
Radiale 1	5.2 - 6	69	66.5
Radiale 2/3	5.2 - 6	43.5	41
Diagonale 1	2.2	56.9	52.9
Diagonale 2/3	2.2	35.2	32.2
Laterali	2.2	64.2	60.2
Casse 1	9	28	28
Casse 2/3	9	26	26
Piatti anti-sussulto	16	-	-

Tabella 4.2 – Ingombri fondazione TetraSub.

SO.

Lunghezza [m]	95.5
Larghezza [m]	102
Altezza [m]	31

Figura 4.10 – Ingombri fondazione TetraSub.

Elaborazione SO.

Per lo studio condotto e descritto all'interno del presente elaborato, ogni braccio è stato discretizzato in shell (gusci) impiegando la seguente procedura:

- è stata definita la posizione locale e globale delle connessioni tra i vari bracci;
- è stata definita la lunghezza e la posizione dei nodi;



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
14 di 85

- tra i nodi, i gusci sono stati posizionati ottimizzando il numero di sezioni e le dimensioni aventi 2.9 m di lunghezza, e laddove non sia stato possibile, sono stati inseriti gusci di lunghezza comunque superiore ad 1m;
- per la Colonna Centrale, Radiale 1, Radiale 2 e Radiale 3, gli anelli di rinforzo sono posizionati al centro di ogni shell.

Inoltre, per alcune shell è stata definita della massa aggiuntiva derivante per esempio dai rinforzi locali, dai rinforzi dei nodi della Colonna Centrale, dai manicotti nelle casse di zavorra per il collegamento con i Radiali, ecc.

Nella seguente immagine viene mostrata la fondazione discretizzata in shell. Il colore delle shell indica l'entità della massa aggiunta. I collegamenti alle estremità sono di colore grigio. L'acciaio addizionale a metà delle casse di zavorra rappresenta la massa assunta per i manicotti, sopra citati, utili per il collegamento cassa/braccio radiale. Il sistema di coordinate locale dei componenti è rappresentato con i due assi in verde e rosso.

Un riepilogo delle dimensioni delle singole shell, delle masse d'acciaio fuso per ogni sezione e delle masse d'acciaio aggiuntive stimate è contenuto nel paragrafo 9.2.1.2 (dalla Figura 9.33 alla Figura 9.38).



Figura 4.11 – Rappresentazione della fondazione discretizzata in shell.

Elaborazione SO.

Infine si riporta il dislocamento del sistema fondazione torre per le configurazioni di trasporto e di operatività.

Tabella 4.3 – Dislocamento della fondazione TetraSub.

SO.

Dislocamento (galleggiamento 8m) [t]	7515
Dislocamento (galleggiamento operativo 11m) [t]	10031



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
16 di 85

	DNVGL-RP-C202:2019. DNVGL – Recommended practice – Buckling strength of shells. Edition September 2019. DNV GL AS, 2019-09
Materiali	DNVGL-OS-B101:2020. DNVGL – Offshore Standards – Metallic materials. Edition July 2020. DNV GL AS, 2020-07.
Protezione dalla corrosione	DNVGL-RP-0416:2016. DNVGL – Recommended practice – Corrosion protection for wind turbines. Edition March 2016, Amended October 2021. DNV GL AS, 2016-04.
	DNVGL-RP-B401:2021. DNVGL – Recommended practice – Cathodic protection design. Edition May 2021. DNV GL AS, 2021-05.
Fabbricazione	EN 1090-2:2018. Eurocode – Execution of steel structures and aluminum structures – Part 2: Technical requirements for steel structures.
Trasporto e installazione	DNVGL-ST-N001:2018. DNVGL – Standard – Marine operations and marine warranty. Edition September 2018, Amended January 2020. DNV GL AS, 2018-09.
	DNVGL-ST-0437:2016. DNVGL – Standard – Loads and site conditions for wind turbines. Edition November 2016, Amended November 2021. DNV GL AS, 2016-11.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
17 di 85

5. CARATTERISTICHE AMBIENTALI DEL SITO

Nel presente paragrafo si riportano le caratteristiche ambientali dell'area marina in cui è prevista la realizzazione del parco eolico; in particolare sono evidenziate le condizioni tipiche di vento, onda, correnti marine e le caratteristiche batimetriche del fondale.

5.1.1. Clima meteomarinario

La caratterizzazione dei carichi ambientali previsti nell'area di progetto è stata condotta mediante l'analisi meteo-marina dei dati di vento, onda e corrente (Report "Relazione Meteomarina" Cod. C0421UR08RELMET00 allegato al presente progetto). Considerando il posizionamento del parco eolico, questo presenta fetch significativi per un settore compreso tra circa 210 e 360°N; per tale motivo, le condizioni meteomarine più estreme si verificano per tali direzioni.



PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE

Posizionamento del parco eolico
Elaborazione iLStudio

LEGENDA

+ Turbina eolica

Figura 5.1 – Ubicazione Parco eolico.

Elaborazione iLStudio.

Correnti marine

Si assume per la colonna d'acqua il profilo di corrente atteso per media profondità (450 m). Questa semplificazione è ritenuta accettabile in quanto:

- la corrente è simile per tutte le profondità nei primi 300m;
- i carichi agenti sulla fondazione e sulle linee di ormeggio sono determinati dalla corrente in prossimità della superficie;
- nel caso di alte profondità, i carichi sul sistema di ormeggio non sono significativamente influenzati dall'aver trascurato le velocità di corrente tra 450 e 600m.

Nella seguente tabella sono mostrati i valori di corrente in superficie in condizioni estreme in riferimento ai periodi di ritorno principali.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

Tabella 5.1 – Velocità corrente estrema in superficie per media profondità di 450m.



Dati di vento e onda

Il presente paragrafo contiene i dati meteomarini di vento e onda organizzati ed elaborati dalla società C2WIND in funzione delle verifiche da eseguire per lo studio dei moti della fondazione e per la verifica strutturale. Le condizioni progettuali meteomarine sito-specifiche di riferimento sono riportate di seguito.

Tabella 5.2 – Riepilogo delle condizioni di vento di riferimento – Altezza mozzo 165m sopra livello medio mare.

[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]

Ai fini dello studio sono state fatte ipotesi sul *wind shear* e sui livelli di turbolenza in accordo con i valori specificati in IEC 61400-1:2019. Per ulteriori dettagli si rimanda all'elaborato di progetto dal titolo "Relazione Meteomarina" Cod. C0421UR08RELMET00. Di seguito si riportano i grafici relativi alla rosa dei venti, dei mari e gli scatter plot rappresentativi dei dati di vento e onda analizzati in condizioni NSS.



Figura 5.2 – Rose dei venti annuali medi per le velocità del vento, $WS_{10,2hr}$ (sx) e $WS_{80,2hr}$ (dx).
Elaborazione DHI.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
19 di 85



Figura 5.3 – Rosa delle onde per il periodo 1979-2000.

Elaborazione DHI.

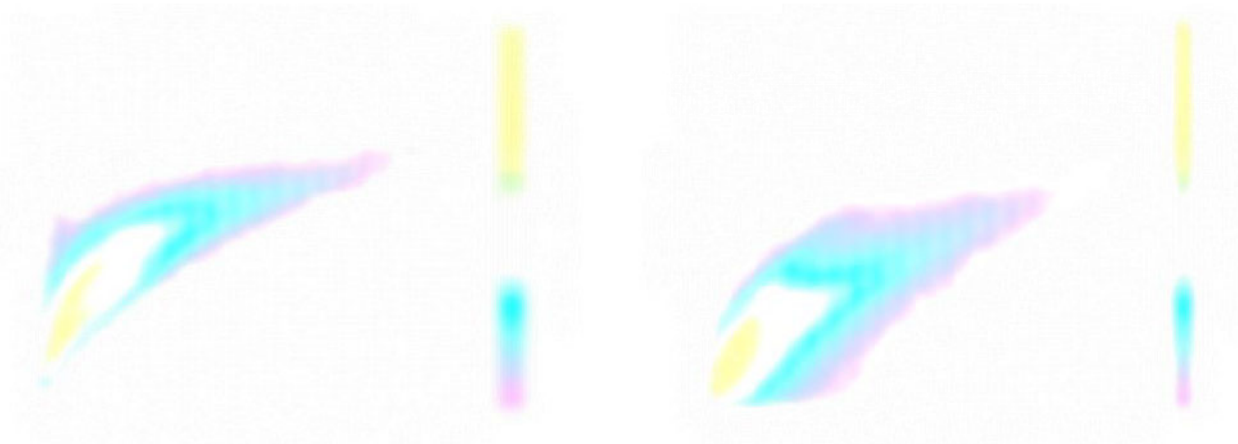


Figura 5.4 - Scatter plot omnidirezionali $H_s - T_p$ (sx) e $H_s - WS_{10,2hr}$ (dx).

Elaborazione DHI.

Le condizioni ambientali estreme (in inglese, *Extreme Sea State* – ESS) per differenti periodi di ritorno, riportate di seguito in forma tabellare e grafica, sono caratterizzate mediante la conoscenza della direzione e velocità del vento, altezza d'onda significativa (H_s) e periodi di picco (T_p) inferiori medi e superiori.

I dati relativi al periodo di ritorno $T_R=5$ anni ed impiegati nel DLC 6.6 (secondo IEC 61400-3-1:2019 e IEC 61400-3-2:2019) sono stati calcolati tramite interpolazione tra quelli relativi al $T_R=1$ anno e $T_R=10$ anni.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
20 di 85

Tabella 5.3 – Condizioni estreme vento-onda per un periodo di ritorno di 500 anni.

Tabella 5.4 – Condizioni estreme vento-onda per un periodo di ritorno di 50 anni.

Tabella 5.5 – Condizioni estreme vento-onda per un periodo di ritorno di 10 anni.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
21 di 85

Tabella 5.6 – Condizioni estreme vento-onda per un periodo di ritorno di 5 anni.

Tabella 5.7 – Condizioni estreme vento-onda per un periodo di ritorno di 1 anno

Figura 5.5 – Velocità del vento (sx) e altezze d'onda significative (dx) per ogni direzione in condizioni estreme.

Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
22 di 85

Marine growth

Per *marine growth* si indica la colonizzazione di strutture da parte di organismi marini che provengono dalla colonna d'acqua e determinano l'incrostazione e la copertura delle superfici degli oggetti sommersi.

Il *marine growth* è più evidente nei primi 50 metri della colonna d'acqua e influisce sia sul peso sia sulla resistenza idrodinamica (*Drag*) della linea di ormeggio.

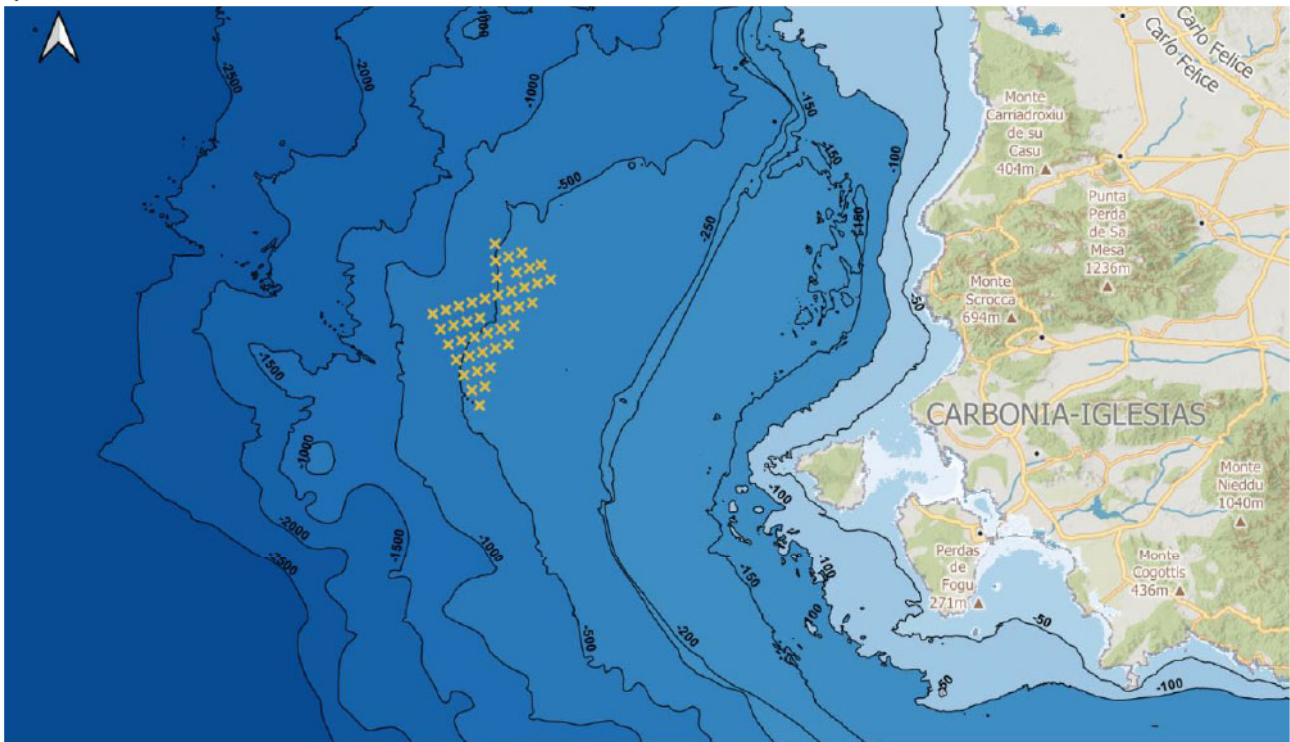
Sebbene per un sistema a catenaria una variazione del peso e della superficie laterale esposta alle correnti può avere un impatto significativo sui carichi agenti sulla linea, invece, per i sistemi tesi, il cui funzionamento è principalmente basato sulla rigidità assiale della fune, l'impatto di queste variazioni è di minore entità se non trascurabile.

Relativamente alla fondazione, assumendo un tasso di crescita del *marine growth* come prescritto dai codici applicabili, l'incremento del peso e la variazione del coefficiente di resistenza è generalmente considerato di bassa entità, se non trascurabile.

L'effetto del *marine growth* sarà comunque tenuto in conto nelle successive fasi di ingegneria di dettaglio (FEED - front-end engineering and design – ingegneria e progettazione front-end) per la verifica della fondazione e del sistema di ormeggio, secondo i requisiti delle normative di riferimento (tra cui DNV-ST-0119:2021, DNVGL-RP-C202:2019, DNVGL-OS-E301:2020), così da garantire elevati standard di sicurezza in tutte le condizioni operative dell'impianto.

5.1.2. Batimetria

La profondità del fondale varia da un minimo di 330 m sul confine ad Est dell'area ad un massimo di 720 m su quello ad Ovest.



PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
Batimetria nell'area di progetto
(EMODnet Bathymetry, 2022)

LEGENDA

x Turbina Eolica

Figura 5.6 – Batimetria nell'area di progetto.

Elaborazione iLStudio.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0421SR14RELFON00a	Data emissione: Marzo 2023	Pagina 23 di 85

Per le finalità di questa relazione e delle analisi condotte, sono stati definiti i seguenti 3 livelli di profondità:

- Bassa profondità (Shallow water depth) – 350m
- Media profondità (Mid-range water depth) – 450m
- Alta profondità (Deep water depth) – 600m



6. CASI DI CARICO DI PROGETTO

Questa sezione descrive il gruppo di casi di carico di progetto (in inglese, Design Load Cases – DLC) come definiti in IEC 61400-3-1:2019 e in IEC 61400-3-2:2019, utilizzati per stabilire il set di analisi da eseguire per il calcolo dei moti fondazione e per le verifiche strutturali.

6.1.1. Tabella di riepilogo dei DLC

I casi di carico considerati sono presentati nelle tabelle sottostanti. I DLC indicati prevedono condizioni estreme di vento e onda e, nello specifico, i DLC 6.1 e 6.2 sono relativi alla verifica allo Stato Limite Ultimo (SLU), mentre il DLC 10.2 è relativo alla verifica allo Stato Limite Accidentale (SLA).

Tabella 6.1 – DLC per verifica allo SLU e in condizioni ESS.

Condizione di progetto	DLC	Vento	Onda	Disallineamento onda-vento	Corrente marina	Errore di imbardata	Livello mare	# di seed	Altre condizioni / Tipo di analisi	# di simulazioni
Produzione di energia	1.2	$V_{HUB} = [V_{IN}:2:V_{OUT}]$ NTM	NSS $H_s = E[H_s V_{HUB}]$ $T_P = E[T_P V_{HUB}]$	MIS $\pm 30^\circ$ Dir=[0:30°:330°]	Assente	0°	MSL	1*	F/U	2202
Macchina parcheggiata (ferma o al minimo)	6.1	$V_{HUB} = V_{HUB,50y}$ EWM	ESS $H_s = H_{s,50y}$	MIS $\pm 30^\circ, 60^\circ$ Dir=[0:30°:330°]	ECM	0°	MSL	6	U	216
	6.2	$V_{HUB} = V_{HUB,50y}$ EWM	ESS $H_s = H_{s,50y}$	MIS $\pm 30^\circ, 60^\circ$ Dir=[0:30°:330°]	ECM	[30°, 90°, 180°, 270°, 330°]	MSL	6	U	1440

Tabella 6.2 – DLC per verifica allo SLA e in condizioni ESS .

Condizione di progetto	DLC	Vento	Onda	Disallineamento onda-vento	Corrente marina	Errore di imbardata	Livello mare	# di seed	Altre condizioni / Tipo di analisi	# di simulazioni
Macchina parcheggiata o fuori servizio	10.2	$V_{HUB} = V_{HUB,1y}$ EWM	ESS $H_s = H_{s,1y}$	COD, Dir=[0°:30°:330°]	NCM	0°	MSL	6	Rottura linea di ormeggio	288

Il disallineamento onda-vento (Wind Wave Misalignment) rappresenta l'angolo relativo tra la direzione del vento e quella dell'onda. L'errore di imbardata (Yaw error) rappresenta l'angolo relativo tra rotore e direzione del vento.

6.1.2. Definizione dei DLC

Tabella 6.3 – Descrizione del DLC 1.2.

DLC 1.2	Normale funzionamento
Descrizione	Questo DLC simula la turbina in condizioni di normale funzionamento e normali condizioni ambientali (velocità del vento, turbolenza, corrente e stato del mare).
Setup di simulazione	Tempo di simulazione: 600 s Numero di seed: tra 1-31, dipende dalla probabilità Velocità del vento: 5 - 25 m/s Turbolenza: NTM Sea state: NSS Corrente: assente Direzione vento e onda: [0°:30°:330°] Altezza e periodo dell'onda (dai dati NSS) Disallineamento vento-onda (dai dati NSS) Disallineamento onda-corrente: assente Errore di imbardata: 0° Fattori parziali di sicurezza delle strutture: Normale (1.1 / 1.35 o 1.25 / 0.7)



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE		
PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0421SR14RELFON00a	Data emissione: Marzo 2023	Pagina 25 di 85

DLC 1.2	Normale funzionamento
	Fattori parziali di sicurezza delle linee di ormeggio: SLU (1.35 / 1.75)
Nota	<ul style="list-style-type: none"> - Le condizioni ambientali con velocità del vento intorno ai 3 m/s sono state omesse e aggregate in quelle con 5 m/s. - Le condizioni ambientali aventi velocità del vento inferiore ai 3 m/s sono state omesse in quanto si assume che non contribuiscano al danno (le altezze d'onda per queste condizioni sono praticamente nulle). - Le condizioni ambientali con velocità del vento superiore a 25 m/s sono state omesse e aggregate conservativamente in quelle con 25 m/s. - Le condizioni ambientali con probabilità inferiore a 10^{-5} sono state omesse. - Il numero di seeds dipende dalla probabilità del caso simulato. Per le probabilità che eccedono 10^{-3}, sono stati considerati seed aggiuntivi tali da non superare questo limite.

Tabella 6.4 – Descrizione del DLC 6.1.

DLC 6.1	Tempesta con $T_R=50$ anni con connessione alla rete
Descrizione	Questo DLC simula la turbina e la fondazione sottoposta ad una tempesta con $T_R = 50$ anni. L'aerogeneratore è al minimo con la possibilità di imbarcarsi mentre rimane collegato alla rete.
Setup di simulazione	<p>Tempo di simulazione: 600 s Numero di seed: 6 Velocità del vento: 5.1.1 Turbolenza: EWM Sea state: ESS Corrente: ECM Direzione vento e onda: [0°:30°:330°] Altezza e periodo dell'onda: 5.1.1 Disallineamento vento-onda: 0°, ±30°, 60° Disallineamento onda-corrente: assente Errore di imbardata: 0° (il movimento della fondazione induce una imbardata > 8°) Fattori parziali di sicurezza delle strutture: Normale (1.1 / 1.35 o 1.25 / 0.7) Fattori parziali di sicurezza delle linee di ormeggio: SLU (1.35 / 1.75)</p>
Nota	Nel treno d'onda simulato è inclusa anche un'onda estrema con H_{MAX} (altezza d'onda massima) e associato periodo T_{ASS} nell'istante di tempo $t=300s$. È stato utilizzato il limite inferiore dei periodi T_P indicati.

Tabella 6.5 – Descrizione del DLC 6.2.

DLC 6.2	Tempesta con $T_R=50$ anni con guasto alla rete
Descrizione	Questo DLC simula la turbina e la fondazione sottoposta ad una tempesta con $T_R = 50$ anni. L'aerogeneratore è al minimo senza possibilità di imbarcarsi perché non è collegato alla rete o ad un sistema di backup di alimentazione.
Setup di simulazione	<p>Tempo di simulazione: 600 s Numero di seed: 6 Velocità del vento: 5.1.1 Turbolenza: EWM Sea state: ESS Corrente: ECM Direzione vento e onda: [0°:30°:330°] Altezza e periodo dell'onda: 5.1.1 Disallineamento vento-onda: 0°, ±30°, 60° Disallineamento onda-corrente: assente Errore di imbardata: 30°, 90°, 180°, 270°, 330° Fattori parziali di sicurezza delle strutture: Anomalo (1.1 / 1.1)</p>



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
26 di 85

Fattori parziali di sicurezza delle linee di ormeggio: SLU (1.3 / 1.75)

Nota

Nel treno d'onda simulato è inclusa anche un'onda estrema con H_{MAX} e associato periodo T_{ASS} nell'istante di tempo $t=300s$. È stato utilizzato il limite inferiore dei periodi T_P indicati.

Tabella 6.6 – Descrizione del DLC 10.2.

DLC 10.2	Funzionamento al minimo con rottura della linea di ormeggio – Verifica della condizione di ridondanza
Descrizione	Questo DLC considera la turbina al minimo in seguito alla rottura di una linea di ormeggio, in condizioni estreme con $T_R=1$ anno. Ogni linea, alternativamente, subisce la rottura per ognuna delle direzioni in cui agiscono i carichi ambientali. La rottura si verifica ad inizio simulazione con il galleggiante che raggiunge la nuova posizione di equilibrio.
Setup di simulazione	Tempo di simulazione: 600 s Numero di seed: 6 Velocità del vento: 5.1.1 Turbolenza: EWM Sea state: ESS Corrente: ECM Direzione vento e onda: [0°:30°:330°] Altezza e periodo dell'onda: 5.1.1 Disallineamento vento-onda: 0° Disallineamento onda-corrente: assente Fattori parziali di sicurezza delle strutture: Anomalo (1.1 / 1.1) Fattori parziali di sicurezza delle linee di ormeggio: SLA (1.0 / 1.1)
Nota	La rottura della singola linea (alternativamente dalla Linea 1 alla 4) si verifica durante l'inizio della simulazione. È stato utilizzato il limite inferiore dei periodi T_P indicati.



7. ANALISI DI STABILITÀ

Le proprietà di stabilità della fondazione TetraSub sono state valutate secondo lo standard DNV-ST-0119:2021; lo studio si esplica in un'analisi quasi-statica del comportamento della struttura sotto un'azione sbandante.

In generale, la stabilità di un sistema galleggiante è quantificata attraverso l'integrale, ovvero l'area sottesa della curva del momento raddrizzante (restoring). Dal valore di tale area, attraverso un coefficiente divisore suggerito dallo standard (DNV), si può valutare il massimo momento di sbandamento accettabile. Quest'ultimo può essere infine confrontato con i carichi applicati alla struttura in differenti condizioni operative, per valutare se il contributo raddrizzante è sufficiente a garantire la stabilità del sistema.

In questa fase di progetto, le valutazioni sono effettuate esclusivamente in condizioni di stabilità intatta, ovvero di fondazione integra. Le valutazioni sono state effettuate secondo configurazione in **fase operativa** o di **esercizio**.

La condizione di stabilità compromessa è stata trascurata poiché non è prevista la presenza di equipaggio in caso di condizioni meteomarine particolarmente avverse.

7.1. Configurazione del sistema

Per il presente studio si è considerata la fondazione TetraSub accoppiata alla turbina eolica da 15MW proposta dal National Renewable Energy Laboratory (NREL, Marzo 2020) sulla base degli attuali sviluppi dell'industria di settore, le cui caratteristiche salienti sono riportate nella seguente tabella.

Tabella 7.1 – Caratteristiche relative alla turbina NREL da 15MW.

(NREL, Marzo 2020).

Potenza nominale [MW]	15
Numero di pale [-]	3
Diametro rotore [m]	240
Quota mozzo [m.s.l.m.]	155-165
Massa singola pala [t]	65
Massa navicella [t]	1017
Massa torre [t]	860

La tabella riporta due valori della quota del mozzo poiché l'analisi di stabilità è stata condotta sia per 155 m.s.l.m che per 165 m.s.l.m.

Infine si specifica che il sistema non è vincolato al fondale da alcuna linea di ormeggio, per cui è da considerarsi libero, determinando una condizione di calcolo ampiamente conservativa.

7.2. Metodologia di calcolo

Nel presente paragrafo è riportata la metodologia di calcolo utilizzata per la valutazione del momento raddrizzante e sbandante, secondo DNV-ST-0119:2021.

7.2.1. Requisito di stabilità di una fondazione semi-immersa (DNV-ST-0119)

Lo standard specifica che la fondazione deve rispettare un requisito di stabilità intatta, a seguito dei passaggi riportati nel seguente metodo.

- Si valuta il momento raddrizzante della fondazione e la relativa curva;
- Si valuta il momento sbandante, assunto costante al variare dell'angolo di inclinazione;
- Si determina l'angolo di allagamento minimo e l'angolo di 2° intercetta tra le curve dei due momenti;



- Si individua come angolo limite il minore tra i precedenti angoli;
- Si valuta l'area sottesa alla curva del momento raddrizzante limitata fino all'angolo limite;
- Si valuta l'area sottesa alla curva del momento sbandante limitata fino all'angolo limite.

Il requisito di stabilità impone che l'area sottesa alla curva del momento raddrizzante fino all'angolo limite, sia maggiore di almeno 1.3 (*rapporto aree*) volte rispetto all'area sottesa alla curva del momento sbandante, limitata allo stesso angolo.

Con l'ausilio della rappresentazione in Figura 7.1, indicato con A_R l'area sottesa alla curva del momento raddrizzante e con A_S quella sottesa alla curva del momento sbandante, il requisito di stabilità suddetto richiede che:

$$A_R \geq 1.3 \cdot A_S \quad \text{eq. (1)}$$

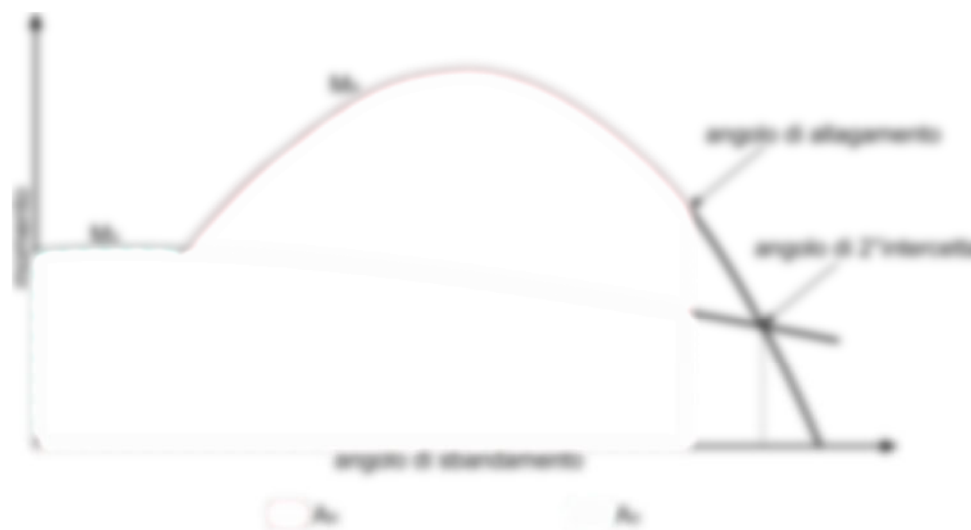


Figura 7.1 – Curve del momento raddrizzante e sbandante.

Elaborazione iLStudio.

7.2.2. Momento raddrizzante e massimo momento sbandante accettabile

Il calcolo del **momento raddrizzante** è effettuato considerando esclusivamente il contributo della spinta e dell'area di galleggiamento della fondazione. È importante ricordare nuovamente che non si considera il contributo stabilizzante dato dalle linee di ormeggio. Ciò implica che la fondazione può essere considerata libera e dunque non vincolata al fondale, conferendo un carattere conservativo ai risultati finali. Il metodo di calcolo è riportato nel seguente elenco puntato.

- Si impone una rotazione sbandante alla struttura;
- Si permettono spostamenti verticali al fine di garantire l'equilibrio verticale della struttura;
- Si valuta la posizione del centro di carena;
- Si valuta la posizione del baricentro della struttura, tenendo conto della correzione dovuta agli specchi liberi all'interno delle casse di zavorra;
- Si calcola il braccio raddrizzante come distanza orizzontale tra il baricentro e il centro di carena;
- Si calcola il momento raddrizzante secondo la sua definizione classica:

$$M_R = \Delta \cdot GZ \quad \text{eq. (2)}$$



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
29 di 85

ove Δ è la forza peso della fondazione e GZ è il braccio di stabilità.



Figura 7.2 – Braccio di stabilità GZ.

Elaborazione iLStudio.

Il momento raddrizzante è stato calcolato per angoli di sbandamento compresi tra 0° e 60° ad intervalli di 5° .

Il **massimo momento sbandante accettabile**, a fronte di una specifica curva di stabilità della fondazione, è stato valutato cercando la generica curva del momento sbandante per cui si verifici il requisito di stabilità riportato nel paragrafo 7.2.1.

Il processo di calcolo descritto nella presente sezione è stato effettuato per differenti assi di rotazione; data la simmetria della fondazione rispetto al piano diametrale, le valutazioni sono state effettuate per angoli di azione sbandante¹ compresi tra 0° e 180° , con intervalli di 30° .

L'asse del rotore, in fase operativa, è stato ritenuto parallelo alla direzione del carico sbandante.

¹ Angolo di azione sbandante: è l'angolo compreso tra l'azione sbandante del vento e l'asse longitudinale (x) della fondazione galleggiante. L'angolo è crescente per rotazioni antiorarie della retta di applicazione dell'azione sbandante.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
30 di 85

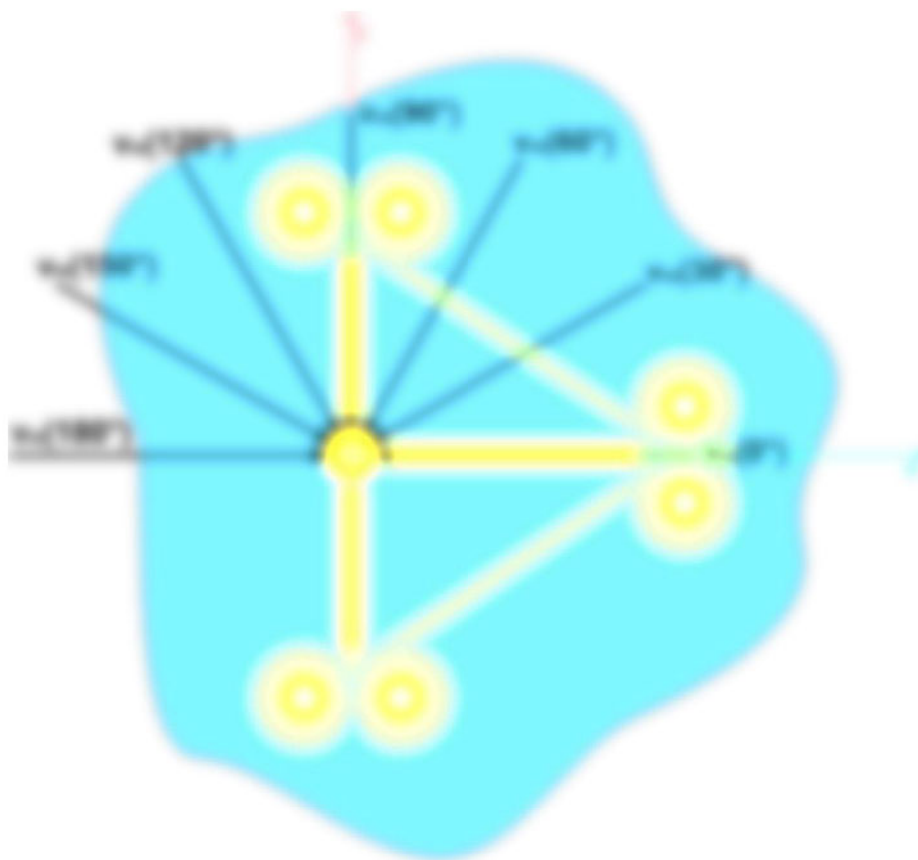


Figura 7.3 – Direzioni di provenienza del vento. Calcolo del momento raddrizzante.

Elaborazione iLStudio.

7.2.3. Momento sbandante

Il calcolo del momento sbandante è effettuato per la condizione di funzionamento della turbina in fase di esercizio; la causa sbandante è imputata all'azione del vento sulla superficie esposta dell'aerogeneratore e della torre eolica.

Il momento sbandante calcolato è considerato costante al variare dell'angolo di sbandamento. Tale ipotesi si rivela conservativa se si considera che all'aumentare dell'angolo di inclinazione del sistema, diminuiscono sia le forze di drag, sia il braccio del momento.

In fase operativa si considera che il massimo momento sbandante è quello dovuto alla condizione in cui si verifica il picco di spinta della turbina eolica. La spinta della turbina è valutata tramite il coefficiente di spinta fornito da NREL e tramite la velocità del vento associata al picco. Nota la spinta, il momento sbandante è valutato considerando il braccio pari alla differenza tra la quota del mozzo e quella dei passacavi.

7.3. Risultati

Nella presente sezione, a valle dei calcoli effettuati, sono riportati i valori del momento raddrizzante del massimo momento sbandante accettabile e dell'effettivo momento sbandante generato dalla turbina.

I calcoli sono stati effettuati mediante apposito tool ██████, realizzato in ambiente Matlab e validato dal registro DNV. Il tool, contenente una modellazione discreta della geometria e delle masse della struttura, permette di calcolare le proprietà statiche come il centro di gravità, il centro di carena utili ai fini dell'analisi di stabilità.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0421SR14RELFON00a	Data emissione: Marzo 2023	Pagina 31 di 85

7.3.1. Momento raddrizzante e massimo momento sbandante accettabile



Figura 7.4 – Massimo momento sbandante accettabile, fase operativa.
SO.

L'angolo di provenienza del vento pari a ■■■ registra il minimo assoluto in termini di momento sbandante accettabile. Per tale angolo, il valore del momento si attesta su ■■■■■.

A seguire, per completezza, si riportano i diagrammi di stabilità della fondazione galleggiante per le 7 direzioni di provenienza del vento.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
32 di 85

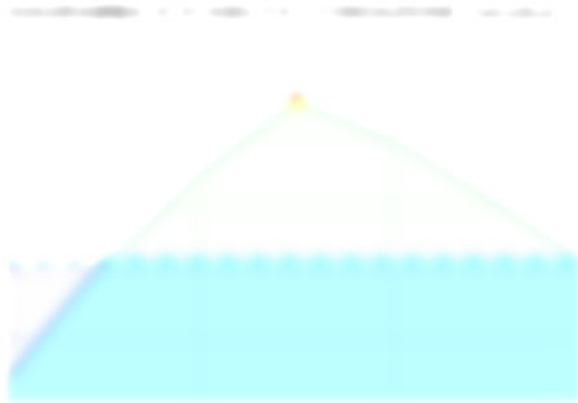


Figura 7.5 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbadante pari a 0°, fase operativa.
SO.



Figura 7.6 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbadante pari a 30°, fase operativa.
SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
33 di 85

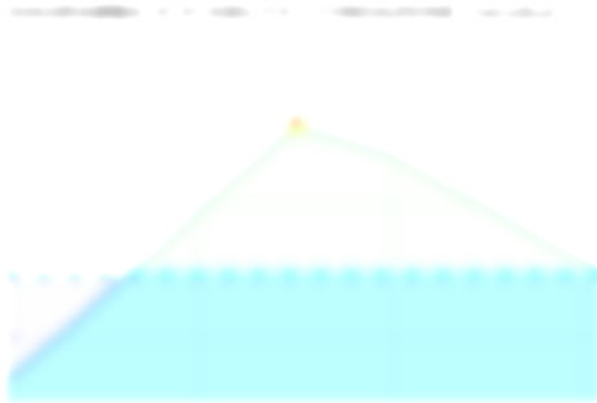


Figura 7.7 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbandante pari a 60°, fase operativa.
SO.

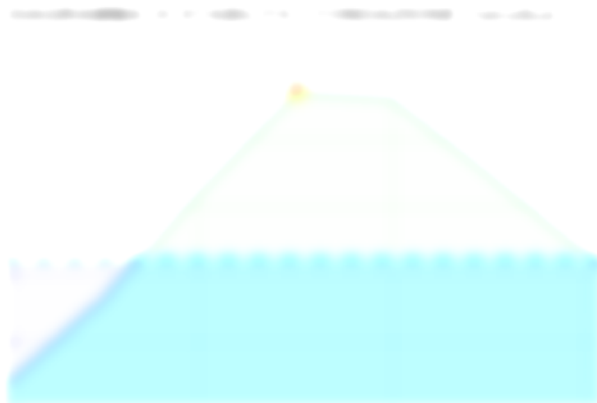


Figura 7.8 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbandante pari a 90°, fase operativa.
SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
34 di 85

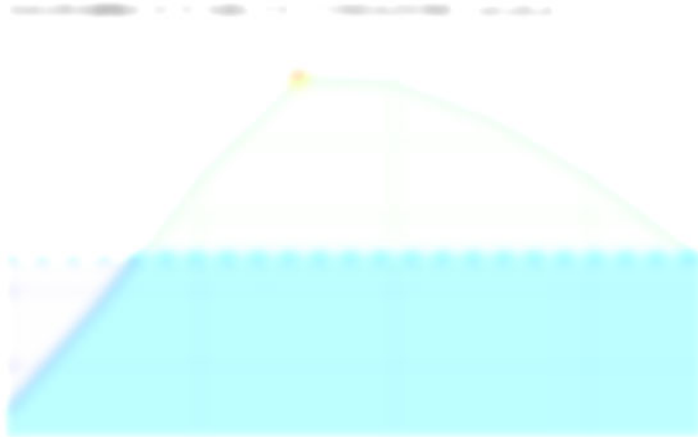


Figura 7.9 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbandante pari a 120°, fase operativa.
SO.

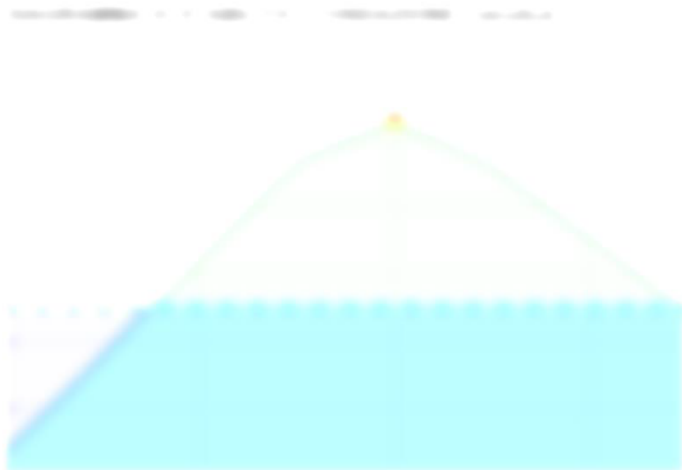


Figura 7.10 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbandante pari a 150°, fase operativa.
SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

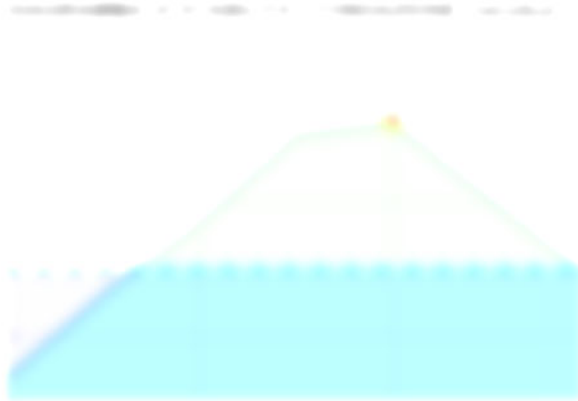


Figura 7.11 – Diagramma di stabilità fondazione TetraSub per angolo di azione sbandante pari a 180°, fase operativa.
SO.

7.3.2. Momento sbandante

Il valore del momento sbandante dipende strettamente dalle caratteristiche della turbina in fase operativa, e dalla velocità del vento nel caso di studio della stabilità in condizioni anemometriche estreme.

7.3.2.1. Fase operativa

In una condizione di fase operativa, il momento di sbandamento è frutto della spinta generata dalla rotazione delle pale. Nel dettaglio si considera il valore di picco della spinta, ottenibile dalle curve di performance della turbina scelta. Nel caso della turbina NREL da 15MW il picco di spinta è 2258 kN.

Nella tabella seguente si riporta il calcolo del momento sbandante sia per la configurazione del mozzo a 155m che per quella a 165m.

Tabella 7.2 – Momenti di sbandamento.
SO.

7.4. Analisi della stabilità della fondazione



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
36 di 85

La stabilità in fase operativa è valutata confrontando il minimo momento di sbandamento ammissibile in Figura 7.4 con il rispettivo effettivo, calcolato e riportato in Tabella 7.2.

Tabella 7.3 – Utilizzo della stabilità in fase operativa.

SO.

██████████	██████████	██████████
████████████████████	████████████████████	██████████
████████████████████	████████████████████	██████████
████████████████████	████████████████████	██████████
██████████	██████████	██████████
██████████	██████████	██████████

Il momento sbandante risulta pari a circa ██████████ ed il ██████████ del valore ammissibile rispettivamente nel caso di quota del mozzo a 155m e 165m; **il criterio di stabilità è soddisfatto per ogni condizione analizzata.**



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
37 di 85

8. ANALISI DINAMICA E DEI MOTI

L'analisi dinamica condotta per la fondazione TetraSub ha permesso di valutare:

- il modo di vibrare delle strutture mediante apposita analisi modale;
- i moti del sistema in termini di accelerazioni in testa alla torre, come criterio tecnologico per il funzionamento della turbina;
- i moti del sistema in termini di traslazioni e rotazioni massime compiute.

Il presente capitolo riporta i risultati ottenuti dalle suddette valutazioni, non prima di aver indicato il software, i sistemi di riferimento utilizzati nelle simulazioni, nonché le tecniche di modellazione e la configurazione del sistema turbina-torre-fondazione.

8.1. Software di simulazione

L'analisi dinamica delle strutture in oggetto richiede l'utilizzo di uno strumento di calcolo capace di simulare tutti i fenomeni fisici ambientali che agiscono sul sistema e di prevederne la risposta in termini di spostamenti e sollecitazioni interne. Lo strumento di simulazione utilizzato per la determinazione dei carichi agenti sulla fondazione TetraSub è il software OrcaFlex sviluppato da Orcina Ltd. Con OrcaFlex è possibile modellare e simulare tutti i principali fenomeni di una fondazione galleggiante, tra cui:

- idrodinamica e dinamica strutturale di corpi galleggianti;
- idrodinamica e dinamica strutturale dei sistemi di ormeggio;
- aerodinamica e dinamica strutturale di una turbina eolica;
- accoppiamento con il software di controllo per controllare il comportamento della turbina durante la simulazione.

8.2. Configurazione del sistema

8.2.1. Sistemi di coordinate

La costruzione del modello e la rappresentazione dei risultati è stata possibile mediante l'utilizzo di un sistema di coordinate globale, un sistema di coordinate della fondazione ed un sistema di coordinate associato agli eventi meteomarinari (d'ora in poi sistema di coordinate meteomarinario).

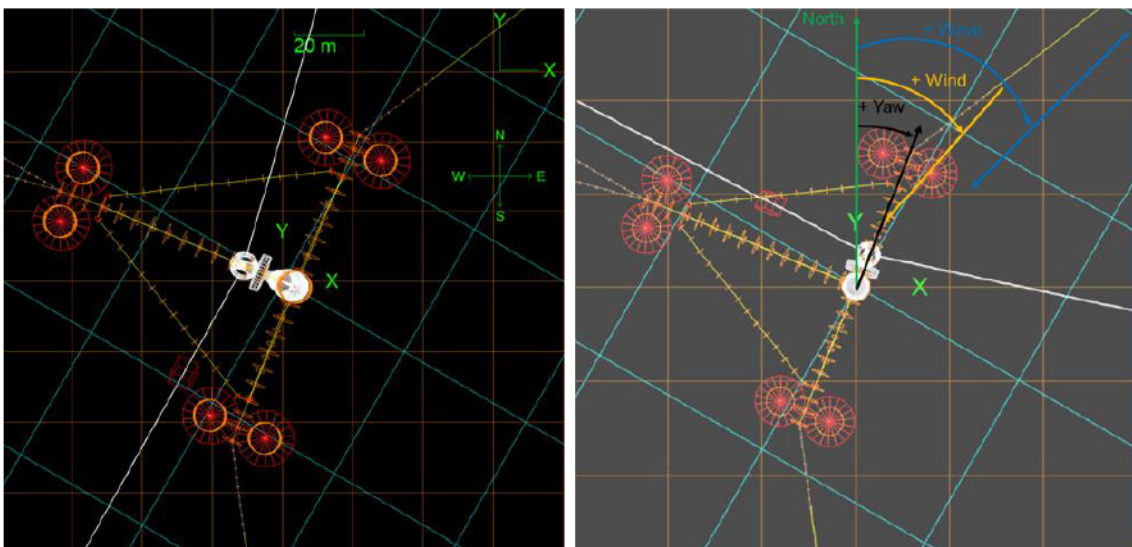


Figura 8.1 – Sistema di coordinate globale (sx), sistema di coordinate meteomarinario (dx).

Elaborazione SO.



8.2.1.1. Sistema di coordinate globale

Il sistema di coordinate globale è fisso ed allineato secondo i punti cardinali. L'asse X è orientato ad Est e l'asse Y è orientato a Nord, l'asse Z è uscente dalla superficie del mare. L'origine si trova nell'intersezione tra il livello medio del mare e la direttrice della colonna centrale (a sinistra nella Figura 8.1).

8.2.1.2. Sistema di coordinate della fondazione

Il sistema di coordinate della fondazione è rappresentato da una terna di riferimento cartesiana levogira, solidale alla struttura, con origine centrata sul fondo della colonna centrale. Di seguito si riporta la caratterizzazione degli assi principali.

- Asse **x**, definito longitudinale, giacente sul piano orizzontale e avente direzione e verso in comune con quella del braccio radiale principale.
- Asse **z** avente direzione verticale e verso positivo verso l'alto.
- Asse **y**, definito trasversale, ortogonale ai due precedenti ed avente verso tale da rendere la terna levogira.

Nota la terna propria della fondazione, si definiscono i 6 moti principali come di seguito.

- **Abbrivio** (*surge*), traslazione lungo l'asse x longitudinale.
- **Deriva** (*sway*), traslazione lungo l'asse y trasversale.
- **Sussulto** (*heave*), traslazione lungo l'asse z verticale.
- **Rollio** (*roll*), rotazione attorno all'asse x longitudinale.
- **Beccheggio** (*pitch*), rotazione attorno all'asse y trasversale.
- **Imbardata** (*yaw*), rotazione attorno all'asse z verticale.

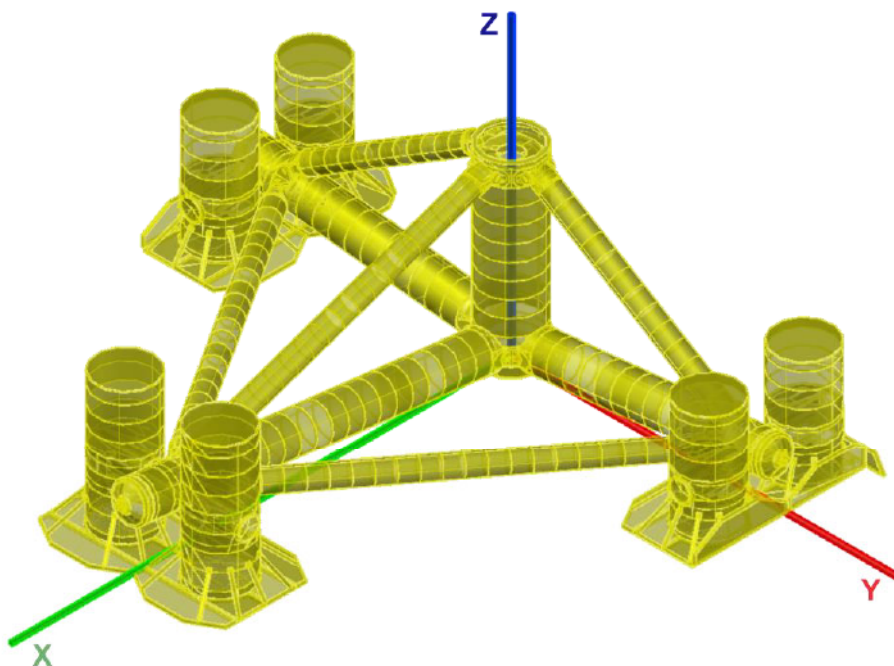


Figura 8.2 – Sistema di coordinate della fondazione.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

8.2.3. Analisi modale

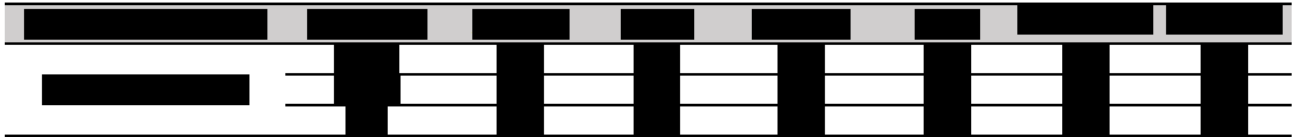
Periodi naturali della fondazione

I periodi naturali del galleggiante rappresentano importanti parametri di progetto. È necessario che questi siano sufficientemente distanti dall'intervallo delle frequenze del carico d'onda, poiché il movimento di risonanza potrebbe indurre un'addizionale carico di fatica. Tuttavia il periodo naturale relativo al sussulto può essere considerato un'eccezione in quanto, in quella direzione, il sistema è fortemente smorzato. Inoltre, il moto di traslazione verticale produce dei carichi che rappresentano solo una piccola parte di quelli gravitazionali. Pertanto si può accettare di buon grado l'eventualità in cui il valore del periodo naturale relativo al sussulto sia vicino alla frequenza del carico d'onda.

I piatti anti-sussulto alla base delle casse influiscono sui gradi di libertà di sussulto, rollio e beccheggio. Per questo studio è stato definito un diametro equivalente dei piatti di 16 metri.

I periodi naturali sono calcolati tramite un'analisi modale eseguita in OrcaFlex, di cui sono riportati i risultati nella seguente tabella.

Tabella 8.4 – Periodi naturali del TetraSub.



Prima frequenza naturale del sistema torre-fondazione

Per minimizzare il danno da fatica, la prima frequenza naturale del sistema torre-fondazione (modo di vibrare mostrato in Figura 8.3, in cui le linee di ormeggio sono nascoste per motivi di rappresentazione grafica) deve essere sufficientemente distante dalle frequenze di rotazione della turbina (specialmente 1P e 3P). La Tabella 8.5 mostra le prime frequenze naturali del sistema, mentre in Tabella 8.6

Tabella 8.6 viene mostrata la differenza tra queste ultime e la sola frequenza 3P, dal momento che la differenza rispetto alla 1P risulta essere più grande.

Tabella 8.5: Frequenze naturali del sistema torre-fondazione

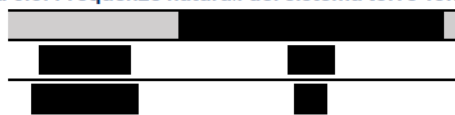


Tabella 8.6: Differenza tra la frequenza 3P e le prime frequenze naturali del sistema



A velocità nominale, la minima differenza tra la frequenza 3P e quelle naturali è del [redacted], bastevole per evitare fenomeni di risonanza.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.

Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE

PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:

C0421SR14RELFON00a

Data emissione:

Marzo 2023

Pagina

43 di 85

9. VERIFICA STRUTTURALE DELLA FONDAZIONE

Con l'obiettivo di dimensionare la fondazione, in determinate condizioni di carico, in modo tale che conservi la sua integrità strutturale, si è fatto ricorso all'analisi agli stati limite considerando le condizioni sito-specifiche dell'opera.

In questa fase di progetto, sono state effettuate alcune valutazioni di massima in accordo con la sezione 2.3.1 del DNV-ST-0119:2021 e per alcune delle parti strutturali della fondazione galleggiante. Si è deciso di focalizzare l'attenzione sulle combinazioni di carico ritenute più gravose.

I carichi sono stati estratti dalle analisi eseguite per il dimensionamento e la verifica del sistema di ormeggio, proposto con 6 linee, ma per il quale è stata impiegata, nelle simulazioni, una configurazione a 4 linee di ormeggio, bastevole per una corretta installazione e per soddisfare le verifiche normative (come illustrato nella relazione specialistica allegata al presente progetto "Relazione tecnica - Dimensionamento delle strutture di ancoraggio e ormeggio" Cod. C0421SR15RELORM00).

Per quanto riguarda lo studio dello **Stato Limite Ultimo (SLU)** e **Stato Limite di Fatica (SLF)**, sotto l'azione dei carichi è stato eseguito un dimensionamento tale che:

- gli elementi cilindrici abbiano una capacità portante sufficiente nei riguardi dei carichi di progetto e della resistenza all'instabilità (*buckling*): ogni guscio (shell) è stato ottimizzato in termini di spessore per far fronte ai soli carichi SLU (Paragrafo 9.1.1.2). Conseguentemente sono stati dimensionati gli anelli di rinforzo (irrigidimento). Lo spessore delle casse di zavorra non è stato dimensionato ma è stato assunto un valore costante pari a [REDACTED];
- gli elementi cilindrici abbiano una capacità portante sufficiente anche nei riguardi dei carichi di progetto allo SLF (Paragrafo 9.1.2);
- le connessioni abbiano una capacità sufficiente a rottura sia per i perni che per le boccole (Paragrafo 9.1.1.3).

All'interno del Paragrafo 9.1 sono comunque descritte anche le verifiche che saranno affrontate nelle successive fasi del progetto.

I nodi cilindrici, realizzati in fonderia e saldati ai bracci della struttura, sono stati opportunamente pre-dimensionati sulla base dell'esperienza maturata in merito. Il dimensionamento di dettaglio e le verifiche numeriche strutturali saranno condotte successivamente nella fase di progettazione di dettaglio FEED (Front-End Engineering Design).



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE		
PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0421SR14RELFON00a	Data emissione: Marzo 2023	Pagina 44 di 85

9.1. Criteri di progettazione

9.1.1. Verifica allo Stato Limite Ultimo

Le verifiche allo stato limite ultimo per la fondazione TetraSub sono state effettuate in accordo allo standard DNV-ST-0119:2021.

9.1.1.1. Verifica di snervamento

La resistenza della fondazione allo Stato Limite Ultimo sarà valutata confrontando le sollecitazioni agenti sulla struttura, ottenute tramite calcolo analitico o tramite analisi agli elementi finiti, con le resistenze caratteristiche dei materiali di cui essa è composta, in termini di qualità, geometria e spessore.

Nel condurre questa verifica, sarà tenuto conto dei coefficienti di sicurezza da applicare al materiale ed alle forze, secondo normativa.

Questa procedura sarà adottata per la verifica degli elementi cilindrici, dei giunti testa-testa a completa penetrazione, delle lamiere in generale e dei nodi.

Per gli elementi per i quali la verifica diretta tramite modello agli elementi finiti risulta complicata o laboriosa, come ad esempio per le saldature a parziale penetrazione o ad angolo, questi saranno verificati analiticamente estrapolando le relative sollecitazioni dal modello FEM. In particolare, la verifica delle saldature sarà condotta in accordo con quanto prescritto nelle EN 1993-1-8:2005.

Per le verifiche descritte si rimanda alle successive fasi di progetto.

9.1.1.2. Stato Limite Ultimo di Instabilità (Buckling)

In accordo con quanto prescritto nella DNVGL-RP-C202:2019, le verifiche di instabilità sono state condotte sugli elementi cilindrici e conici.

In particolare questi elementi sono composti da gusci di sezione circolare (fasciame), rinforzati trasversalmente con anelli interni di opportuno spessore; pertanto la verifica di instabilità è stata condotta sul guscio esterno, sugli anelli di rinforzo e sull'elemento nella sua interezza (guscio più anelli).

Come specificato nella *Sezione 7.2* del DNV-ST-0119:2021 la verifica di instabilità dovrà essere eseguita in accordo con il DNVGL-RP-C202:2019 o il Norsok N-004:2021 in base al rapporto tra il diametro (D) e lo spessore (t):

- per $D/t > 120$ è valido il DNVGL-RP-C202:2019 per il quale i membri sono considerati come gusci (shells)
- per $D/t < 120$ è valido il Norsok N-004:2021 per il quale i componenti sono considerati come membri tubolari.

I rapporti di utilizzo per instabilità sono stati valutati in 18 punti discreti periferici attorno ad ogni sezione analizzata delle shell.

Il fattore del materiale impiegato nel calcolo è scelto in funzione del parametro di snellezza λ_s in accordo con la seguente tabella (DNV-ST-0119:2021, nel quale viene indicato con l).

Tabella 9.1 – Fattore del materiale per il calcolo di instabilità

Parametro di snellezza ridotto (λ_s)	Fattore del materiale (γ_m)
$\lambda_s \leq 0.5$	1.10
$0.5 \leq \lambda_s \leq 1$	$0.80 + 0.60 \cdot \lambda_s$
$\lambda_s \geq 1$	1.4



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE		
PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0421SR14RELFON00a	Data emissione: Marzo 2023	Pagina 45 di 85

9.1.1.2.1. Valutazione dell'instabilità dei gusci (shell)

La Colonna Centrale e i componenti radiali sono rinforzati tramite anelli interni. Per questo motivo, ai fini della verifica strutturale, ciò corrisponde ad avere dei cilindri non rinforzati tra ogni coppia di anelli, in accordo con la *Tabella 1-1* dello standard DNVGL-RP-C202:2019. Pertanto sono state considerate le seguenti modalità di cedimento per instabilità: instabilità del guscio (*shell buckling*), instabilità dell'anello (*panel ring buckling*) e instabilità della colonna (*column buckling*).

Gli effetti P-Δ, derivanti dalla deflessione della linea di mezzeria del membro, sono inclusi nelle forze di sezione, tenendo così conto dell'interazione tra instabilità locale e globale. Quando si tiene conto di questi effetti nella valutazione di instabilità dei gusci in accordo con il DNVGL-RP-C202:2019, si considera intrinsecamente l'instabilità della colonna (con riferimento alla *Sezione 4.5.1.8* dello standard DNV-ST-0126:2021).

Shell buckling

Si specifica che tutte le equazioni e sezioni indicate negli elenchi sottostanti sono relative allo standard DNVGL-RP-C202:2019.

La verifica di instabilità delle shell (gusci) è stata eseguita secondo quanto indicato nella *Sezione 3.4* (DNVGL-RP-C202:2019). Il requisito di stabilità è dato dalla seguente relazione

$$\sigma_{j,sa} \leq f_{ksa} \quad \text{eq. (3)}$$

Con:

- $\sigma_{j,sa}$ tensione di Von Mises di progetto [MPa]
- f_{ksa} tensione ammissibile per instabilità del guscio [MPa]

La tensione agente di Von Mises è stata calcolata con la seguente espressione:

$$\sigma_{j,sa} = \sqrt{(\sigma_{a,sa} + \sigma_{m,sa})^2 - (\sigma_{a,sa} + \sigma_{m,sa})^2 \cdot \sigma_{h,sa} + \sigma_{h,sa}^2 + 3 \cdot \tau_{sd}^2} \quad \text{eq. (4)}$$

Con

- $\sigma_{a,sa}$ tensione assiale di progetto [MPa] (*equazione 2.2.2*);
- $\sigma_{m,sa}$ tensione flessionale di progetto [MPa] (*equazione 2.2.3*);
- $\sigma_{h,sa}$ tensione circonferenziale di progetto [MPa] (*equazione 2.2.8*);
- τ_{sd} tensione di taglio di progetto [MPa] (*equazione 2.2.5*).

La tensione ammissibile per instabilità del guscio (f_{ksa}) è stata calcolata dividendo la resistenza caratteristica per instabilità (f_{ks}) per un fattore del materiale γ_m come indicato in *Tabella 9.1*:

$$f_{ksa} = \frac{f_{ks}}{\gamma_m} \quad \text{eq. (5)}$$

In cui:

$$f_{ks} = \frac{f_y}{\sqrt{1 + \lambda_s^4}} \quad \text{eq. (6)}$$

Con:



Ichnusa wind power srl

iLStudio.

Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
46 di 85

- f_y resistenza a snervamento
- $\bar{\lambda}_s$ parametro di snellezza ridotto del guscio

Il parametro di snellezza è così definito:

$$\lambda_s^2 = \frac{f_y}{\sigma_{j,Sd}} \cdot \left(\frac{\sigma_{a0,Sd}}{f_{Ea}} + \frac{\sigma_{m0,Sd}}{f_{Em}} + \frac{\sigma_{h0,Sd}}{f_{Eh}} + \frac{\tau_{Sd}}{f_{E\tau}} \right) \quad \text{eq. (7)}$$

Con

- $\sigma_{a0,Sd}$ pari a 0 se di trazione, altrimenti $|\sigma_{a,Sd}|$ [MPa] (equazione 3.2.4);
- $\sigma_{m0,Sd}$ pari a 0 se di trazione, altrimenti $|\sigma_{m,Sd}|$ [MPa] (equazione 3.2.5);
- $\sigma_{h0,Sd}$ pari a 0 se di trazione, altrimenti $|\sigma_{h,Sd}|$ [MPa] (equazione 3.2.6);
- f_{Ea} resistenza ad instabilità elastica per forza assiale (Sezione 3.4.2);
- f_{Em} resistenza ad instabilità elastica per momento flettente (Sezione 3.4.2);
- f_{Eh} resistenza ad instabilità elastica per pressione idrostatica (Sezione 3.4.2);
- $f_{E\tau}$ resistenza ad instabilità elastica per forza di taglio (Sezione 3.4.2).

Panel ring buckling

Gli anelli di rinforzo sono stati dimensionati in modo da evitare problemi di instabilità del tipo *panel ring buckling*: ciò è possibile se vengono soddisfatti i requisiti di area e momento di inerzia (in accordo con la Sezione 3.5.2 del DNVGL-RP-C202:2019).

L'area della sezione trasversale dell'anello non deve essere inferiore a A_{req} :

$$A_{req} \geq \left(\frac{2}{Z_i^2} + 0.06 \right) \cdot l \cdot t \quad \text{eq. (8)}$$

Con:

- l distanza tra due anelli;
- t spessore della shell;
- Z_i parametro di curvatura (equazione 3.5.1).

L'effettivo momento di inerzia dell'anello non deve essere inferiore a I_R , così definito:

$$I_R = I_x + I_{xh} + I_h \quad \text{eq. (9)}$$

Dove i momenti di inerzia sono ottenuti applicando rispettivamente le equazioni 3.5.5, 3.5.7 e 3.5.8 (DNVGL-RP-C202:2019).

9.1.1.2.2. Valutazione dell'instabilità dei membri tubolari

La verifica di instabilità dei membri tubolari è stata eseguita in accordo con la Sezione 6.3 dello standard Norsok N-004:2021. I componenti collocati al di sopra della *splash zone* sono soggetti a carichi combinati derivanti da carico assiale (trazione o compressione), momento flettente e pressione idrostatica (Sezione 6.3.9 del Norsok N-004:2021). Gli anelli di rinforzo sono stati dimensionati secondo quanto indicato nella Sezione 6.3.6.2 del Norsok N-004:2021.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
47 di 85

9.1.1.2.3. Fattori di carico parziali

I fattori di carico parziali utilizzati per la definizione dei carichi di progetto sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 9.2 – Fattori parziali di sicurezza (Tabella 5-1 DNV-ST-0119:2021).

Set	Stato Limite	γ_G	γ_Q	γ_E		γ_D	$\gamma_P^{3)}$	
				CC1	CC2		Fav	Sfav
(a)	SLU	1.25	1.25	0.7 ¹⁾		1.0	0.9	1.1
(b)	SLU	1.0 ²⁾	1.0	1.35	1.55	1.0	0.9	1.1
(c)	SLU (DLC anomalo)	1.1	1.1	1.1	1.25	1.0	0.9	1.1
(d)	SLA per struttura integra	1.0	1.0	1.0	1.15	1.0	0.9	1.1
(e)	SLA per struttura danneggiata	1.0	1,0	1.0	1.15	1.0	0.9	1.1
-	SLF	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Tipologia di carico:

G = Permanente, Q = Variabile, E = ambientale, D = Deformazione, P = Precarico

1) quando i carichi ambientali devono essere combinati con quelli operativi derivanti da impatto contro imbarcazioni, il fattore di carico ambientale deve essere incrementato da 0.7 ad 1.0 in funzione del fatto che gli impatti con imbarcazioni sono correlate con le condizioni d'onda.

2) Se gli studi di sensitività mostrano dei rischi per eccessive eccitazioni dinamiche, i fattori di carico per i carichi permanenti dovranno variare tra 0.9 e 1.1.

3) Il valore più conservativo di 0.9 e 1.1 deve essere utilizzato come fattore di carico per la progettazione.

CC1 e CC2 denotano la Classe di Conseguenza 1 e 2, Fav/Sfav denotano se il fattore di carico è favorevole o sfavorevole rispetto alla resistenza della struttura. Per i componenti strutturali analizzati in questo report è stata utilizzata la CC1.

9.1.1.2.4. Seed averaging

I carichi di progetto sono stati computati applicando la procedura di *Seed averaging* (il *seed* consiste in una quantità che definisce l'entità di turbolenza del campo di vento).

Viene definito, innanzitutto, il gruppo di simulazione caratterizzato da uno specifico DLC e fissate condizioni al contorno (condizioni ambientali ed input), ad esempio *U62_u42_ud000_wd300_je030*, ovvero DLC 6.2 con determinate condizioni di vento e onda. Per lo specifico gruppo viene eseguito un numero di simulazioni pari al numero di seed indicato.

Il dato che differenzia una simulazione dall'altra, all'interno di ciascun gruppo di simulazione, è il valore assunto dal *random seed*.

Successivamente si ricava da ognuna delle simulazioni il massimo valore di tensione di progetto, dopo aver applicato i fattori parziali di sicurezza.

I fattori parziali di sicurezza γ_i sono indicati in Tabella 9.2 e definiti in funzione dello stato limite considerato (SLU normale, SLU anomalo, SLA, SLF) e della specifica categoria di carico (F_i). Il carico di progetto è calcolato con una formula del tipo:

$$F_d = \sum_{i=1}^N \gamma_i F_i \quad \text{eq. (10)}$$

Per lo specifico gruppo, la tensione di progetto è calcolata come media dei massimi valori di progetto ottenuti dalle simulazioni, tante quanti sono i seed (secondo uno schema di tipo "mean of max").

Questa procedura viene ripetuta per ogni set di condizioni ambientali specificate per il DLC che si sta analizzando.

Il carico di progetto dimensionante per il DLC valutato risulterà essere quello più gravoso tra i vari gruppi di simulazione.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE		
PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0421SR14RELFON00a	Data emissione: Marzo 2023	Pagina 48 di 85

Per l'analisi di alcuni dettagli strutturali della fondazione, risulta fondamentale valutare l'effetto, in termini di stress, che produce un carico combinato derivante da diverse componenti di carico (ad esempio flessione e trazione combinate).

In questi casi sarebbe eccessivamente conservativo o irrealistico combinare contemporaneamente i carichi di progetto per ogni componente di carico (F_x , F_y , F_z ...). Pertanto, in queste situazioni, sarebbe opportuno applicare l'approccio descritto nell'Annex I in IEC 61400-1:2019, relativo alla procedura di estrazione dei carichi contemporanei.

I carichi contemporanei sono carichi che si verificano nello stesso istante all'interno di una simulazione. Con lo scopo di costruire un insieme di combinazioni di carico realistiche si procede secondo la metodologia rappresentata in maniera esemplificativa nella seguente tabella.

Tabella 9.3 – Matrice dei carichi estremi.

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z	F_R	θ_F	M_R	θ_M
Max.	■									
Min.	■									
Max.		■								
Min.		■								
Max.			■							
Min.			■							
Max.				■						
Min.				■						
Max.					■					
Min.					■					
Max.						■				
Min.						■				
Max.							■			
Min.							■			
Max.								■		
Min.								■		

L'analisi strutturale dei componenti di una turbina viene comunemente realizzata tramite un modello agli elementi finiti o altri modelli per la determinazione delle tensioni e deformazioni risultanti a seguito dell'applicazione dei carichi.

In Tabella 9.3 ogni colonna rappresenta una componente di carico identificata dall'intestazione in alto (per comodità si suppone che gli assi x e y siano nel piano di carico e l'asse z normale ad esso). Ogni riga indica i valori contemporanei (cioè che si verificano nello stesso istante di tempo) e la cella ombreggiata indica la componente specifica che assume in quel momento il valore massimo o quello minimo, come indicato sulla sinistra all'interno della prima colonna.

Successivamente il modello strutturale dettagliato viene sottoposto a questi carichi usando ciascuna delle linee in tabella ottenendo dei valori di tensione e deformazione da confrontare con appropriati criteri di cedimento. In tabella sono indicati anche i valori risultanti $F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ e $M_R = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$ e rispettivi angoli di applicazione del carico $\theta_F = \arctan(F_x/F_y)$ e $\theta_M = \arctan(M_x/M_y)$, in quanto può verificarsi la situazione in cui il carico estremo più gravoso occorre quando le componenti x e y sono grandi ma non al loro più alto valore assoluto.

Anche in questo caso è possibile applicare la procedura di seed averaging: si procede come già descritto, sia per la componente principale di carico, sia per i corrispondenti carichi contemporanei.

La combinazione di carichi dimensionante per il DLC valutato risulterà essere quella più gravosa tra le combinazioni della matrice dei carichi.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
49 di 85

9.1.1.3. Verifica allo Stato Limite Ultimo dei collegamenti con perni

L'assemblaggio dei componenti principali della fondazione sarà eseguito tramite collegamenti con perni. La seguente sezione descrive in breve il metodo per il dimensionamento e la verifica strutturale dei perni in accordo con gli standard di riferimento (in accordo con la *Sezione 3.13.2* del EN 1993-1-8:2007).

Quando, nel calcolo analitico, viene applicato il carico esterno, i carichi di progetto $F_{v,Ed}$ e $F_{b,Ed}$ (riportati nelle equazioni sottostanti) possono essere divisi per 2 dato che, in un doppio giunto (a causa dell'esistenza di 2 piani di taglio in ciascun perno), la forza di taglio interna risulta pari alla metà della forza esterna.

La prima verifica da soddisfare è quella relativa alla **resistenza a taglio** del perno:

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \cdot A \cdot f_{up}}{\gamma_{M2}} \geq F_{v,Ed} \quad \text{eq. (11)}$$

Il secondo criterio è relativo alla **resistenza a rifollamento** delle parti collegate:

$$F_{b,Rd} = \frac{1.5 \cdot t \cdot d \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \geq F_{b,Ed} \quad \text{eq. (12)}$$

La terza verifica riguarda la **resistenza a flessione** del perno:

$$M_{Rd} = \frac{1.5 \cdot W_{el} \cdot f_{yp}}{\gamma_{M0}} \geq M_{Ed} \quad \text{eq. (13)}$$

E il quarto criterio considera il caso di **carico combinato** (flessione e taglio):

$$\left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1 \quad \text{eq. (14)}$$

Un **criterio aggiuntivo** concerne il caso di perni soggetti anche a carico assiale: il criterio richiede che la sollecitazione derivante da un carico assiale, momento flettente e taglio rimanga inferiore alla tensione di snervamento di progetto:

$$\sigma_{eq,Rd} = \frac{f_{yp}}{\gamma_{M0}} \geq \sqrt{\left(\frac{F_{t,Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}}{W_{el}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{F_{v,Ed}}{A}\right)^2} \quad \text{eq. (15)}$$

Con

- f_y resistenza a snervamento minima tra quella del perno (f_{yp}) e quella delle parti collegate (f_{up});
- $F_{v,Rd}$ resistenza a taglio di progetto;
- $F_{v,Ed}$ forza di taglio di progetto;
- $F_{b,Rd}$ resistenza a rifollamento di progetto;
- $F_{b,Ed}$ forza di bearing di progetto;
- M_{Rd} momento resistente di progetto;
- M_{Ed} momento di progetto;
- $F_{t,Ed}$ forza assiale di progetto;
- A sezione del perno;
- t spessore dei materiali collegati;
- d diametro del perno;
- W_{el} modulo elastico di sezione del perno (momento di resistenza flessionale);
- γ_{M0} fattore di sicurezza del materiale pari a 1.10 (*Sezione 4.9.1.4* del DNV-ST-0126:2021);
- γ_{M2} fattore di sicurezza del materiale pari a 1.25 (*Sezione 4.9.1.4* del DNV-ST-0126:2021).



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0421SR14RELFON00a	Data emissione: Marzo 2023	Pagina 50 di 85

9.1.1.4. Verifica allo Stato Limite Ultimo delle Conessioni con iniezioni di malta

Le connessioni realizzate tramite iniezione di malta cementizia, in generale, non possono essere progettate e verificate mediante approcci classici, devono necessariamente essere analizzate tramite opportuni approcci tecnologici qualificati.

Tuttavia, le DNVGL-ST-0126:2021 permettono un pre-dimensionamento di massima strutturato in due parti. Per cui, in generale si prevede la:

- Verifica della resistenza della malta cementizia allo Stato Limite Ultimo;
- Verifica delle *shear keys* allo Stato Limite Ultimo.

Per la verifica allo SLU delle connessioni con iniezione di malta si rimanda alle successive fasi del progetto.



9.1.2. Verifica allo Stato Limite a Fatica

Le verifiche allo Stato Limite di Fatica sono state condotte per quelle saldature che incidono sull'integrità strutturale degli elementi primari: si tratta delle saldature circolari tra i gusci e tra gusci e anelli di rinforzo, tralasciando quelle longitudinali che generalmente non vengono valutate in termini di resistenza strutturale. Per la verifica SLF è stata impiegata la serie temporale dei carichi operativi.

Questi ultimi sono stati usati per calcolare le tensioni nominali agenti sulle saldature e moltiplicati per un fattore di concentrazione delle tensioni (Stress Concentration Factor – SCF) per tenere conto delle tolleranze di fabbricazione e/o degli effetti geometrici. È stato, inoltre, applicato un fattore di progetto a fatica (Design Fatigue Factor – DFF) pari a 3 (ipotizzando assenza di ispezioni durante il funzionamento) ed impiegate le curve S-N in accordo con DNV-RP-C203:2021, di cui ne vengono mostrate alcune nel seguente grafico.

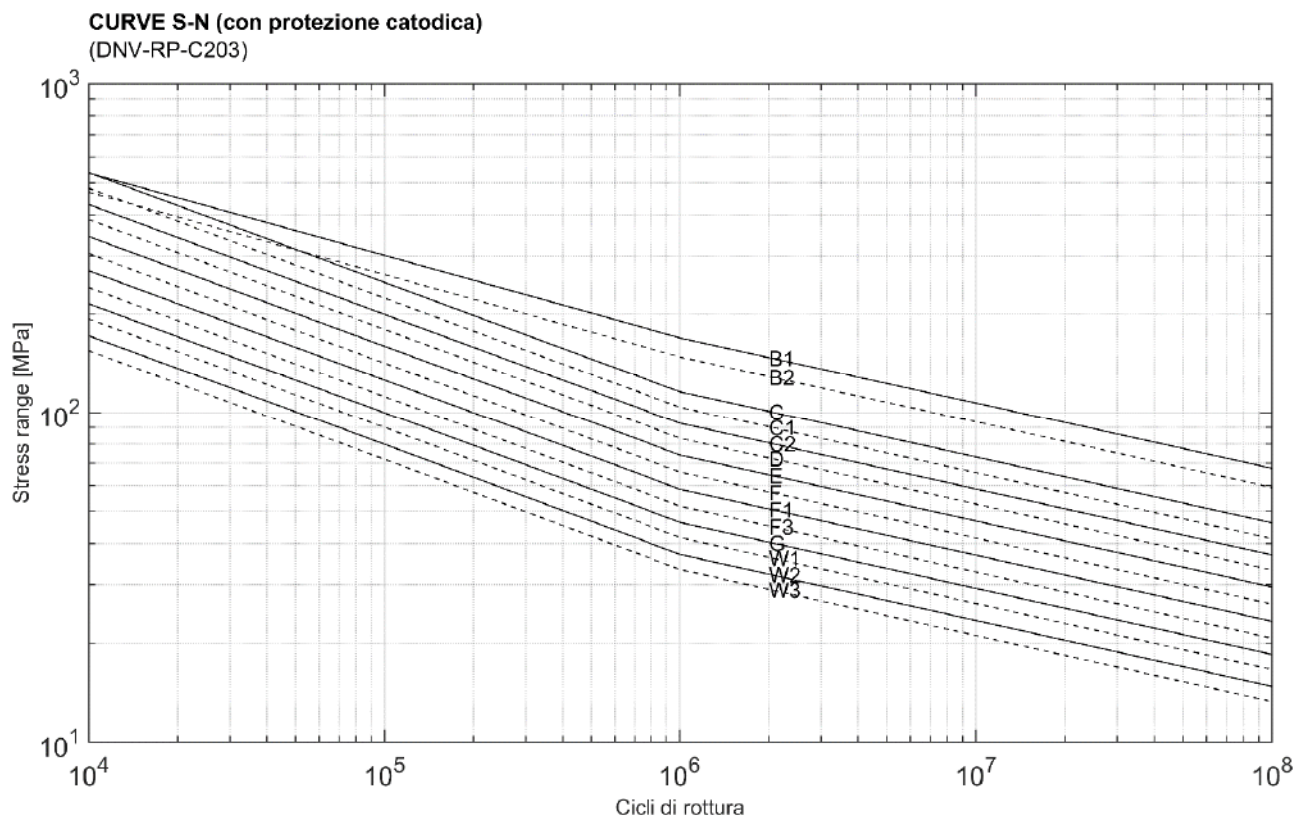


Figura 9.1 – Curve S-N (protezione catodica)

Ai fini della verifica a fatica è stata considerata una vita operativa di progetto di 25 anni, riservando il 10% della capacità totale di fatica per potenziali danni subiti durante l'assemblaggio, il trasporto e la fase di dismissione.

Il danno totale di progetto, ottenuto moltiplicando il danno caratteristico per il DFF, si basa sulla legge di Palmgren-Miner che prevede un accumulo lineare del danno secondo la seguente espressione (Sezione 2.2 DNV-RP-C203:2021):

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{\bar{a}} \sum_{i=1}^k n_i \cdot (\Delta\sigma_i)^m \leq \eta = \frac{1}{DFF} \quad \text{eq. (16)}$$

ovvero,

$$D_D = D_C \cdot DFF \leq 1 \quad \text{eq. (17)}$$

Il danno di progetto, D_D , si ottiene moltiplicando il danno caratteristico, D_C , per un appropriato fattore di fatica,



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
52 di 85

DFF, selezionato secondo la *Tabella 7-5* del DNV-ST-0119:2021. Con:

- D danno a fatica accumulato
- \bar{a} intercetta della curva S-N
- m pendenza negativa inversa della curva S-N
- k numero di blocchi di carico
- n_i numero di cicli di tensione per ogni i -esimo blocco
- N_i numero di cicli di rottura corrispondenti al range di tensione
- η fattore di utilizzo pari a $\frac{1}{DFF}$

9.1.3. Verifica allo Stato Limite Ultimo per Azioni Eccezionali

In accordo con quanto riportato al *Capitolo 7.4* delle DNVG-ST-0119:2021, la fondazione sarà verificata allo Stato Limite Ultimo per le seguenti Azioni Eccezionali (*Paragrafo 4.7.1.1* - DNVG-ST-0119:2021):

- Cedimento di un singolo cavo di ormeggio;
- Condizione post-cedimento con un cavo di ormeggio rimosso;
- Impatto con imbarcazione;
- Tempesta con tempo di ritorno 500 anni;
- Guasto al sistema zavorrante;
- Caduta accidentale di oggetti;
- Incendi ed esplosioni;
- Inondazioni accidentali.

Per ciascuna di queste condizioni, sarà verificata sia la resistenza nei confronti dello snervamento che dell'instabilità globale degli elementi costituenti la fondazione. In nessun caso dovrà verificarsi il superamento dei valori limite ammissibili e deve quindi sarà scongiurato il rischio di un ribaltamento o di un cedimento catastrofico e completo della struttura. Per casi estremi, che verranno analizzati in sede di progetto esecutivo, è lecito ammettere effetti locali di cedimenti o instabilità a patto che questi non portino al collasso completo dell'intera fondazione galleggiante.

Per la presente verifica si rimanda alle successive fasi di progetto.

9.1.4. Verifica allo Stato Limite di Esercizio

In accordo con il *Paragrafo 2.4.1.3* delle DNVGL-ST-0119:2021, la fondazione sarà verificata nel rispetto degli Stati Limite di Esercizio. In particolare deve verificarsi:

- Il contenimento di spostamenti e rotazioni che possano interferire con le forze agenti;
- Il contenimento delle vibrazioni e delle accelerazioni che possano compromettere il funzionamento di componenti non strutturali;
- Il contenimento degli spostamenti nei confronti delle tolleranze strumentali dei macchinari installati;
- Il contenimento di spostamenti e deformazioni che possano compromettere il corretto funzionamento della turbina;
- La non apertura di fessure tali da compromettere la tenuta stagna;
- La resistenza contro i fenomeni di corrosione a componenti strutturali e non strutturali.

Per la presente verifica si rimanda alle successive fasi di progetto.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
53 di 85

9.2. Dimensionamento strutturale

9.2.1. Analisi di instabilità dei componenti della fondazione

9.2.1.1. Carichi interni e pressione idrostatica

Nei seguenti grafici sono mostrati i carichi di progetto agenti lungo i componenti della fondazione per i DLC 6.1 e 6.2. Questi sono definiti come i valori massimi tra quelli estratti dalle varie simulazioni di carico (ottenute combinando direzione del vento, direzione dell'onda, altezza d'onda, ecc.) per ognuna delle sezioni considerate. Ciò significa che lungo ogni membro, in corrispondenza delle sezioni, i carichi di progetto ricavati possono derivare da differenti casi/combinazioni di carico. Per tutti i grafici la posizione $z = 0$ coincide con l'origine del sistema di coordinate locale (Figura 4.11), inoltre ogni curva è relativa ad una specifica condizione di profondità (bassa, media e alta).

Nella seguente figura viene mostrato il momento risultante agente lungo la colonna centrale.

Colonna centrale



Figura 9.2 – Momento flettente risultante per la Colonna Centrale.

Elaborazione: SO.

In Tabella 9.4 sono riportati i massimi valori di momento flettente alla base della torre, utili per le successive fasi di progettazione ed in particolare per la verifica della connessione flangiata (colonna centrale/base della torre). I valori, corrispondenti a quelli indicati in Figura 9.2 nel punto $z = 31 \text{ m}$ (base torre), sono presi come il massimo carico di progetto assoluto. Si noti che il carico cresce con la profondità considerata, a causa dei maggiori movimenti ed accelerazioni.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
54 di 85

Tabella 9.4 – Massimi valori di momento flettente

Componente		Max. Momento Flettente (kNm)	Max. Momento Flettente (kNm)
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

A seguire si riportano i restanti grafici della Colonna Centrale e quelli di tutti gli altri componenti con indicazione del momento flettente risultante, tensione effettiva, forza di taglio e torsione.



Figura 9.3 – Tensione effettiva per la Colonna Centrale.
Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
55 di 85



Figura 9.4 – Forza di taglio per la Colonna Centrale.
Elaborazione SO.



Figura 9.5 – Torsione per la Colonna Centrale.
Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

Radiale 1

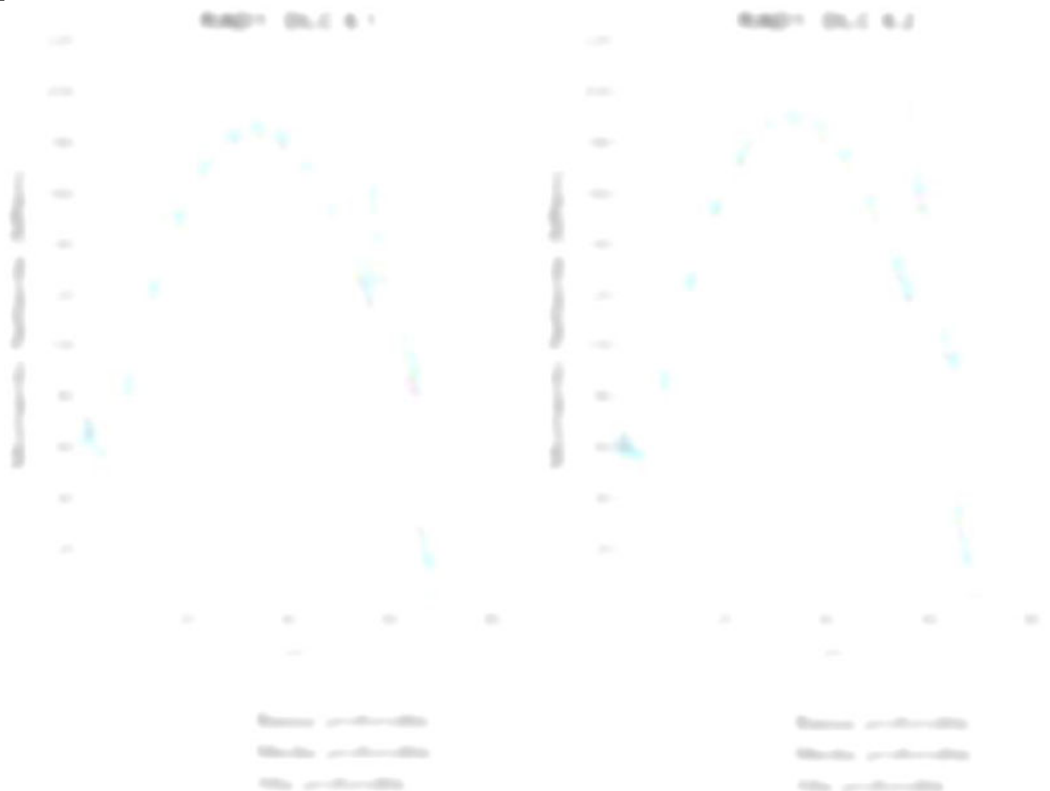


Figura 9.6 – Momento flettente risultante per Radiale 1.

Elaborazione SO.

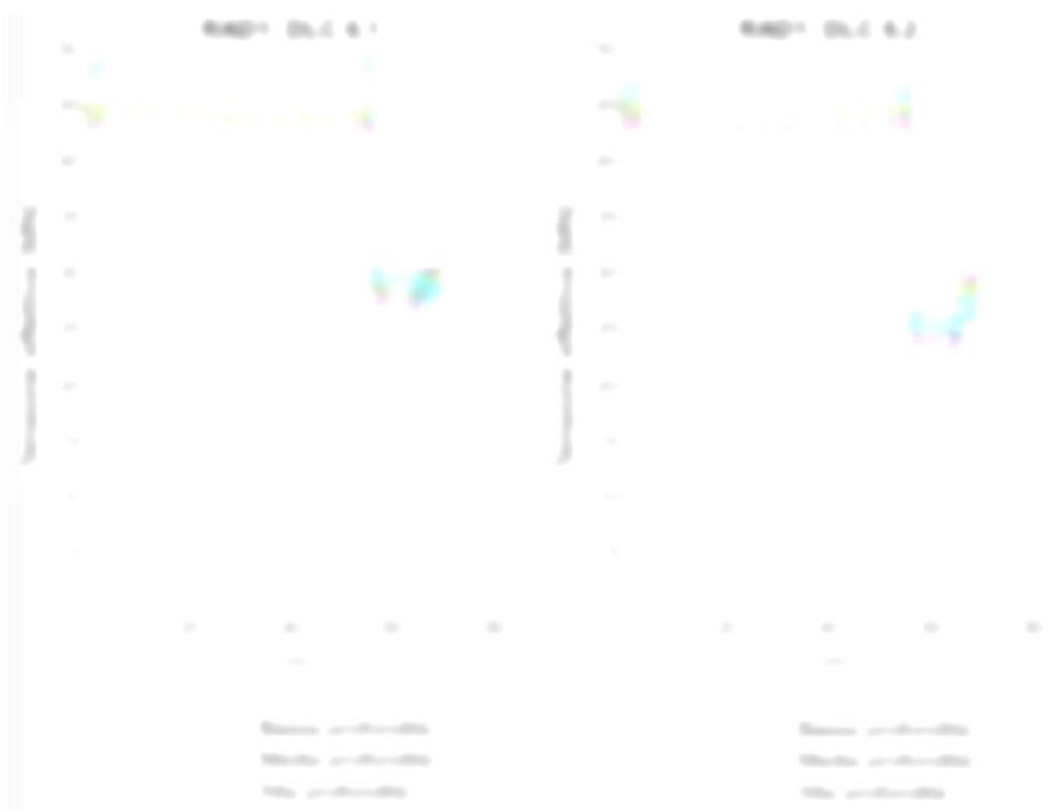


Figura 9.7 – Tensione effettiva per Radiale 1.

Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
57 di 85

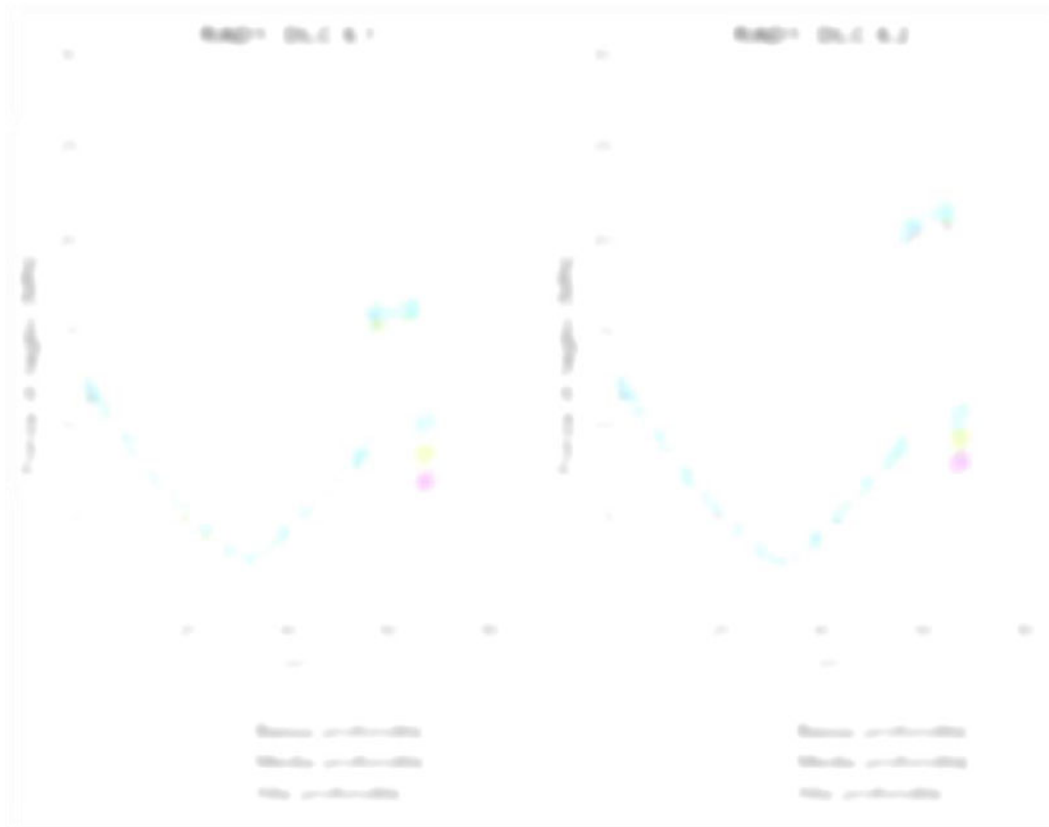


Figura 9.8 – Forza di taglio per Radiale 1.
Elaborazione SO.



Figura 9.9 – Torsione per Radiale 1.
Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

Radiale 2/3

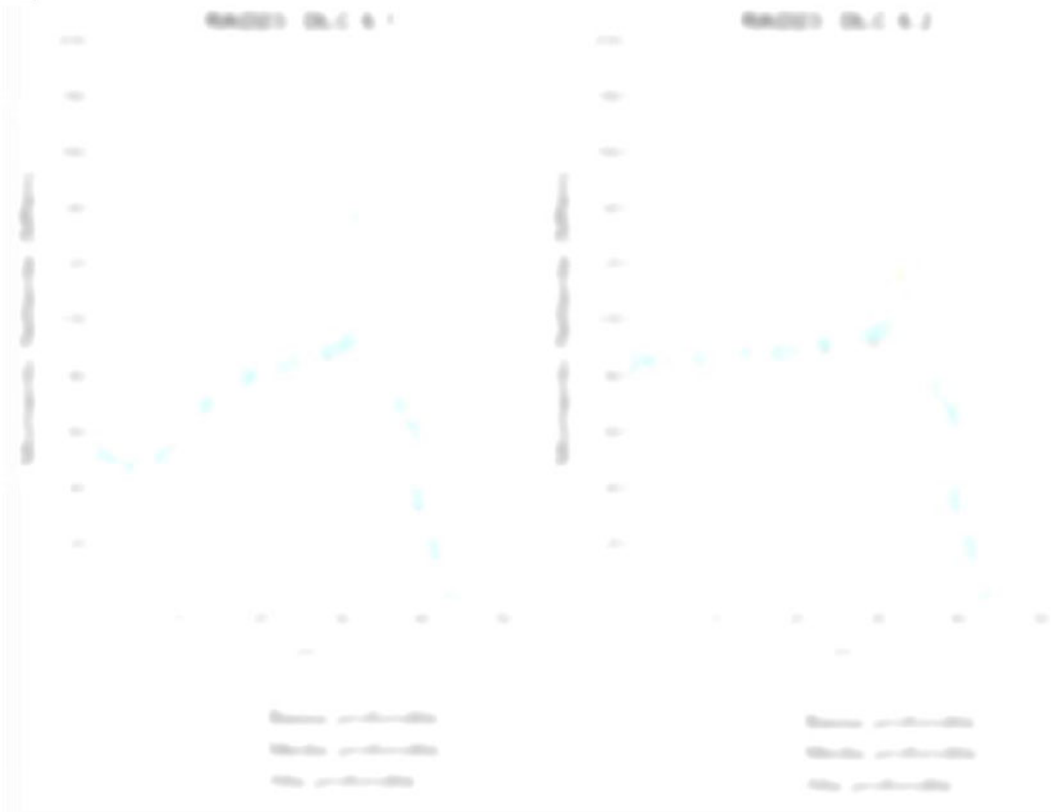


Figura 9.10 – Momento flettente risultante per Radiale 2/3.
Elaborazione SO.



Figura 9.11 – Tensione effettiva per Radiale 2/3.
Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
59 di 85



Figura 9.12 – Forza di taglio per Radiale 2/3.
Elaborazione SO.



Figura 9.13 – Torsione per Radiale 2/3.
Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

Diagonale 1



Figura 9.14 – Momento flettente risultante per Diagonale 1.
Elaborazione SO.



Figura 9.15 – Tensione effettiva per Diagonale 1.
Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
61 di 85

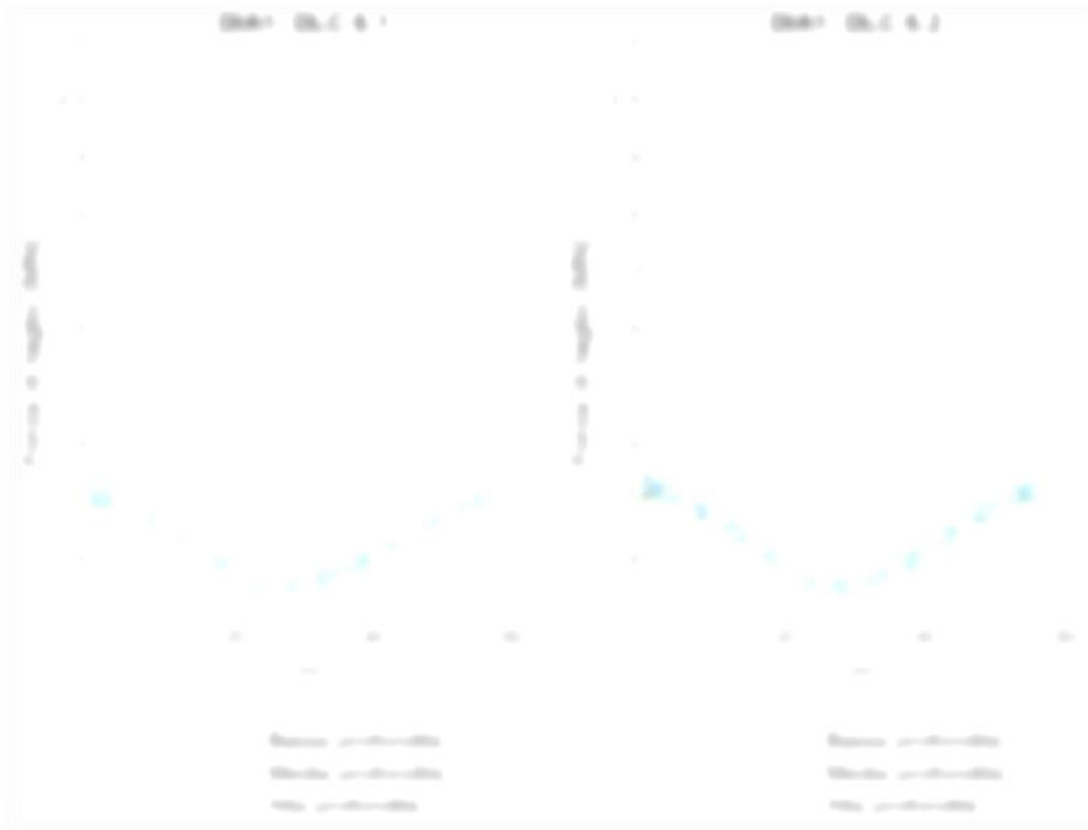


Figura 9.16 – Forza di taglio per Diagonale 1.
Elaborazione SO.



Figura 9.17 – Torsione per Diagonale 1.
Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.

Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
62 di 85

Diagonale 2/3



Figura 9.18 – Momento flettente risultante per Diagonale 2/3.

Elaborazione SO.



Figura 9.19 – Tensione effettiva per Diagonale 2/3.

Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
63 di 85



Figura 9.20 – Forza di taglio per Diagonale 2/3.
Elaborazione SO.



Figura 9.21 – Torsione per Diagonale 2/3.
Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

Laterale 1/2

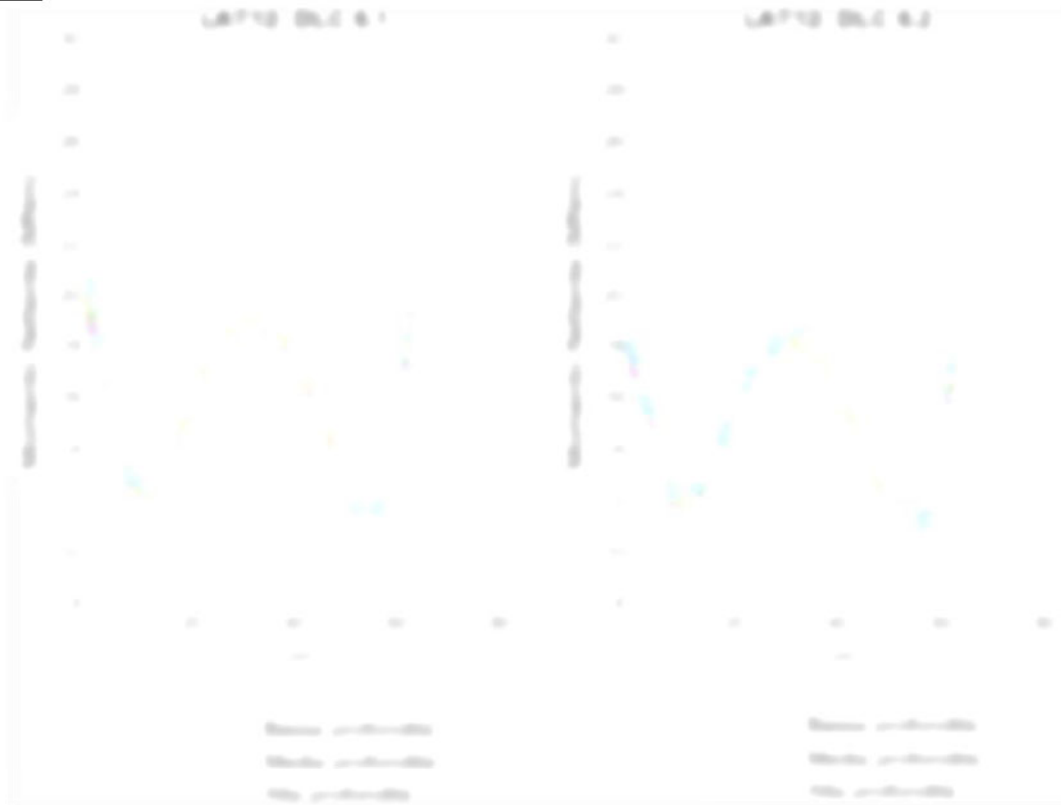


Figura 9.22 – Momento flettente risultante per Laterale 1/2.

Elaborazione SO.



Figura 9.23 – Tensione effettiva per Laterale 1/2.

Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
65 di 85

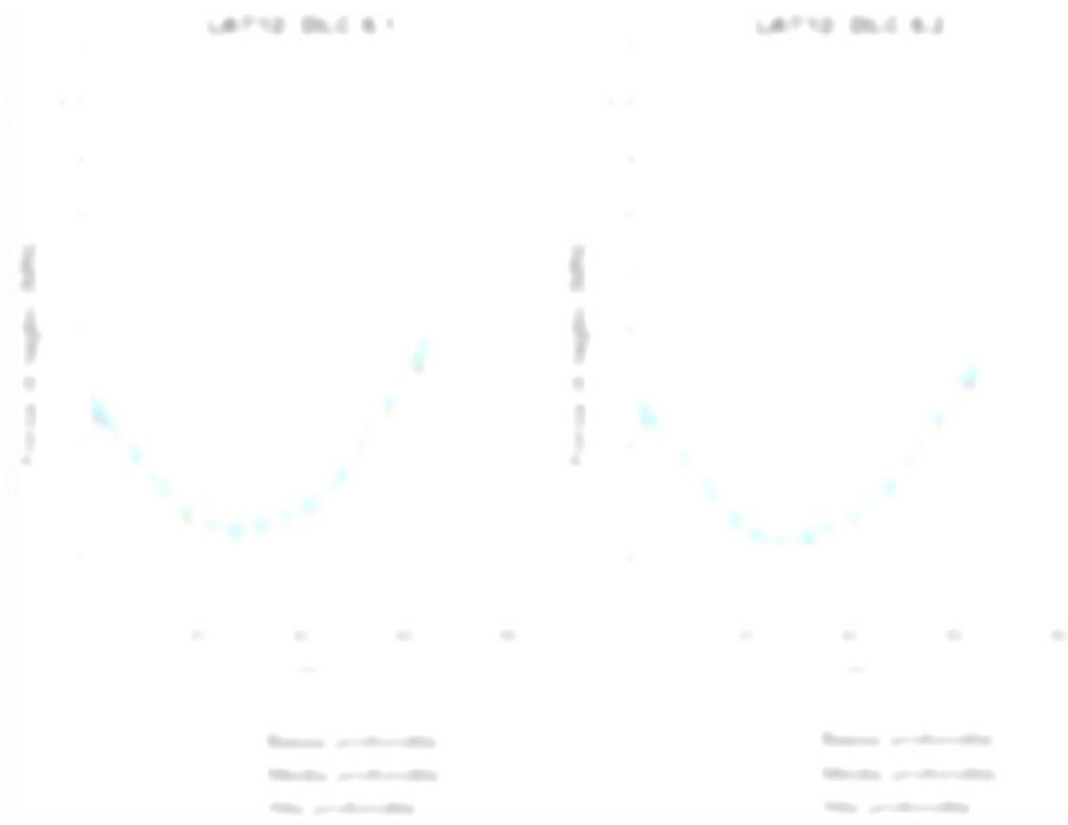


Figura 9.24 – Forza di taglio per Laterale 1/2.

Elaborazione SO.



Figura 9.25 – Torsione per Laterale 1/2.

Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
66 di 85

La pressione idrostatica, a differenza dei carichi interni, non è stata estratta direttamente dalle simulazioni ma computata in accordo con la *Sezione 4.9.3* del DNV-ST-0119:2021. Il calcolo della pressione agente dipende dalle tre seguenti grandezze:

- pescaggio estremo in condizioni operative T_E , rappresentato in Figura 9.26 dalla superficie blu;
- distanza verticale dalla superficie inferiore della fondazione alla cresta dell'onda D_D , rappresentata in Figura 9.26 dalla superficie rossa;
- altezza dell'onda H .

Esse sono ricavate dalla specifica simulazione che restituisce il più alto valore di T_E , in quanto, principalmente da quest'ultimo, dipende la massima pressione idrostatica. Le misure e distanze sono state calcolate rispetto alla base della colonna centrale, assumendo che essa sia allineata con la verticale. L'altezza d'onda H è selezionata come il più alto valore tra quelli che occorrono durante la simulazione stabilita.

I valori associati ad ognuna delle tre componenti sono: XXXXXXXXXX



Figura 9.26 – Rappresentazione della funzione di pressione idrostatica applicata

Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
67 di 85

9.2.1.2. Dimensionamento e rapporti di utilizzo

Lo spessore di ogni guscio (shell) per ciascun componente è stato dapprima ottimizzato in modo tale da resistere ai carichi SLU fino al 100% di utilizzo, così come per gli anelli di rinforzo (Figura 9.27). Successivamente l'ottimizzazione è stata eseguita tenendo conto anche dello SLF (Figura 9.31).

Per quanto riguarda il dimensionamento dei gusci, è stato, innanzitutto, calcolata la tensione e il relativo utilizzo in funzione dello spessore da calcolare in corrispondenza delle sezioni di saldatura. Lo spessore risultante, mostrato in Figura 9.27, è stato poi determinato imponendo il massimo utilizzo intorno alla circonferenza.

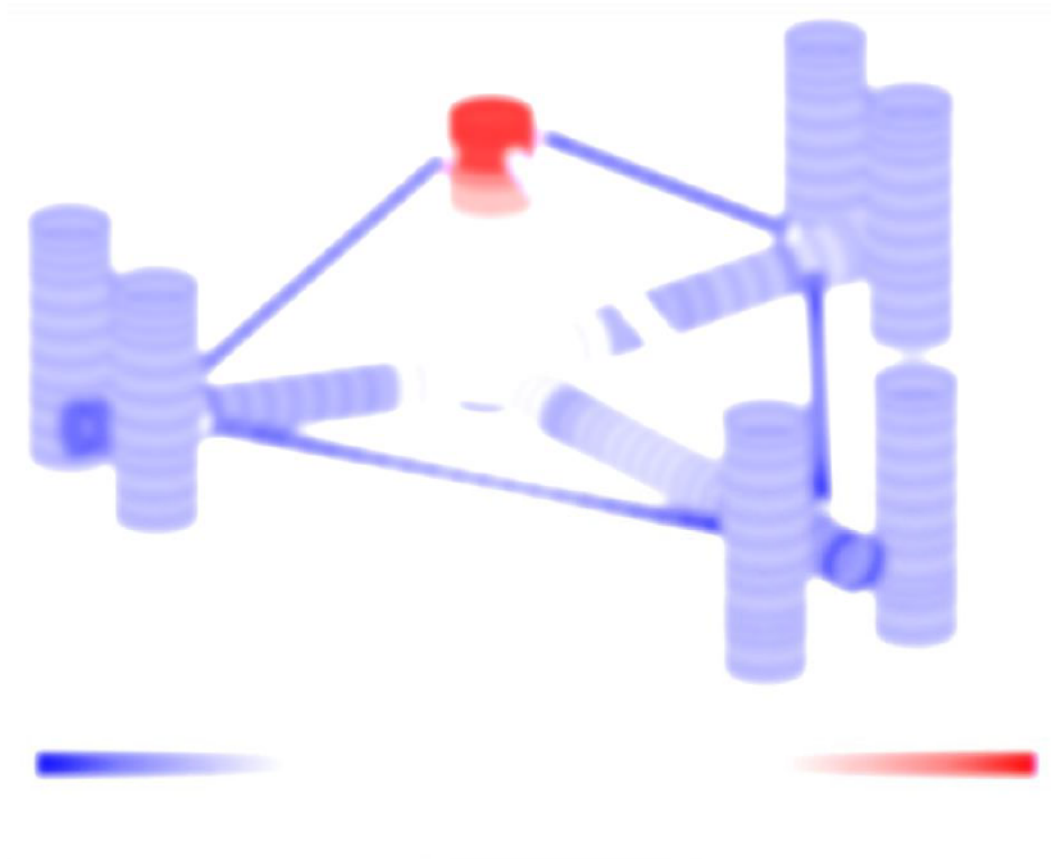


Figura 9.27 – Rappresentazione dello spessore di ogni shell e membro tubolare – ottimizzazione SLU.
Elaborazione SO.

I rapporti di utilizzo ottenuti sono mostrati nelle seguenti figure. Il calcolo è stato condotto in corrispondenza delle sezioni di saldatura tra due gusci (fasciame). Le prime shell sono indicate in grigio scuro in quanto l'utilizzo è calcolato a partire dalla prima saldatura. Le connessioni finali sono indicate in grigio chiaro. Tra due saldature consecutive i rapporti di utilizzo sono stato interpolati ai fini di produrre una visualizzazione grafica con scala uniforme. Sui radiali, gli utilizzi più elevati si riscontrano nella metà inferiore (Figura 9.29).



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
68 di 85

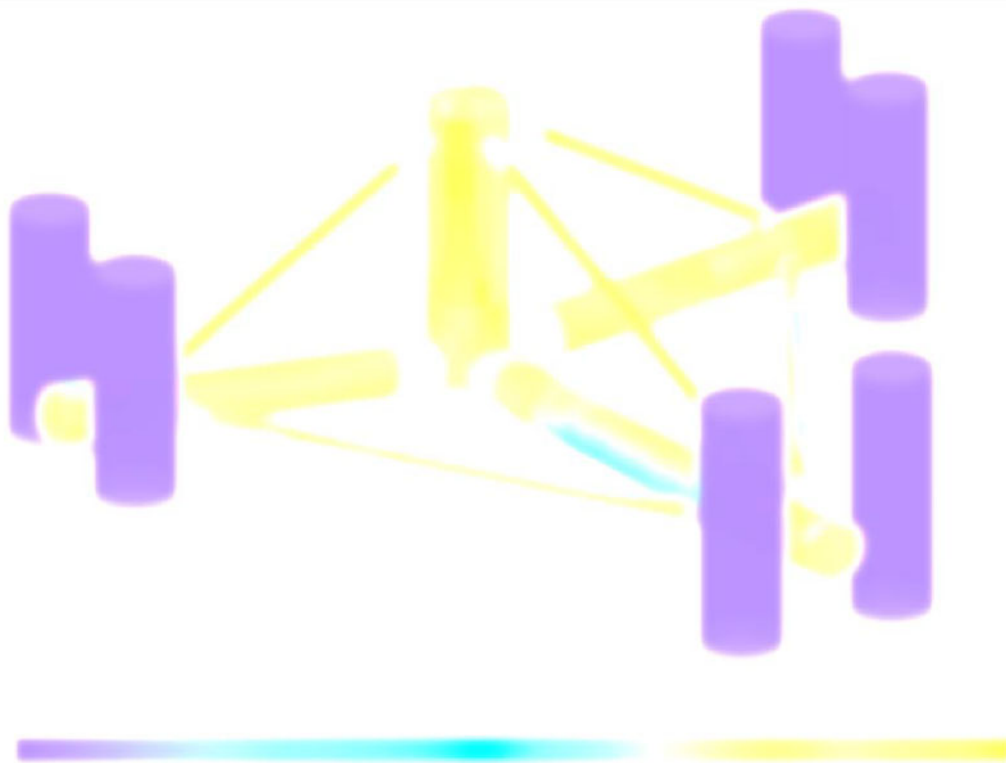


Figura 9.28 – Rapporti di utilizzo a buckling ottimizzati per ogni guscio (shell) della struttura. Vista frontale/superiore.
Elaborazione SO.



Figura 9.29 – Rapporti di utilizzo a buckling ottimizzati per ogni guscio (shell) della struttura. Vista dal basso.
Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
69 di 85

La valutazione della fatica è stata condotta considerando una vita di progetto pari a 25 anni e lo scenario di alta profondità.

La curva S-N impiegata per il calcolo è la curva C1 con protezione catodica (DNV-RP-C203), mostrata nella figura sottostante.

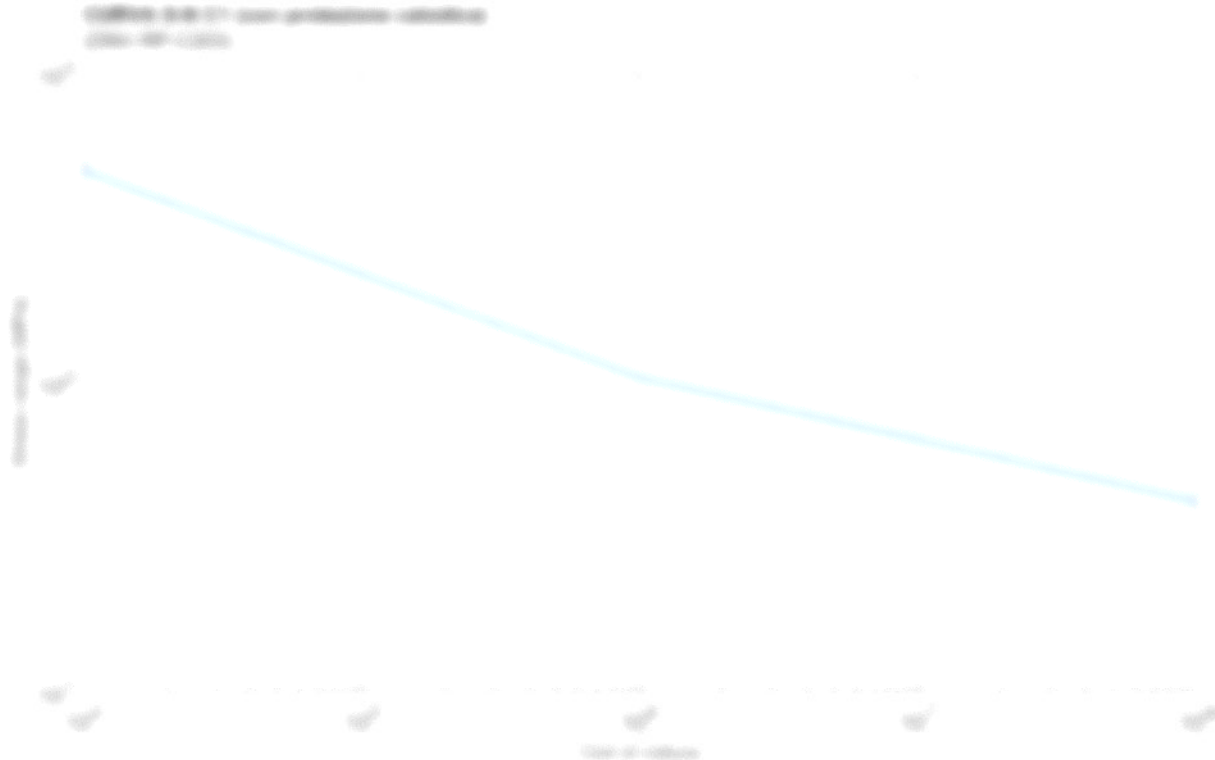


Figura 9.30 – Curva S-N C1 con protezione catodica.

Elaborazione iLStudio.

L'immagine seguente mostra gli spessori ottimizzati a seguito delle valutazioni SLU e SLF.

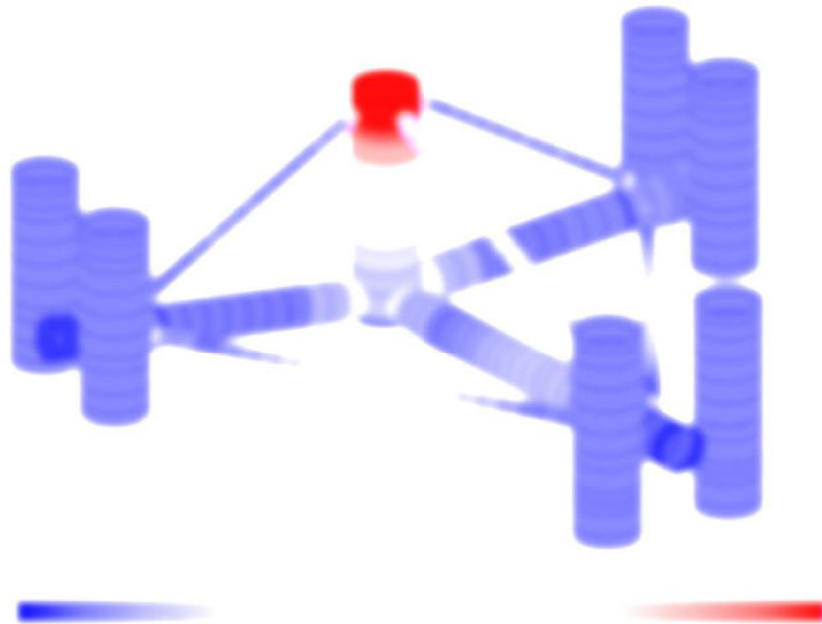


Figura 9.31 – Rappresentazione dello spessore di ogni shell – ottimizzazione SLU / SLF.

Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
70 di 85

Affinché i risultati ottenuti per lo Stato Limite di Fatica in configurazione di alta profondità possano essere utilizzati come base per la determinazione di quelli relativi alle altre condizioni di profondità, è stato calcolato il rapporto tra gli spessori delle shell del caso SLU/SLF (Figura 9.31) e del caso SLU (Figura 9.27).



Figura 9.32 – Confronto tra ottimizzazione dello spessore SLU e SLF tramite il calcolo di un moltiplicatore.
Elaborazione SO.

Questo rapporto (moltiplicatore) è visualizzato in Figura 9.32 dove il valore di 1.0 corrisponde esattamente ai risultati SLU e i valori maggiori di 1.0 sono i moltiplicatori che devono essere applicati agli spessori SLU per ottenere i corrispondenti spessori SLU/SLF. Dalla figura si deduce che i bracci laterali e diagonali e la metà superiore della colonna centrale sono dimensionati a fatica.

Le seguenti figure (dalla Figura 9.33 alla Figura 9.38, per alcuni dei bracci della struttura) riepilogano i risultati ottenuti per il caso combinato SLU/SLF e si compongono di tre rappresentazioni grafiche:

- una illustrazione 2D delle sezioni e degli anelli di rinforzo. Le sezioni che includono i nodi o acciaio addizionale sono mostrate in grigio;
- indicazione degli spessori dei gusci;
- i massimi rapporti di utilizzo per ogni guscio. Laddove siano presenti anche gli anelli di rinforzo, vengono indicati in figura anche i fattori di utilizzo relativi all'area e momento di inerzia ammissibili richiesti.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
71 di 85



Figura 9.33 – Rapporti di utilizzo e caratteristiche geometriche della Colonna centrale.
Elaborazione SO.



Figura 9.34 – Rapporti di utilizzo e caratteristiche geometriche del Radiale 1.
Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
72 di 85



Figura 9.35 – Rapporti di utilizzo e caratteristiche geometriche del Radiale 2 (simile per Radiale 3).
Elaborazione SO.



Figura 9.36 – Rapporti di utilizzo e caratteristiche geometriche del Diagonale 1.
Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
73 di 85



Figura 9.37 – Rapporti di utilizzo e caratteristiche geometriche del Diagonale 2 (simile per Diagonale 3).
Elaborazione SO.



Figura 9.38 – Rapporti di utilizzo e caratteristiche geometriche del Laterale 1 (simile per Laterale 2).
Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
74 di 85

9.2.2. Analisi delle connessioni con perno

9.2.2.1. Calcolo dei carichi sui perni e sulle boccole

La verifica strutturale dei perni è stata eseguita utilizzando le forze di reazione estratte dall'analisi nel dominio del tempo (Integrated Loads Analysis – ILA). Per ogni perno sono state calcolate 4 forze rispetto al proprio sistema di coordinate locale (mostrati in Figura 9.39, a titolo di esempio, per le alcune delle connessioni superiori) ovvero la forza assiale (F_x), le forze di taglio (F_y e F_z) e la forza di taglio risultante (F_{yz}).

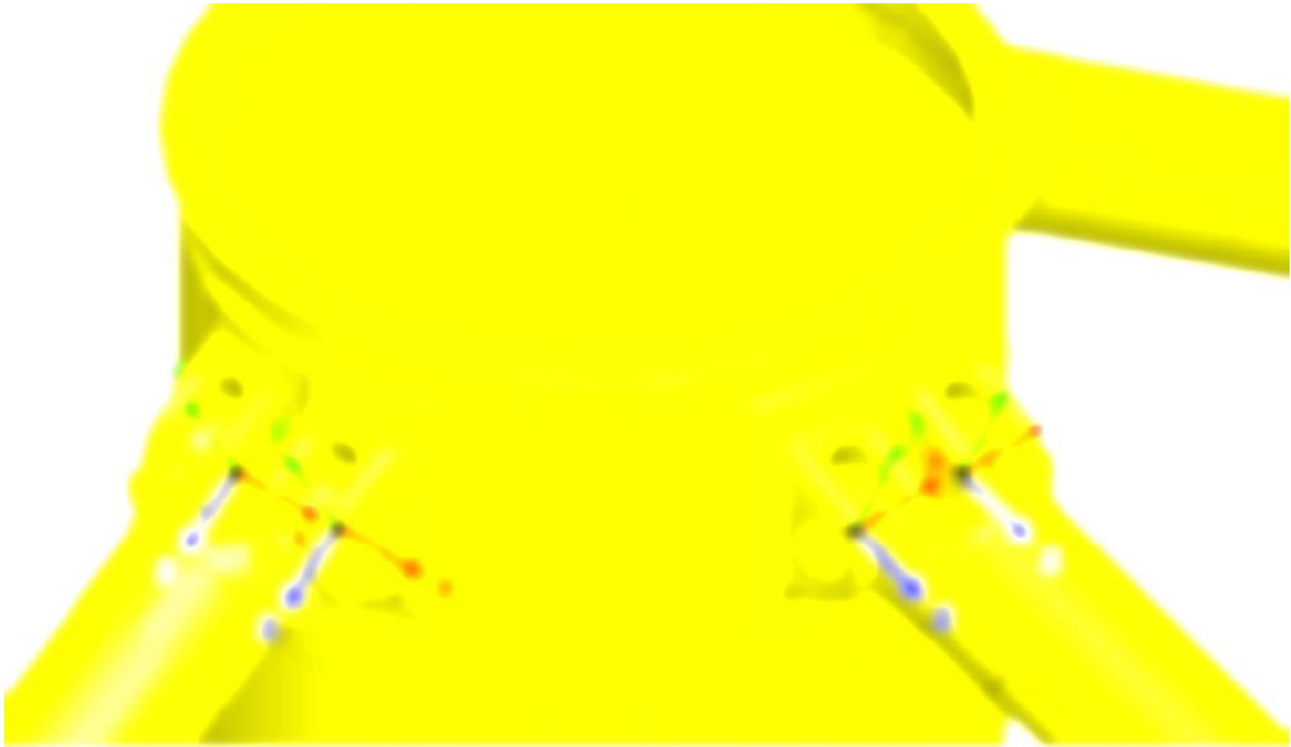


Figura 9.39 – Sistema di coordinate locale delle connessioni superiori.

Elaborazione SO.

Nei seguenti grafici vengono mostrati i massimi carichi di progetto assiale e radiale per ogni connessione con perno.



Figura 9.40 – Forza assiale di progetto per ogni connessione.

Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
75 di 85



Figura 9.41 – Forza radiale di progetto per ogni connessione.

Elaborazione SO.

Le tensioni nominali delle boccole (rappresentate graficamente in Figura 9.42) sono calcolate come il rapporto tra la forza di progetto e l'area proiettata. I fornitori indicano un limite massimo di carico statico pari a 150 MPa. Tuttavia, tenendo conto del carico laterale sui bordi e della loro usura e sulla base di valutazioni fatte nell'ambito di altri progetti, il carico limite è stato ridotto a 80 MPa.



Figura 9.42 – Massima pressione nominale (per area proiettata) sulla boccola.

Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
77 di 85

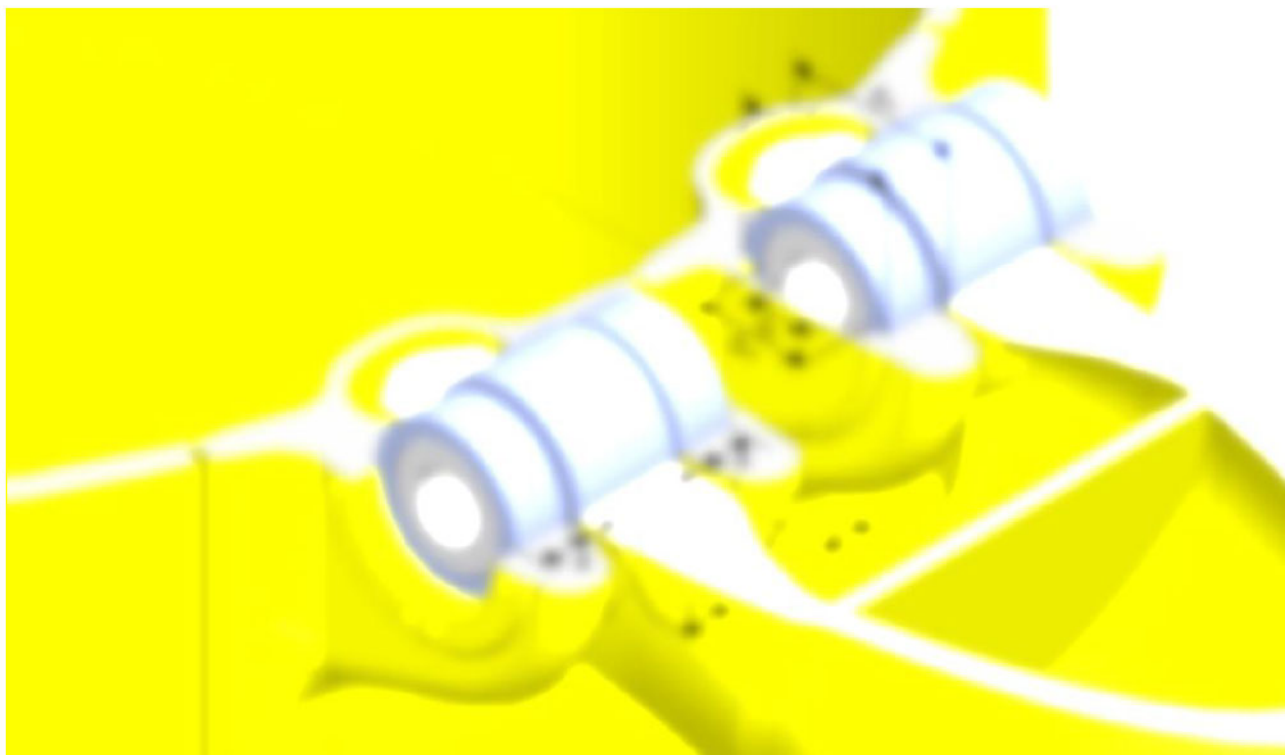


Figura 9.44 – Sezione della connessione con perno.

Elaborazione SO.

I rapporti di utilizzo delle connessioni con perno sono mostrati in Figura 9.45, dai quali si evince che il massimo utilizzo in condizioni SLU si ha in corrispondenza delle connessioni inferiori per il criterio della tensione equivalente.

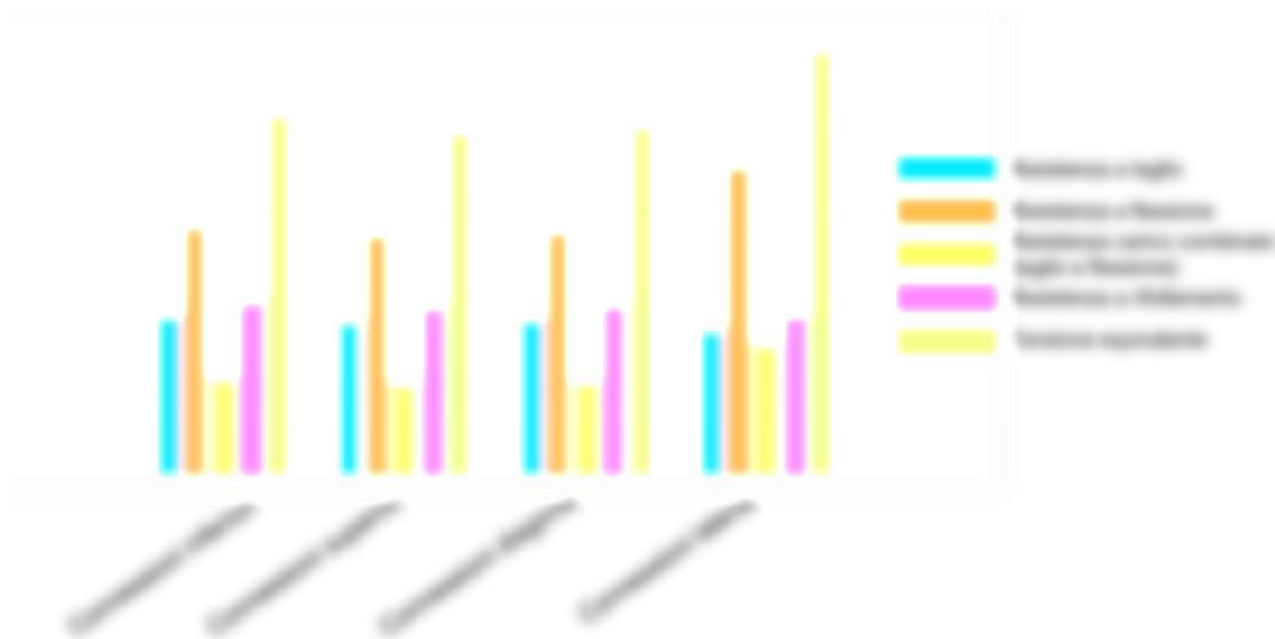


Figura 9.45 – Massimi rapporti di utilizzo delle connessioni con perno.

Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE		
PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0421SR14RELFON00a	Data emissione: Marzo 2023	Pagina 78 di 85

9.2.3. Conclusioni

I bracci sono stati ottimizzati, in termini di spessore, per resistere alle condizioni di carico SLU e a quella combinata SLU/SLF. Sono stati calcolati anche gli utilizzi dei perni ricavando un valore massimo del [REDACTED] in corrispondenza di una delle connessioni laterali. Le dimensioni delle boccole sono state determinate assumendo una tensione ammissibile di progetto di 80 MPa, valore desunto sulla base dell'esperienza maturata e delle informazioni fornite dai produttori fondate sulla progettazione e collaudo di prototipi.

Per quanto riguarda i nodi in acciaio, le dimensioni e le masse sono state definite sulla base di progetti precedentemente affrontati e adattati alle dimensioni della fondazione del presente progetto. Viene, inoltre, fornita una stima della massa di malta cementizia utilizzata per singola connessione pari a circa [REDACTED].

Analisi numeriche dettagliate che consentiranno di ottimizzare massa e dimensioni relative ai suddetti componenti saranno condotte in fasi successive del progetto.

Nella tabella seguente vengono riepilogate le masse risultanti a seguito del processo di ottimizzazione (nel caso di alta profondità del fondale).

Tabella 9.6 – Riepilogo delle masse per ottimizzazione SLU e SLU/SLF.

[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

Si riporta, a seguire, la modalità con la quale è stata stimata la massa dei componenti che non rientrano nelle verifiche strutturali ma contribuiscono al computo della massa totale, ovvero i perni e la malta cementizia (impiegati per il collegamento con le casse di zavorra) e i piatti anti-sussulto.

Le dimensioni assunte per i perni delle casse sono:

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

La massa totale dei perni è così calcolata:

$$[REDACTED]$$

eq. (18)

Questo contributo di massa è già incluso nell'acciaio delle strutture primarie indicato in Tabella 9.6.

La massa della malta è stata stimata assumendo il volume in un cilindro cavo attorno al perno con le seguenti caratteristiche:

[REDACTED]

[REDACTED]

La massa totale della malta impiegata per le tre connessioni è così calcolata:

$$[REDACTED]$$

eq. (19)



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
79 di 85

La massa dei piatti anti-sussulto è stata calcolata considerando:

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

Questo contributo di massa è già incluso nell'acciaio delle strutture primarie indicato in Tabella 9.6.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.

Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE

PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:

C0421SR14RELFON00a

Data emissione:

Marzo 2023

Pagina

80 di 85

10. PREVENZIONE DELLA CORROSIONE

La corrosione è un aspetto fondamentale della progettazione della fondazione. Questa infatti può avere una notevole influenza sulle metodologie di verifica strutturale, in particolare per quel che riguarda la valutazione dell'instabilità (buckling) degli elementi o della loro resistenza a fatica.

Le normative che regolamentano le direttive da seguire nei confronti della protezione contro la corrosione per le fondazioni galleggianti sono le seguenti

- Sezione 13 del DNV-ST-0119:2021;
- DNV-RP-0416:2021;
- DNVGL-RP-B401.

In linea generale, la corrosione del TetraSub viene impedita tramite l'azione simultanea di un rivestimento di vernice protettivo (coating), dalla protezione catodica indotta dall'utilizzo di correnti impresse o anodi sacrificali e dall'utilizzo di materiali resistenti alla corrosione. Per tutti gli elementi, comunque, deve essere garantita durabilità pari alla vita utile di progetto della fondazione (25 anni) più due anni addizionali (uno per l'installazione e uno per la dismissione), quindi 27 anni in totale.

Le parti strutturali completamente sommerse vengono protette tramite idonee verniciature e l'utilizzo di protezione catodica, quelle invece che si trovano al di sopra del livello medio del mare vengono protette tramite il solo impiego di vernice protettiva. Maggiore attenzione deve essere dedicata poi a quelle zone particolarmente esposte agli spruzzi d'acqua salmastra, la cui area d'estensione deve essere attentamente valutata. Si sottolinea che in accordo con la Normativa Europea in ambito navale (Regolamento CE n.782/2003), non saranno utilizzate vernici contenenti composti organostannici, ritenute altamente tossiche per la vita marina.

La corretta saldatura tra elementi adiacenti, oltre ad assicurare efficienza strutturale, deve garantire la chiusura ermetica tra le parti che unisce affinché qualunque infiltrazione all'interno degli elementi cilindrici, quali ad esempio i bracci laterali o i diagonali, venga scongiurata. Per i bracci radiali, laterali e diagonali infatti, internamente, non è previsto alcun tipo di protezione fisica contro la corrosione (es. vernice o simili); le pareti interne di questi elementi, tuttavia, sono comunque progettate, secondo normativa, abbattendo le caratteristiche di resistenza meccanica del materiale secondo il tasso di corrosione relativo alle superfici interne. Al contrario, per la colonna centrale, che presenta aperture con l'ambiente atmosferico esterno, è previsto anche il rivestimento con vernice anticorrosiva delle pareti interne.

Per ultimo viene stabilita una adeguata messa a terra tra le parti e valutato il rischio di corrosione galvanica per tutti gli assemblaggi i cui materiali con potenziale elettrochimico diverso possono essere in contatto. Per gli elementi per i quali questo non può essere garantito, si procede con idoneo isolamento elettrico.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
81 di 85

11. ASSEMBLAGGIO ED INSTALLAZIONE

L'assemblaggio della fondazione è previsto in idonea banchina e si compone dei procedimenti riportati nel seguente elenco puntato.

- Il braccio radiale principale (1) compreso di spinotto al vertice, opportunamente infilato in getto di malta cementizia, viene posizionato su una chiatta adiacente alla banchina.
- I bracci radiali 2 e 3 sono opportunamente posizionati sulla medesima chiatta.
- La colonna centrale viene posizionata in prossimità degli estremi interni dei bracci radiali.
- Il braccio diagonale 1 è posizionato e collegato con gli appositi spinotti alla colonna centrale ed al braccio radiale 1.
- I bracci laterali 2 e 3 sono posizionati tra il braccio radiale 1 e rispettivamente il braccio radiale 2 e 3.
- I restanti bracci diagonali 2 e 3 sono posizionati e connessi con i rispettivi bracci radiali e con la colonna centrale.
- I bracci laterali 2 e 3 vengono connessi ai bracci radiali.
- Le casse di zavorra vengono infilate negli spinotti al vertice e bloccate tramite getto di malta cementizia.

A seguire si riporta uno schema di massima relativo ai passaggi appena descritti.



Figura 11.1 – Processo di assemblaggio fondazione TetraSub.

Elaborazione SO.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante		
Codice documento: C0421SR14RELFON00a	Data emissione: Marzo 2023	Pagina 82 di 85

Le verifiche di resistenza sui componenti della fondazione TetraSub sono condotte anche nei riguardi delle sollecitazioni indotte durante la fase temporanea di stoccaggio, assemblaggio e trasporto della struttura. Queste operazioni vengono effettuate in ambiente portuale e/o marino, pertanto vengono utilizzate le prescrizioni riportate in:

- Sezione 14.1.1.1 del DNV-ST-0119:2021;
- DNV-ST-N001:2020;
- DNV-ST-0437:2021.

I controlli consistono nel verificare che tutte le componenti in gioco siano correttamente dimensionate per resistere agli sforzi derivanti da operazioni quali ad esempio il sollevamento, lo spostamento, lo stoccaggio ed il montaggio.

Particolare attenzione viene posta sui supporti temporanei impiegati, per evitare che questi o le configurazioni strutturali da essi derivanti non inducano deformazioni eccessive o danneggiamenti tali da poter compromettere la funzionalità della struttura durante il suo funzionamento. Per questo tipo di analisi si adotta un approccio simulativo agli Elementi Finiti. Dai risultati ottenuti è possibile scegliere tipologia, numero e posizione dei supporti temporanei necessari.

In questa fase, l'aspetto relativo alla fatica indotta sui materiali non viene preso direttamente in considerazione (ulteriori analisi verranno condotte in sede di progetto esecutivo), tuttavia viene assunto che lo stress trasmesso alle componenti durante queste fasi si sommi a quello di fatica relativo alla vita utile della fondazione (per un valore pari al 10% del danno totale calcolato con un coefficiente DFF pari a 3).



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting Studio

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
83 di 85

12. MANUTENZIONE IN FASE OPERATIVA

La documentazione dettagliata relativa alle operazioni di manutenzione da effettuarsi durante la fase di esercizio del parco, è rimandata alle successive fasi di progetto.

In generale si prevedono:

- Ispezioni visive di collegamenti bullonati, verifiche dei serraggi e sostituzione delle eventuali bullonerie deteriorate;
- Ispezioni visive delle strutture primarie, compresa la colonna centrale, Controlli Non Distruttivi (NDT – Non Destructive Testing) secondo specifiche tecniche (dettagliate nelle prossime fasi progettuali);
- Ispezione dei nodi e sostituzione delle eventuali sezioni ammalorate;
- Ispezioni visive e regolari test dell’equipaggiamento di sicurezza;
- Ispezioni subacquee relative all’opera viva della fondazione, compresa la protezione catodica;
- Ispezioni visive relative alle strutture secondarie (piattaforma, punto di attracco ecc);
- Ripristino delle eventuali sezioni verniciate ammalorate;
- Pulizia, manutenzione e sostituzione della sensoristica esterna;
- Quant’altro necessario all’efficiente e sicuro funzionamento delle strutture.



Ichnusa wind power srl

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE
PROGETTO DEFINITIVO

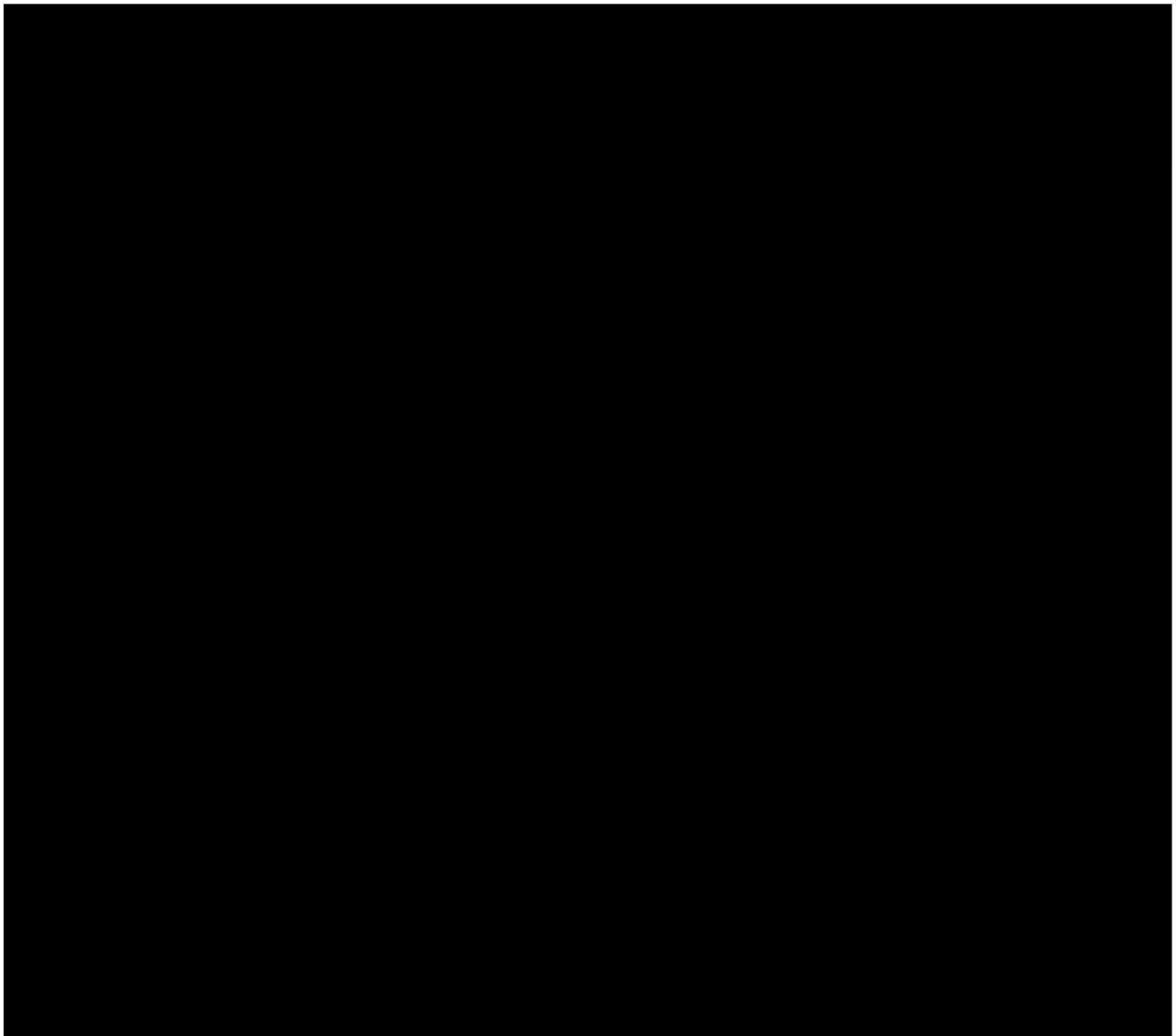
Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
84 di 85

RIFERIMENTI





Ichnusa wind power srl

iLStudio.

Engineering & Consulting **Studio**

PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE

PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica - Dimensionamento della fondazione galleggiante

Codice documento:
C0421SR14RELFON00a

Data emissione:
Marzo 2023

Pagina
85 di 85

Il presente documento, composto da n. 95 fogli è protetto dalle leggi nazionali e comunitarie in tema di proprietà intellettuali delle opere professionali e non può essere riprodotto o copiato senza specifica autorizzazione del Progettista.

Taranto, Marzo 2023

Dott. Ing. Luigi Severini