



Rinnovabili da sempre

Impianto fotovoltaico flottante "Cave Podere Stanga" nel Comune di Piacenza

Studio di Impatto Ambientale

Legge Regione Emilia Romagna n.20/2018 e smi

Decreto legislativo n. 152/2006 e smi

Wave for Energy Srl

Luglio 2024

INT.ANC.R.01.a

Sistemi di ancoraggio

Progettista

BP Engineering SrL

Hydrosolar SrL

Coordinamento di progetto e consulenza tecnica

Hydrosolar SrL – Infralab SrL

Opere di rete per la connessione CP "Montale"

Sering Italia SrL

Opere di utenza per la connessione

Ing. Giovanni Antonio Saraceno – **3E Ingegneria SrL**

Hydrosolar SrL

Sistemi di ancoraggio

Wave for Energy SrL

Geologia e idrogeologia

Dott. Geol. Alessandro Murratzu, Dott. Geol. Simone Fiaschi – **Idrogeo Service SrL**

Idraulica

Ing. Marco Monaci

Studio di impatto ambientale e progettazione ambientale integrata

Dott. Agr. Andrea Vatteroni, Ing. Cristina Rabozzi, Dott. Agr. Elena Lanzi, Arch. Michela Bortolotto, Ing. Sara Cassini, Dott. Alessandro Sergenti, Dott. Simone Luccini, Arch. Martina Mastropietro, Arch. Emma Bilancieri

ENVIarea stp snc

Idrobiologia

Dott. Biol. Nicola Polisciano

Ambiente, Paesaggio, Biodiversità e Ecologia

Dott. Agr. Andrea Vatteroni, Ing. Cristina Rabozzi, Dott. Agr. Elena Lanzi, Arch. Michela Bortolotto, Ing. Sara Cassini, Dott. Alessandro Sergenti, Dott. Simone Luccini, Arch. Martina Mastropietro, Arch. Emma Bilancieri

ENVIarea stp snc

Cartografia vettoriale

Arch. Martina Mastropietro, Arch. Emma Bilancieri, Arch. Michela Bortolotto

ENVIarea stp snc

Rendering e fotosimulazioni

Geom. Eleonora Frosini – **3D Visualization***

Acustica

Ing. Francesco Borchì, Ing. Gianfranco Colucci – **Vie en.ro.se. Ingegneria SrL**

SOMMARIO

Premessa	3
Abbreviazioni.....	9
1. IDENTIFICAZIONE DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI	11
1.1 Pericolosità sismica.....	11
1.1.1 Curva di pericolosità.....	12
1.1.2 Spettri a pericolosità uniforme.....	13
1.1.3 Considerazioni sul pericolo sismico	14
1.2 Velocità del vento	15
1.2.1 Database ERA5.....	15
1.2.2 Database ARPAE.....	17
1.2.3 Normativa DNV e NTC.....	17
2. DETERMINAZIONE DEI CARICHI AGENTI SULLE STRUTTURE GALLEGGIANTI.....	19
2.1 Forze di drag in direzione perpendicolare al colmo.....	20
2.1.1 Bacino Nord.....	20
2.1.2 Bacino Sud.....	30
2.2 Forze di drag in direzione parallela al colmo.....	34
2.2.1 Bacino Nord.....	34
2.2.2 Bacino Sud.....	39
3. RISULTATI.....	42
3.1.1 Bacino Nord.....	42
3.1.2 Bacino Sud.....	42
4. ANALISI DATI DI BACINO	43
4.1 Bacino Nord	43
4.2 Bacino Sud.....	45
5. SISTEMA DI ORMEGGIO	46
5.1 Base di layout.....	46
5.2 Modellazione.....	48
5.2.1 Contesto e condizioni ambientali	48
5.2.2 Layout dell’ormeggio.....	49
5.2.3 Risultati	50
5.3 Modalità di installazione/cantierizzazione	54
6. BIBLIOGRAFIA	55

Premessa

L'impianto fotovoltaico galleggiante denominato Cave Podere Stanga si estende su 2 bacini in aree di cave dismesse, site nel comune di Piacenza, con una potenza di picco pari a 30.6 (MWp). L'impianto viene suddiviso in bacino Nord e bacino Sud. La piattaforma galleggiante che verrà realizzata per ogni bacino sarà costituita da diversi moduli cluster, composti a loro volta da diverse zattere pannelli e inverter.

Figura 1. Planimetria dei 2 bacini di Cave Podere Stanga



Figura 2. Rappresentazione dei cluster sui 2 bacini, Nord e Sud

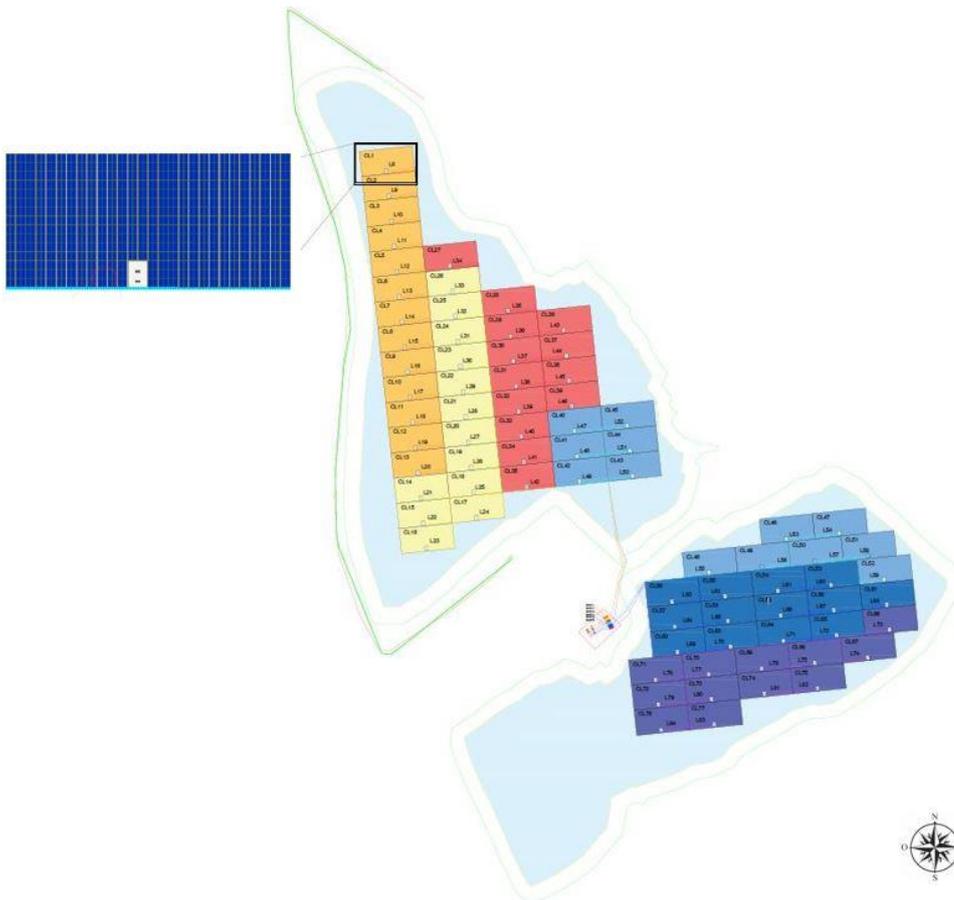
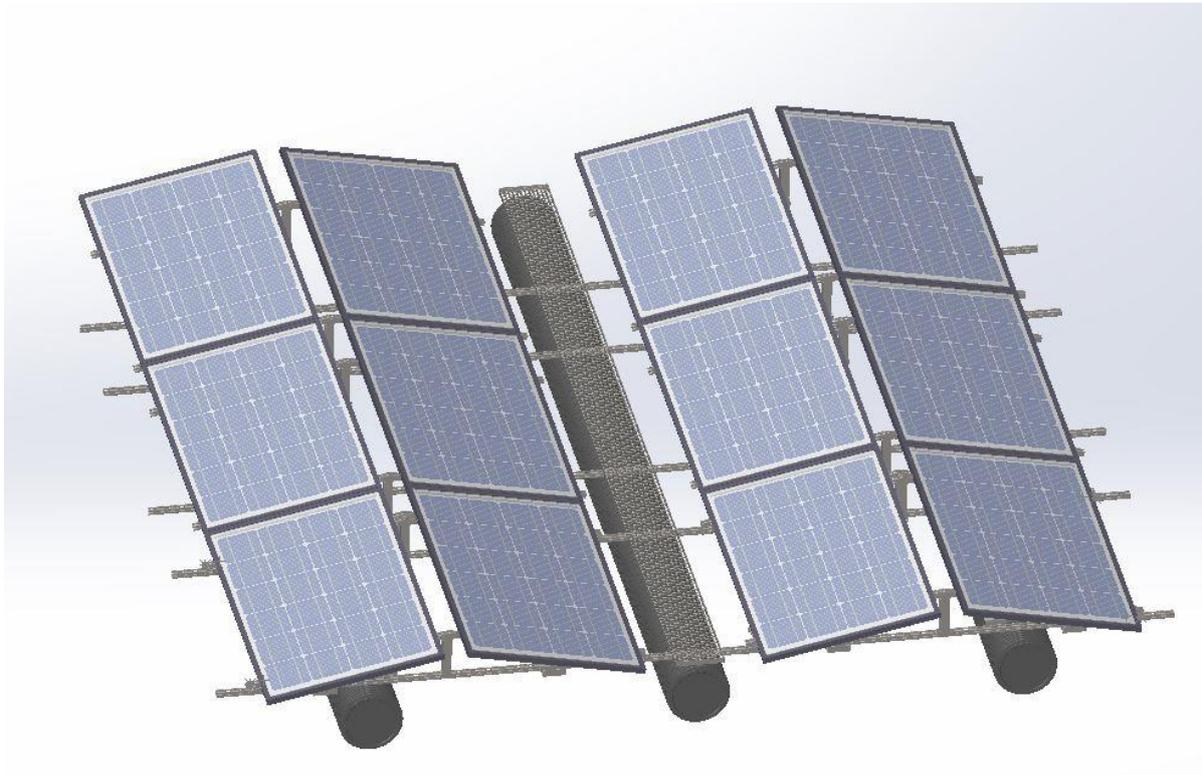


Tabella 1. Layout impianto Cave Podere Stanga

Quantità	Bacino Nord	Bacino Sud
N° cluster	45	32
N° zattere pannelli	3105	2208
N° zattere inverter	45	32
N° pannelli fotovoltaici	37260	26496

La tipologia di zattera pannelli in accordo alla società Hydrosolar prevede 12 pannelli fotovoltaici, con 2 strutture a doppia falda con inclinazione di 10°. Le zattere vengono mantenute in galleggiamento da tubi di polietilene chiusi.

Figura 3. Zattera pannelli Hydrosolar



Ogni cluster contiene 69 zattere pannelli e 1 zattera inverter, come rappresentato in Figura 4.

Figura 4. Rappresentazione di un cluster costituito da 69 zattere pannelli e 1 zattera inverter

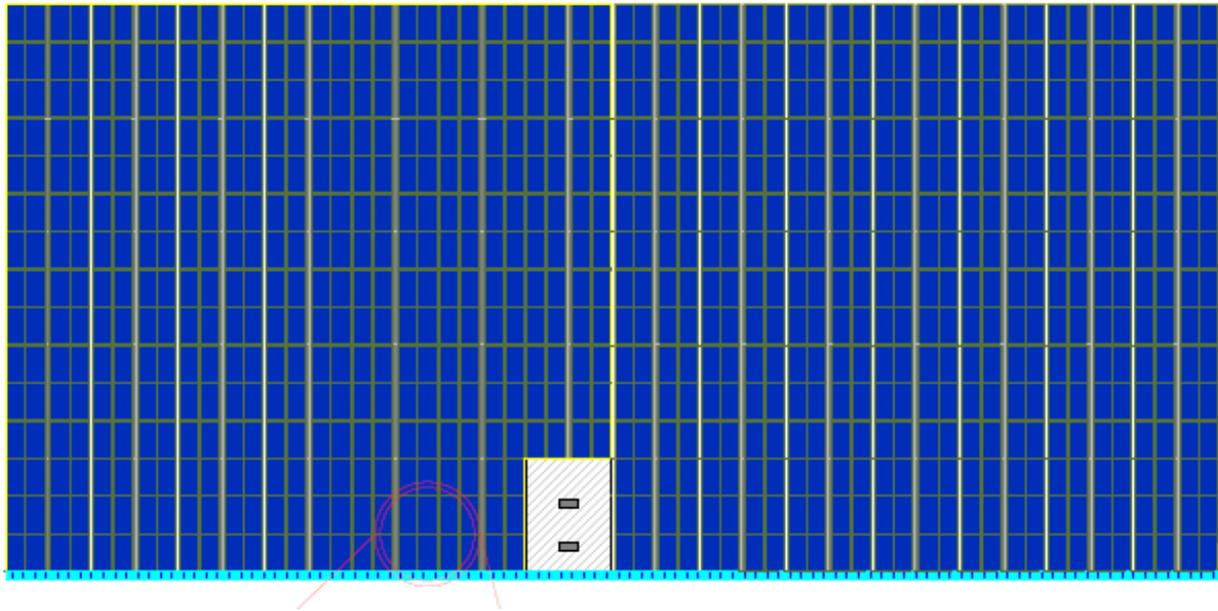


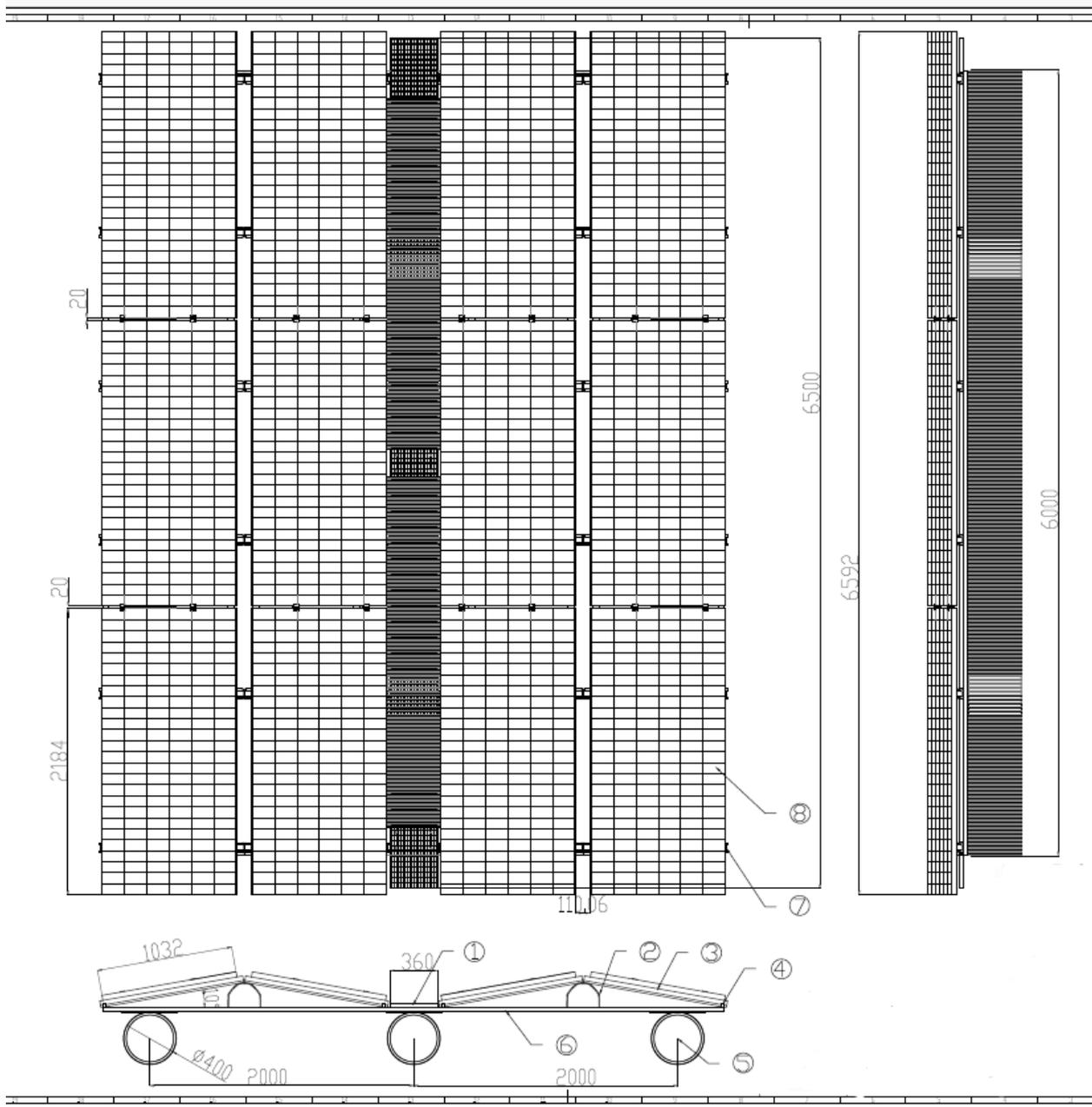
Tabella 2. Composizione di un modulo cluster

Cluster	
Zattere pannelli	69
Zattera inverter	1
Zattere per riga	14
Zattere per colonna	5
Pannelli per zattera	12
Pannelli per riga	56
Pannelli per colonna	15
Pannelli per cluster	828
Tettoie per riga	28
Numero di tubi per zattera	3
Numero di tubi per cluster	210
Numero di tubi per colonna	5
Numero di tubi per riga	42

Le dimensioni del singolo PFV sono le seguenti: $L = 1029 (mm)$ $B = 2182 (mm)$ $H = 35 (mm)$. Le aree del singolo pannello sono pari a: $A_{PFV} = 2.25 (m^2)$; $A_{PFV, sez} = 0.036 (m^2)$

La Figura 5 riporta alcune dimensioni caratteristiche della zattera pannelli, necessarie allo sviluppo dei calcoli.

Figura 5. Zattera pannelli fotovoltaici



Distanza del piano di camminamento dalla superficie libera dell'acqua: $H_{aff} = 0.27 \text{ (m)}$

Il diametro esterno del tubo corrugato per il galleggiamento è pari a: $D_e = 400 \text{ (mm)}$.

$$A_{tubo, sez} = \frac{\pi D_e^2}{4} = 0.126 \text{ (m}^2\text{)}$$

Figura 6. Caratteristiche dimensionali del tubo corrugato di galleggiamento

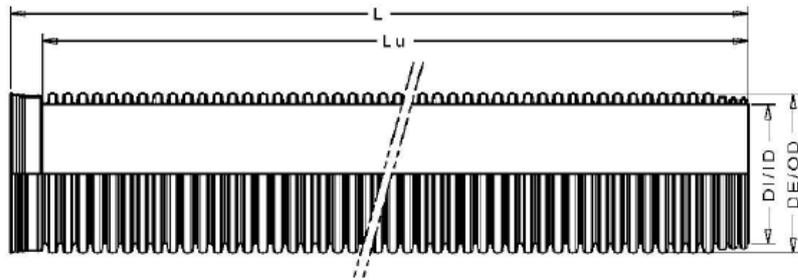
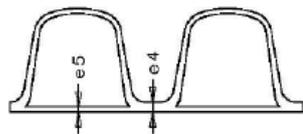


SYSTEM GROUP
www.tubi.net

SCHEMA TECNICA

Codice articolo I-FS11NN00M00

Magnum - Tubo PE corrugato SN8 DN/OD Diametri esterni

Dimensionali [mm]

DE/OD	DI/ID	DImin	e4min	e5min	L*	Lu*	Tipo di giunzione
125	105	105	1.1	1.0	6000	6000	C
160	137	134	1.2	1.0	6000	5800	B
200	172	167	1.4	1.1	6000	5800	B
250	218	209	1.7	1.4	6000	5800	B
315	272	263	1.9	1.6	6250	6000	A_2
400	347	335	2.3	2.0	6250	6000	A_2
500	433	418	2.8	2.8	6250	6000	A_2
630	542	527	3.3	3.3	6250	6000	A_2
800	678	669	4.1	4.1	6750	6550	A_2
1000	852	837	5.0	5.0	6750	6550	A_2
1200	1020	1005	5.0	5.0	6750	6550	A_2

* I valori indicati si riferiscono allo standard produttivo con tolleranze pari al 3%. Barre realizzabili con lunghezze di 3m, 5,90m, 6,25m da definire in fase di offerta. Lunghezze personalizzate disponibili su richiesta.

Abbreviazioni

PFV	Pannelli FotoVoltaici
DNV	Det Norske Veritas
NTC	Norme Tecniche per le Costruzioni
u_w, PFV	Velocità del vento sui pannelli fotovoltaici
$u_w, tubi$	Velocità del vento sui tubi
C_F	Coefficiente aerodinamico, di forma,
Φ	Grado di ostruzione
η	Fattore di schermatura
α	Rapporto di spaziatura
α_t	Angolo della falda o tettoia
A_{PFV}	Area in pianta dei pannelli fotovoltaici
$A_{lat, tubo}$	Area laterale del tubo
$A_{PFV, sch}$	Area del pannello fotovoltaico schermato
$A_{sch, tubo}$	Area del tubo schermato
$A_{tubo, em}$	Area del tubo emerso dall'acqua

Per ogni bacino considerato vengono definite:

$n_{PFV, c}$	Massimo numero di pannelli fotovoltaici in prima colonna
$n_{PFV TOT}$	Numero totale di pannelli fotovoltaici
$n_{PFV sch}$	Numero di pannelli fotovoltaici schermati dalla prima tettoia
$n_{PFV, r}$	Massimo numero di pannelli fotovoltaici presenti per riga
$n_{tubi, c}$	Massimo numero di tubi per colonna
$n_{tubi TOT}$	Numero totale di tubi
$n_{tubi sch.}$	Numero di tubi schermati dalla prima colonna
$n_{tubi, r}$	Massimo numero di tubi per riga
$A_{c, PFV}$	Area dei pannelli fotovoltaici in prima colonna
$A_{c, tubo}$	Area laterale dei tubi in prima colonna
$F_{\perp PFV}$	Forza in direzione perpendicolare al colmo agente sui pannelli fotovoltaici
$F_{d, PFV}$	Forza di drag in direzione perpendicolare agente sui pannelli fotovoltaici
$F_{\perp PFV, sch}$	Forza in direzione perpendicolare agente sui pannelli fotovoltaici schermati
$F_{\perp, tubi}$	Forza in direzione perpendicolare al colmo agente sui tubi
$F_{\perp tubi, sch}$	Forza in direzione perpendicolare al colmo agente sui tubi schermati
$F_{\perp tubi TOT}$	Forza in direzione perpendicolare al colmo agente su tutti i tubi
$F_{\perp, tubi+strutt}$	Forza in direzione perpendicolare al colmo agente su tutti i tubi e le strutture di sostegno dei pannelli fotovoltaici
$A_{r, PFV}$	Area dei pannelli fotovoltaici in prima riga
$F_{\parallel, PFV}$	Forza in direzione parallela al colmo e agente sulla sezione frontale dei pannelli in prima riga

$F_{\parallel 2, PFV}$	Forza in direzione parallela al colmo e agente su tutta la superficie dei pannelli
$F_{\parallel TOT, PFV}$	Forza in direzione parallela al colmo e agente su tutti i pannelli
$F_{\parallel 1, tubi}$	Forza in direzione parallela agente sulla sezione dei tubi in prima riga
$A_{tubo, \parallel}$	Area laterale dei tubi in direzione parallela al colmo
$F_{\parallel 2, tubi}$	Forza in direzione parallela agente sulla sezione laterale dei tubi
$F_{\parallel TOT, tubi}$	Forza in direzione parallela agente su tutti i tubi
$F_{\parallel TOT, tubi+strutt}$	Forza in direzione parallela agente su tutti i tubi e sulle strutture di sostegno dei pannelli fotovoltaici
$F_{\perp TOT}$	Forza totale agente sulla piattaforma galleggiante in direzione perpendicolare al colmo
$F_{\parallel TOT}$	Forza totale agente sulla piattaforma galleggiante in direzione parallela al colmo

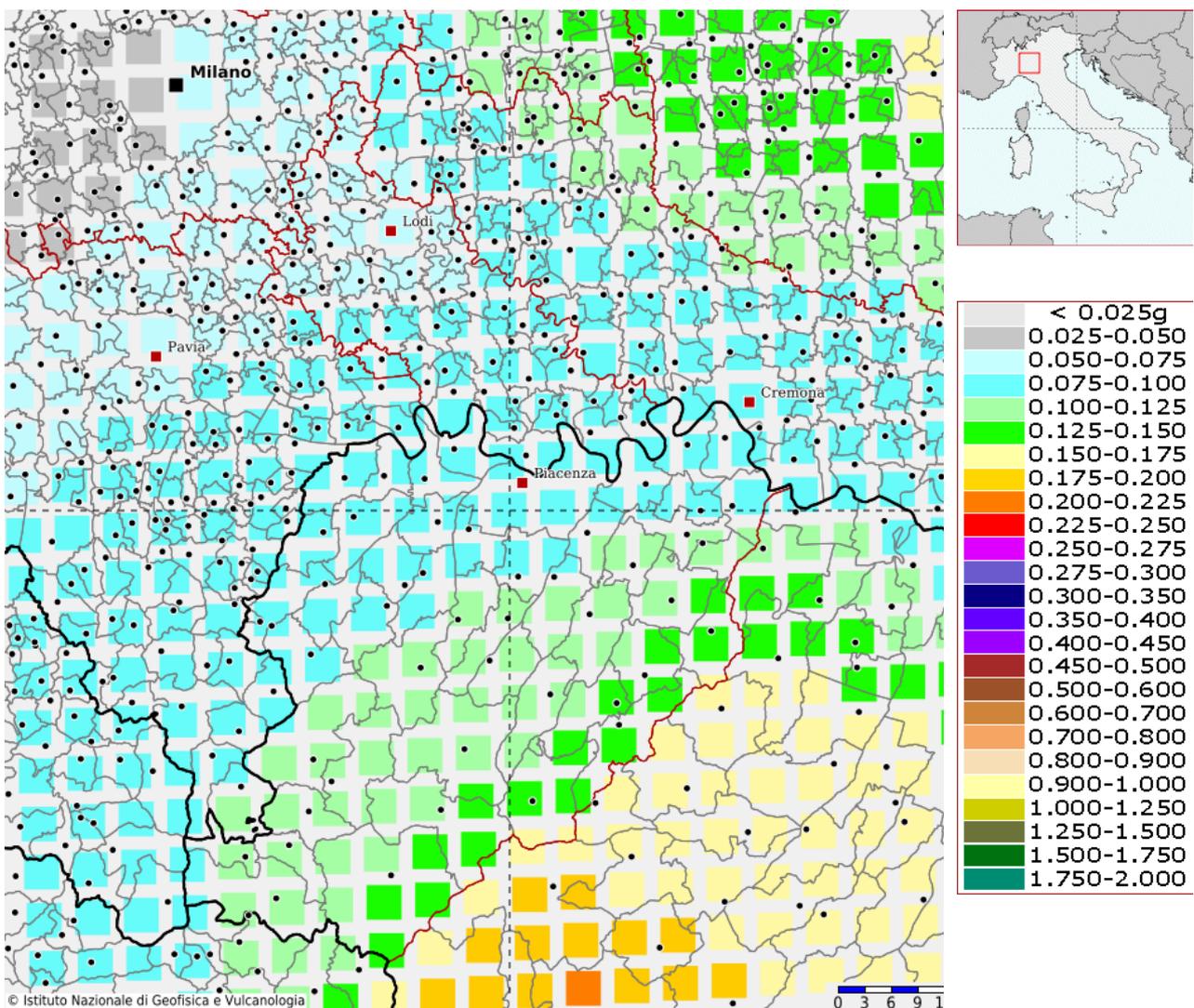
1. IDENTIFICAZIONE DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI

Lo scopo del presente documento riguarda l'identificazione delle forze agenti sulle piattaforme galleggianti. I carichi agenti sull'isola galleggiante derivano dall'interazione della struttura galleggiante con le diverse condizioni ambientali.

1.1 Pericolosità sismica

A partire dal modello di pericolosità sismica del territorio nazionale MPS04-S1 sviluppato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia [6] ed identificato l'ID 14265 del nodo corrispondente alle coordinate del sito in questione (Lat. 45.054, Long. 9.793), si è potuto estrapolare il dato di accelerazione di picco del suolo relativo per un periodo di ritorno di 50 anni.

Figura 7. Pericolosità sismica



La mappa di Figura 7 rappresenta il modello di pericolosità sismica per la zona di interesse e i diversi colori indicano il valore di scuotimento (PGA = Peak Ground Acceleration; accelerazione di picco del suolo, espressa in termini di g, l'accelerazione di gravità) atteso con una probabilità di eccedenza pari al 10% in 50 anni su suolo rigido (classe A, Vs30 > 800 m/s) e pianeggiante.

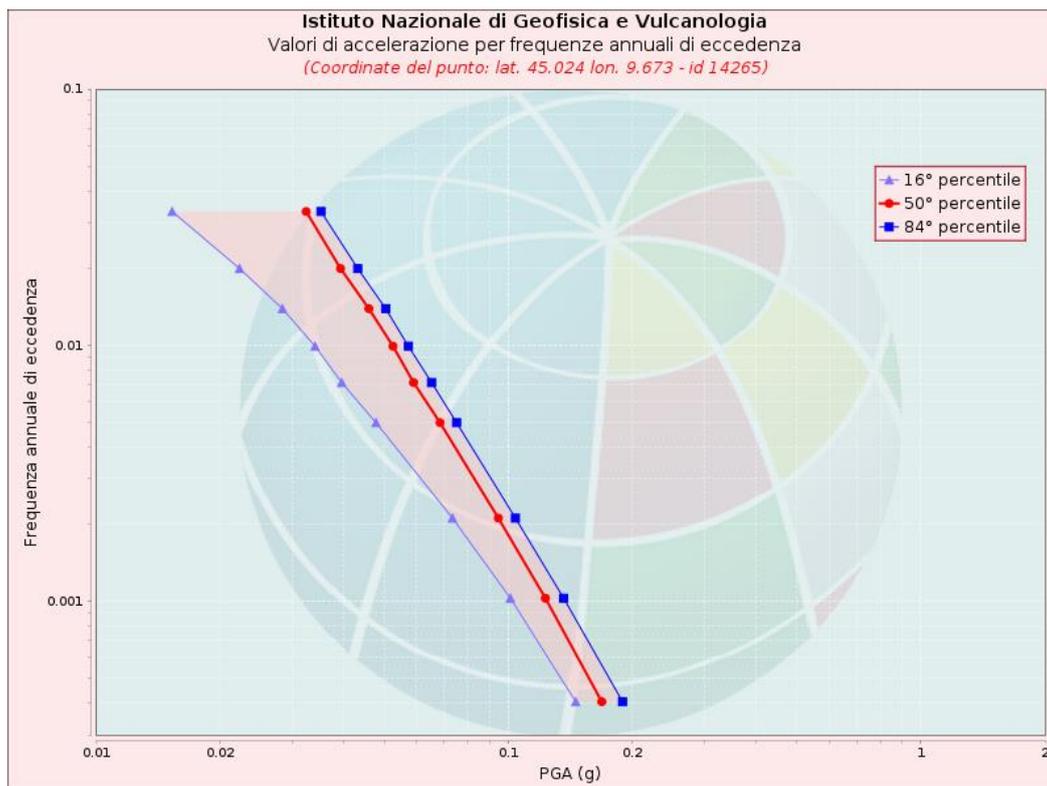
La zona interessata, situata nella zona Nord-Est di Piacenza, rientra nella fascia 0.075-0.100 g.

L'area è quindi da considerare a bassa pericolosità sismica, collocabile in **Zona 3** (accelerazione <0.15g) Figura 7.

1.1.1 Curva di pericolosità

La pericolosità è l'insieme dei valori di scuotimento (in questo caso per la PGA) per diverse frequenze annuali di eccedenza (valore inverso del periodo di ritorno). La tabella riporta i valori mostrati nel grafico, relativi al valore mediano (50mo percentile) ed incertezza, espressa attraverso il 16° e l'84° percentile. (Figura 8)

Figura 8. Valori di accelerazione



Valori di accelerazione per frequenze annuali di eccedenza			
Frequenza annuale di ecc.	PGA (g)		
	16° percentile	50° percentile	84° percentile
0.0004	0.146	0.169	0.189

0.0010	0.101	0.123	0.136
0.0021	0.073	0.095	0.104
0.0050	0.048	0.068	0.075
0.0071	0.040	0.059	0.065
0.0099	0.034	0.053	0.057
0.0139	0.028	0.046	0.051
0.0199	0.022	0.039	0.043
0.0332	0.015	0.032	0.035

La frequenza annuale da considerare per una probabilità di eccedenza pari al 10% in 50 anni è pari a:

$$\lambda = \frac{\ln(1 - P(Y_T > y^*))}{t} = \frac{\ln(1 - 0.1)}{50} = 0.0211$$

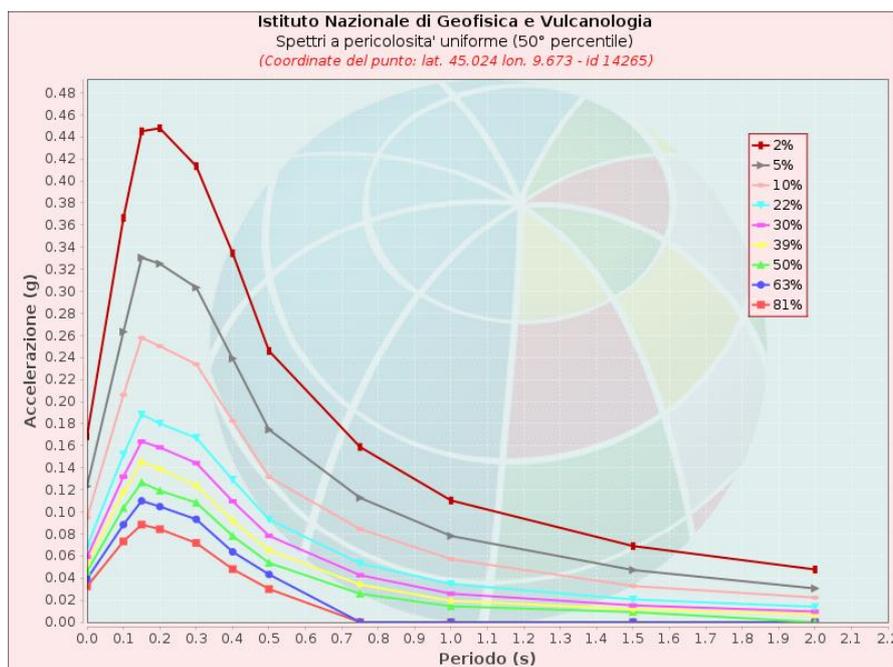
con $P(Y_T > y^*) = 0.1 = 10\%$ e periodo di ritorno $t=50$ anni.

Pertanto i valori di accelerazioni risultano quelli evidenziati in tabella.

1.1.2 Spettri a pericolosità uniforme

Gli spettri indicano i valori di scuotimento calcolati per 11 periodi spettrali, compresi tra 0 e 2 secondi. La PGA corrisponde al periodo pari a 0 secondi. Il grafico è relativo alle stime mediane (50mo percentile) proposte dal modello di pericolosità. I diversi spettri nel grafico sono relativi a diverse probabilità di eccedenza (PoE) in 50 anni. La tabella riporta i valori mostrati nel grafico di Figura 9.

Figura 9. Spettri di pericolosità uniforme (50° percentile)



Spettri a pericolosità uniforme (50° percentile)											
PoE in 50 anni	Accelerazione (g)										
	Periodo (s)										
	0.0	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0
2%	0.169	0.367	0.445	0.448	0.413	0.335	0.246	0.159	0.110	0.069	0.048
5%	0.123	0.263	0.330	0.325	0.303	0.239	0.175	0.113	0.078	0.047	0.031
10%	0.095	0.206	0.258	0.250	0.234	0.182	0.132	0.084	0.057	0.033	0.022
22%	0.068	0.152	0.188	0.180	0.167	0.129	0.093	0.053	0.034	0.021	0.014
30%	0.059	0.132	0.164	0.158	0.144	0.110	0.078	0.043	0.026	0.015	0.010
39%	0.053	0.118	0.145	0.139	0.124	0.092	0.065	0.034	0.019	0.012	0.007
50%	0.046	0.103	0.127	0.119	0.108	0.078	0.054	0.026	0.014	0.009	0.000
63%	0.039	0.088	0.110	0.105	0.093	0.064	0.043	0.000	0.000	0.000	0.000
81%	0.032	0.073	0.088	0.084	0.072	0.048	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000

1.1.3 Considerazioni sul pericolo sismico

Considerando un ormeggio del sistema che preveda corpi morti sul fondo dei bacini e screw anchor nelle parti più ripide del fondale, si ritiene che la bassa entità delle accelerazioni e i periodi coinvolti non influenzino l'integrità e la stabilità dei punti di aggancio. Ulteriori e più dettagliate informazioni sono contenute nel documento RPB.SIA.R.07.a - relazione geologica [13].

I periodi naturali tipici dei sistemi di ormeggio semi-tesi o tesi, simili a quello che verrà adottato per il sistema oggetto dello studio, sono nell'intervallo 2-8 (s), quindi ragionevolmente al di fuori dei periodi interessati dalle stime presentate.

1.2 Velocità del vento

1.2.1 Database ERA5

Per la valutazione delle condizioni di vento è stato utilizzato il database di ERA5.

Il dataset di ri-analisi ERA5 [10] viene generato dallo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). In particolare, l'ERA5 comprende dati su parametri di onde e vento, derivati da una combinazione di altimetria satellitare, osservazioni di boe e modelli numerici. I dati sul vento sono forniti con una risoluzione spaziale di $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ e vengono aggiornati su base oraria.

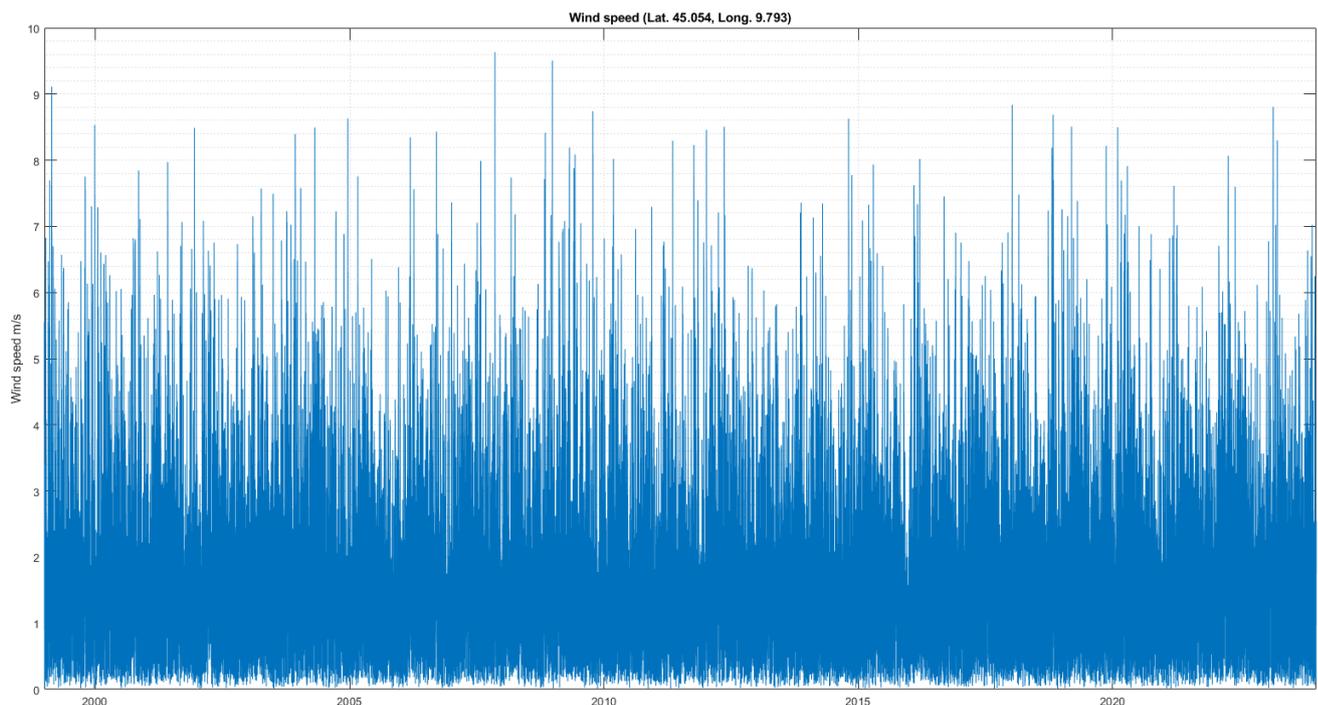
In particolare, il dataset disponibile include la componente est della velocità del vento a 10 metri (u_{10m}) e la componente nord della velocità del vento a 10 metri (v_{10m}), ovvero le componenti della velocità orizzontale del vento ad un'altezza di 10 metri sopra la superficie del mare. Le componenti della direzione del vento fornite da ERA5 seguono la convenzione meteorologica, indicando la direzione da cui soffia il vento. Sono analizzati sia il vento convenzionale che il vento neutrale a 10 metri sopra il livello del mare per identificare il dataset più adatto.

Il database ERA5[9], parte integrante di ECWAM (ECMWF Ocean Wave Model), rappresenta la quinta generazione di ri-analisi meteorologica, risultato dell'integrazione di ampie quantità di dati osservati a livello globale tramite satelliti e sensori in-situ, elaborati tramite sofisticati modelli meteorologici.

Sono stati estratti dal database tutti i dati disponibili, relativi agli ultimi 24 anni (dal 01/01/1999 al 31/12/2023), su base oraria.

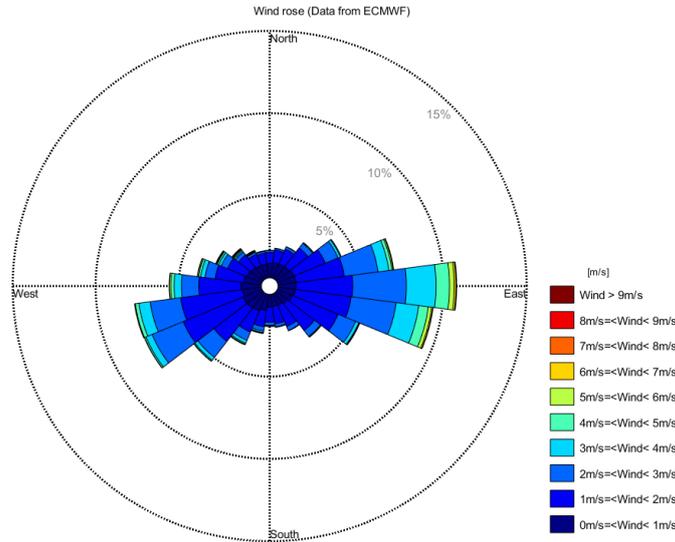
Nella Figura 10 si può verificare che il dato massimo di velocità del vento è pari a 9.633 (m/s) in data 09/11/2007.

Figura 10. Velocità del vento (database ERA5)



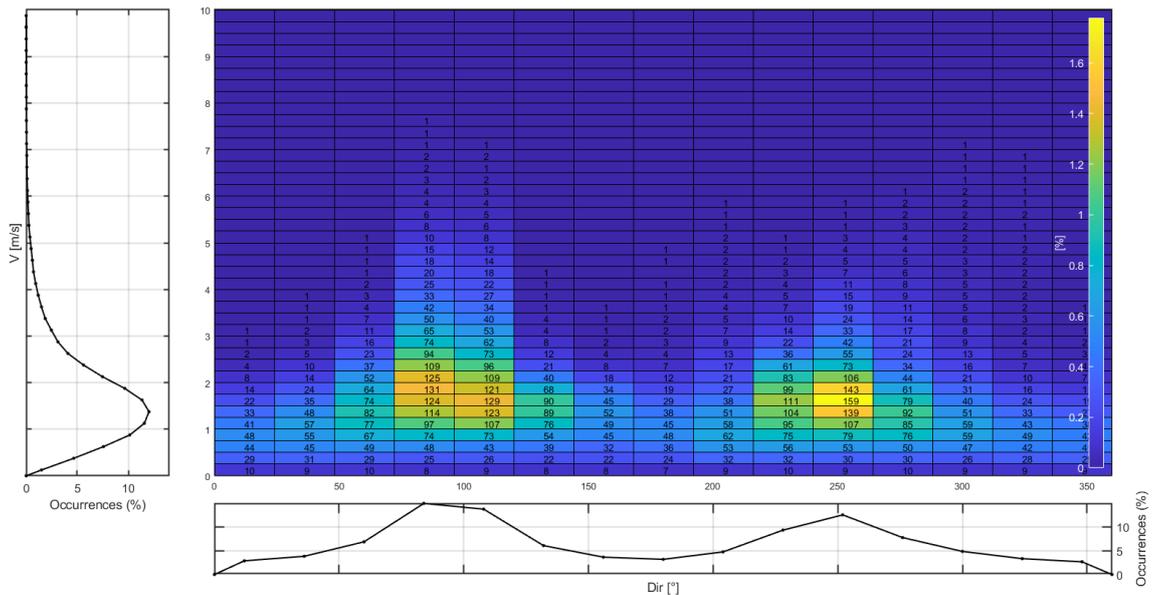
Nella Figura 11 è mostrata sulla rosa dei venti la direzionalità associata all'intensità del vento per il sito in questione. Si nota come la direzione principale sia Est-Ovest con fenomeni più intensi provenienti da Est.

Figura 11. Direzionalità e intensità del vento



In Figura 12 è mostrata la scatter table delle occorrenze ordinata per direzione e velocità del vento, da cui si può notare come il fenomeno sia mediamente più intenso e più frequente nelle direzioni Est-Ovest.

Figura 12. Scatter table delle occorrenze direzionale



1.2.2 Database ARPAE

Dalla consultazione del database Dext3r di Arpa Emilia Romagna [11], estraendo i dati per l'area che comprende quella di interesse si è riscontrato che il database è fortemente frammentato nel tempo, forse a causa di malfunzionamenti del sistema di rilevamento.

Si sono elaborati i dati presenti categorizzati come "massimo valore di raffica del vento a 10m dal suolo" in modo da avere un riscontro sul valore massimo di velocità del vento da poter utilizzare nei calcoli di dimensionamento.

Il valore massimo rilevato è pari a 16.8 (m/s).

1.2.3 Normativa DNV e NTC

La normativa DNVGL-RP-0584 rif. [2] relativa alla progettazione di sistemi di pannelli fotovoltaici (PFV) galleggianti, fa riferimento alla normativa DNVGL-RP-C205 rif. [3] per il calcolo delle forze di vento. La normativa Italiana NTC 2018 rif. [1] definisce per ogni zona del territorio Italiano una velocità di base per il vento come valore medio su 10 minuti a 10 (m) di altezza su un terreno pianeggiante e omogeneo di categoria di esposizione II con un periodo di ritorno pari a 50 anni. In mancanza di specifiche e adeguate indagini statistiche, la velocità di base V_b è data dalla relazione:

$$V_b = V_{b,0} * c_a$$

Con:

$V_{b,0}$ velocità di base al riferimento del mare in funzione della zona in cui sorge la costruzione (vedere tabella 3.3.I rif.[1])

c_a Altitudine sul livello del mare del sito ove sorge la costruzione

Dalla tabella 3.3.I rif.[1], per il sito di costruzione in Emilia Romagna, la velocità base $V_{b,0}$ vale 25 (m/s), per un altitudine di 750 (m). Per altitudini del sito minori o uguali a quello tabulato, il coefficiente di altitudine vale 1 (altitudine sito di costruzione a 61 m.s.l.m.m). La velocità di riferimento è definita dalla seguente relazione:

$$V_r = V_b * c_r$$

Con:

V_b velocità di base

c_r coefficiente di ritorno in funzione del tempo di ritorno

Il coefficiente di ritorno per la definizione di tale velocità, considerando un periodo di ritorno pari a 50 anni, assume un valore pari ad 1.

Il valore della velocità di riferimento, ricavata dalla NTC 2018 nelle condizioni suddette per il sito di Cava Podere Stanga, è quindi pari a **25 (m/s)**.

Tale è la velocità a 10 (m) dal livello dell'acqua che si assume come base per il calcolo della velocità a livello dei pannelli e quindi delle forze di vento sul sistema.

Per il calcolo della velocità media a 10 minuti a livello dei PFV si utilizza la seguente formula ottenuta dalla normativa DNV, rif. [3] che esprime il profilo della velocità del vento in funzione dell'altezza z dal livello dell'acqua:

$$U(T, z) = U_{10} \left(1 + 0.137 \ln \frac{z}{H} - 0.047 \ln \frac{T}{T_{10}} \right)$$

Dove:

U_{10} : Velocità media a 10 min a 10 m dal livello dell'acqua = 25 (m/s)

z : Altezza per il calcolo della velocità del vento dal livello dell'acqua (si assume per i PFV la quota più alta pari a 0.45 (m), Figura 5, mentre per i tubi galleggianti + struttura la quota è di 0.27 (m))

T_{10} : Periodo di riferimento pari a 10 minuti

T : Periodo di tempo per il calcolo della media della velocità. In questo caso $T = T_{10}$, pertanto l'ultimo termine risulta nullo

H : Altezza di riferimento pari a 10 (m)

Sulla base delle dimensioni riportate in Figura 5, si ottengono quindi le seguenti velocità del vento medie a 10 minuti rispettivamente alla massima altezza, approssimata per eccesso, dei PFV e del tubo:

$$u_{w, PFV} = u_w(10min, 0,45m) = 14.37 \left(\frac{m}{s} \right)$$

Per la velocità a livello dei tubi si ottiene invece:

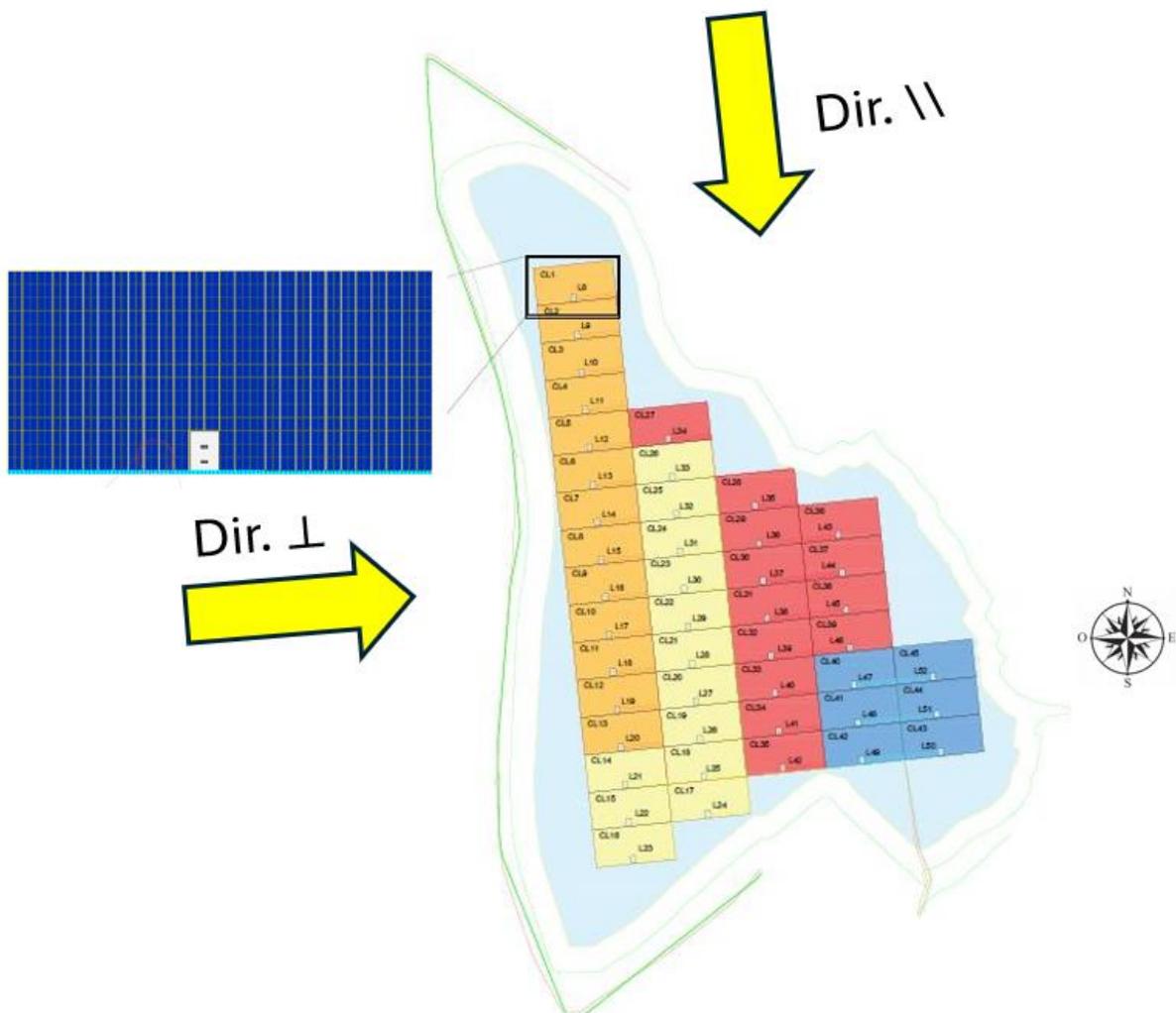
$$u_{w, tubi} = u_w(10min, 0,27m) = 12.63 \left(\frac{m}{s} \right)$$

2. DETERMINAZIONE DEI CARICHI AGENTI SULLE STRUTTURE GALLEGGIANTI

Per lo studio in questione e per la tipologia di sito esaminato, i carichi agenti sull'isola galleggiante PFV sono legati agli effetti del vento. Le componenti di vento in direzione verticale, di lift, non verranno esaminate in quanto vengono bilanciate dal peso proprio delle strutture e dalla spinta idrostatica. L'effetto di drag sull'isola galleggiante, per entrambi i bacini, può essere scomposto nelle direzioni principali all'impianto come in uno schema matriciale, ovvero:

- **Direzione parallela alla linea di colmo** della zattera pannelli (Dir. //); grandezze esaminate per colonna.
- **Direzione perpendicolare alla linea di colmo** della zattera pannelli (Dir. ⊥); grandezze esaminate per riga.

Figura 13. Indicazioni delle direzioni di calcolo del vento



Nello studio trattato in questo documento verranno adottate le seguenti ipotesi:

1. **Vento agente lungo una sola direzione principale, non simultaneamente**
2. **Intensità del modulo del vettore vento che non varia spazialmente lungo l'impianto**
3. **L'impianto galleggiante si comporta come un unico corpo rigido nella trasmissione dei carichi tra i vari moduli cluster**

La normativa DNVGL-RP-C205, rif. [3] non fornisce coefficienti di forza specifici per i pannelli fotovoltaici e rimanda anche all'Eurocodice, rif. [4], di cui le NTC 2018, rif. [1] sono l'applicazione a livello nazionale, per il reperimento di tali coefficienti per varie strutture. Si fa quindi riferimento alla normativa nazionale considerando la struttura che più si avvicina alla configurazione dei pannelli, ovvero la tettoia a doppia falda, nelle condizioni di vento previste con un periodo di ritorno pari a 50 anni.

2.1 Forze di drag in direzione perpendicolare al colmo

2.1.1 Bacino Nord

Le principali grandezze dell'impianto denominato bacino Nord vengono riassunte nella seguente Tabella 3.

Tabella 3. Caratteristiche impianto bacino Nord

Tipologia	Descrizione	Quantità
Cluster	N° totale	45
	N° in prima colonna	16
	N° in prima riga	5
Pannelli	N° in prima colonna $n_{PFV, c}$	240
	N° totale $n_{PFV TOT}$	37260
	N° schermati dalla prima tettoia $n_{PFV sch}$	36780
	N° per riga $n_{PFV, r}$	280
Tubi	N° in prima colonna $n_{tubi, c}$	80
	N° totale $n_{tubi TOT}$	9450
	N° schermati dalla prima colonna $n_{tubi sch.}$	9370
	N° per riga $n_{tubi, r}$	210

2.1.1.1 Pannelli fotovoltaici

Figura 14. Coefficienti di forza secondo NTC2018, rif [1]

C3.3.8.2.2 Tettoie a falda doppia

La Tabella C3.3.XVI e la relativa Figura C3.3.23 riportano i valori dei coefficienti di forza per le tettoie a doppia falda (di uguale pendenza) con vento agente perpendicolarmente alla linea di colmo. I valori dei coefficienti di forza sono espressi in funzione del grado di bloccaggio ϕ e dell'inclinazione α delle falde. Per valori intermedi di ϕ è ammessa un'interpolazione lineare tra i valori relativi ai casi $\phi=0$ e $\phi=1$. La quota di riferimento z_e è pari all'altezza massima h della tettoia. L'area di riferimento L^2 , ossia l'area su cui è applicata la forza risultante, è pari all'area di ciascuna falda della tettoia.

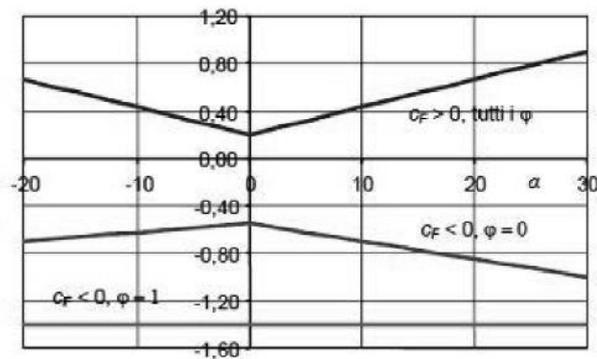
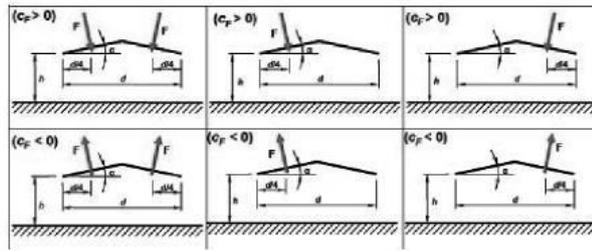


Figura C3.3.23 - Coefficienti di pressione complessiva per tettoie a falda doppia

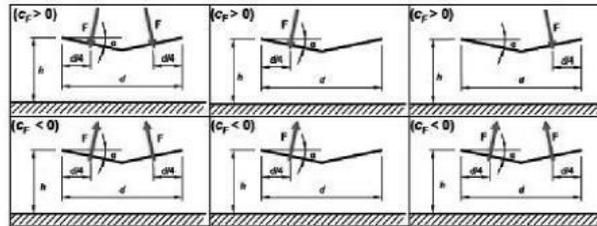
Tabella C3.3.XVI - Coefficienti di forza per tettoie a doppia falda (α in $^\circ$).

Valori positivi	Tutti i valori di ϕ	$c_F = +0,2 + 0,7 \alpha /30$	
Valori negativi	$\phi = 0$	$\alpha \leq 0^\circ$	$c_F = -0,5 + 0,1\alpha/10$
		$\alpha \geq 0^\circ$	$c_F = -0,5 - 0,2\alpha/10$
	$\phi = 1$	tutti i valori di α	$c_F = -1,4$

Per il calcolo della tettoia si considerano le condizioni di carico più gravose tra quelle indicate nella Figura C3.3.24, dove la forza risultante $F = q_p(z) L^2 c_F$ è considerata agente simultaneamente su entrambe le falde oppure soltanto su una di esse. Ciascuna falda delle tettoie a doppia falda con vento agente parallelamente alla linea di colmo può essere analizzata, in prima approssimazione, come una tettoia piana a semplice falda ($\alpha = 0^\circ$).



(a)



(b)

a) Tettoie a doppia falda: posizione del punto di applicazione delle forze risultanti in funzione della direzione della forza – schema per $\alpha > 0^\circ$.

b) Tettoie a doppia falda: posizione del punto di applicazione delle forze risultanti in funzione della direzione della forza – schema per $\alpha < 0^\circ$

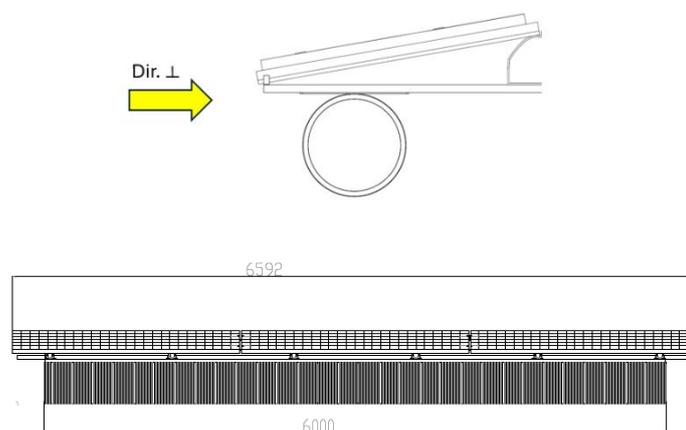
Figura C3.3.24

Per la definizione dei coefficienti di forza la normativa fa riferimento al grado di bloccaggio o solidity ratio ϕ definito come il rapporto tra l'area esposta al vento di un'eventuale ostruzione presente al di sotto della tettoia e l'area totale della superficie ortogonale alla direzione del vento al di sotto della tettoia.

La forza che si calcola sulla base di tali coefficienti ha direzione perpendicolare alla superficie del pannello, come indicato in Figura 14 (fig. C.3.3.24 NTC 2018).

Per vento incidente perpendicolarmente alla linea di colmo dei pannelli (\perp) il grado di bloccaggio $\phi \approx 1$ in quanto l'area al di sotto dei pannelli è quasi totalmente ostruita dal profilo della zattera, con i supporti dei pannelli, e dal tubo di galleggiamento posto in direzione longitudinale (Figura 15).

Figura 15. Vista laterale della zattera in direzione perpendicolare al colmo (\perp)



Sulla base di quanto sopra riportato, per $\Phi=1$, si ottiene il coefficiente massimo e pari a $C_{F\perp, PFV} = 1,4$

In base a quanto previsto dalla normativa DNV rif. [3], quando due o più strutture parallele sono posizionate l'una dietro l'altra nella direzione del vento, è possibile considerare l'effetto di schermatura della prima sulle altre.

Si definisce a tale scopo un fattore di schermatura, *shielding factor* η (Figura 16), che dipende dal *solidity ratio* (Φ, β) della prima struttura sottovento, dal tipo di elementi che compongono la struttura e dal rapporto di spaziatura α (*spacing ratio*) definito come rapporto tra la distanza centro-centro tra le due strutture consecutive e la minima dimensione complessiva della struttura misurata perpendicolarmente alla direzione del vento. Il fattore di schermatura η si applica a tutte le strutture dietro alla prima.

Figura 16. Fattore di schermatura η da DNV, rif [3]

Table 5-1 The shielding factor η as function of spacing ratio α and aerodynamic solidity ratio β.								
β α	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
< 1.0	1.0	0.96	0.90	0.80	0.68	0.54	0.44	0.37
2.0	1.0	0.97	0.91	0.82	0.71	0.58	0.49	0.43
3.0	1.0	0.97	0.92	0.84	0.74	0.63	0.54	0.48
4.0	1.0	0.98	0.93	0.86	0.77	0.67	0.59	0.54
5.0	1.0	0.98	0.94	0.88	0.80	0.71	0.64	0.60
> 6.0	1.0	0.99	0.95	0.90	0.83	0.75	0.69	0.66

The *spacing ratio* α is the distance, centre to centre, of the frames, beams or girders divided by the least overall dimension of the frame, beam or girder measured at right angles to the direction of the wind. For triangular or rectangular framed structures diagonal to the wind, the spacing ratio should be calculated from the mean distance between the frames in the direction of the wind.

The *aerodynamic solidity ratio* is defined by $\beta = \phi a$ where

- ϕ = solidity ratio, see [5.3.2]
- a = constant
 - = 1.6 for flat-sided members
 - = 1.2 for circular sections in subcritical range and for flat-sided members in conjunction with such circular sections
 - = 0.6 for circular sections in the supercritical range and for flat-sided members in conjunction with such circular sections.

Facendo riferimento alla tabella di Figura 16 e alle dimensioni illustrate in Figura 5, si ottengono i seguenti rapporti di spaziatura per PFV e tubi in condizioni di vento perpendicolare alla linea di colmo dei PFV:

$$\alpha_{PFV} = \frac{2570}{6592} = 0.39 < 1$$

$$\alpha_{tubi} = \frac{2000}{6500} = 0.31 < 1$$

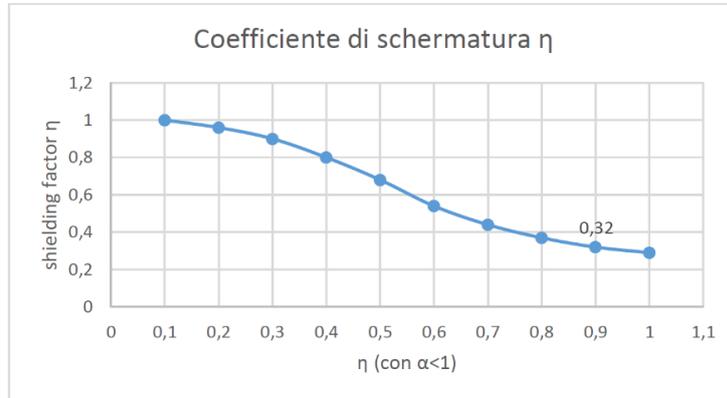
$a = 0.9$ considerando una situazione intermedia cautelativa, tra subcritica e supercritica

$$\phi \simeq 1$$

$$\beta = \phi * a = 0.9$$

Proseguendo il grafico per $\beta = 0,9$ come riportato in Figura 17 si ottiene $\eta = 0.32$

Figura 17. Rappresentazione grafica del fattore di schermatura η



La forza complessiva sui PFV, agente in direzione ortogonale ai pannelli come illustrato in Figura 14, viene calcolata utilizzando le seguenti formule:

$$F_{\perp PFV} = q_{PFV} c_F A$$

$$q_{PFV} = \frac{1}{2} \rho u_{w, PFV}^2$$

Per calcolare la forza orizzontale di drag, agente sul piano dell'isola galleggiante, occorre proiettare la forza precedentemente calcolata considerando l'angolo di inclinazione della falda, ovvero:

$$F_{d, PFV} = F_{\perp, PFV} * \sin(\alpha_t)$$

Con α_t corrispondente all'angolo di inclinazione della falda=10°

L'area da considerare A corrisponde all'area dei pannelli presa in esame.

Per la prima colonna di pannelli, corrispondente alla prima tettoia, l'area da considerare vale:

$$A_{c, PFV} = A_{PFV} * n_{PFV, c} = 1077.73 (m^2)$$

Dove:

$n_{PFV, c} = 480$ che corrispondono al numero di pannelli che si trovano in prima tettoia, nella condizione di vento ortogonale al colmo, nel bacino Nord.

Dalla 2° tettoia in avanti, occorre considerare il fattore di schermatura precedentemente calcolato, pari a $\eta = 0.32$, per calcolare l'area oggetto alla schermatura. Al singolo pannello schermato corrisponde un area:

$$A_{PFV, sch} = \eta * A_{PFV} = 0.72 (m^2)$$

I pannelli che sono soggetti a schermatura dalla prima tettoia $n_{PFV sch}$ sono pari al numero totale di pannelli del bacino Nord depurati dei pannelli presenti nella prima tettoia (come riportato in Tabella 3).

Si riportano in tabella tutte le grandezze utili per il calcolo delle forze di drag.

Grandezza	Valore (u.d.m)
$u_{w, PFV}$	14.37 (m/s)
ρ	1.25 (kg/m ³)
c_F	1.4
$A_{c, PFV}$	1077.73 (m ²)
η	0.32
$A_{PFV, sch}$	0.72 (m ²)
$n_{PFV sch}$	36780

$F_{1 \perp PFV}$	194.73 (kN)
$F_{\perp PFV, sch}$	4774.78 (kN)
$F_{\perp PFV TOT}$	4959.51 (kN)
$F_{d, PFV}$	862.95 (kN)

Il contributo di drag del vento in direzione ortogonale al colmo e agente sul piano dell'isola galleggiante, considerando il solo contributo dei pannelli fotovoltaici, corrisponde ad una spinta di circa 863 (kN), circa 88 (t) di spinta.

2.1.1.2 Tubi e struttura

Per quanto riguarda i tubi, i coefficienti di forma si ricavano direttamente dalla normativa DNV rif [3]. Essi sono definiti in funzione del *solidity ratio* o *grado di ostruzione* Φ , come riportato in Figura 18. Per vento con direzione perpendicolare al tubo si considerano i tubi pressoché ostruiti dall'acqua sottostante.

Figura 18. Coefficienti di forma in funzione del solidity ratio da DNVGL RP C205, rif. [3]

Table 5-1 Effective shape coefficient C_g for single frames

Solidity ratio Φ	Effective shape coefficient C_g		
	Flat-side members	Circular sections	
		$Re < 4.2 \times 10^5$	$Re \geq 4.2 \times 10^5$
0.10	1.9	1.2	0.7
0.20	1.8	1.2	0.8
0.30	1.7	1.2	0.8
0.40	1.7	1.1	0.8
0.50	1.6	1.1	0.8
0.75	1.6	1.5	1.4
1.00	2.0	2.0	2.0

Per $\Phi=1$, vento in direzione ortogonale al colmo $\rightarrow C_{F\ tubi} = 2$

La forza di drag sui tubi si calcola applicando le seguenti formule:

$$F_{\perp, tubi} = q_{tubi} C_T A_{tubi}$$

$$q_{tubi} = \frac{1}{2} \rho u_w^2$$

L'area del singolo tubo laterale di una zattera vale:

$$A_{lat, tubo} = H_{aff} * L_{tubo} = 0.27 * 6 = 1.62 \text{ (m}^2\text{)}$$

Per il primo tubo considerato, partendo dall'esterno del bacino Nord ed esaminando la prima tettoia, l'area del tubo corrispondente vale:

$$A_{c, tubo} = A_{tubo, lat} * n_{tubi, c} = 1.62 * 80 = 129.6 \text{ (m}^2\text{)}$$

Dove:

$n_{tubi, c} = 80$ è pari al numero di tubi per colonna in ciascun cluster (5) moltiplicato per il numero di cluster soggetti al vento in direzione perpendicolare al colmo (16).

Dalla 2° fila di tubi in avanti, occorre considerare il fattore di schermatura $\eta=0.32$ per calcolare l'area oggetto alla schermatura. Al singolo tubo schermato corrisponde un'area:

$$A_{sch. tubo} = \eta * A_{lat, tubo} = 0.52 \text{ (m}^2\text{)}$$

I tubi che risultano essere schermati dalla prima colonna $n_{tubi\ sch}$. sono pari al numero di tubi totali del bacino Nord depurati dei tubi presenti in prima colonna (come riportato in Tabella 3).

La forza di drag totale agente sui tubi e sulle strutture si ottiene ipotizzando di aumentare del 10% il valore di drag ottenuti sui tubi.

$$F_{\perp, tubi+strutt} = 1.1 F_{\perp, tubi\ TOT}$$

Si riportano in tabella tutte le grandezze utili per il calcolo delle forze di drag.

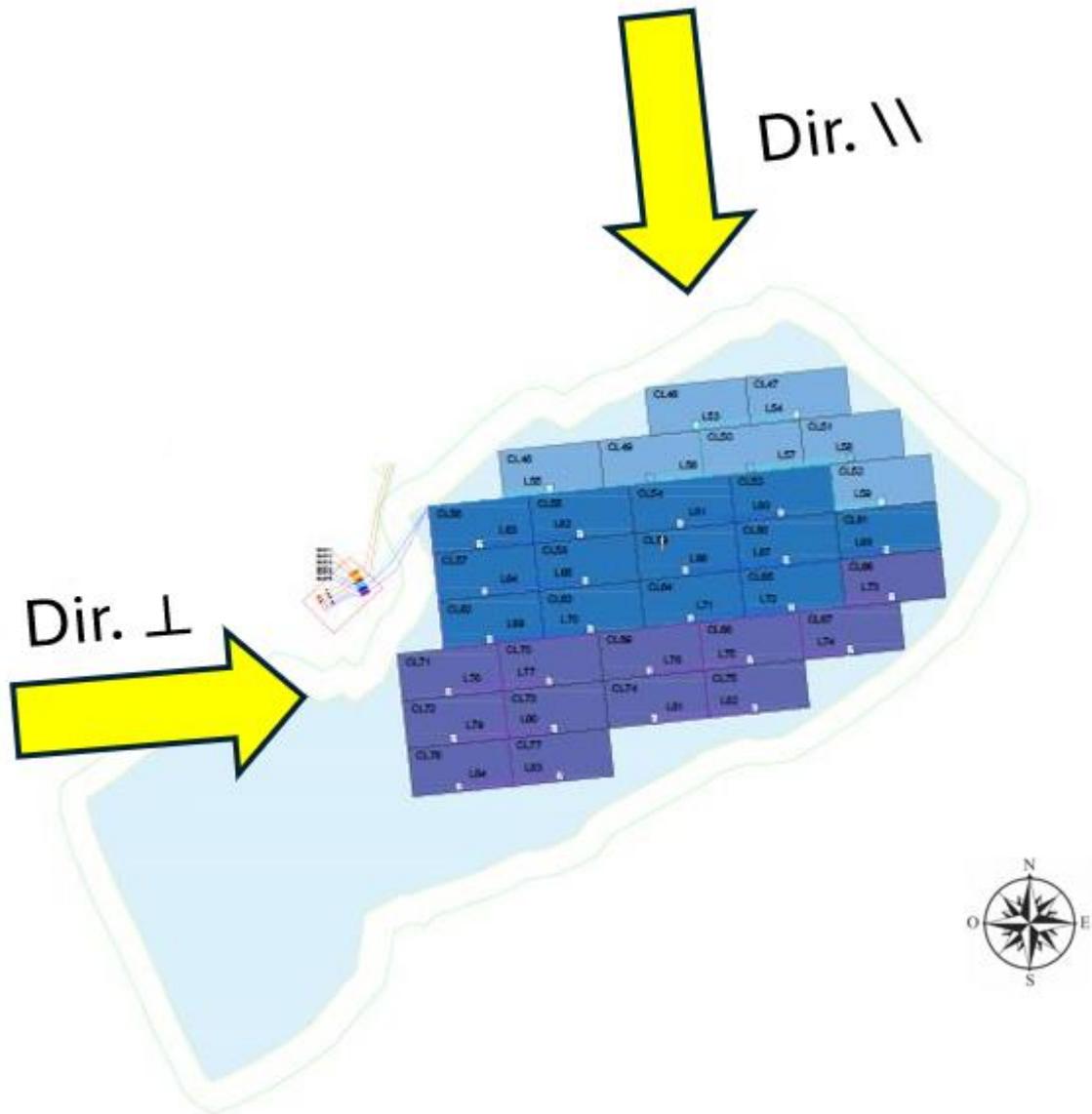
Grandezza	Valore (u.d.m)
$u_w, tubi$	12.63 (m/s)
ρ	1.25 (kg/m ³)
$C_F\ tubi$	2
$A_c, tubo$	129.6 (m ²)
η	0.32
$A_{sch. tubo}$	0.52 (m ²)
$n_{tubi\ sch}$	9370
$F_{\perp, tubi}$	25.85 (kN)
$F_{\perp\ tubi, sch}$	968.55 (kN)
$F_{\perp\ tubi\ TOT}$	994.39 (kN)
$F_{\perp, tubi+strutt}$	1093.83 (kN)

Il contributo di drag del vento in direzione ortogonale al colmo e agente sul piano dell'isola galleggiante, considerando il solo contributo dei tubi e della struttura di supporto dei pannelli fotovoltaici, corrisponde ad una spinta di circa 1094 (kN), circa 111.5 (t) di spinta.

2.1.2 Bacino Sud

La Figura 19 illustra il layout dell'impianto denominato bacino Sud.

Figura 19. Cluster bacino Sud



Le principali grandezze dell'impianto bacino Sud vengono riassunte nella seguente Tabella 4.

Tabella 4. Caratteristiche impianto bacino Sud

Tipologia	Descrizione	Quantità
Cluster	N° totale	32
	N° in prima colonna	8

	N° in prima riga	5.5
Pannelli	N° in prima colonna $n_{PFV, c}$	120
	N° totale $n_{PFV TOT}$	26496
	N° schermati dalla prima tettoia $n_{PFV sch.}$	26256
	N° per riga $n_{PFV, r}$	308
Tubi	N° in prima colonna $n_{tubi, c}$	40
	N° totale $n_{tubi TOT}$	6720
	N° schermati dalla prima colonna $n_{tubi sch.}$	6680
	N° per riga $n_{tubi, r}$	231

2.1.2.1 Pannelli fotovoltaici

La trattazione sui coefficienti aerodinamici utilizzati per lo studio dei pannelli fotovoltaici è identica a quanto visto precedentemente per il bacino Nord.

Per la prima colonna di pannelli, corrispondente alla prima tettoia, l'area considerata vale:

$$A_{c, PFV} = A_{PFV} * n_{PFV, c} = 538.87 \text{ (m}^2\text{)}$$

Dove:

$n_{PFV, c} = 240$ che corrispondono al numero di pannelli che si trovano in prima tettoia, nella condizione di vento ortogonale al colmo, nel bacino Sud.

I pannelli che sono soggetti a schermatura dalla prima tettoia $n_{PFV sch}$ sono pari al numero totale di pannelli del bacino Sud depurati dei pannelli presenti nella prima tettoia (come riportato in Tabella 4).

Si riportano in tabella tutte le grandezze utili per il calcolo delle forze di drag.

Grandezza	Valore (u.d.m)
$u_{w, PFV}$	14.37(m/s)
ρ	1.25 (kg/m ³)
c_F	1.4
$A_{c, PFV}$	538.87 (m ²)
η	0.32
$A_{PFV, sch}$	0.72 (m ²)
$n_{PFV sch.}$	26256
$F_{1 \perp PFV}$	97.36 (kN)

$F_{\perp PFV, sch}$	3408.55 (kN)
$F_{\perp PFV TOT}$	3505.92 (kN)
$F_{d, PFV}$	608.80 (kN)

Il contributo di drag del vento in direzione ortogonale al colmo e agente sul piano dell'isola galleggiante, considerando il solo contributo dei pannelli fotovoltaici, corrisponde ad una spinta di 609 (kN), circa 62 (t) di spinta.

2.1.2.2 Tubi e struttura

La trattazione sui coefficienti aerodinamici utilizzati per la valutazione del drag di tubi e strutture è identica a quanto visto precedentemente per il bacino Nord.

Per il primo tubo considerato, partendo dall'esterno del bacino Sud ed esaminando la prima colonna, l'area corrispondente vale:

$$A_{c, tubo} = A_{lat, tubo} * n_{tubi, c} = 1.62 * 40 = 64.8(m^2)$$

Dove:

$n_{tubi, c} = 40$ è pari al numero di tubi per colonna in ciascun cluster (5) moltiplicato per il numero di cluster soggetti al vento in direzione perpendicolare al colmo (8).

Dalla 2° fila di tubi in avanti, occorre considerare il fattore di schermatura $\eta=0.32$ per calcolare l'area oggetto alla schermatura. Al singolo tubo schermato corrisponde un'area:

$$A_{tubo sch} = 0.52 (m^2)$$

I tubi che risultano essere schermati dalla prima colonna $n_{tubi sch}$ sono pari al numero di tubi totali del bacino Sud depurati dei tubi presenti in prima colonna (come riportato in Tabella 4).

La forza di drag totale agente sui tubi e sulle strutture si ottiene ipotizzando di aggiungere del 10% il valore di drag ottenuti sui tubi.

Si riportano in tabella tutte le grandezze utili per il calcolo delle forze di drag.

Grandezza	Valore (u.d.m)
$u_{w, tubi}$	12.63 (m/s)
ρ	1.25 (kg/m ³)
$C_F tubi$	2
$A_{tubo, sud}$	64.8 (m ²)

η	0.32
$A_{tubo\ sch}$	0.52 (m ²)
$n_{tubi\ sch.}$	6680
$F_{1\perp, tubi}$	12.92(kN)
$F_{\perp\ tubi, sch}$	690.49 (kN)
$F_{\perp\ tubi\ TOT}$	703.41 (kN)
$F_{\perp, tubi+strutt}$	773.75 (kN)

Il contributo di drag del vento in direzione ortogonale al colmo e agente sul piano dell'isola galleggiante, considerando il solo contributo dei tubi e della struttura di supporto dei pannelli fotovoltaici, corrisponde ad una spinta di circa 774(kN), circa 79 (t) di spinta.

2.2 Forze di drag in direzione parallela al colmo

2.2.1 *Bacino Nord*

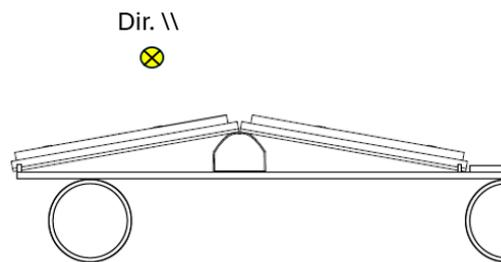
2.2.1.1 Pannelli fotovoltaici

Per il calcolo della forza di drag in questa direzione si considerano le seguenti componenti:

1. Contributo di drag sulla sezione frontale dei pannelli

In questo caso il grado di ostruzione generato dai pannelli, nella condizione di vento parallela al colmo, è relativamente basso in quanto vi sono delle aperture in cui il flusso può continuare imperturbato (Figura 20). Il solidity ratio calcolato è pari a $\Phi=0.3$ con un corrispettivo coefficiente $C_{F\parallel, PFV} = 1.7$ (Figura 18).

Figura 20. Dettaglio vista frontale zattera con direzione del vento parallela al colmo



La forza di drag parallela al colmo, agente frontalmente ai pannelli, viene calcolata moltiplicando l'area in sezione dei pannelli per la quantità di pannelli che si trovano nella prima riga. L'area da considerare nel calcolo risulta pari:

$$A_{r, PFV} = A_{PFV, sez} * n_{PFV, r} = 10.08 (m^2)$$

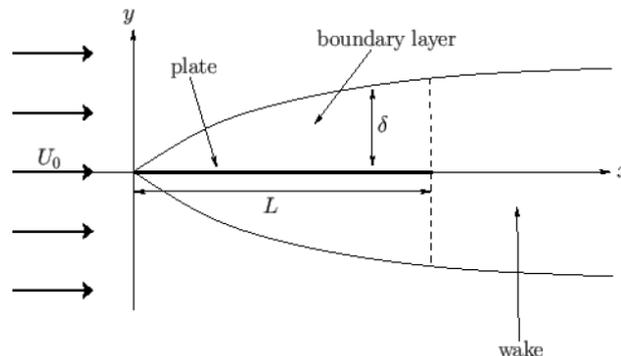
Dove:

$n_{PFV, r} = 280$ che corrispondono al numero di pannelli, nella condizione di vento parallela al colmo, ricavato moltiplicando il numero di pannelli presenti in ogni riga del cluster (56) per il numero di cluster considerati (5). La forza corrispondente vale:

$$F_{\parallel 1, PFV} = q_{PFV} * C_{F\parallel, PFV} * A_{r, PFV}$$

2. Forza di attrito lungo il pannello secondo la teoria della lastra piana immersa in un flusso tangenziale ad essa (Figura 21)

Figura 21. Flusso su lastra piana



In questo caso il coefficiente di drag per la lastra piana in regime turbolento (si considera conservativamente tutto regime turbolento poiché il coefficiente di drag per regime laminare è inferiore) è espresso dalla seguente formula:

$$C_T = \frac{0.074}{Re^{0.2}}$$

$$Re = \frac{u_w L}{\nu}$$

Dove:

C_T : Coefficiente drag

Re : Numero di Reynolds

u_w : Velocità massima del vento

ν : Viscosità cinematica dell'aria

L : Lunghezza del pannello nella direzione del vento

Grandezza	Valore (u.d.m)
L	2182 (mm)
ν	$1,45 \times 10^{-5}$ (m ² /s)
u_w, PFV	14.37 (m/s)
Re	2 162 437
C_T	0.004

La forza di drag parallela al colmo data dall' attrito lungo i pannelli, viene calcolata moltiplicando l'area dei pannelli per la quantità totale di pannelli presenti nell'impianto.

$$F_{\parallel 2, PFV} = q_{PFV} * C_T * A_{PFV} * n_{PFV TOT}$$

La forza totale agente sui pannelli fotovoltaici, in direzione parallela al colmo, è pari alla somma dei contributi visti in precedenza:

$$F_{\parallel TOT, PFV} = F_{\parallel 1, PFV} + F_{\parallel 2, PFV}$$

Grandezza	Valore (u.d.m)
$u_{w, PFV}$	14.37(m/s)
ρ	1.25 (kg/m ³)
$C_{F\parallel, PFV}$	1.7
$A_{r, PFV}$	10.08 (m ²)
$F_{\parallel 1, PFV}$	2212.50 (N)
C_T	0.004
$n_{PFV TOT}$	37260
$F_{\parallel 2, PFV}$	43206.55 (N)
$F_{\parallel TOT, PFV}$	45.42 (kN)

Il contributo di drag del vento in direzione parallela al colmo, considerando il solo contributo dei pannelli fotovoltaici, corrisponde ad una spinta di circa 45.4 (kN), circa 4.6 (t) di spinta.

2.2.1.2 Tubi e struttura

Si considerano i due seguenti contributi.

1. Forza di drag dovuta all'impatto frontale sulla sezione del tubo

L'area del tubo emerso considerata e il coefficiente aerodinamico corrispondente valgono:

$$A_{tubo, em} = 0.09 (m^2)$$

$$C_{F\parallel, tubi} = 1.9 \text{ (Figura 18, con } \Phi \text{ minimo, la faccia del tubo è flat)}$$

La forza di drag corrispondente vale:

$$F_{\parallel 1, tubi} = q_{tubi} * C_{F\parallel, tubi} * A_{tubo, em} * n_{tubi, r}$$

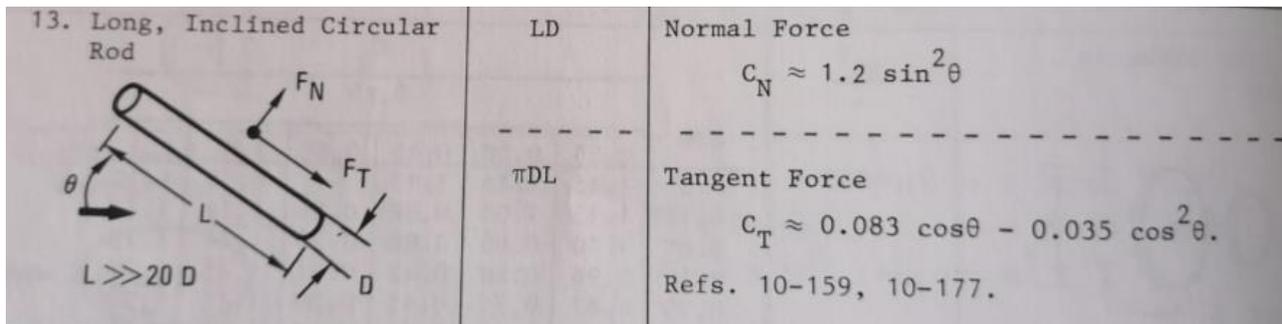
Dove:

$n_{tubi, r} = 210$ numero di colonne di tubi presenti nell'impianto Nord, corrispondenti al numero di file di tubi per cluster (42) moltiplicati per il massimo numero di cluster per riga (5).

2. Forza di attrito lungo il tubo

In questo caso si utilizza la formula del Blevins, rif. [5] riportata in Figura 22.

Figura 22. Coefficiente di forza tangenziale lungo un tubo, rif [5]



Il tubo viene considerato orizzontale (con $\theta=0^\circ$) e con un'area pari all'area laterale del tubo.

$$A_{tubo, //} = \pi * D_e * L * x = 4.67(m^2)$$

Dove:

$D_e = 0.4$ (m) diametro esterno del tubo di galleggiamento

$L = 6$ (m) corrispondente alla lunghezza di un tubo zattera

$x = 0.62$ corrispondente al rapporto tra circonferenza fuori dall'acqua e la circonferenza totale.

Il coefficiente di attrito, per la forza tangenziale, secondo la formula riportata in Figura 22, vale:

$$C_T = 0.083 \cos \theta - 0.035 \cos^2 \theta = 0.048$$

I tubi che risultano essere soggetti a drag sono pari al numero totale di tubi zattera installati nel bacino Nord.

$$F_{\parallel 2, tubi} = q_{tubi} * C_T * A_{tubo, //} * n_{tubiTOT}$$

$$F_{\parallel TOT, tubi} = F_{\parallel 1, tubi} + F_{\parallel 2, tubi}$$

$$F_{\parallel TOT, tubi+strutt} = 1.1 * F_{\parallel TOT, tubi}$$

Si riportano in tabella tutte le grandezze utili per il calcolo delle forze di drag.

Grandezza	Valore (u.d.m)
$u_w, tubi$	12.63 (m/s)
ρ	1.25 (kg/m ³)
$A_{tubo, em}$	0.09 (m ²)

$n_{tubi, r}$	210
$C_{F\parallel, tubi}$	1.9
$F_{\parallel 1, tubi}$	3590.06 (N)
c_T	0.048
$A_{tubo, \parallel}$	4.67 (m ²)
$n_{tubi TOT}$	9450
$F_{\parallel 2, tubi}$	211.14 (kN)
$F_{\parallel TOT, tubi}$	214.99 (kN)
$F_{\parallel TOT, tubi+strutt}$	236.49 (kN)

Il contributo di drag del vento in direzione parallela al colmo e agente sul piano dell'isola galleggiante, considerando il solo contributo dei tubi e della struttura di supporto dei pannelli fotovoltaici, corrisponde ad una spinta di circa 237(kN), circa 24.1 (t) di spinta.

2.2.2 **Bacino Sud**

2.2.2.1 Pannelli fotovoltaici

Il calcolo della forza di drag agente sui pannelli in direzione parallela al colmo viene ripetuto come visto in precedenza nel bacino Nord.

1. Contributo di drag sulla sezione frontale dei pannelli

L'area di interesse per i pannelli esposti al vento parallelo al colmo viene calcolata come:

$$A_{r, PFV} = A_{PFV, sez} * n_{PFV, r} = 11.09 (m^2)$$

Dove:

$n_{PFV, r} = 308$ corrisponde al numero di pannelli, ricavati moltiplicando il numero di pannelli presenti in ogni riga del cluster (56) per il numero di cluster considerati (5.5).

La forza di drag corrispondente vale:

$$F_{\parallel 1, PFV} = q_{PFV} * C_{F\parallel, PFV} * A_{r, PFV}$$

Il valore del coefficiente aerodinamico del vento agente sulla sezione laterale dei pannelli risulta invariato e pari al valore calcolato in precedenza, $C_{F\parallel, PFV} = 1.7$.

2. Contributo di drag di attrito sui pannelli

La forza di drag parallela al colmo data dall'attrito lungo i pannelli, viene calcolata con la seguente formula, che agisce su tutti i pannelli dell'impianto.

$$F_{\parallel 2, PFV} = q_{PFV} * c_T * A_{PFV} * n_{PFV TOT}$$

I tubi che risultano essere soggetti a drag sono pari al numero totale di tubi zattera installati nel bacino Sud.

Il coefficiente aerodinamico tangenziale c_T resta immutato in quanto non varia né la geometria né le condizioni ambientali.

Si riportano in tabella i dati necessari al calcolo.

Grandezza	Valore (u.d.m)
$u_{w, PFV}$	14.37 (m/s)
ρ	1.25 (kg/m ³)
$C_{F\parallel, PFV}$	1.7

$A_{r, PFV}$	10.08 (m ²)
$F_{\parallel 1, PFV}$	2433.75 (N)
C_T	0.004
$n_{PFV TOT}$	26496
$F_{\parallel 2, PFV}$	30.72 (kN)
$F_{\parallel TOT, PFV}$	33.16(kN)

Il contributo di drag del vento in direzione parallela al colmo, considerando il solo contributo dei pannelli fotovoltaici, corrisponde ad una spinta di circa 33 (kN), circa 3.4 (t) di spinta.

2.2.2.2 Tubi e struttura

1. Contributo forza di drag dovuta all’impatto frontale sulla sezione del tubo

La formula per calcolare il contributo di drag sulla sezione dei tubi e struttura vale:

$$F_{\parallel 1, tubi} = q_{tubi} * C_{F\parallel, tubi} * A_{tubo, em} * n_{tubi, r}$$

Anche in questo caso, per il vento agente in direzione parallelo al colmo e agente sui tubi e struttura, il coefficiente aerodinamico $C_{F\parallel, tubi}$ e l’area del tubo in sezione $A_{tubo, em}$ restano invariati.

Il numero di tubi investiti dal vento nel bacino Sud corrispondono a:

$n_{tubi, r} = 231$ pari al numero di colonne di tubi presenti nel bacino Sud, corrispondenti al numero di file di tubi per cluster (42) moltiplicati per il massimo numero di cluster per riga (5.5).

2. Contributo di attrito lungo i tubi

La formula per il calcolo dell’attrito lungo i tubi vale:

$$F_{\parallel 2, tubi} = q_{tubi} * C_T * A_{tubo, //} * n_{tubi, TOT}$$

Anche in questo caso, per il vento agente in direzione parallelo al colmo e agente sui tubi e struttura, il coefficiente aerodinamico C_T e l’area del tubo in sezione $A_{tubo, //}$ restano invariati.

Il numero di tubi investiti dal vento nel bacino Sud corrispondono a:

$n_{tubi, TOT} = 6720$ pari al numero totale di tubi presenti nel bacino Sud.

Si riportano in tabella tutte le grandezze utili per il calcolo delle forze di drag.

Grandezza	Valore (u.d.m)
$u_w, \text{ tubi}$	12.63 (m/s)
ρ	1.25 (kg/m ³)
$A_{\text{tubo}, em}$	0.09 (m ²)
$n_{\text{tubi}, r}$	231
$C_{F\parallel, \text{ tubi}}$	1.9
$F_{\parallel 1, \text{ tubi}}$	3949.07 (N)
c_T	0.048
$A_{\text{tubo}, \parallel}$	4.67 (m ²)
$n_{\text{tubi}, TOT}$	6720
$F_{\parallel 2, \text{ tubi}}$	150.33 (kN)
$F_{\parallel TOT, \text{ tubi}}$	154.28 (kN)
$F_{\parallel TOT, \text{ tubi+strutt}}$	169.71 (kN)

Il contributo di drag del vento in direzione parallela al colmo e agente sul piano dell'isola galleggiante, considerando il solo contributo dei tubi e della struttura di supporto dei pannelli fotovoltaici, corrisponde ad una spinta di circa 170 (kN), pari a 17.3 (t) di spinta.

3. RISULTATI

3.1.1 Bacino Nord

$$F_{\perp TOT} = F_{d, PFV} + F_{\perp, tubi+strutt} = 1956.79 \text{ (kN)}$$

$$F_{\parallel TOT} = F_{\parallel TOT, PFV} + F_{\parallel TOT, tubi+strutt} = 281.91 \text{ (kN)}$$

Condizione di vento	Forze di drag (t)		
	Sui PFV	Su tubi e struttura	Totali
Perpendicolare al colmo dei PFV (\perp)	88.0	111.5	199.5
Parallelo al colmo dei PFV (\parallel)	4.6	24.1	28.7

3.1.2 Bacino Sud

$$F_{\perp TOT} = 1382.50 \text{ (kN)}$$

$$F_{\parallel TOT} = 202.87 \text{ (kN)}$$

Condizione di vento	Forze di drag (t)		
	Sui PFV	Su tubi e struttura	Totali
Perpendicolare al colmo dei PFV (\perp)	62.1	78.9	141
Parallelo al colmo dei PFV (\parallel)	3.4	17.3	20.7

4. ANALISI DATI DI BACINO

Dall'analisi della batimetria fornita risulta evidente come la conformazione dei due bacini sia abbastanza simile.

Presentano entrambi, nella parte che verrà utilizzata per l'installazione dell'impianto, delle zone perimetrali con una pendenza più pronunciata, maggiore mediamente per il bacino Sud. La parte centrale, più profonda raggiunge circa i 20 metri con un fondo abbastanza regolare intervallato da alcuni rilievi di circa 2 o 3 metri.

La profondità media nella zona perimetrale è nel range dei 5-6 metri per entrambi i bacini.

Per procedere alla progettazione del sistema di ormeggio è consigliata una nuova campagna di rilevazione batimetrica unita ad un'analisi dei primi metri della composizione e consistenza del fondo per consentire la scelta della tipologia di ormeggio più efficace.

Dalla conformazione del fondo si può ipotizzare che un ormeggio completamente subacqueo potrebbe impiegare l'utilizzo di corpi morti nella parte più profonda, mentre nelle zone meno profonde e più pendenti, dei sistemi di ancoraggio più adatti a questa conformazione, come ad esempio le screw anchor, mostrate in Figura 23.

Si precisa che se in seguito alle verifiche sul campo, si determinasse la non installabilità delle ancore a vite si potrà procedere utilizzando dei corpi morti opportunamente modificati per aumentare la tenuta su fondo scosceso.

Figura 23. Screw anchor



4.1 Bacino Nord

Profondità massima: 20 m

Conformazione: range di pendenza 8-13°

Fondo sabbioso / limaccioso (da confermare)

Figura 24. Batimetria bacino Nord

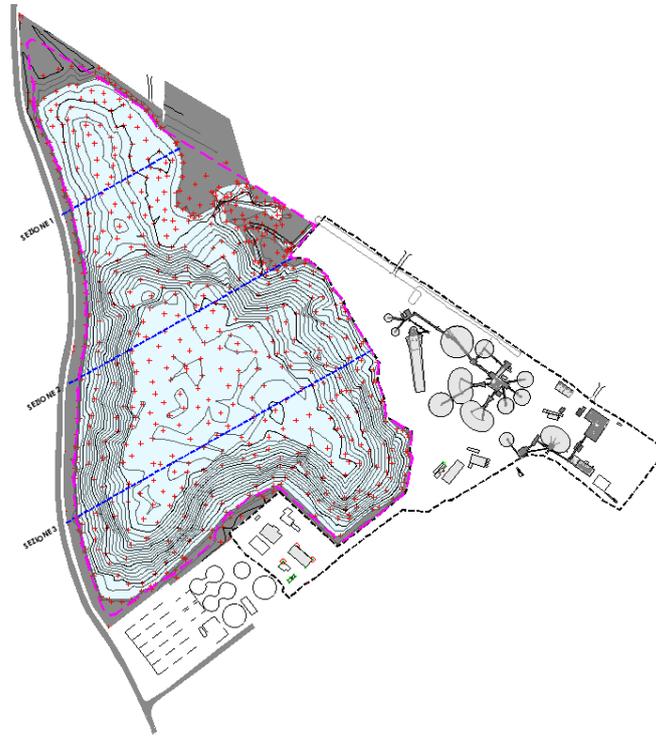


Figura 25. Batimetria sezione 1 bacino Nord

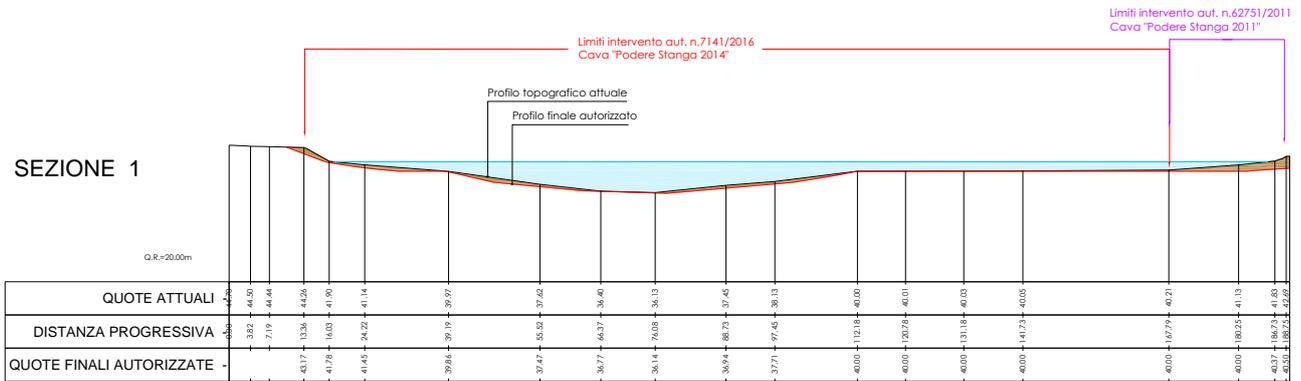
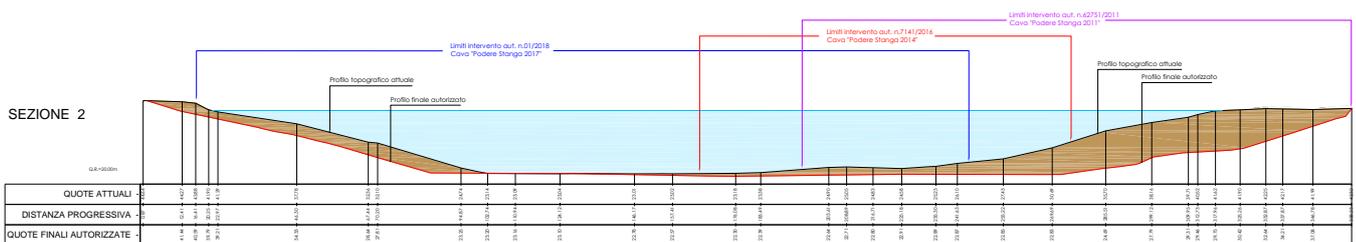


Figura 26. Batimetria sezione 2 bacino Nord



5. SISTEMA DI ORMEGGIO

Dati i carichi agenti sull'intera struttura (cfr. par.2) e analizzata la batimetria del fondale dei due specchi d'acqua (cfr par. 4) si può stimare il carico agente su un solo cluster come la quota parte divisa equamente sui singoli cluster.

Ne risulta un carico perpendicolare al colmo pari a 43.93 (kN) per il bacino Nord e 43.67 (kN) per il bacino Sud, per il carico parallelo al colmo invece i carichi sono 6.24 (kN) per il bacino Nord e 4.48 (kN) per il bacino Sud.

Viene preso quindi come riferimento per la determinazione dei carichi sulla struttura dovuti all'ormeggio un carico perpendicolare al colmo pari a 44 (kN) e parallelo al colmo pari a 6.24 (kN), considerando un cluster tipico.

5.1 Base di layout

Al fine di descrivere al meglio tutte le tipologie di ormeggio che saranno presenti nel layout finale complessivo si è scelto di studiare un caso tipo formato da un singolo cluster.

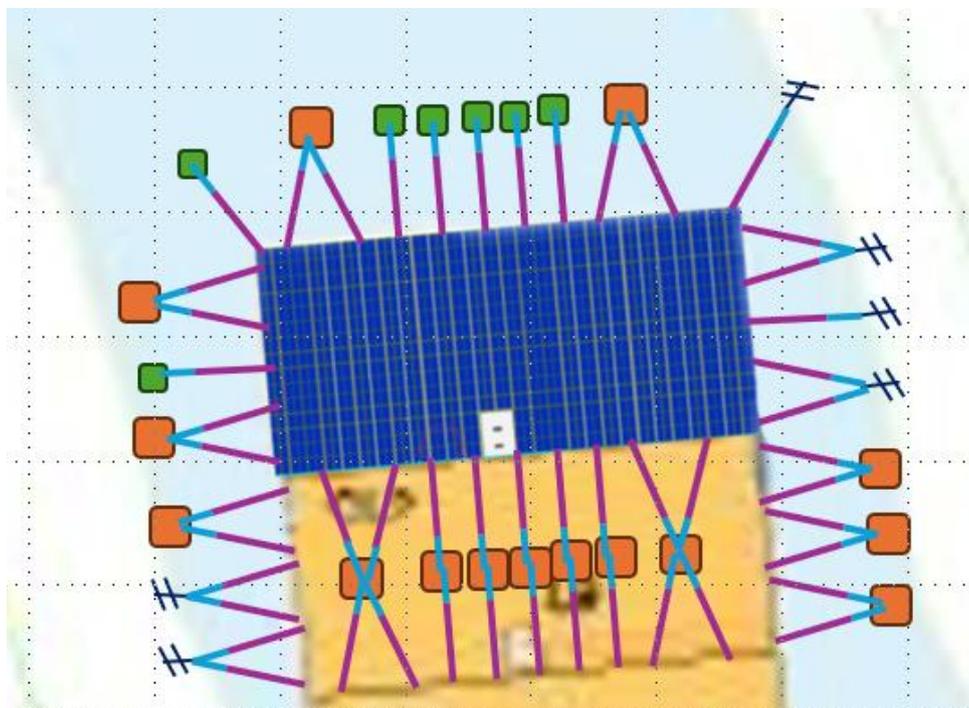
Questo comprende le seguenti tipologie di linee:

- singole collegate ad un corpo morto di dimensioni ridotte (in verde in Figura 29)
- doppie in cui due linee sono collegate ad un singolo corpo morto di dimensioni maggiori (in arancio)
- singole collegate ad una screw anchor
- doppie con 2 linee collegate alla stessa screw anchor

Per il collegamento degli altri cluster alcuni blocchi verranno condivisi e posizionati al di sotto delle isole (cluster) stesse.

Per ogni linea di ormeggio verrà previsto un sistema di regolazione manuale che permetta la registrazione della lunghezza della linea stessa in caso di necessità.

Figura 29. Schema tipo dell'ormeggio di un cluster



5.2 Modellazione

Per la modellazione del sistema di ormeggio è stato utilizzato il software OrcaFlex versione 11.1 (prodotto di Orcina Ltd.) per le analisi nel dominio del tempo. OrcaFlex è un software ad elementi finiti utilizzato principalmente per analizzare station-keeping e installazione di diverse strutture offshore. Tra le applicazioni chiave si ricorda la progettazione di riser flessibili e in acciaio, cavi elettrici e ombelicali, tubature, sistemi di ormeggio, sistemi trainati, sistemi ad energia rinnovabile e simulazione di operazioni marittime offshore.

L'analisi è mirata al dimensionamento delle cime di ormeggio, la scelta della composizione delle stesse, la stima dei carichi ai punti di attacco sulla struttura portante del sistema fotovoltaico galleggiante e per il dimensionamento dei punti di ormeggio (corpi morti o ancore a vite). Viene valutata anche la pretensione da dare alle linee, in quanto, visto il poco spazio a disposizione si è scelto di utilizzare un ormeggio di tipo teso (taut mooring).

Ogni linea è stata modellata a partire dal punto di ormeggio sul fondo del bacino come composta da cime intrecciate in poliestere (da 10 a 30 mm di diametro)

È stata valutato anche l'utilizzo del nylon per confrontare la risposta del sistema utilizzando un materiale a rigidità minore (maggiore elasticità).

5.2.1 *Contesto e condizioni ambientali*

Per quanto riguarda la densità dell'acqua è stato assunto il valore di 1000 kg/m^3 (acqua dolce)

La crescita di eventuale flora e fauna acquatica non è stata tenuta in considerazione delle condizioni ambientali rilevate nel punto d'installazione.

Le condizioni d'onda sono trascurabili e quindi non prese in considerazione, in quanto le dimensioni dei bacini non sono tali da permettere la generazione di moto ondoso.

Non essendoci affluenti o emissari, ed essendo i bacini alimentati da falde sotterranee, vengono trascurate le correnti in acqua.

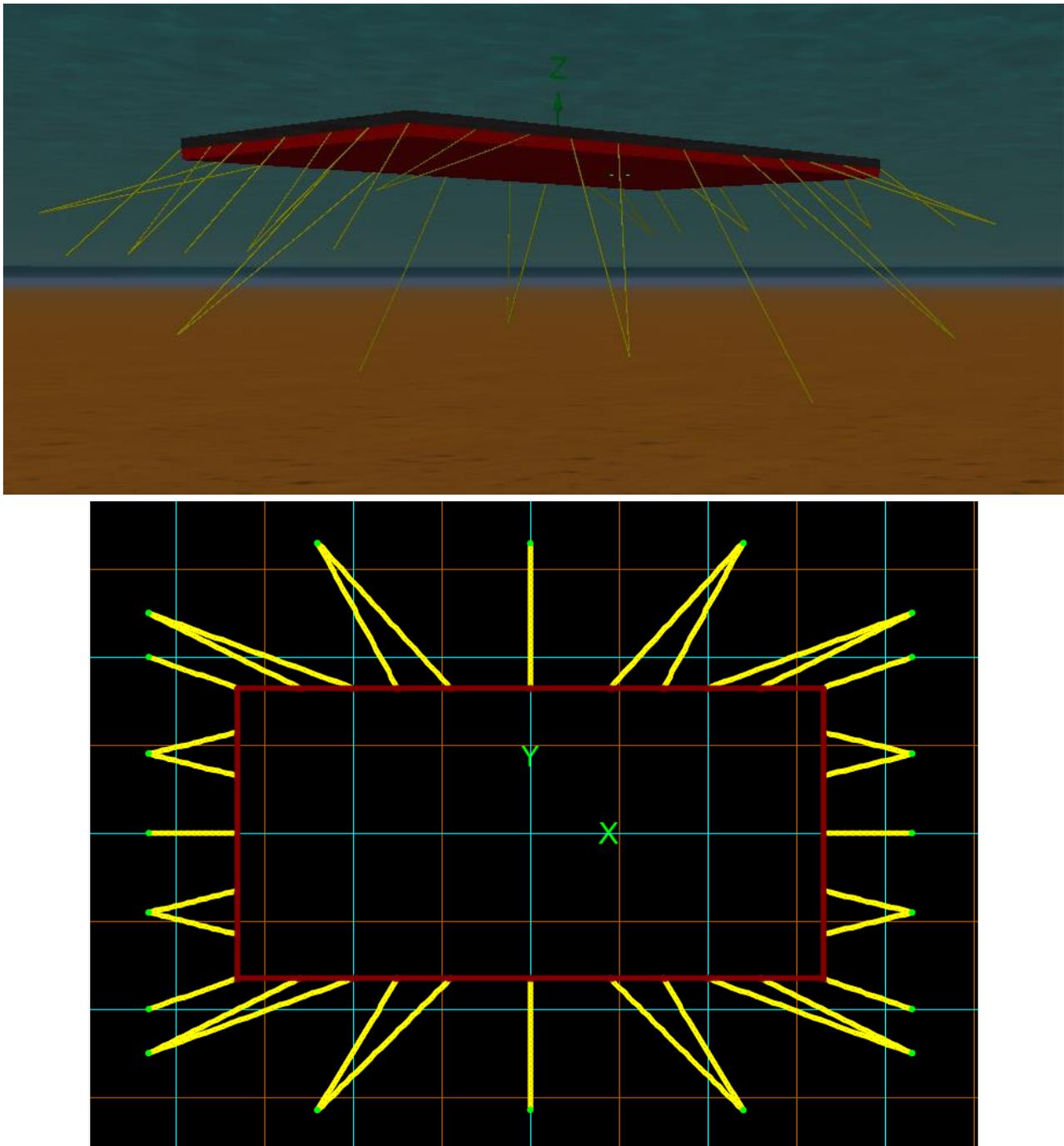
L'azione del vento viene presa in considerazione caricando il COG (centro di gravità) del sistema con i carichi descritti nell'introduzione di questo capitolo (cap.5).

Si considera un'escursione del livello dell'acqua di circa 1 metro causata dalla variazione dell'apporto idrico in falda nei diversi periodi dell'anno.

5.2.2 *Layout dell'ormeggio*

Lo schema del modello è mostrato in Figura 30. Si nota che i punti di aggancio sono stati scelti seguendo la conformazione tipica del bacino, con i punti più vicini alla battigia a batimetria minore (intervallo da 6 a 10m), mentre i punti centrali, posti sui lati più lunghi della struttura del cluster a batimetria maggiore (tra i 18 e i 23m).

Figura 30. Schema modello Orcaflex



5.2.3 Risultati

Dalle analisi effettuate si è ottenuto un dimensionamento che prevede l'utilizzo di cime di poliestere aventi le seguenti caratteristiche:

Materiale	Poliestere
Diametro	20 (mm)
Densità	0.58 (kg/m)
Rigidezza assiale	436 (kN)
Carico di rottura	270-310 (kN)

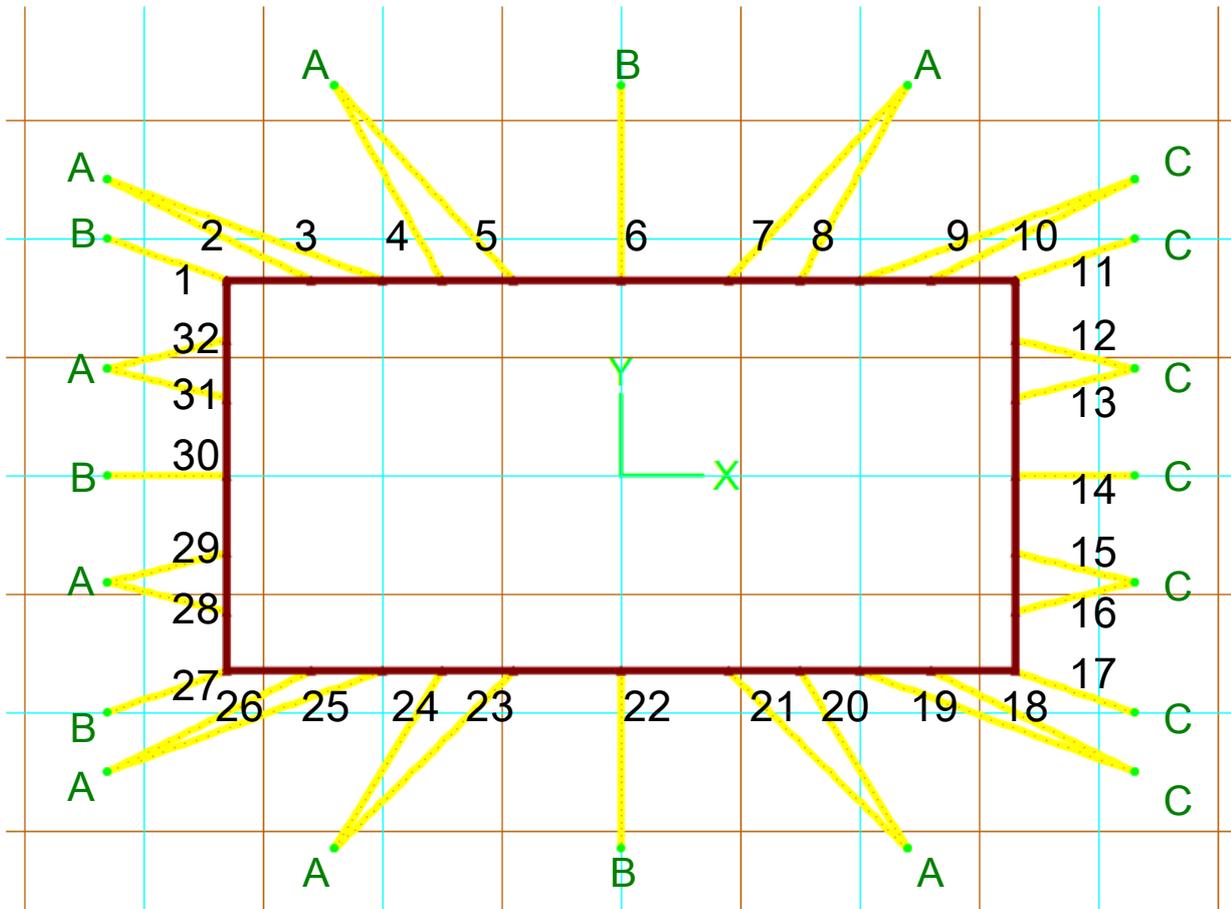
La scelta della cima è stata dettata soprattutto dalla sua rigidezza, indispensabile per limitare al massimo gli spostamenti della struttura galleggiante.

Le linee sono denominate come mostrato in Figura 31, in ordine progressivo in nero partendo dalla linea in alto a sinistra e proseguendo in senso orario.

I punti di ancoraggio (in verde) hanno tre tipologie:

- A) Punto di ancoraggio doppio, con corpo morto da 5.3 ton (2.3 m³ peso in acqua 3 ton)
- B) Punto di ancoraggio singolo con corpo morto da 2.6 ton (1.15 m³ peso in acqua 1.5 ton)
- C) Punto di ancoraggio con screw anchor (load capacity 3 ton)

Figura 31. Denominazione linee di ormeggio e punti ancoraggio



La pretensione delle linee è stata impostata a 500 (N), per compensare in parte la variazione di livello del bacino ed evitare regolazioni frequenti.

Lo spostamento massimo, nella configurazione studiata risulta essere al di sotto dei 0.2 (m) con il massimo carico di vento.

Per quanto riguarda i carichi sulle singole linee si è ottenuto un valore al di sotto di 5143 (N) come mostrato in Figura 32 e Tabella 5.

Si nota inoltre che il carico si distribuisce in maniera distribuita sulle linee poste a sinistra della mezzeria della piattaforma galleggiante e che le linee inclinate posizionate sui lati lunghi della struttura contribuiscono in maniera rilevante alla tenuta in posizione della struttura.

Figura 32. Carichi massimi per singola linea

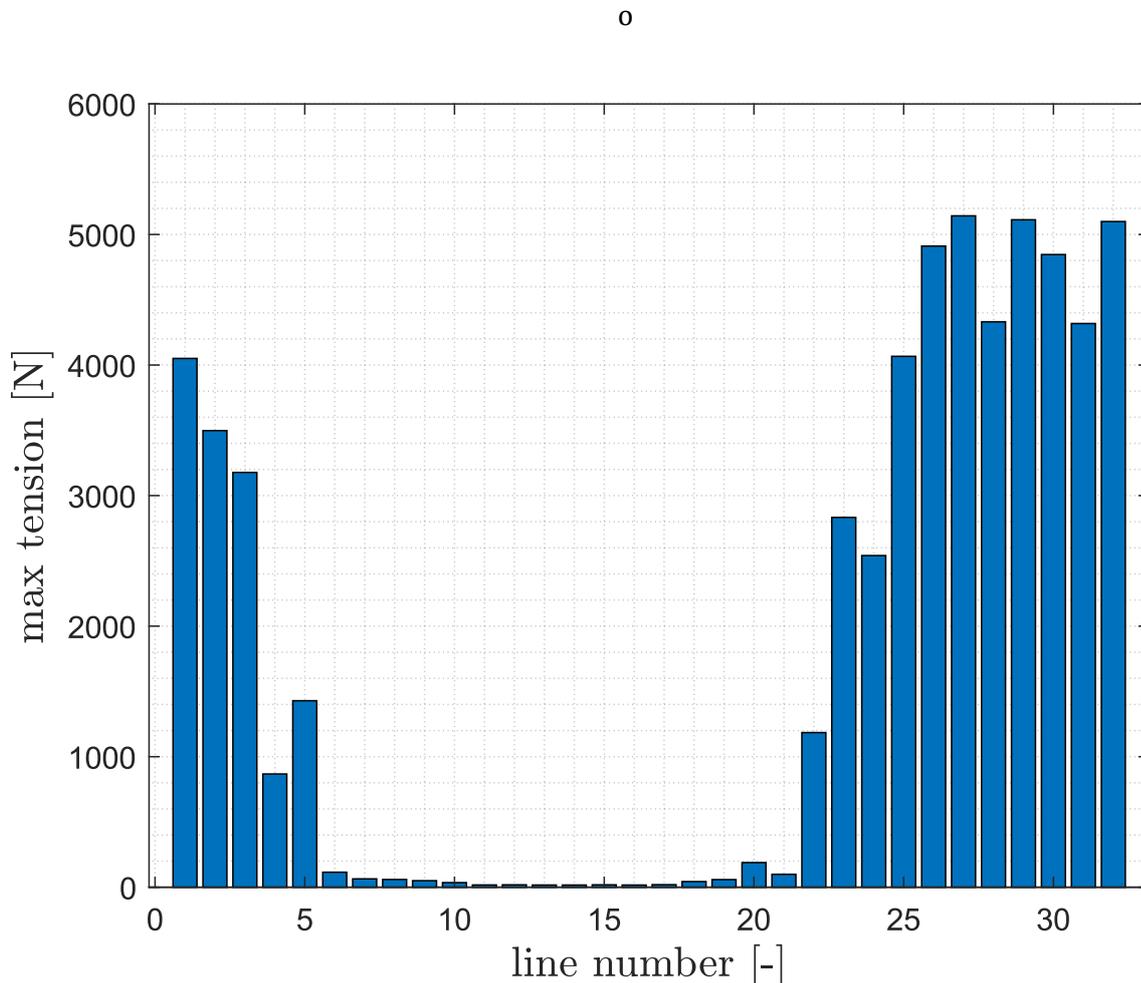


Tabella 5. Carichi massimi per singola linea

Line number	Max tension [N]	Line length [m]	Pretension [N]	Fairlead position [m]			Anchor position [m]		
				x	y	z	x	y	z
1	4051	14,57	500	-33	16,5	0	-43	20	-10
2	3498	19,93	500	-26	16,5	0	-43	25	-6
3	3177	25,24	500	-20	16,5	0	-43	25	-6
4	867	26,02	500	-15	16,5	0	-24	33	-18
5	1429	28,66	500	-9	16,5	0	-24	33	-18
6	115	28,31	500	0	16,5	0	0	33	-23
7	64	28,66	500	9	16,5	0	24	33	-18
8	59	26,02	500	15	16,5	0	24	33	-18
9	50	25,24	500	20	16,5	0	43	25	-6
10	35	19,93	500	26	16,5	0	43	25	-6
11	17	12,18	500	33	16,5	0	43	20	-6
12	18	11,93	500	33	11,5	0	43	9	-6
13	17	11,93	500	33	6,5	0	43	9	-6
14	17	11,66	500	33	0	0	43	0	-6
15	18	11,93	500	33	-6,5	0	43	-9	-6
16	17	11,93	500	33	-11,5	0	43	-9	-6
17	20	12,18	500	33	-16,5	0	43	-20	-6
18	43	19,93	500	26	-16,5	0	43	-25	-6
19	58	25,24	500	20	-16,5	0	43	-25	-6
20	189	25,10	500	15	-16,5	0	24	-31,5	-18
21	99	27,82	500	9	-16,5	0	24	-31,5	-18
22	1185	27,46	500	0	-16,5	0	0	-31,5	-23
23	2833	27,82	500	-9	-16,5	0	-24	-31,5	-18
24	2541	25,10	500	-15	-16,5	0	-24	-31,5	-18
25	4067	25,24	500	-20	-16,5	0	-43	-25	-6
26	4911	19,93	500	-26	-16,5	0	-43	-25	-6
27	5143	14,57	500	-33	-16,5	0	-43	-20	-10
28	4331	14,36	500	-33	-11,5	0	-43	-9	-10
29	5113	14,36	500	-33	-6,5	0	-43	-9	-10
30	4846	14,14	500	-33	0	0	-43	0	-10
31	4318	14,36	500	-33	6,5	0	-43	9	-10
32	5099	14,36	500	-33	11,5	0	-43	9	-10

Il fattore di sicurezza risulta quindi superiore a 20 per le linee in polipropilene e pari a 3 per i corpi morti.

5.3 Modalità di installazione/cantierizzazione

Da primi sopralluoghi effettuati da una squadra di sub nel bacino Nord, si rileva che il fondo abbia uno strato superficiale di consistenza melmosa dai 10 ai 50 (cm) circa.

Durante l'installazione dei sistemi di ancoraggio, soprattutto nel caso dei corpi morti, è opportuno evitare il più possibile di portare in sospensione questo strato a bassa consistenza, in modo da compromettere il meno possibile la limpidezza dell'acqua. Questa situazione di intorbidimento dell'acqua potrebbe infatti produrre un impatto - diretto ed indiretto - sugli ecosistemi lacuali, con particolare riferimento all'ittiofauna e alla capacità di tali ecosistemi di svolgere le normali funzioni di fotosintesi (fitoplancton) e, conseguentemente, di ossigenazione delle acque

A tal fine si consiglia, durante il varo di corpi morti di eseguire la discesa dei blocchi, qualche metro prima di toccare il fondo a velocità estremamente limitata, in modo da non turbare il particolato in sospensione.

A causa della consistenza del primo strato di fondo, inoltre, si consiglia di terminare il posizionamento dei corpi morti circa un mese prima dell'installazione delle piattaforme galleggianti, lasciando dei pedagni per individuarli più facilmente in un secondo momento.

È probabile infatti che si verifichi una fase di assestamento dei blocchi, consistente in affondamento ed eventuale, anche se minima, traslazione. Questa misura permetterebbe di dare più stabilità al sistema di ormeggio evitando regolazioni nel breve periodo sulla lunghezza delle linee di ormeggio.

Per salvaguardare la zona di battigia, maggiormente frequentata dalla fauna ed interessata in alcuni tratti dallo sviluppo di vegetazione, si eviterà di installare gli ancoraggi entro la fascia di 20 (m) dal perimetro anche a livello sottomarino.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] **Norme Tecniche per le costruzioni, approvate con Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 (NTC 2018) e relativa Circolare 7 del 21/01/2019, Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018**
- [2] **DNVGL-RP-0584 Design, development and operation of floating solar photovoltaic systems, March 2021**
- [3] **DNV-RP-C205 Environmental Conditions and Environmental Loads**
- [4] **Eurocode EN 1991-1-4 General actions - Wind actions**
- [5] **R.D. Blevins - Applied fluid dynamics handbook**
- [6] **<https://esse1-gis.mi.ingv.it/> (19/05/2024)**
- [7] **Stucchi M., Meletti C., Montaldo V., Crowley H., Calvi G.M., Boschi E., 2011. Seismic Hazard Assessment (2003-2009) for the Italian Building Code. Bull. Seismol. Soc. Am. 101(4), 1885-1911. DOI:10.1785/0120100130.**
- [8] **AJ Simmons et al. "The ECMWF medium-range prediction models development of the numerical formulations and the impact of increased resolution". In: Mete-orology and atmospheric physics 40 (1989), pp. 28-60**
- [9] **Hans Hersbach. "The ERA5 Atmospheric Reanalysis." In: AGU fall meeting ab-stracts. Vol. 2016. 2016, NG33D-01**
- [10] **Hans Hersbach et al. "Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP". In: (2018)**
- [11] **<https://simc.arpae.it/dext3r/>**
- [12] **Decreto Legislativo n. 112 del 1998 e Decreto del Presidente della Repubblica n. 380 del 2001 - "Testo Unico delle Norme per l'Edilizia**
- [13] **RPB.SIA.R.07.a - Relazione geologica**