

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 1 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE

### Caratterizzazione meteomarina area di progetto

01	Emissione per Enti	Del Bianco	L.Nardi	P. Russo S. Scandale	Agosto 2024
00	Emissione Finale / per Enti	M. Cardellini	C. Pizzigalli	A. Consonni	30/10/2022
<b>Rev.</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Elaborato</b>	<b>Verificato</b>	<b>Approvato Autorizzato</b>	<b>Data</b>

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 2 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## INDICE

<b>1</b>	<b>GENERALITÀ</b>	<b>4</b>
	1.1 Inquadramento Generale	4
	1.2 Il Soggetto Proponente	9
<b>2</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>11</b>
	2.1 Introduzione	11
	2.2 Scopi e contenuti del documento	11
	2.3 Acronimi e abbreviazioni	12
	2.4 Unità di misura	12
<b>3</b>	<b>OBIETTIVI E METODOLOGIA</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>DATI METEOMARINI DI RIFERIMENTO</b>	<b>14</b>
	4.1 Dati di vento	15
	4.2 Dati di moto ondoso	15
	4.3 Dati mareografici	16
	4.4 Altri riferimenti	16
<b>5</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOGRAFICO</b>	<b>17</b>
	5.1 Ubicazione del Terminale di Porto Torres	17
	5.2 Caratteristiche e profondità all'Interno del Porto	17
	5.3 Fetch geografici ed efficaci	18
<b>6</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE METEOROLOGICA</b>	<b>23</b>
	6.1 Precipitazioni	23
	6.2 Temperatura e umidità dell'aria	23
	6.3 Pressione atmosferica	24
	6.4 Radiazione solare	25
	6.5 Temperatura del mare	26
	6.6 Salinità dell'acqua di mare	27
	6.7 Densità dell'acqua	27
<b>7</b>	<b>VENTO</b>	<b>28</b>
	7.1 Clima anemometrico a largo	28
	7.2 Clima anemometrico in costa	30
	7.3 Valori estremi della velocità del vento al largo e sottocosta	31
	7.4 NTC 2018 - Velocità del vento base di riferimento	32
<b>8</b>	<b>MOTO ONDOSO</b>	<b>33</b>
	8.1 Dati di moto ondoso in ricostruzione ERA5 Porto Torres	33
	8.2 Calibrazione degli eventi estremi di moto ondoso	38
	8.3 Confronto degli eventi sincroni al largo di Alghero	39
	8.4 Confronto degli eventi estremi asincroni al largo di Alghero	39
	8.5 Analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo	41
	8.6 Propagazione del moto ondoso da largo a riva	50
	8.7 Caratteristiche del moto ondoso in prossimità del punto di ormeggio	53
<b>9</b>	<b>VARIAZIONI DEL LIVELLO DEL MARE</b>	<b>56</b>
	9.1 Maree astronomiche e meteorologiche	56

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 3 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

<b>10</b>	<b>VALUTAZIONE DELLA TRACIMAZIONE</b>	<b>60</b>
10.1	Introduzione	60
10.2	Geometria della sezione trasversale di calcolo	61
10.3	Condizioni per il calcolo della portata di tracimazione	62
10.1	Calcolo della portata media di tracimazione secondo EuroTop	62
10.2	Calcolo del volume di tracimazione	64
10.3	Distribuzione spaziale della tracimazione a tergo del muro paraonde	65
10.4	Conclusioni	66
<b>11</b>	<b>CAMBIAMENTI CLIMATICI</b>	<b>67</b>
11.1	Variazioni a lungo termine dei livelli del mare a Porto Torres	67

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 4 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## 1 GENERALITÀ

### 1.1 Inquadramento Generale

La Società Snam Rete Gas ("SRG"), soggetta all'attività di direzione e coordinamento di Snam S.p.A. ("Snam"), una delle principali società di infrastrutture energetiche e principale TSO (Transport System Operator - gestore del sistema di trasporto gas) in ambito europeo, intende allestire nel porto industriale di Porto Torres (SS) un terminale di rigassificazione su un mezzo navale permanentemente ormeggiato ("Terminale") per consentire lo stoccaggio e la vaporizzazione di gas naturale liquefatto (GNL) per il suo trasferimento nella rete di trasporto di gas naturale a terra che sarà realizzata da Enura S.p.A., società soggetta anch'essa all'attività di direzione e coordinamento di Snam. Il Terminale è anche predisposto per svolgere servizi di Small Scale LNG attraverso il rifornimento di apposite navi metaniere "bunkering vessels".

Il Terminale sarà costituito da una unità navale di stoccaggio e rigassificazione flottante (Floating Storage Regasification Unit o "FSRU") con una capacità indicativa di stoccaggio di circa 140.000 m<sup>3</sup> di GNL e una capacità di rigassificazione nominale di circa 330.000 Sm<sup>3</sup>/h. La FSRU sarà ormeggiata a lungo termine (25 anni).

Il Progetto, inizialmente presentato da Snam (Rif. Prot. No. 245 del 29 Novembre 2022), prevedeva l'accosto della FSRU in corrispondenza della banchina carbonile in stretta adiacenza al molo di ormeggio in concessione a EP FiumeSanto. Le numerose interlocuzioni intercorse con le Autorità tecniche portuali nonché con gli organi del Comitato Tecnico Regionale (CTR), hanno fatto emergere l'opportunità di spostare la posizione del Terminale lungo la parte terminale del molo foraneo settentrionale realizzando una nuova struttura d'accosto permanente in cassoni che resterà a servizio del Porto.

Il progetto è parte integrante del più ampio progetto di "Collegamento Virtuale" (o "Virtual Pipeline") per l'approvvigionamento di gas naturale alla Sardegna, che Snam intende realizzare, anche attraverso le sue controllate e partecipate come Snam Rete Gas ed Enura, in coerenza a quanto disciplinato dall'art. 2 comma 4 e comma 5 del Decreto del Presidente del Consiglio dei ministri del 29 marzo 2022, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale numero 125 del 30 maggio 2022, avente ad oggetto "*Individuazione delle opere e delle infrastrutture necessarie al phase out dell'utilizzo del carbone in Sardegna e alla decarbonizzazione dei settori industriali dell'Isola*" (c.d. DPCM Sardegna).

Come indicato nell'art. 1 comma 1 del suddetto DPCM Sardegna, il progetto Virtual Pipeline si inserisce nell'ambito delle iniziative mirate a sostenere il rilancio delle attività produttive nella regione Sardegna, la decarbonizzazione dei settori industriali, la transizione energetica delle

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 5 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

attività produttive e il phase-out del carbone garantendo sia l'approvvigionamento di energia all'Isola a prezzi in linea con quelli del resto d'Italia che, assicurando l'attuazione degli obiettivi del PNIEC (Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima).

Il progetto Virtual Pipeline include lo sviluppo delle infrastrutture di trasporto e di rigassificazione di GNL necessarie a garantire la fornitura di gas naturale in Sardegna mediante l'utilizzo di navi spola (metaniere di piccola taglia o c.d. "shuttle carrier") tra i terminali di rigassificazione italiani regolati ed i futuri terminali di rigassificazione da realizzare in Sardegna. Lo spostamento di volumi fisici di GNL mediante navi spola sarà effettuato con modalità equiparate, anche ai fini tariffari, a quelle del trasporto di gas, che comunemente avviene attraverso un qualsiasi metanodotto del sistema nazionale di trasporto.

In tale contesto, gli shipper operanti nel sistema di trasporto gas nazionale potranno rendere disponibili volumi di gas in un qualsiasi punto di ingresso del sistema o al c.d. Punto di Scambio Virtuale (PSV), richiedendone a Snam Rete Gas la riconsegna in un punto di uscita in Sardegna. In questo modo, volumi di GNL immessi nel sistema presso i terminali di stoccaggio in continente, potranno essere intercambiabili, attraverso opportuni meccanismi di "swap", con equivalenti volumi di gas per i quali sia stata richiesta una riconsegna in Sardegna.

La disponibilità di gas naturale in Sardegna consentirà di avviare il processo di conversione a gas naturale di utenze civili e industriali, oggi ancora approvvigionate principalmente a carbone, olio combustibile, gasolio, GPL o aria propanata, con riduzione degli effetti sull'ambiente, dato che il gas naturale è un combustibile con basse emissioni inquinanti (annullamento sia di particolato (PM10) che di ossidi di zolfo (SOx), ed una considerevole riduzione degli ossidi di azoto (NOx) e, a titolo di esempio, circa -15% di CO2 rispetto al gasolio).

Il Terminale di rigassificazione di Porto Torres (art. 2 comma 4, del DPCM Sardegna) sarà il principale punto di approvvigionamento di gas naturale dei bacini di consumo della Città Metropolitana di Sassari nonché del segmento industriale, ed eventualmente termoelettrico, del Nord dell'Isola.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 6 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

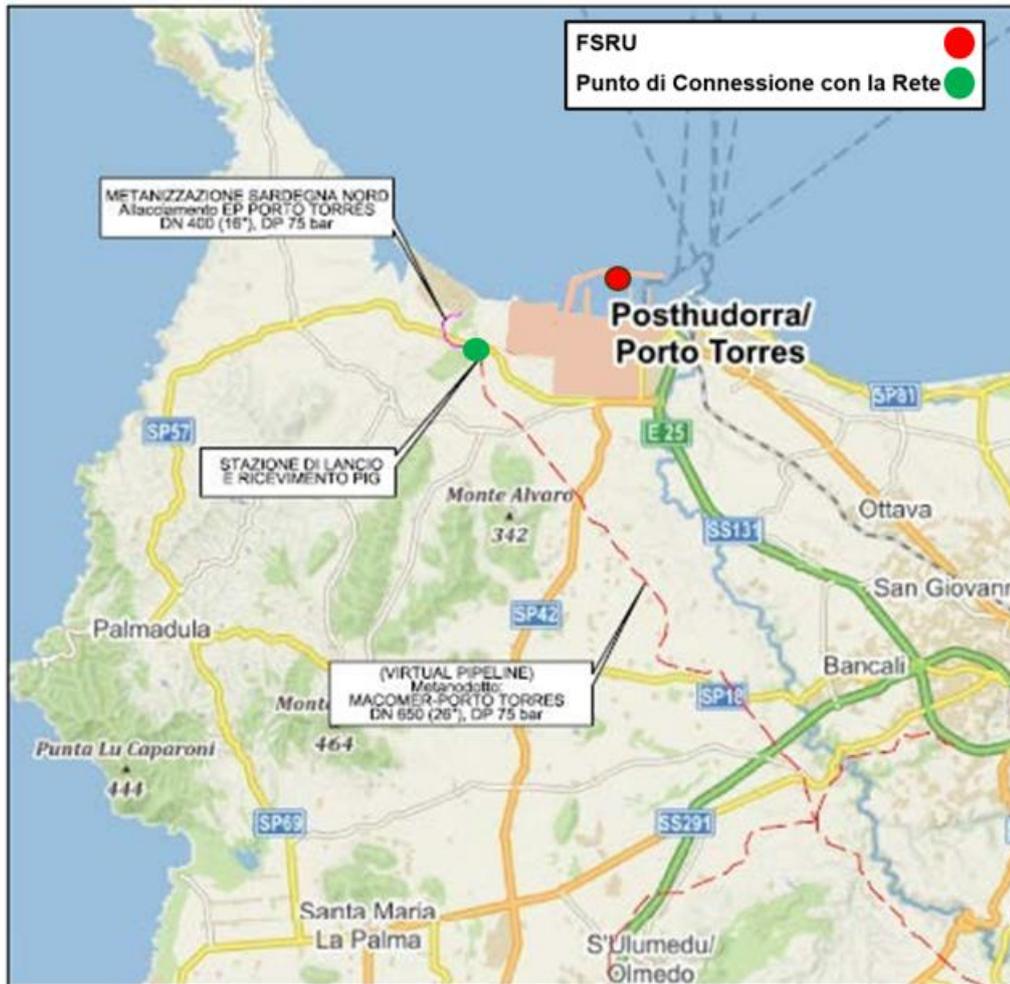


Figura 1-1 - Corografia con Rete Energetica Sardegna Tratto Nord e ubicazione della FSRU.

### 1.1.1 Terminale di Porto Torres

Il progetto (“Terminale di Porto Torres”) prevede la realizzazione di un terminale di ricezione, stoccaggio e rigassificazione di Gas Naturale Liquefatto (GNL) del tipo flottante (Floating Storage Regasification Unit o “FSRU”) all’interno del porto industriale di Porto Torres in Provincia di Sassari e relative opere connesse per la realizzazione del collegamento a terra con lo scopo di raggiungere la futura Dorsale Nord già autorizzata con Decreto VIA n. 373 del 05.12.2022.

Nella seguente figura si riporta un inquadramento dell’area con indicate le opere in progetto:

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 7 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

- Terminale FSRU;
- banchina di ormeggio;
- condotta sottomarina e relativo approdo;
- cavo elettrico a Media Tensione (MT).

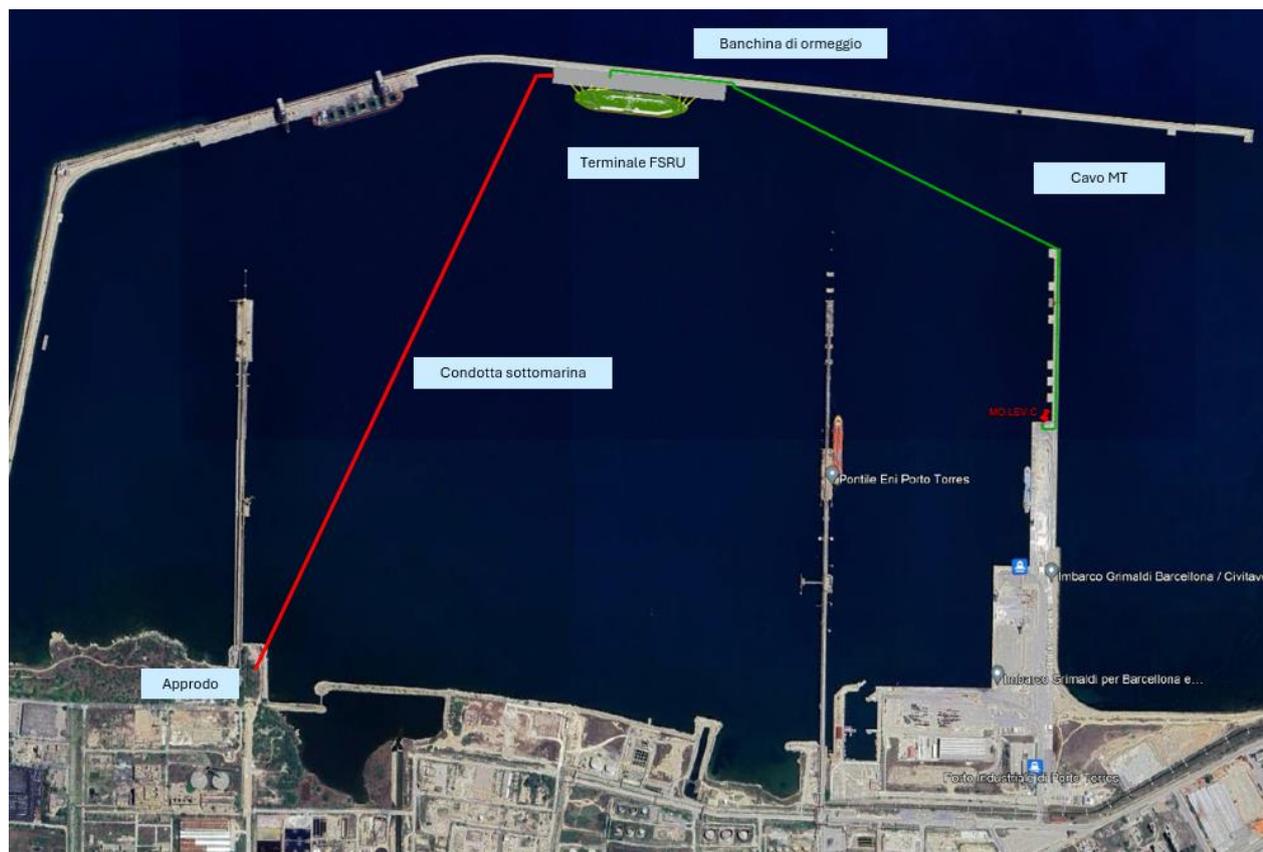


Figura 1-2 - Stralcio ortofoto con ubicazione del progetto in area portuale.

Il progetto del Terminale di Porto Torres, oggetto del presente Studio di Impatto Ambientale (SIA) sarà composto da:

- Una FSRU (Floating Storage and Regasification Unit) avente una capacità indicativa di stoccaggio pari a circa 140.000 m<sup>3</sup>, una capacità di rigassificazione di circa 330.000 Sm<sup>3</sup>/h e dimensioni pari a circa 290 m (lunghezza) x 48 m (larghezza)
- Una nuova banchina costituita da:
  - N.28 cassoni cellulari prefabbricati in c.a. zavorrati con materiale arido;

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 8 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

- Coronamento dei cassoni in cemento armato gettato in opera;
  - Impalcati di collegamento tra i cassoni con travi in c.a.p. e getti in opera di completamento;
  - Scanno di imbasamento dei cassoni in pietrame protetto da una mantellata in massi naturali;
- Gli impianti e le attrezzature da realizzarsi sulla nuova banchina est esistente costituiti da:
    - Sistema di scarico del gas vaporizzato dalla FSRU costituito da N. 2 bracci di scarico ed una condotta in acciaio che corre interrata fino al punto di intercettazione linea (PIL) anch'esso in banchina;
    - Sistema di ormeggio della FSRU;
    - Sistema antincendio costituito da un sistema di pompaggio, un anello di distribuzione ed una serie di monitori e cortine d'acqua;
    - Sistema di controllo ed emergenza per gli impianti di processo sulla nuova banchina;
    - Sistema di blowdown e sfiato di emergenza.
  - Un tratto di condotta sottomarina di lunghezza complessiva pari a circa 1670 m di cui 1300 m saranno all'interno di un microtunnel da realizzare come approdo costiero. La condotta a mare funge da collegamento tra il sistema di scarico del gas dalla FSRU e il punto di interfaccia con il tratto a terra della condotta. La condotta proseguirà a terra fino al Punto d'Intercetto, che identifica il punto di ingresso nella rete di trasporto del gas naturale a terra (Rete Energetica tratto nord, si veda la Figura 1.3), che non è oggetto del presente documento;
  - Un cavo elettrico di media tensione (MT) per l'alimentazione della banchina di ormeggio della FSRU;
  - Un cavo telecomando per collegamento con il dispacciamento a terra di SRG con tracciato in parallelo alla condotta sottomarina.

### 1.1.2 Opere Connesse

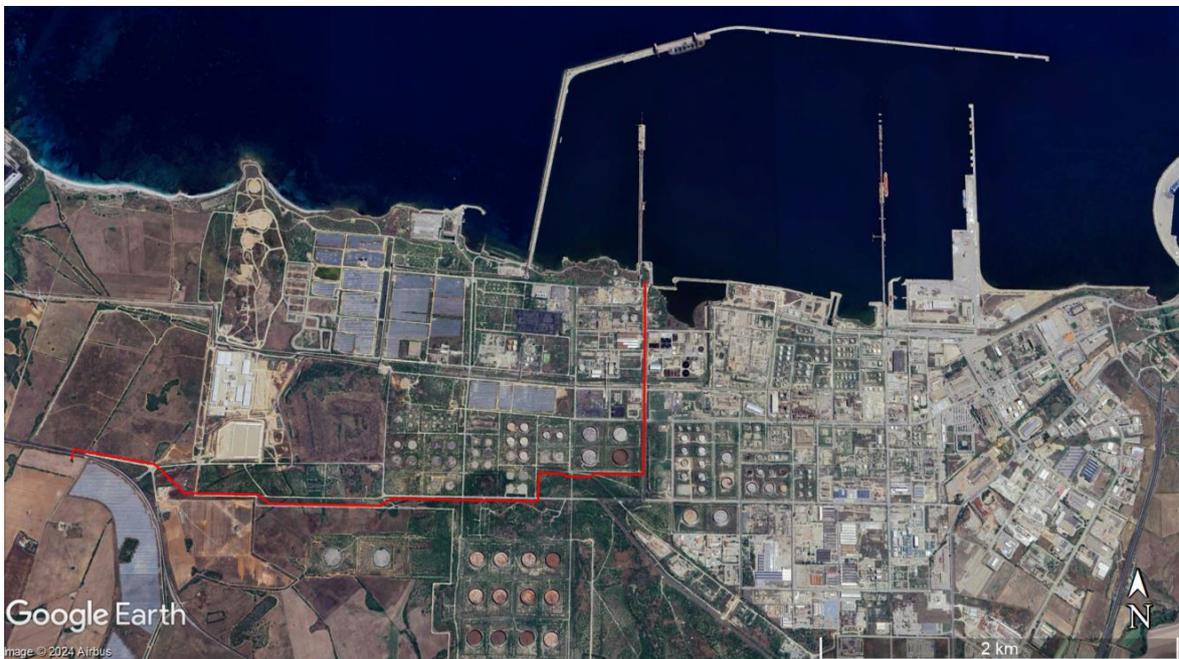
Si considerano opere connesse e oggetto della presente procedura di Valutazione di Impatto Ambientale, la Rete Energetica di Porto Torres di proprietà di Enura S.p.A. La Rete energetica

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 9 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

consentirà il collegamento del Terminale di Porto Torres. Quest'ultima a sua volta sarà connessa alle reti di distribuzione locali dei bacini di utenza della Città Metropolitana di Sassari, le principali utenze industriali del Nord dell'Isola ed eventualmente alle utenze termoelettriche.

La Valutazione di Impatto Ambientale della Rete Energetica di Porto Torres è riportata nel documento Doc. No. REL-SIA-E-13010 "Studio di Impatto Ambientale del Progetto Virtual Pipeline Sardegna – Rete Energetica tratto Nord – Metanodotto Collegamento FSRU di Porto Torres DN 500 (20"), DP 100 bar" Proponente: Enura S.p.A.



**Figura 1-3 - Stralcio ortofoto con Metanodotto Collegamento FSRU di Porto Torres  
DN 500 (20") DP 100 bar.**

L'opera, denominata "Virtual Pipeline Sardegna – Rete Energetica Tratto Nord - Collegamento FSRU di Porto Torres DN 500 (20")", DP 100 bar, di lunghezza pari a 4,689 km proposta da Enura ha come obiettivo quello di consentire il collegamento tra il Terminale di Porto Torres e la Rete energetica della Sardegna (progetto Metanizzazione Sardegna – tratto Nord, per il quale Enura ha già ottenuto il decreto di compatibilità ambientale (VIA) con provvedimento n. 373 del 05 Dicembre 2022).

## 1.2 Il Soggetto Proponente

Il Proponente del Progetto è la Società Snam Rete Gas ("SRG"), società soggetta all'attività di direzione e coordinamento di Snam S.p.A ("Snam").

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 10 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

Grazie a una rete sostenibile e tecnologicamente avanzata, Snam garantisce la sicurezza degli approvvigionamenti e gioca un ruolo di abilitatore nella transizione energetica. Oltre che in Italia, Snam è attiva, attraverso consociate internazionali, in Albania (AGSCo), Austria (TAG, GCA), Cina (Snam Gas & Energy Services), Francia (Teréga), Grecia (DESFA), Emirati Arabi Uniti (ADNOC Gas Pipelines) e Regno Unito (Interconnector UK).

Prima in Europa per estensione della rete di trasmissione (ca. 41.000 km) e capacità di stoccaggio (ca. 20 bcm) di gas naturale, è anche tra i principali operatori nella rigassificazione attraverso i terminali di Panigaglia (GNL Italia) e di Piombino (FSRU Italia), di cui è interamente proprietaria, e le partecipazioni nei rigassificatori italiani di Livorno (OLT) e Rovigo (Adriatic LNG), oltre che nel terminale di Revithoussa (DESFA) in Grecia.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 11 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## 2 INTRODUZIONE

### 2.1 Introduzione

Il presente documento costituisce la relazione sulla caratterizzazione meteomarina delle aree interessate dal progetto per i lavori di realizzazione delle opere civili relative alla nuova banchina per l'ormeggio di una FSRU, ubicata lungo la diga foranea di sopraflutto del porto industriale di Porto Torres (SS).

La zona dove è previsto l'ormeggio della FSRU (avente coordinate 4522540 mN, 1446565 mE GB fuso ovest) (Rif. Figura 2-1) è localizzata a ridosso della diga di sopraflutto a Ovest dell'imboccatura del porto industriale di Porto Torres.

La zona di ormeggio è prospiciente lo specchio acqueo portuale compreso tra il "pontile solidi" ed il "pontile liquidi". Le quote del fondale nell'area interessata dall'intervento sono mediamente di circa -21 m s.l.m.m (MSL).

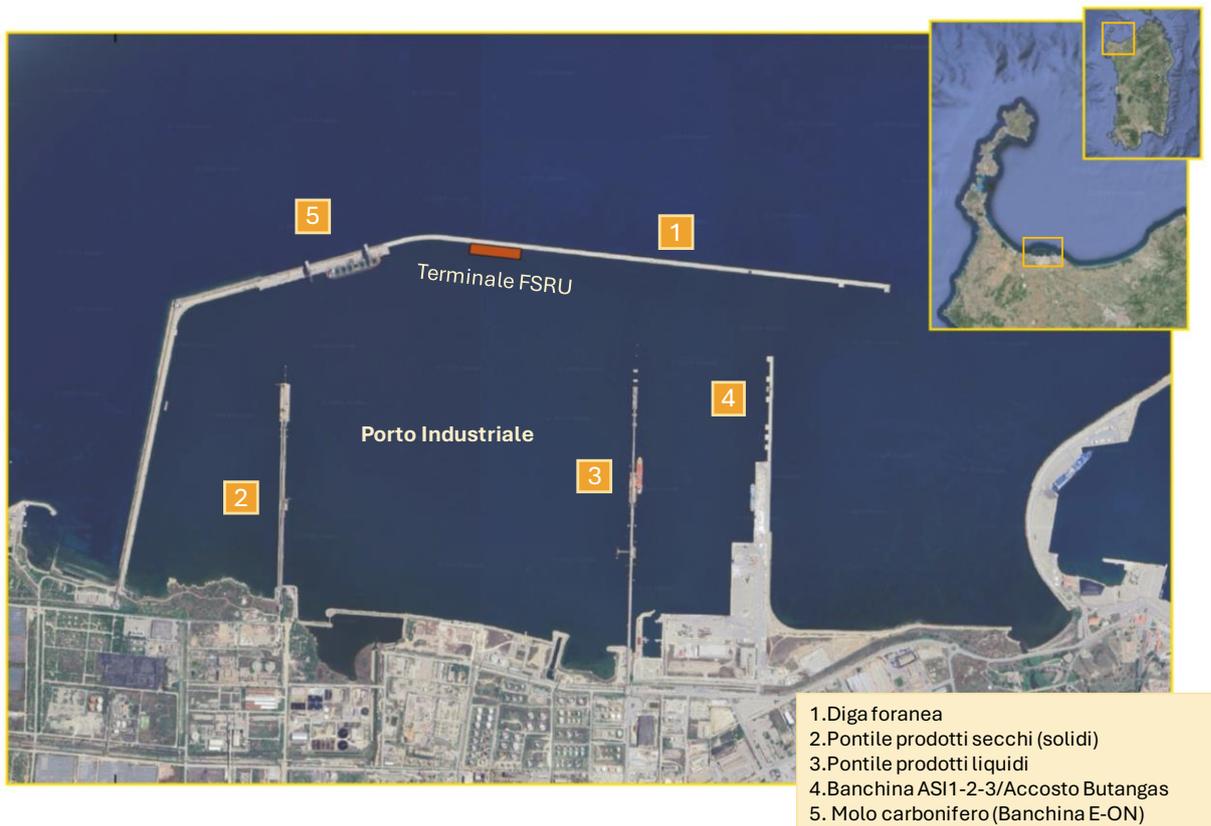


Figura 2-1. Localizzazione geografica del nuovo terminale FSRU (sagoma in rosso).

### 2.2 Scopi e contenuti del documento

Il presente documento fornisce la caratterizzazione meteomarina dell'area di progetto (vento, moto ondoso, livelli) necessaria per la progettazione delle opere e per la valutazione delle condizioni all'ormeggio della nave FSRU. Il documento fornisce inoltre una panoramica dei principali fattori ambientali di interesse (temperatura e umidità relativa dell'aria, temperatura e densità dell'acqua di mare, radiazione solare).

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 12 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## 2.3 Acronimi e abbreviazioni

Acronimo	Descrizione
FSRU	Floating Storage and Regasification Units
GNL	Gas Naturale Liquido
HAT	Highest Astronomical Tide (la più alta marea astronomica)
Hs o Hmo	Altezza d'onda significativa spettrale
Tp	Periodo di picco spettrale dell'onda
HAT	Highest Astronomical Tide (la più alta marea astronomica)
MHWS	Mean High Water Springs (media alte maree sizigiali)
MHWN	Mean High Water Neaps (media alte maree di quadratura)
MSL	Mean Sea Level (livello medio mare)
MLWS	Mean Low Water Springs (media basse maree sizigiali)
MLWN	Mean Low Water Neaps (media basse maree di quadratura)
LAT	Lowest Astronomical Tide (la più bassa marea astronomica)

## 2.4 Unità di misura

Le unità e simboli utilizzati nel presente rapporto sono conformi alle unità del Sistema Internazionale (unità SI).

Tutte le coordinate UTM sono espresse in metri con due (2) decimali.

**Tabella 2-1. Unità di misura utilizzate**

Grandezza	Unità di misura
Altezza delle precipitazioni	mm
Altezza d'onda	m
Densità	kg/m <sup>3</sup>
Massa	kg
Periodo d'onda	s
Pressione Atmosferica	hPa
Profondità del mare	m
Radiazione Solare	MJ/m <sup>2</sup>
Salinità	psu
Temperatura	°C
Velocità del vento	m/s

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 13 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

### 3 OBIETTIVI E METODOLOGIA

Gli obiettivi del presente studio sono quelli di definire le caratteristiche dei principali parametri meteorologici (moto ondoso, vento e variazioni del livello del mare) di interesse per la progettazione del nuovo terminale marittimo che accoglierà la nave FSRU.

Le analisi condotte hanno consentito di definire nella zona di interesse:

- le caratteristiche dei principali fattori ambientali di interesse (precipitazioni, temperatura e umidità relativa dell'aria, temperatura e densità dell'acqua di mare, radiazione solare);
- Il clima anemometrico e i valori estremi di vento per prefissati tempi di ritorno;
- il clima ondometrico e i valori estremi di moto ondoso al largo di Porto Torres per prefissati tempi di ritorno;
- i valori estremi di moto ondoso (onde corte, o di breve periodo) a ridosso della diga foranea, in prossimità dell'imboccatura portuale, ottenuti a seguito della propagazione sottocosta con un modello numerico;
- il grado di agitazione ondosa all'interno dello specchio acqueo portuale in corrispondenza dell'ormeggio della nave FSRU dovuta a condizioni di moto ondoso estreme (onde corte, o di breve periodo), valutato a seguito della propagazione del moto ondoso con un modello numerico di diffrazione - riflessione;
- le variazioni del livello medio marino indotte sia dalla marea astronomica che dalla marea meteorologica;

Lo studio si è posto inoltre l'obiettivo di fornire una valutazione delle problematiche connesse alla possibile tracimazione della diga foranea esistente. Seguendo la metodologia di calcolo indicata dal manuale EuroTop 2018 è stata effettuata una stima della portata e dei volumi di tracimazione attesi in occasione di stati di mare estremi.

Infine viene presentata una valutazione degli effetti dei cambiamenti climatici con particolare riferimento all'innalzamento atteso del livello del mare.

Tutti i risultati delle analisi condotte saranno oggetto di ulteriori approfondimenti nel corso dei successivi livelli di progettazione.

Per la redazione dello studio si è fatto riferimento ai più recenti dati di vento e moto ondoso ricostruiti in rianalisi dal Centro Meteorologico Europeo (ECMWF) nell'ambito del progetto Copernicus ERA5 che hanno permesso di effettuare analisi statistiche su un campione di dati molto esteso (1940-2022).

Sempre dal database Copernicus sono stati desunti i valori medi mensili della temperatura del mare e delle precipitazioni attese per il sito in esame.

Si è fatto riferimento alle misure di livello del mare, temperatura dell'aria, umidità relativa, pressione atmosferica eseguite dalla stazione mareografica situata nel Porto Torres facente parte della Rete Mareografica Nazionale (RMN) attualmente gestita dall'ISPRA.

È stata inoltre acquisita la serie storica delle misure di moto ondoso effettuate dalla boa ondometrica direzionale di Alghero facente parte della Rete Ondometrica Nazionale (RON) attualmente gestita dall'ISPRA. I dati di moto ondoso misurati a largo di Alghero sono stati utilizzati per calibrare le onde estreme a largo del sito in esame secondo quanto descritto nel seguito.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 14 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

#### 4 DATI METEOMARINI DI RIFERIMENTO

Per la redazione dello studio sono state prese in esame le fonti di dati maggiormente attendibili e attualmente disponibili per il sito in esame:

- dati di vento e di moto ondoso ricostruiti in ri-analisi dal 1940 al 2022 con cadenza oraria dal Centro Meteorologico Europeo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF) nell’ambito del progetto Copernicus - ERA5. Questi dati sono stati acquisiti sia per un punto posto a largo del sito in esame, sia per un punto posto a largo di Alghero;
- misure di moto ondoso direzionali eseguite a largo di Alghero effettuate dalla boa ondometrica direzionale di Alghero facente parte della Rete Ondometrica Nazionale (RON) gestita dall’ISPRA;
- misure mareografiche (variazioni del livello del mare) eseguite dal 2010 al 2023 dalla stazione mareografica situata nel porto civico di Porto Torres facente parte della Rete Mareografica Nazionale (RMN) attualmente gestita dall’ISPRA.

La posizione dei punti di ricostruzione e/o misurazione dei diversi dati di riferimento è riportata nella carta di Figura 4-1.

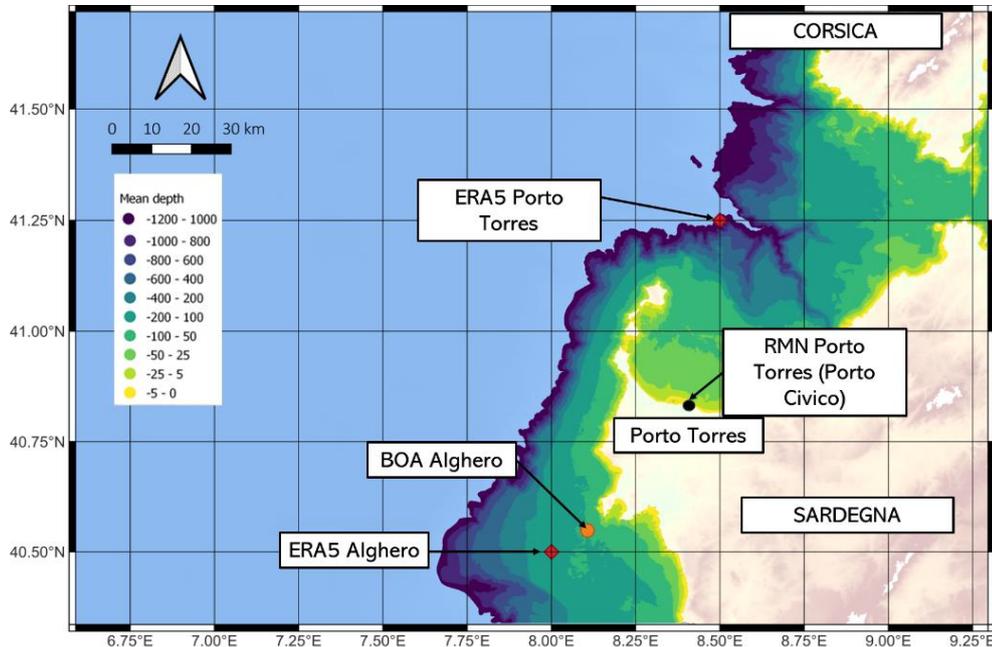
Il punto ERA5 Porto Torres è localizzato a circa 45 km a Nord di Port Torres ad una profondità di circa 1000 m.

Nella stessa figura è indicata la posizione del punto ERA5 Alghero, situato su fondali di profondità di circa 500 m, e della boa ondometrica di Alghero, situata su fondali di profondità pari a circa 85 m, facente parte della Rete Ondometrica Nazionale gestita dall’ISPRA. Come di seguito descritto, questi dati sono stati utilizzati per calibrare la serie storica di moto ondoso ERA5 Porto Torres.

Infine, è riportata la posizione della stazione mareografica di Porto Torres appartenente alla Rete Mareografica Nazionale gestita da ISPRA.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 15 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002



**Figura 4-1. Localizzazione geografica dei punti di ricostruzione di vento e moto ondoso ERA5 e delle stazioni di misura RON di Alghero e RMN Porto Torrese presi a riferimento per lo studio.**

#### 4.1 Dati di vento

Le caratteristiche principali dei dati anemometrici utilizzati sono riportate nella Tabella 4-1.

La serie storica oraria ricostruita in ri-analisi dall'ECMWF si estende per 82 anni.

I dati misurati a terra fanno riferimento alla stazione della rete mareografica italiana (RMN) di Porto Torres localizzata nel Porto Civico e ricoprono una finestra temporale di 14 anni.

**Tabella 4-1 - Dati anemometrici acquisiti.**

Rif	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
1	DATI RICOSTRUITI: ECMWF-ERA5 82-Year Wave Hindcast: <a href="https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview">https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview</a>	Dati anemometrici ricostruiti con modello  ERA5 Porto Torres	41.25°N 8.50°E	1940 2022
2	Rete Mareografica Nazionale (RMN - ISPRA) Stazione di Porto Torres <a href="http://dati.isprambiente.it/">http://dati.isprambiente.it/</a>	Dati anemometrici misurati  RMN Porto Torres	40.842°N 8.403°E	2010 2024

#### 4.2 Dati di moto ondoso

Le caratteristiche principali dei dati ondometrici utilizzati sono riportati nella Tabella 4-2.

Anche in questo caso le serie storiche orarie ricostruite in ri-analisi dall'ECMWF e da Copernicus si estendono per 82 anni dal 1940 al 2022.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 16 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 4-2. Dati ondametrici utilizzati**

Rif	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
3	DATI RICOSTRUITI: ECMWF-ERA5 63-Year Wave Hindcast: <a href="https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview">https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview</a>	Dati di moto ondoso ricostruiti con modello ERA5 Porto Torres	41.25°N 8.50°E	1940 2022
4	DATI RICOSTRUITI: ECMWF-ERA5 82-Year Wave Hindcast: <a href="https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview">https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview</a>	Dati di moto ondoso ricostruiti con modello ERA5 Alghero	40.50°N 8.00°E	1940 2022
5	Rete Ondametrica Nazionale (RON - ISPRA) BOA ONDAMETRICA ALGHERO	Dati di moto ondoso misurati dalla boa ondametrica BOA Alghero	40.548°N 8.107°E	1989 2014

### 4.3 Dati mareografici

Si riportano nella Tabella 4-3 le caratteristiche principali dei dati mareografici utilizzati.

La posizione geografica di riferimento della stazione mareografica del Porto Civico di Porto Torres, facente parte della Rete Mareografica Italiana (RMN) gestita dall'ISPRA è planimetricamente indicata in Figura 4-1.

**Tabella 4-3 Dati mareografici utilizzati**

Rif	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
6	Rete Mareografica Nazionale (RMN - ISPRA) Stazione di Porto Torres <a href="http://dati.isprambiente.it/">http://dati.isprambiente.it/</a>	Dati mareografici misurati	40.842°N 8.403°E	2010 2023

### 4.4 Altri riferimenti

Rif	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
7	Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)	Precipitazioni medie mensili	Porto Torres	1991 2021
8	Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)	Temperatura superficiale del mare, medie mensili	41.25°N 8.50°E	1979 2022
9	Regione Sardegna (ARPAS)	Mappe di radiazione solare	Regione Sardegna	2023

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 17 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## 5 INQUDRAMENTO GEOGRAFICO

### 5.1 Ubicazione del Terminale di Porto Torres

Il porto industriale di Porto Torres è situato lungo la costa settentrionale della Sardegna all'interno del Golfo dell'Asinara, a circa 3 km dall'omonimo centro abitato, 20 km da Sassari e 30 km da Alghero.

La diga foranea protegge lo specchio acqueo portuale dagli stati di mare prevalenti che, considerata la protezione offerta dall'Isola dell'Asinara nei confronti del moto ondoso proveniente da maestrale, si presentano generalmente da Nord-NordEst.

La FSRU sarà ormeggiata all'interno del Porto Industriale di Porto Torres, presso una nuova struttura di accosto dedicata (avente coordinate 446541.00 m E, 4522531.00 m N) posta a ridosso della diga foranea.



Figura 5-1. Inquadramento geografico del sito di Porto Torres con indicazione del settore di traversia principale.

### 5.2 Caratteristiche e profondità all'Interno del Porto

Attualmente il porto presenta una profondità massima di circa 21.5 m all'imboccatura mentre il nuovo accosto identificato per l'ormeggio della FSRU ha una profondità compresa tra 20 m e i 20.5 m, come riportato nella figura sottostante.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 18 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

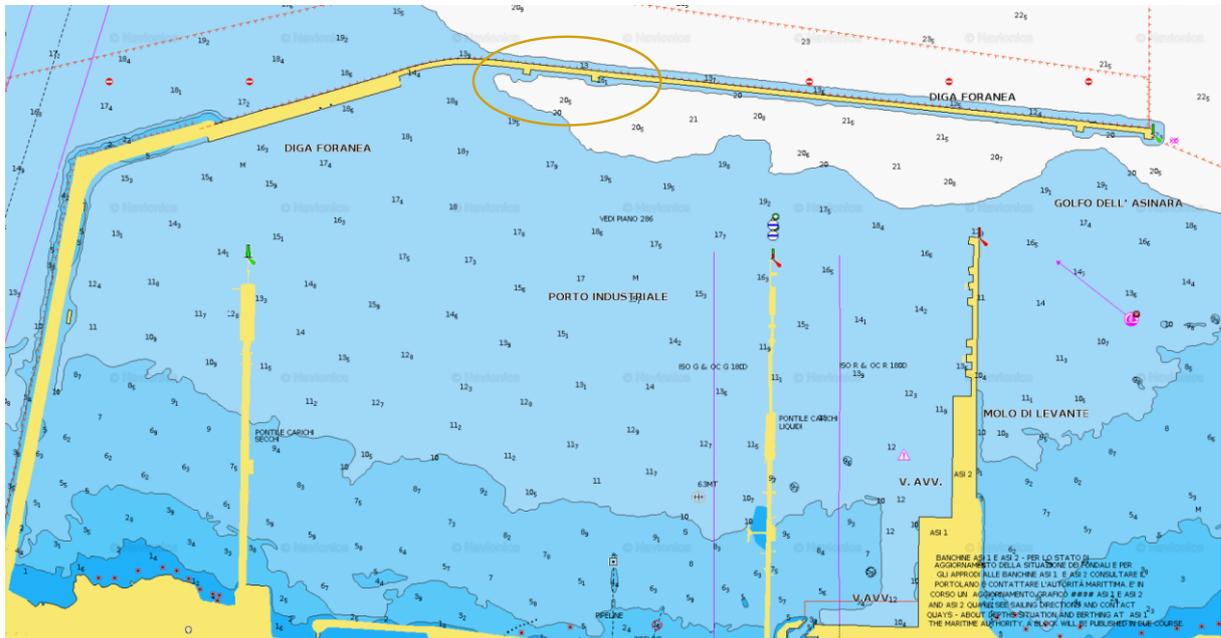


Figura 5-2. Batimetria all'interno del porto industriale di Porto Torres

### 5.3 Fetch geografici ed efficaci

L'analisi dell'esposizione geografica di un sito costiero si basa sulla determinazione dei fetch geografici ed efficaci. Per fetch si intende la lunghezza della porzione di mare sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso per opera dell'azione esercitata dal vento.

In bacini semichiusi di estensione limitata, come il Mar Mediterraneo, l'individuazione dei fetch può essere eseguita facendo ricorso al concetto di fetch geografico che indica la distanza geografica tra il punto di interesse e la terra più vicina in relazione ad una prefissata direzione.

L'assimilazione della dimensione caratteristica dell'area di generazione alla distanza geografica può essere accettata, poiché le dimensioni tipiche delle perturbazioni che normalmente interessano il Mediterraneo sono dello stesso ordine di grandezza dei valori massimi che caratterizzano i fetch geografici (circa 400-500 km).

Il valore del fetch efficace relativo ad una determinata direzione è funzione dei valori di fetch geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata. In questo modo i fetch efficaci consentono di tener conto del fatto che il moto ondoso è generato non solo nella direzione lungo la quale spira il vento ma anche in tutte le direzioni comprese in un settore di  $\pm 90^\circ$  rispetto alla direzione media di azione del vento (Massel, 1996). Di conseguenza, la lunghezza dei fetch efficaci risulta essere diversa da quella dei fetch geografici.

Il calcolo dei fetch efficaci è stato eseguito utilizzando l'applicazione ENIF che, sulla base del fetch geografico tracciato in coordinate polari, risolve la seguente relazione:

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 19 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)}$$

nella quale i simboli che compaiono rappresentano i seguenti parametri:

- $F_{e,w}$  lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione  $\Phi_w$ ;
- $F_i$  lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione  $i$ -esima  $\theta_i$ ;
- $\Phi_w$  direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;
- $\Phi_w - \theta_i \leq \Phi_i \leq \Phi_w + \theta_i$  direzione  $i$ -esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di  $2\theta$  considerato nell'intorno della direzione  $\Phi_w$ ;
- $\theta$  ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso (il metodo di Saville prevede un valore di  $\theta = \pm 45^\circ$  mentre quello di Seymour fa riferimento ad un valore di  $\theta = \pm 90^\circ$ . Nel presente caso si è fatto riferimento al metodo di Saville);
- $n$  termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume  $n = 4$ ).

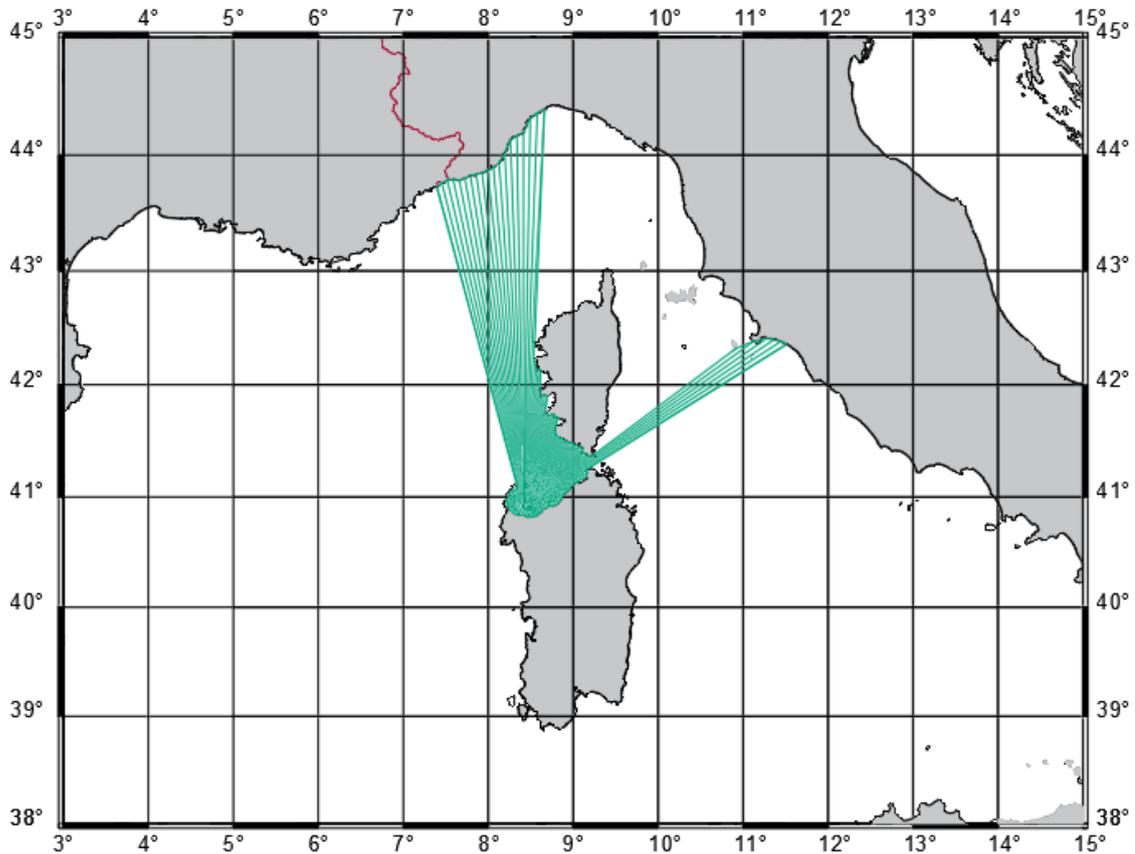
L'equazione deriva dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretschneider, 1947) e dai suoi successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, Smith 1991).

Nel seguito si illustrano le caratteristiche di esposizione del sito di Porto Torres in termini di distribuzione direzionale dei fetch geografici e dei fetch efficaci.

In Figura 5-3 è riportato il fetch geografico calcolato per un punto posto a circa 6 km al largo della diga foranea del Porto Industriale di Porto Torres.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 20 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002



**Figura 5-3 Fetch geografico per il Porto Industriale di Porto Torres.**

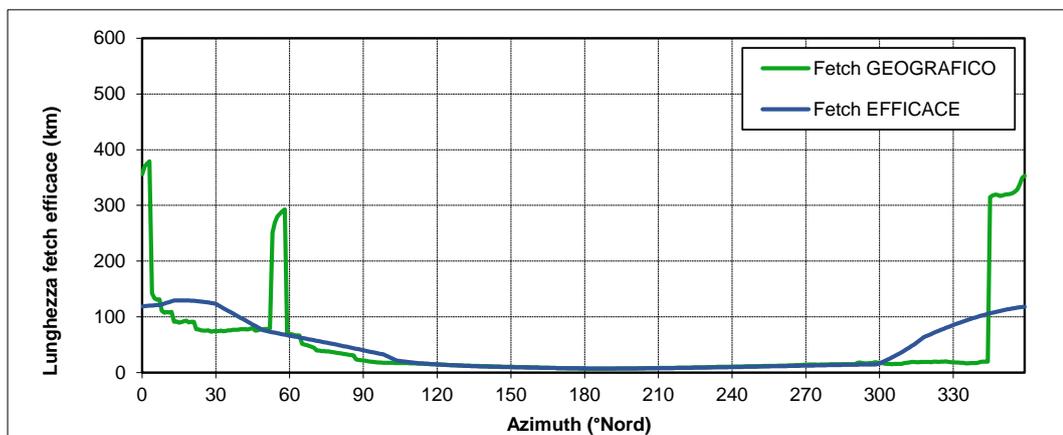
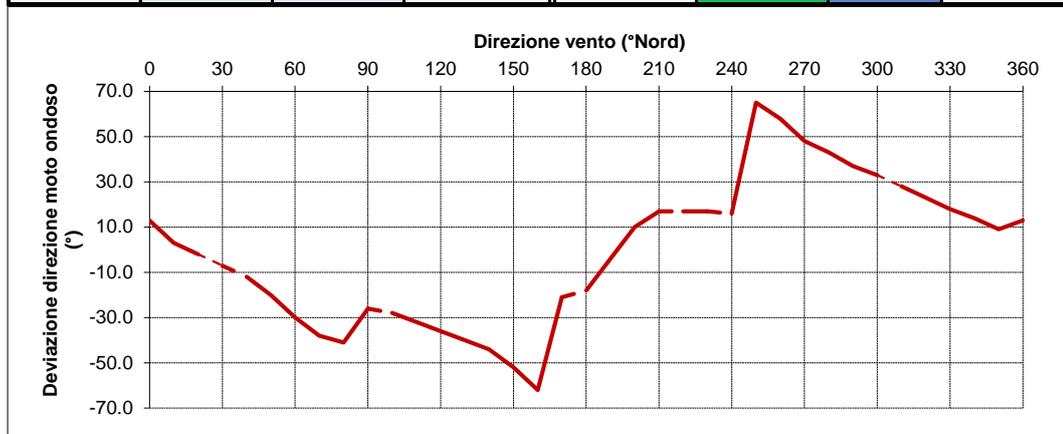
L'applicazione del modello ENIF fornisce oltre al fetch efficace (vedi Tabella 5-1 e Figura 5-5) la correlazione tra la direzione media di azione del vento e la direzione media del moto ondoso generato. I risultati dell'elaborazione, condotta con un passo di discretizzazione di  $1^\circ$ , sono sintetizzati, per valori discreti con passo angolare di  $10^\circ$ , nella Tabella 5-1 e riportati in forma grafica nei diagrammi cartesiani della Figura 5-4.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 21 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 5-1 Fetch geografico ed efficace con deviazione direzionale vento/mare per Porto Torres.**

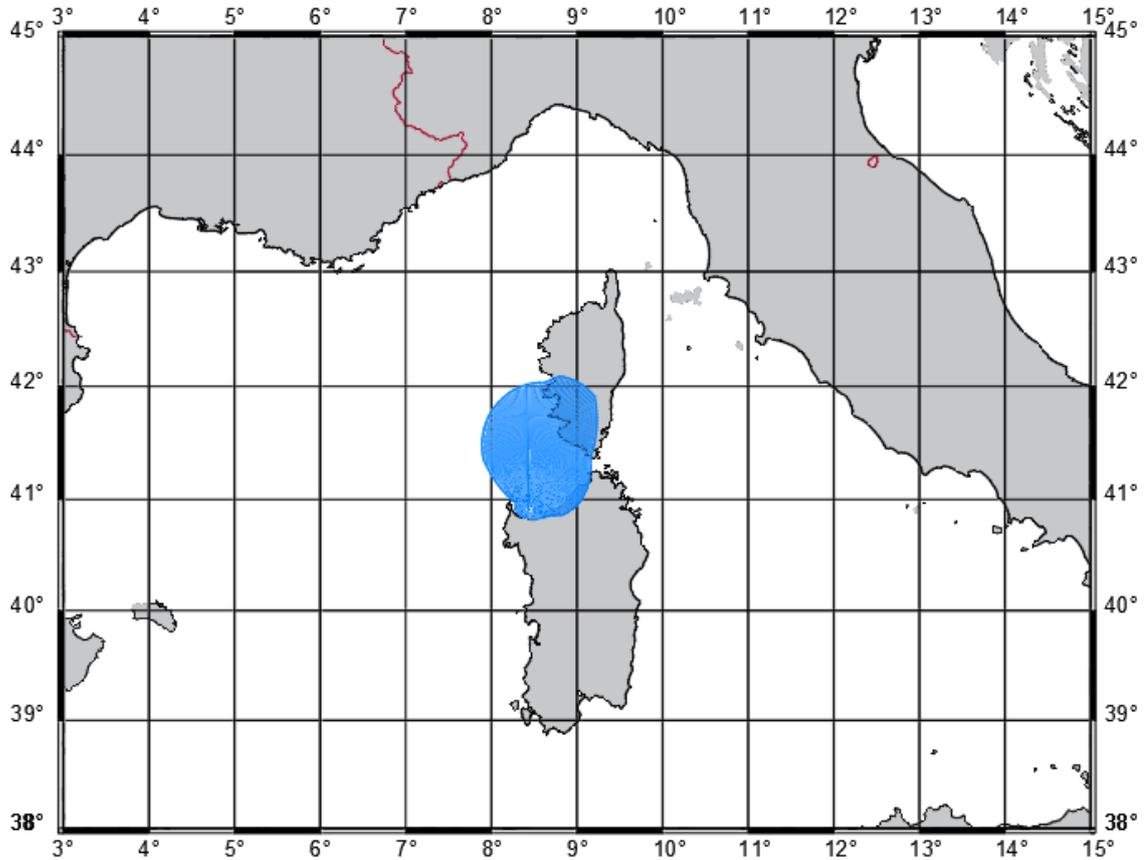
Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)	Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)
0	356.10	118.89	13.0	180	6.85	7.69	-18.0
10	108.36	125.20	3.0	190	7.08	7.52	-4.0
20	90.93	129.19	-2.0	200	7.59	7.58	10.0
30	74.93	123.56	-7.0	210	8.22	7.85	17.0
40	77.77	98.54	-12.0	220	8.86	8.35	17.0
50	78.63	75.33	-20.0	230	10.01	9.06	17.0
60	69.18	66.39	-30.0	240	10.68	9.85	16.0
70	44.41	57.96	-38.0	250	11.52	10.71	65.0
80	34.92	49.31	-41.0	260	12.49	11.59	58.0
90	21.84	40.03	-26.0	270	14.12	12.45	48.0
100	17.56	28.81	-28.0	280	14.95	13.38	43.0
110	16.54	17.96	-32.0	290	15.04	14.20	37.0
120	14.80	14.74	-36.0	300	17.24	16.73	33.0
130	12.83	12.35	-40.0	310	17.19	39.25	28.0
140	11.51	10.85	-44.0	320	18.96	67.36	23.0
150	10.34	9.74	-52.0	330	18.44	85.31	18.0
160	9.39	8.81	-62.0	340	17.78	100.35	14.0
170	8.00	8.12	-21.0	350	317.71	111.59	9.0



**Figura 5-4. Grafico superiore: deviazione tra la direzione di provenienza del vento e del moto ondoso. Grafico inferiore: fetch geografico ed efficace al largo di Porto Torres.**

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 22 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002



**Figura 5-5 Fetch efficace per il Porto Industriale di Porto Torres.**

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 23 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## 6 CARATTERIZZAZIONE METEOROLOGICA

### 6.1 Precipitazioni

Le precipitazioni a carattere piovoso sono solitamente limitate, con una maggiore concentrazione nella stagione invernale e autunnale e qualche improvviso acquazzone in primavera. Le manifestazioni piovose si presentano sotto forma di rovesci violenti con totali annui caratterizzati da accentuata instabilità.

Le precipitazioni più rilevanti si hanno generalmente alla fine dell'autunno mentre il mese con meno precipitazioni è solitamente luglio. Il regime pluviometrico può, cioè, definirsi di transizione tra il regime sublitoraneo e quello mediterraneo.

Porto Torres mediamente è caratterizzato da 68 giorni piovosi all'anno (giorni in cui vi è una precipitazione superiore o uguale ad 1 mm) con una precipitazione media annua di 637mm.

Il dettaglio dei valori medi mensili è riportato nella seguente tabella.

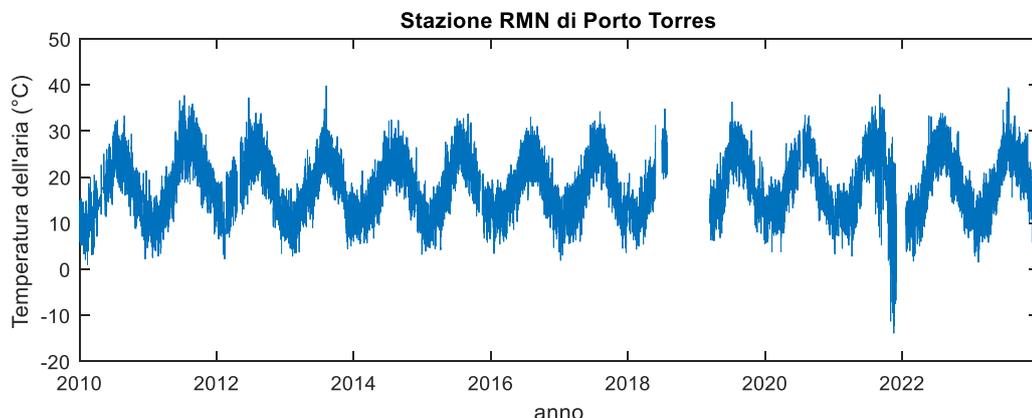
**Tabella 6-1. Regime pluviometrico Porto Torres (Rif.)**

Mese	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	Tot. annuo
Precipitazioni medie mensili (mm)	62	60	57	66	48	23	7	11	41	77	106	79	637
Giorni piovosi medi mensili (giorni)	8	7	6	7	5	3	1	2	4	7	9	9	68

### 6.2 Temperatura e umidità dell'aria

L'andamento temporale delle temperature registrate dalla stazione RMN di Porto Torres è mostrato in Figura 6-1. La Tabella 6-2 le temperature medie mensili e i valori massimi e minimi assoluti registrati. In tabella sono inoltre riportati i valori medi dell'umidità relativa registrata.

I mesi con le temperature medie maggiori sono luglio e agosto durante i quali si possono verificare picchi di circa 40°C. I mesi più freddi sono gennaio e febbraio che presentano una temperatura media di 11.5°- 12.0° con minimi poco al di sopra dello zero.



**Figura 6-1. Andamento delle temperature misurate dalla stazione RMN di Porto Torres 2010-2023**

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 24 di 72	<b>Rev.</b> 01

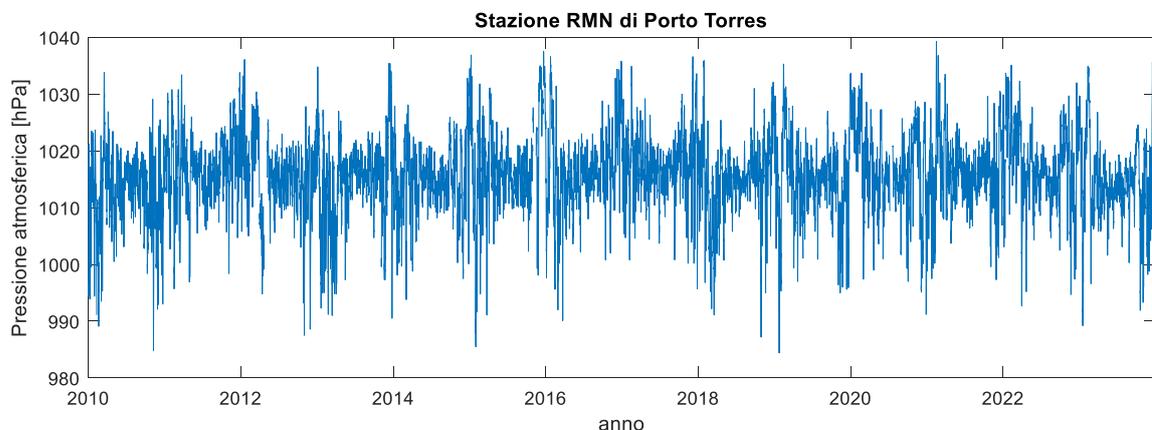
Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 6-2. Temperatura dell'aria e umidità valori medi e estremi registrati dalla stazione RMN di Porto Torres nel periodo 2010 – 2023.**

Stazione RMN di Porto Torres	Temperatura dell'aria registrata (°C)			Umidità relativa
	Media	Massima Assoluta	Minima Assoluta	Media (%)
Gennaio	11.8	20.8	1.9	81%
Febbraio	11.6	21.3	1	80%
Marzo	13.0	24.3	1.7	78%
Aprile	15.5	27.3	2.8	78%
Maggio	18.6	33.3	6.8	77%
Giugno	23.2	37.2	13.5	75%
Luglio	25.9	39.4	15	72%
Agosto	25.9	39.8	14.6	71%
Settembre	23.3	37.9	11.6	74%
Ottobre	20.0	30.7	5.9	77%
Novembre	16.1	29.2	1.3	80%
Dicembre	13.2	24.3	2.2	81%
Annuale	18.2	39.8	1	77%

### 6.3 Pressione atmosferica

In Figura 6-2 è mostrato l'andamento temporale della pressione atmosferica registrata tra il 2010 e il 2023 dalla stazione RMN di Porto Torres. Come riportato in Tabella 6-3 la pressione atmosferica media attesa al livello del mare è di 1015.9 hPa. In occasione di alta pressione sono stati misurati valori massimi di 1039 hPa, viceversa in occasione di forti depressioni sono stati registrati valori minimi di 984 hPa.



**Figura 6-2. Pressione atmosferica registrata dalla stazione RMN di Porto Torres tra il 2010 e il 2023.**

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 25 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 6-3. Pressione atmosferica valori medi e estremi registrati dalla stazione RMN di Porto Torres nel periodo 2010 – 2023.**

Pressione atmosferica registrata [hPa]			
Stazione RMN di Porto Torres	Media	Massima Assoluta	Minima Assoluta
Gennaio	1017	1037	984
Febbraio	1017	1039	989
Marzo	1016	1034	990
Aprile	1015	1031	995
Maggio	1015	1028	997
Giugno	1015	1024	1001
Luglio	1015	1024	1001
Agosto	1015	1023	1000
Settembre	1016	1031	999
Ottobre	1017	1030	987
Novembre	1014	1033	985
Dicembre	1019	1038	991
<b>Annuale</b>	<b>1015.9</b>	<b>1039</b>	<b>984</b>

#### 6.4 Radiazione solare

La radiazione solare di riferimento è stata valutata sulla base dei dati forniti dal dipartimento meteorologico della Regione Sardegna (ARPAS).

Con riferimento alle mappe mostrate in Figura 6-3 i massimi valori di radiazione solare raggiunti nel sito di interesse nei mesi di febbraio, giugno, agosto e novembre dell'anno 2023 variano da un minimo di 11MJ/m<sup>2</sup> (febbraio) ad un massimo di circa 25 MJ/m<sup>2</sup>.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 26 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

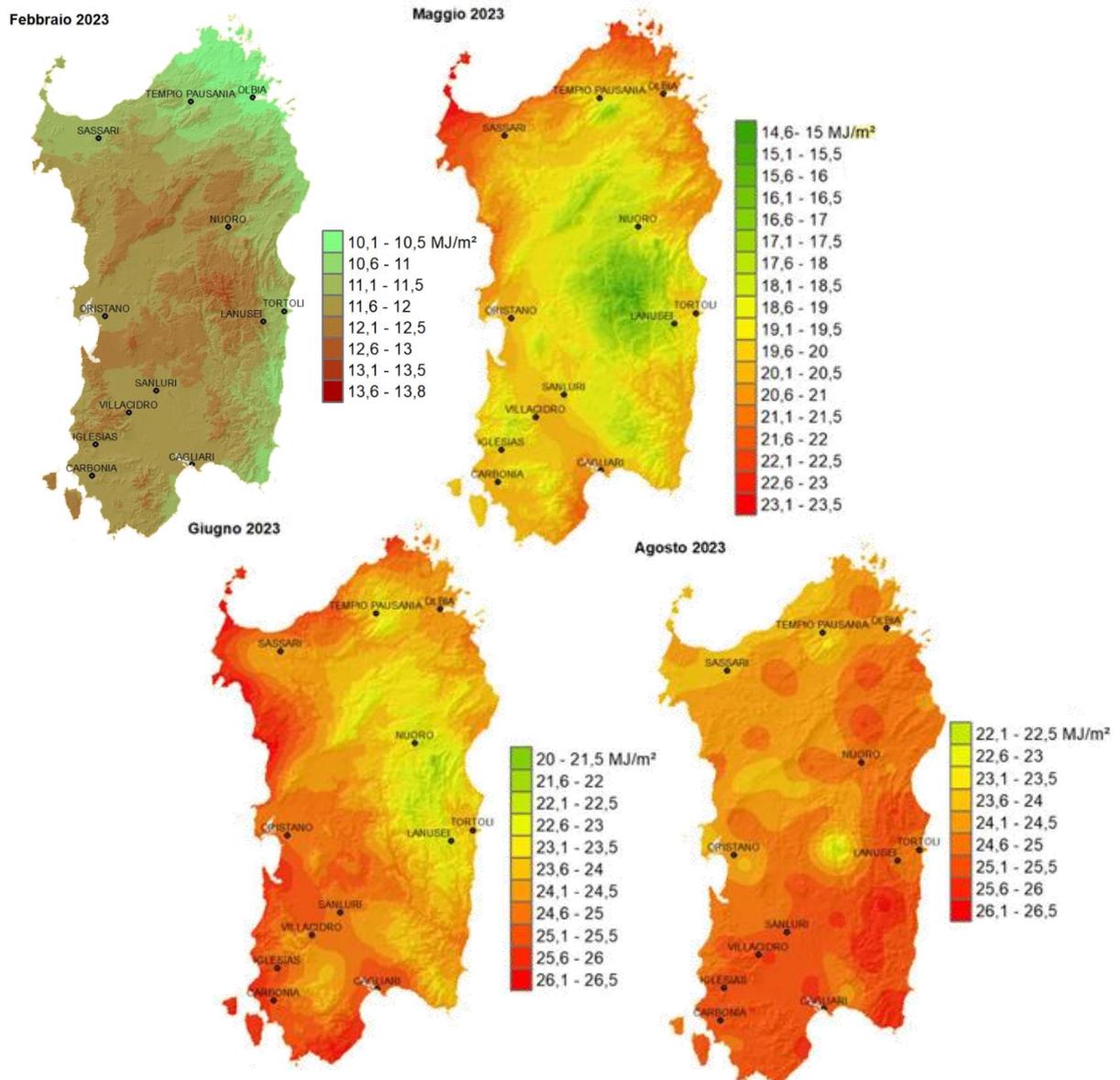


Figura 6-3. Mappe della radiazione solare per i mesi di febbraio, giugno, agosto e novembre 2023

## 6.5 Temperatura del mare

Per valutare la temperatura del mare in prossimità del sito in esame si è fatto riferimento ai valori medi mensili estratti dal database in rianalisi ERA5 - Copernicus per il periodo 1979 – 2023. È stato selezionato un punto di coordinate 41°N, 8.50°E posto a circa 20 km dal porto su profondità di 75 m.

Come mostrato in , la temperatura superficiale media dell'acqua di mare è pari a 18.5 °C. Nei mesi estivi la temperatura si innalza con valori medi compresi tra 24 e 25°C con picchi che possono raggiungere la temperatura di 27-28° in agosto.

In inverno la temperatura media è più bassa, con valori compresi tra 13-14°C con valori minimi attesi di circa 12°C.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 27 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 6-4. Valori medi mensili, massimi e minimi della temperatura superficiale del mare al largo di Porto Torres estratti dal database in rianalisi ERA5 Copernicus.**

Temperatura della superficie del mare [°C]			
ERA5 Porto Torres	Media	Massima	Minima
Gennaio	13.8	15.2	12.3
Febbraio	13.3	15.2	12.2
Marzo	13.5	14.9	12.6
Aprile	14.6	15.7	13.7
Maggio	17.2	19.0	14.6
Giugno	20.9	24.0	18.1
Luglio	23.8	26.4	21.0
Agosto	24.9	27.8	23.0
Settembre	23.3	25.1	21.2
Ottobre	20.9	22.8	18.3
Novembre	18.0	20.0	16.2
Dicembre	15.3	17.0	13.6
<b>Annuale</b>	<b>18.3</b>	<b>27.8</b>	<b>12.2</b>

## 6.6 Salinità dell'acqua di mare

A causa dell'esigua comunicazione idrica tra il Mar Mediterraneo e gli oceani Atlantico e Indiano, oltreché per la forte evaporazione, le acque del bacino mediterraneo sono generalmente molto salate; la salinità media si aggira attorno al 38,6 psu con un livello locale variabile tra il 36‰ e 39‰ muovendosi dalle regioni dello Stretto di Gibilterra verso il Mar di Levante.

## 6.7 Densità dell'acqua

Per la densità dell'acqua marina si può assumere un valore medio di 1027.6 kg/m<sup>3</sup>.

Sono attese variazioni stagionali della densità dell'acqua dovute in maggior misura alla variazione della temperatura dell'acqua. Assumendo una salinità media di 38.6 psu la variabilità della densità dell'acqua attesa è compresa tra un minimo di 1026.0 kg/m<sup>3</sup> (25°C) e un massimo di 1029.2 kg/m<sup>3</sup> (13°C).

Si precisa che per effettuare i calcoli di stabilità delle opere (spinta di galleggiamento) è stata assunta una densità dell'acqua di mare di 10.1 kN/m<sup>3</sup> (pari a 1030 kg/m<sup>3</sup>).

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 28 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## 7 VENTO

Per l'analisi del regime dei venti si è fatto riferimento:

- (i) ai dati di vento ricostruiti in ri-analisi dall'ECMWF e da Copernicus e riportati nel database ERA5 sviluppato nell'ambito di un progetto europeo sul nodo di griglia 41.25°N – 8.50°E (vedi Figura 4-1), posto poco a Nord/Est del sito oggetto di studio;
- (ii) ai dati misurati dalla stazione RMN di Porto Torres (dal 2010 al 2024) posta nel Porto Civico di Porto Torres.

### 7.1 Clima anemometrico a largo

Nella Figura 7-1 è riportata in forma polare la rosa direzionale degli eventi anemometrici ottenuta sulla base della serie storica oraria acquisita nel punto ERA5 Porto Torres di coordinate 41.25°N – 8.50°E e relativa al periodo 1940-2022. Il punto è posizionato a largo del sito in esame fuori dello schermo offerto dall'Asinara, quasi in posizione centrale rispetto alle Bocche di Bonifacio.

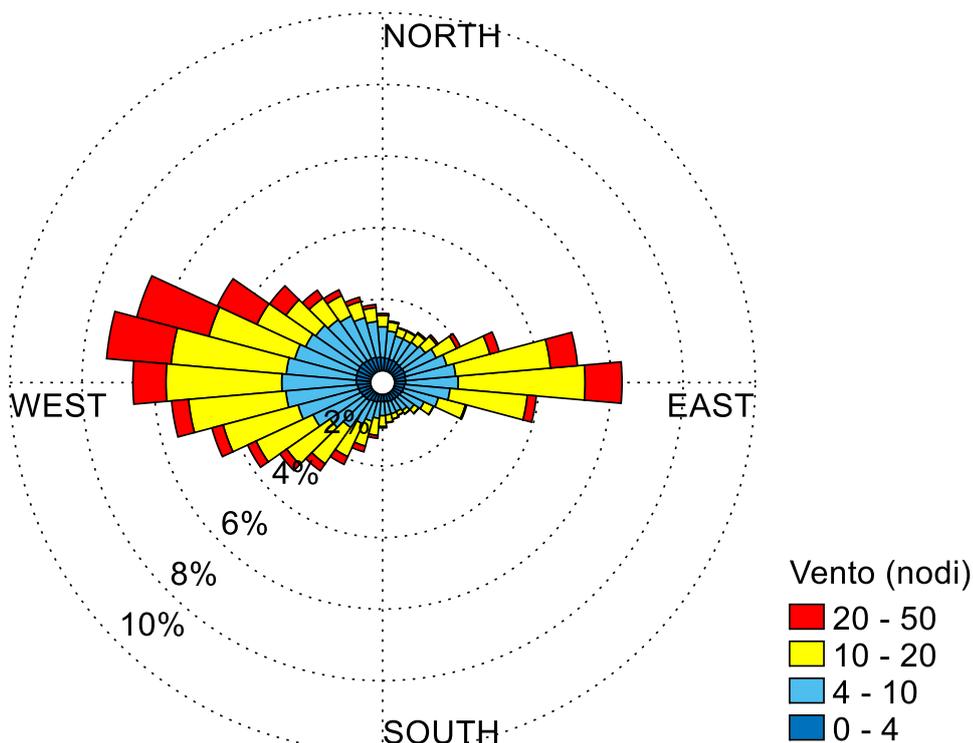


Figura 7-1. Distribuzione direzionale del regime anemometrico ricostruito nel punto ERA5 Porto Torres.

Nella Tabella 7-1 è riportato in forma numerica il clima anemometrico ottenuto classificando gli eventi ricostruiti in classi di direzione di provenienza e di velocità espressa in nodi.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 29 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 7-1 Tabella delle frequenze di accadimento dei venti ricostruiti nel punto ERA5 Porto Torres  
41.25°N – 8.50°E.**

Direzione °N	Classi di velocità del vento (nodi)												Tot
	da 1 a 4	4 7	7 11	11 17	17 22	22 28	28 34	34 41	41 48	48 56	56 63		
10	0.3509	0.4779	0.3398	0.1572	0.0551	0.0159	0.0014						1.398
20	0.3384	0.4254	0.3004	0.1457	0.0477	0.0085	0.0001						1.266
30	0.3422	0.4035	0.3146	0.1480	0.0518	0.0109	0.0007						1.272
40	0.3228	0.4331	0.3494	0.1854	0.0647	0.0205	0.0012						1.377
50	0.3157	0.4544	0.4147	0.2497	0.0865	0.0297	0.0030						1.554
60	0.3292	0.5205	0.5733	0.3924	0.1578	0.0596	0.0122	0.0001					2.045
70	0.3250	0.5513	0.8260	0.8013	0.3571	0.1324	0.0188	0.0018					3.014
80	0.3080	0.6028	1.0707	1.6464	1.0514	0.3726	0.0356	0.0043					5.092
90	0.3029	0.5862	1.2129	2.2102	1.4390	0.5073	0.0445	0.0025					6.306
100	0.2764	0.5081	1.0670	1.4728	0.5026	0.1108	0.0062						3.944
110	0.2706	0.4542	0.7078	0.5307	0.1058	0.0144	0.0004						2.084
120	0.2451	0.3550	0.4140	0.1898	0.0242	0.0030							1.231
130	0.2286	0.2958	0.2514	0.1013	0.0142	0.0012							0.892
140	0.2221	0.2400	0.1873	0.0772	0.0095	0.0012							0.737
150	0.2161	0.2133	0.1593	0.0799	0.0100	0.0014	0.0004						0.680
160	0.2150	0.2148	0.1710	0.1042	0.0195	0.0045							0.729
170	0.2000	0.2262	0.1930	0.1361	0.0363	0.0071	0.0001	0.0001					0.799
180	0.1997	0.2269	0.2093	0.2077	0.0734	0.0179	0.0008						0.936
190	0.2025	0.2440	0.2910	0.3174	0.1358	0.0370	0.0037						1.231
200	0.2319	0.2830	0.3495	0.4691	0.2508	0.0778	0.0098	0.0003					1.672
210	0.2418	0.3483	0.4735	0.6447	0.3536	0.1149	0.0131	0.0005	0.0001				2.191
220	0.2911	0.4306	0.6449	0.8259	0.3582	0.1142	0.0126	0.0004					2.678
230	0.2970	0.5094	0.8568	0.9952	0.3553	0.1171	0.0135						3.144
240	0.3163	0.6421	1.1346	1.1852	0.3737	0.1248	0.0191	0.0007		0.0001			3.797
250	0.3470	0.7345	1.3563	1.4690	0.4768	0.1561	0.0247	0.0027	0.0003				4.567
260	0.3605	0.8311	1.5667	1.8153	0.6937	0.2420	0.0282	0.0026					5.540
270	0.3964	0.9034	1.5457	2.1089	1.0561	0.4975	0.0753	0.0074					6.591
280	0.4075	0.8869	1.3810	1.9825	1.4405	0.9558	0.2632	0.0304	0.0003				7.348
290	0.4188	0.8888	1.1181	1.4786	1.2283	1.0803	0.4252	0.0845	0.0012				6.724
300	0.4232	0.8645	0.9258	0.8976	0.6656	0.6160	0.2750	0.0577	0.0010				4.726
310	0.4328	0.8358	0.8150	0.6340	0.3473	0.2746	0.1307	0.0217	0.0007				3.493
320	0.4133	0.7640	0.7647	0.4615	0.2214	0.1361	0.0498	0.0084	0.0001				2.819
330	0.3968	0.7269	0.7137	0.4000	0.1744	0.0930	0.0186	0.0036	0.0001				2.527
340	0.4011	0.6394	0.5984	0.2901	0.1238	0.0715	0.0107	0.0026	0.0001				2.138
350	0.3780	0.5926	0.4892	0.2364	0.1095	0.0441	0.0074	0.0008					1.858
360	0.3641	0.5265	0.3997	0.1959	0.0840	0.0258	0.0041						1.600
<b>% di eventi</b>	11.328	18.841	24.186	25.243	12.556	6.098	1.510	0.233	0	0	0		100.00

Analizzando la frequenza di accadimento degli eventi è possibile osservare che il regime anemometrico è di tipo bimodale con la prevalenza dei venti occidentali i quali, oltre ad essere i più frequenti, sono anche caratterizzati da maggiore intensità rispetto a quelli orientali.

Si osserva che la presenza dei rilievi della Corsica e della Sardegna tende ad incanalare ed accelerare il vento proveniente da occidente lungo l'asse delle bocche di Bonifacio, rendendo la zona una delle più ventose di Italia.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fig. 30 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## 7.2 Clima anemometrico in costa

Nella Figura 7-2 è riportata in forma grafica polare la rosa direzionale degli eventi anemometrici ottenuta sulla base della serie storica oraria misurata dalla stazione mareografica di Porto Torres dell'ISPRA situata nel Porto Civico e relativa al periodo 2010-2024.

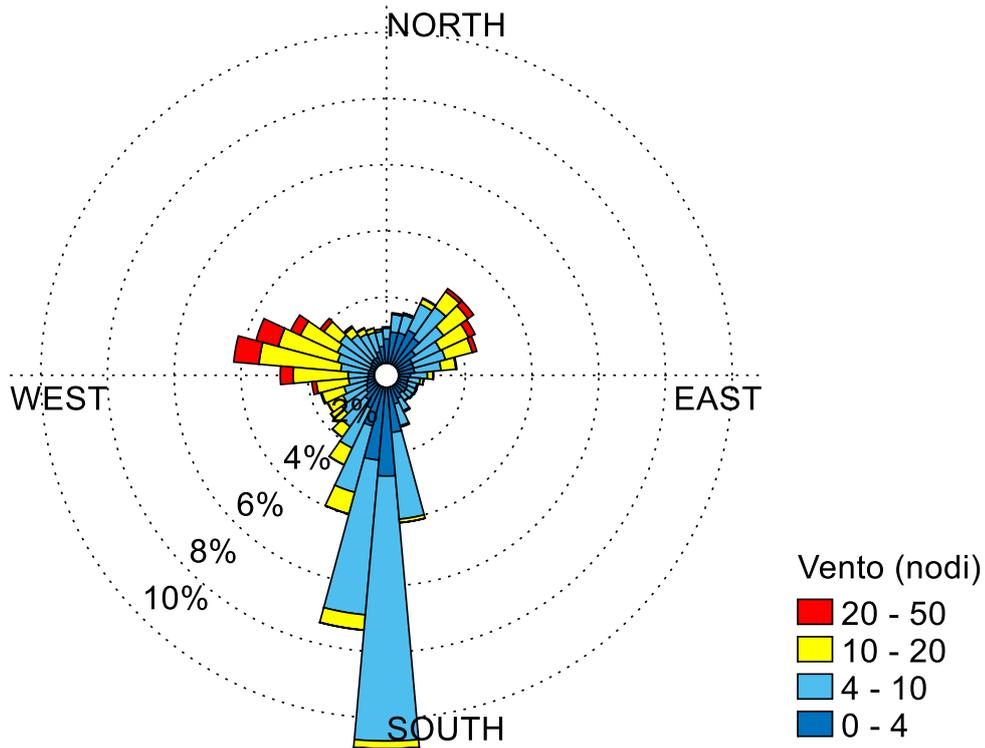


Figura 7-2 Regime anemometrico rilevato dalla stazione RMN di Porto Torres

Nella Tabella 7-2 è riportato numericamente il clima anemometrico ottenuto classificando gli eventi anemometrici in classi di direzione di provenienza e di velocità espressa in nodi.

Rispetto al clima anemometrico a largo, si osserva la comparsa di una terza direzione di provenienza del vento, quella meridionale costituita prevalentemente da brezze di terra di minore frequenza ed intensità rispetto alle componenti anemometriche occidentali e orientali.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 31 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 7-2. Frequenze di accadimento dei venti misurati dalla stazione RMN di Porto Torres**

Direzione °N	Classi di velocità del vento (nodi)											Tot
	da 1 a 4	4 7	7 11	11 17	17 22	22 28	28 34	34 41	41 48	48 56	56 63	
10	1.1390	0.5505	0.1152	0.0305								1.835
20	1.1648	0.5457	0.1400	0.0400	0.0067	0.0010	0.0010					1.899
30	1.3695	0.8276	0.2629	0.1390	0.0295	0.0200	0.0057					2.654
40	1.2181	0.9381	0.5314	0.4619	0.1657	0.0743	0.0057					3.395
50	0.8333	0.7943	0.5657	0.6924	0.3714	0.1076	0.0162	0.0010				3.382
60	0.5829	0.6914	0.5467	0.7219	0.3914	0.1267	0.0114					3.072
70	0.5705	0.6752	0.6552	0.6838	0.2648	0.0686	0.0019					2.920
80	0.5724	0.5867	0.4724	0.3752	0.0790	0.0133						2.099
90	0.4267	0.3990	0.2486	0.1486	0.0229	0.0010						1.247
100	0.3571	0.2848	0.1800	0.0733	0.0076	0.0010						0.904
110	0.3505	0.2686	0.1010	0.0295	0.0019							0.751
120	0.4076	0.2429	0.0924	0.0181	0.0029							0.764
130	0.4267	0.2238	0.0810	0.0181	0.0029							0.752
140	0.3667	0.2200	0.1067	0.0114	0.0010							0.706
150	0.4933	0.3362	0.1714	0.0267	0.0019							1.030
160	0.6390	0.5810	0.2552	0.0343								1.510
170	1.6390	2.4267	0.7724	0.0800	0.0038	0.0019						4.924
180	3.2124	7.5848	2.1048	0.1619	0.0171	0.0010						13.082
190	2.6476	4.2962	1.4705	0.3733	0.0381	0.0029	0.0010					8.830
200	1.4657	1.6181	1.0600	0.5829	0.0400	0.0029						4.770
210	0.8790	1.0229	0.7229	0.4848	0.0390	0.0019						3.150
220	0.6486	0.7267	0.5638	0.3400	0.0343	0.0019						2.315
230	0.4629	0.6162	0.5524	0.3429	0.0257	0.0057						2.006
240	0.3657	0.4495	0.6057	0.4067	0.0724	0.0076						1.908
250	0.3019	0.3333	0.6629	0.5705	0.1219	0.0210	0.0029					2.014
260	0.2410	0.2705	0.5943	0.7952	0.2752	0.0667	0.0086					2.251
270	0.2124	0.2695	0.6648	1.3514	0.6143	0.2286	0.0314	0.0048				3.377
280	0.2143	0.3362	0.9714	2.0514	0.9152	0.4381	0.1295	0.0124				5.069
290	0.1895	0.4248	1.0267	1.4400	0.7867	0.4419	0.0905	0.0133				4.413
300	0.1952	0.4610	1.1267	0.9219	0.4105	0.2067	0.0343	0.0057				3.362
310	0.2505	0.6400	0.8505	0.4190	0.2267	0.0705	0.0124					2.470
320	0.2848	0.6105	0.5267	0.2067	0.0762	0.0343	0.0048					1.744
330	0.2829	0.6124	0.3638	0.1276	0.0552	0.0162	0.0067					1.465
340	0.4505	0.5419	0.2048	0.0981	0.0333	0.0086						1.337
350	0.6181	0.4476	0.1086	0.0543	0.0162	0.0038						1.249
360	0.8790	0.3295	0.0781	0.0314	0.0019							1.320
<b>% di eventi</b>	26.359	32.184	19.557	14.345	5.153	1.975	0.364	0.037	0	0	0	100.0

### 7.3 Valori estremi della velocità del vento al largo e sottocosta

I dati anemometrici ricostruiti in re-analisi per il punto ERA5 Porto Torres sono stati analizzati statisticamente per definire la correlazione velocità del vento (V) – tempo di ritorno (Tr). V è il valore medio su 10 minuti della velocità del vento alla quota +10.0 m sul l.m.m.

I risultati dell'adattamento dei valori estremi ottenuti per prefissati tempi di ritorno, applicando una distribuzione dei valori estremi tipo Weibull (con parametro k=1), sono riportati in Tabella 7-3 dove la velocità del vento è espressa in m/s.

Il pannello di sinistra della tabella mostra la correlazione Tr-velocità del vento omnidirezionale ottenuta nel punto ERA5 Porto Torres. Il pannello centrale mostra la correlazione Tr-velocità del vento per il settore di traversia compreso tra 225°N e 315°N, corrispondente al settore Ovest. Infine, il pannello di destra mostra la correlazione Tr-velocità del vento per il settore compreso tra 45°N e 135°N, corrispondente al settore Est.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 32 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 7-3 Valori estremi di vento (media su 10 minuti alla quota + 10.0 m sul l.m.m.) per il punto ERA5 Porto Torres**

OMNIDIREZIONALE 0°N - 360°N		Settore 225°N-315°N		Settore 45°N-135°N	
Tr(anni)	V(m/s)	Tr(anni)	V(m/s)	Tr(anni)	V(m/s)
2	19.45	2	19.32	2	15.49
5	20.44	5	20.31	5	16.67
10	21.19	10	21.05	10	17.57
15	21.62	15	21.49	15	18.09
20	21.93	20	21.80	20	18.46
25	22.17	25	22.04	25	18.75
50	22.92	50	22.78	50	19.65
100	23.67	100	23.53	100	20.54
150	24.10	150	23.96	150	21.07
250	24.65	250	24.51	250	21.73
500	25.40	500	25.26	500	22.62
1000	26.15	1000	26.00	1000	23.52

La stessa analisi di correlazione Tr-Velocità del vento si è effettuata per la serie storica misurata a terra dalla stazione anemometrica sita all'interno di Porto Torre (RMN). I risultati di tale analisi sono riportati in Tabella 7-4. A differenza del punto ERA5 Porto Torres, sito al largo rispetto al paraggio di interesse, il vento misurato a terra presenta un ulteriore settore compreso tra 165°N e 205°N, il quale corrisponde al settore Sud.

**Tabella 7-4 Valori estremi di vento (media su 10 minuti alla quota + 10.0 m sul l.m.m.) per il punto RMN Porto Torres**

OMNIDIREZIONALE 0°N - 360°N		Settore 25°N-90°N		Settore 165°N-205°N		Settore 255°N-315°N	
Tr(anni)	V(m/s)	Tr(anni)	V(m/s)	Tr(anni)	V(m/s)	Tr(anni)	V(m/s)
2	15.26	2	12.62	2	8.07	2	14.98
5	16.65	5	13.70	5	9.26	5	16.42
10	17.58	10	14.52	10	10.16	10	17.51
15	18.09	15	15.00	15	10.68	15	18.14
20	18.45	20	15.34	20	11.06	20	18.60
25	18.72	25	15.60	25	11.35	25	18.95
50	19.52	50	16.42	50	12.24	50	20.03
100	20.30	100	17.23	100	13.14	100	21.12
150	20.73	150	17.71	150	13.67	150	21.76
250	21.27	250	18.31	250	14.33	250	22.56
500	21.98	500	19.13	500	15.23	500	23.64
1000	22.67	1000	19.95	1000	16.12	1000	24.73

#### 7.4 NTC 2018 - Velocità del vento base di riferimento

Si riporta infine la velocità del vento base di riferimento ( $v_{b,o}$ ) (media su 10 minuti alla quota di + 10 m sul l.m.m.) riportata nel Paragrafo 3.3.1 (Velocità base di riferimento) delle NTC2018 per la zona occidentale della Sardegna dove ricade Porto Torres.

Tale velocità del vento, che corrisponde al tempo di ritorno  $Tr = 50$  anni, risulta essere  $v_{b,o} = 28$  m/s.

Si ricorda che la normativa fornisce anche valori della velocità del vento per tempi di ritorno maggiori (vedi paragrafo 3.3.2 Velocità di riferimento).

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 33 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

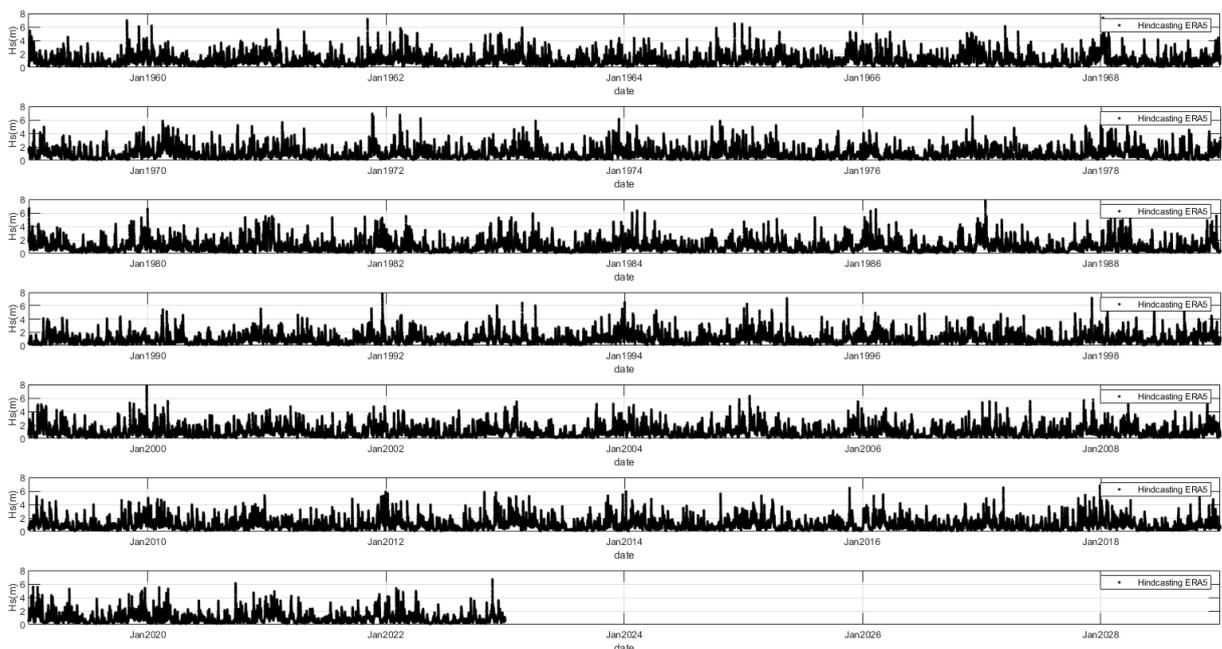
## 8 MOTO ONDOSO

Per la definizione delle caratteristiche del moto ondoso a largo di Porto Torres si è fatto riferimento alla serie storica dei dati ondametrici ERA5. Nel dettaglio, ERA5 rende disponibili i dati meteomarini orari (moto ondoso, vento e pressione atmosferica) ricostruiti in ri-analisi dal 1940 al 2022, con un passo di discretizzazione spaziale LAT/LON di 0.25° e una discretizzazione temporale oraria.

Questi dati sono stati acquisiti sul punto di griglia 41.25°N-8.50°E, indicato in Figura 4-1 come ERA5 Porto Torres e utilizzati come condizioni al largo del sito in esame.

### 8.1 Dati di moto ondoso in ricostruzione ERA5 Porto Torres

La serie storica ondametrica oraria che copre con continuità 82 anni relativa al punto ERA5 Porto Torres di coordinate 41.25°N – 8.50°E è costituita da 727584 stati di mare. La serie storica dell'altezza d'onda significativa Hs, relativa a tale punto, è riportata a titolo di esempio graficamente nella Figura 8-1.



**Figura 8-1** Serie storica dei valori di Hs ricostruiti nel punto ERA5 Porto Torres di coordinate 41.25°N 8.50°E nel periodo 1940-2022.

Nella Figura 8-2, nella Tabella 8-1 e nella Tabella 8-2, è riportato il clima ondametrico relativo al punto ERA5 sia in forma grafica, sia in forma numerica.

In particolare, mentre in ciascuna casella della Tabella 8-1 è riportato il numero degli eventi osservati (classificati in termini di Hs e di direzione di provenienza), nella Tabella 8-2 gli stessi eventi sono forniti in percentuale la quale coincide con la loro frequenza di accadimento media annuale.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 34 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

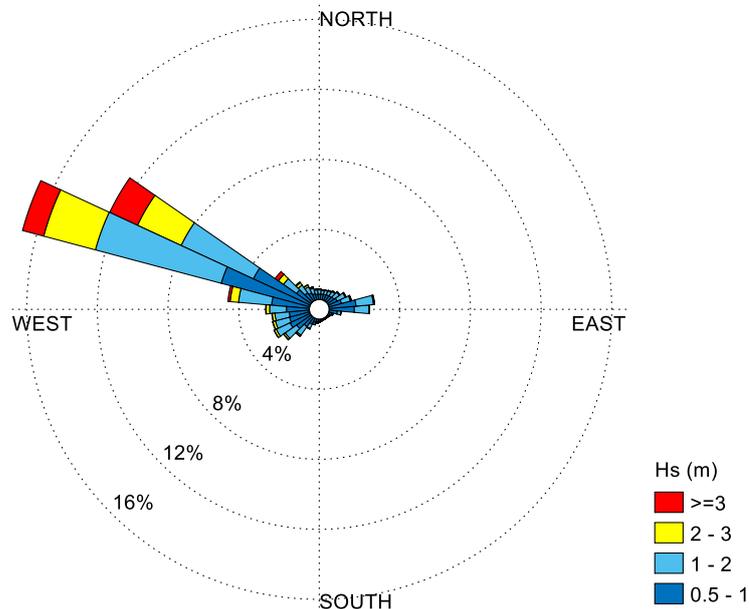


Figura 8-2 Distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso con  $H_s > 0.5$  m nel punto ERA5 Porto Torres di coordinate  $41.25^\circ N$ ,  $8.50^\circ E$ .

Tabella 8-1 Numero di eventi di moto ondoso al largo di Porto Torres suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione. Punto di acquisizione ERA5 Porto Torres  $41.25^\circ N$  –  $8.50^\circ E$ . Periodo di riferimento 1940 – 2022.

Direzione d'onda °N	Numero di eventi (Hs)															Tot
	Altezza d'onda (m)															
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 4.50	4.50 5.00	5.00 5.50	5.50 6.00	6.00 6.50	6.50 > 7.00	
10	2052	2553	2423	1059	467	167	33	11	1							8766
20	1876	2859	2489	1167	535	150	27	3								9106
30	1855	2835	2802	1241	496	172	32	1								9434
40	2106	3234	2945	1492	670	222	72	20								10761
50	2198	3314	3329	1868	880	262	71	23	16							11961
60	2055	3759	4157	2554	1157	269	72	16	4							14043
70	1998	4431	5529	2862	969	330	90	17	7							16233
80	1818	6672	11391	5699	1528	330	79	31	20							27568
90	1555	6157	10603	4872	1190	203	58	6								24644
100	1100	3199	3501	1335	251	37	10									9433
110	720	1563	1464	384	106	16										4253
120	496	917	878	207	48											2546
130	401	617	553	174	32	2										1779
140	336	545	460	147	25	1										1514
150	329	472	522	133	18	2										1476
160	330	514	484	145	27	1										1501
170	378	631	703	185	32	6										1935
180	484	918	961	256	61	8	1	3								2692
190	577	1217	1363	357	102	16	8	4								3644
200	744	1594	1694	676	231	41	12	4		1						4997
210	809	2194	2777	1515	518	173	72	15								8073
220	884	2730	4800	3107	1228	384	164	37	7		1					13342
230	959	4154	7445	4082	1660	590	171	49	8	5		1				19124
240	1120	5250	9416	4419	1846	681	252	80	20	5	1					23090
250	1470	5612	8819	4131	1908	803	278	91	30	10	1					23153
260	2084	6696	8556	4064	1915	807	282	113	37	21	5					24580
270	2996	9211	9696	4819	2118	1001	412	144	38	23	17	6	1			30481
280	4062	12565	16061	8934	4719	2352	1127	517	214	109	49	30	7	5		50739
290	4961	18875	38474	31004	22671	14184	7888	4322	2361	1218	578	297	109	63	59	146833
300	5930	17460	26447	18571	14264	11673	8187	5502	3317	1880	1072	503	222	87	40	114806
310	5908	9475	7554	3976	2626	1565	994	603	460	258	140	90	49	24	23	33649
320	5167	6052	4458	2598	1331	780	417	220	116	38	12	6	3	4	2	21195
330	4699	4697	3522	1814	1021	493	285	116	41	6	4	3	2			16701
340	3808	3257	2702	1570	828	365	162	55	21	9	7	1				12785
350	2934	2939	2297	1229	601	224	100	19	7	1						10351
360	2556	2735	2307	1235	583	225	43	10	2							9696
N° di eventi	73755	161903	213582	123881	68662	38535	21399	12032	6727	3584	1887	937	393	183	124	726884

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 35 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 8-2** Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso al largo di Porto Torres suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione. Punto di acquisizione ERA5 Porto Torres 41.25°N – 8.50°E. Periodo di riferimento 1940 – 2022.

Direzione d'onda °N	Frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa																Tot
	Altezza d'onda (m)																
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 4.50	4.50 5.00	5.00 5.50	5.50 6.00	6.00 6.50	> 7.00		
10	0.282	0.351	0.333	0.146	0.064	0.023	0.005	0.002	0.000							1.206	
20	0.258	0.393	0.342	0.161	0.074	0.021	0.004	0.000								1.253	
30	0.255	0.390	0.385	0.171	0.068	0.024	0.004	0.000								1.298	
40	0.290	0.445	0.405	0.205	0.092	0.031	0.010	0.003								1.480	
50	0.302	0.456	0.458	0.257	0.121	0.036	0.010	0.003	0.002							1.646	
60	0.283	0.517	0.572	0.351	0.159	0.037	0.010	0.002	0.001							1.932	
70	0.275	0.610	0.761	0.394	0.133	0.045	0.012	0.002	0.001							2.233	
80	0.250	0.918	1.567	0.784	0.210	0.045	0.011	0.004	0.003							3.793	
90	0.214	0.847	1.459	0.670	0.164	0.028	0.008	0.001								3.390	
100	0.151	0.440	0.482	0.184	0.035	0.005	0.001									1.298	
110	0.099	0.215	0.201	0.053	0.015	0.002										0.585	
120	0.068	0.126	0.121	0.028	0.007											0.350	
130	0.055	0.085	0.076	0.024	0.004	0.000										0.245	
140	0.046	0.075	0.063	0.020	0.003	0.000										0.208	
150	0.045	0.065	0.072	0.018	0.002	0.000										0.203	
160	0.045	0.071	0.067	0.020	0.004	0.000										0.206	
170	0.052	0.087	0.097	0.025	0.004	0.001										0.266	
180	0.067	0.126	0.132	0.035	0.008	0.001	0.000	0.000								0.370	
190	0.079	0.167	0.188	0.049	0.014	0.002	0.001	0.001								0.501	
200	0.102	0.219	0.233	0.093	0.032	0.006	0.002	0.001		0.000						0.687	
210	0.111	0.302	0.382	0.208	0.071	0.024	0.010	0.002								1.111	
220	0.122	0.376	0.660	0.427	0.169	0.053	0.023	0.005	0.001		0.000					1.836	
230	0.132	0.571	1.024	0.562	0.228	0.081	0.024	0.007	0.001	0.001		0.000				2.631	
240	0.154	0.722	1.295	0.608	0.254	0.094	0.035	0.011	0.003	0.001	0.000					3.177	
250	0.202	0.772	1.213	0.568	0.262	0.110	0.038	0.013	0.004	0.001	0.000					3.185	
260	0.287	0.921	1.177	0.559	0.263	0.111	0.039	0.016	0.005	0.003	0.001					3.382	
270	0.412	1.267	1.334	0.663	0.291	0.138	0.057	0.020	0.005	0.003	0.002	0.001	0.000			4.193	
280	0.559	1.729	2.210	1.229	0.649	0.324	0.155	0.071	0.029	0.015	0.007	0.004	0.001	0.001		6.976	
290	0.683	2.597	5.293	4.265	3.119	1.951	1.085	0.595	0.325	0.168	0.080	0.041	0.015	0.009	0.008	20.159	
300	0.816	2.402	3.638	2.555	1.962	1.606	1.126	0.757	0.456	0.259	0.147	0.069	0.031	0.012	0.006	15.725	
310	0.813	1.304	1.039	0.547	0.361	0.215	0.137	0.083	0.063	0.035	0.019	0.012	0.007	0.003	0.003	4.617	
320	0.711	0.833	0.613	0.357	0.183	0.107	0.057	0.030	0.016	0.005	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	2.915	
330	0.646	0.646	0.485	0.250	0.140	0.068	0.039	0.016	0.006	0.001	0.001	0.000	0.000			2.297	
340	0.524	0.448	0.372	0.216	0.114	0.050	0.022	0.008	0.003	0.001	0.001	0.000				1.759	
350	0.404	0.404	0.316	0.169	0.083	0.031	0.014	0.003	0.001	0.000						1.424	
360	0.352	0.376	0.317	0.170	0.080	0.031	0.006	0.001	0.000							1.334	
Freq. Accadimento	10.147	22.274	29.383	17.043	9.446	5.301	2.944	1.655	0.925	0.493	0.260	0.129	0.054	0.025	0.017	100	

Il diagramma polare di Figura 8-2 (clima ondometrico medio annuale) mostra che il punto in esame posto a largo del sito di interesse, presenta due settori di traversia, il primo ricadente nel IV quadrante (settore Nord-Ovest) e il secondo tra il I e il II quadrante (settore Est).

Gli stati di mare provenienti dal IV quadrante risultano sia di maggiore intensità, sia di maggiore frequenza rispetto a quelli provenienti dal I/II quadrante e pertanto il settore Nord-Ovest può essere considerato il settore di traversia principale.

In Figura 8-3 sono riportate le rose ondometriche medie stagionali desunte sempre dalla serie storica. La figura mostra che la frequenza delle onde provenienti da Nord-Ovest risulta prevalente durante l'anno rispetto alle onde provenienti dal settore Est, le quali si verificano più frequentemente durante la primavera.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 36 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

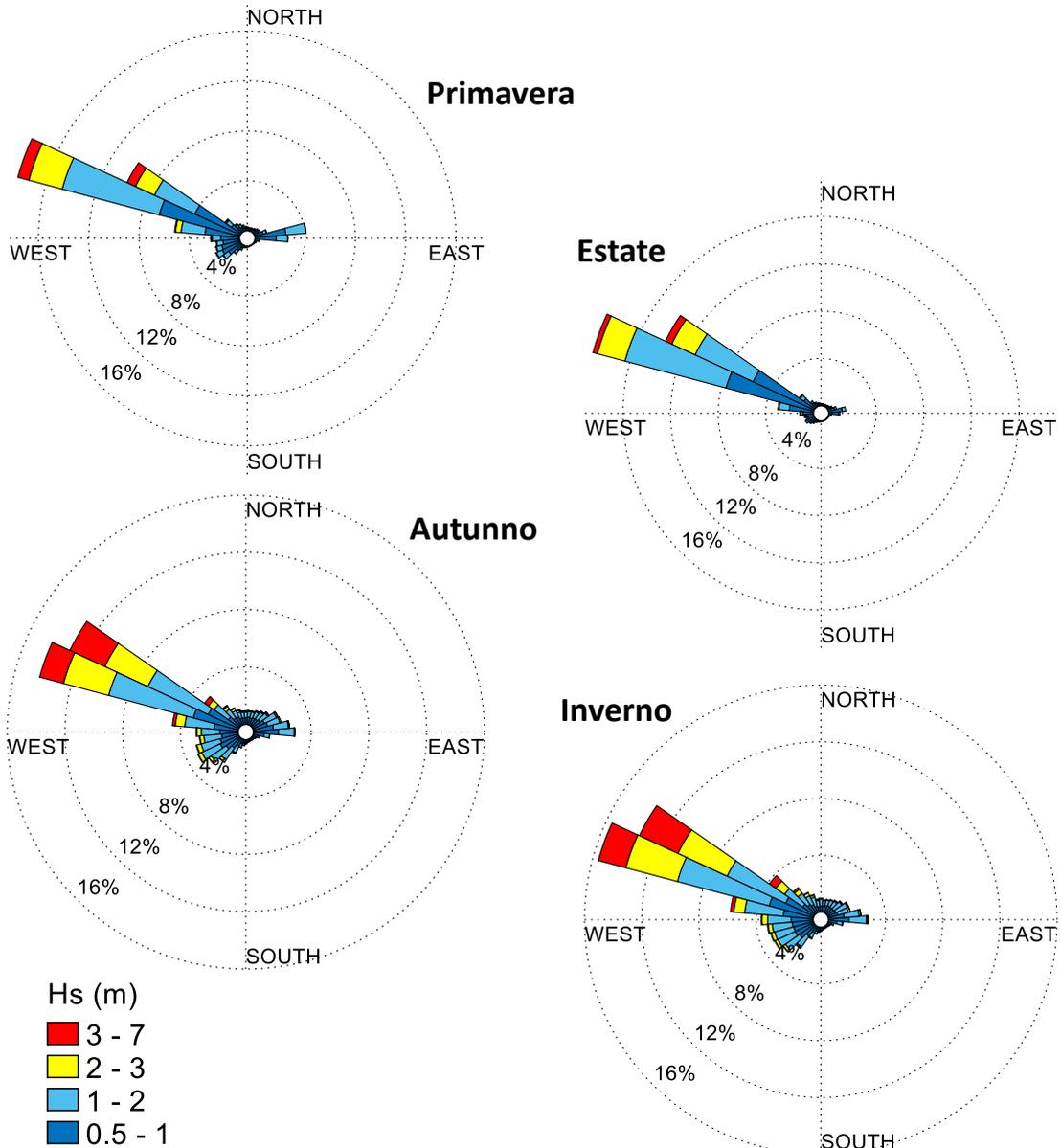


Figura 8-3 Rose di distribuzione direzionale su base stagionale degli eventi di moto ondoso con  $H_s > 0.5m$  nel punto ERA 5 Porto Torres di coordinate  $41.25^{\circ}N - 8.50^{\circ}E$

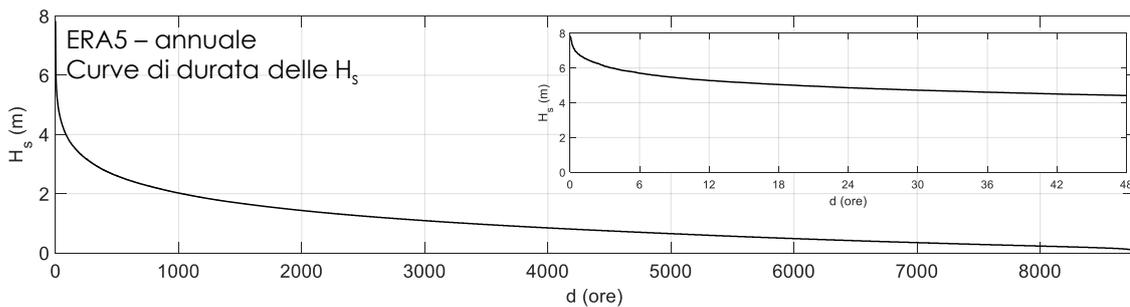
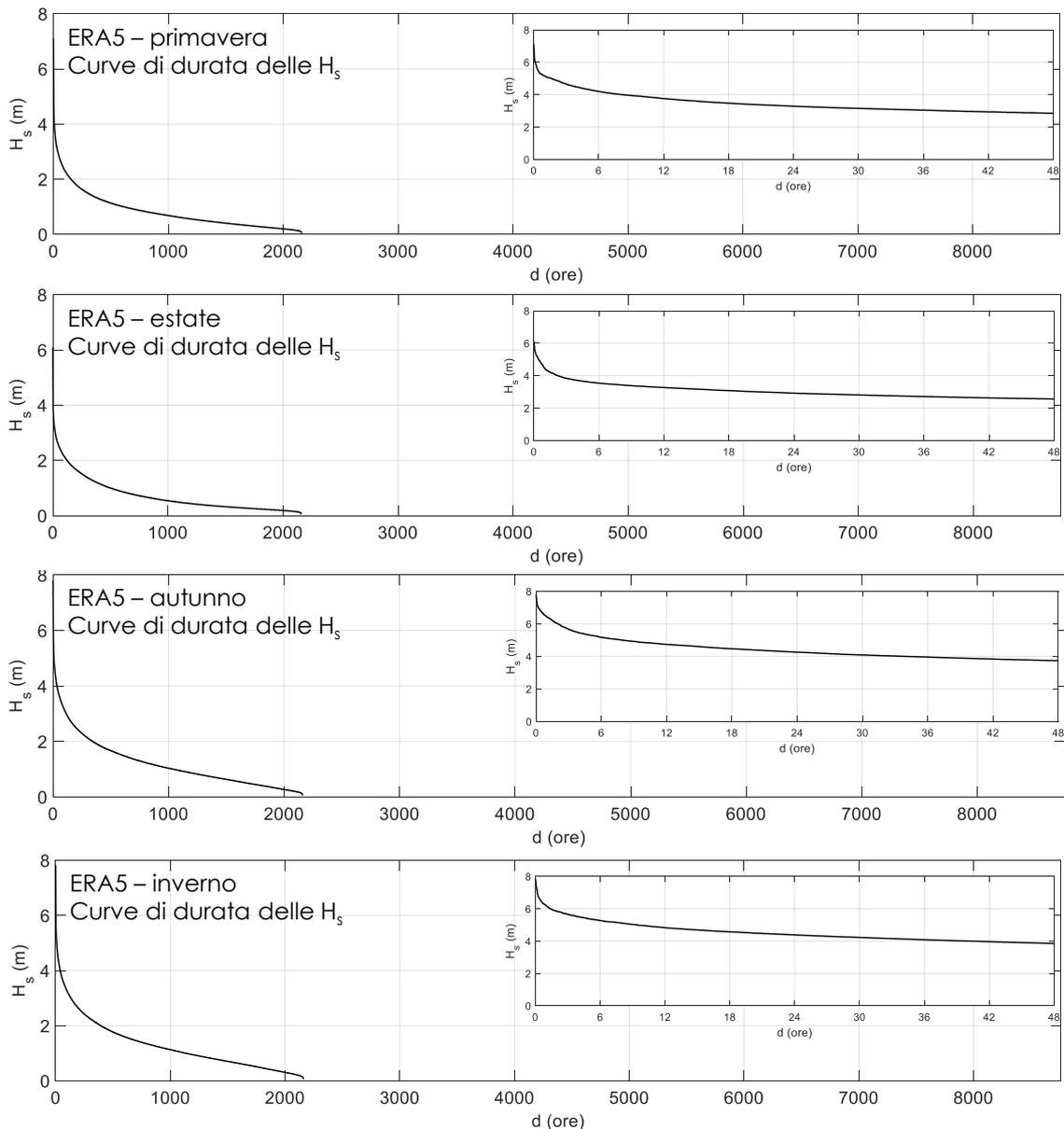


Figura 8-4 Curva di durata annuale delle  $H_s$  per il punto ERA5 Porto Torres ( $41.25^{\circ}N - 8.50^{\circ}E$ )

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 37 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002



**Figura 8-5 Curve di durata stagionali delle H<sub>s</sub> per il punto ERA5 Porto Torres (41.25°N-8.50°E).**

Nella Figura 8-4 e nella Figura 8-5 sono riportate rispettivamente le curve di durata delle altezze d'onda significative H<sub>s</sub> medie annuali e stagionali per il punto ERA5 Porto Torres calcolate sulla base della serie storica ECMWF.

Nella Tabella 8-3 infine sono riportate le frequenze di superamento medie annuali e stagionali (esprese rispettivamente in ore/anno e in giorni/anno), di prefissate soglie di H<sub>s</sub>.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 38 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 8-3** Frequenze medie annuali e stagionali di superamento di soglie di Hs per il punto ERA5 Porto Torres.

ANNUALE - ERA5			PRIMAVERA - ERA5			AUTUNNO - ERA5		
Hs (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)	Hs (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)	Hs (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)
0.5	5922.7	246.8	0.5	1338.5	55.8	0.5	1689.6	70.4
1.0	3351.2	139.6	1.0	617.6	25.7	1.0	1064.4	44.4
1.5	1859.7	77.5	1.5	298.9	12.5	1.5	619.6	25.8
2.0	1033.0	43.0	2.0	165.0	6.9	2.0	348.2	14.5
2.5	569.1	23.7	2.5	84.6	3.5	2.5	198.8	8.3
> 3	311.4	13.0	> 3	48.2	2.0	> 3	118.8	4.9

ESTATE - ERA5			INVERNO - ERA5		
Hs (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)	Hs (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)
0.5	1094.9	45.6	0.5	1799.9	75.0
1.0	524.5	21.9	1.0	1145.0	47.7
1.5	258.2	10.8	1.5	682.9	28.5
2.0	124.1	5.2	2.0	396.1	16.5
> 2.5	54.2	2.26	2.5	231.7	9.7
			> 3	144.0	6.0

## 8.2 Calibrazione degli eventi estremi di moto ondoso

I dati ondametrici ricostruiti in ri-analisi dai principali centri meteorologici mondiali sono inevitabilmente soggetti ad errori, i quali dipendono dagli errori commessi nel ricostruire i campi di vento che si ripercuotono sulla ricostruzione del moto ondoso.

Mentre dal punto di vista climatico questi errori sono generalmente poco significativi per definire le condizioni medie di esposizione ondametrica di un sito, invece, gli eventuali errori possono condizionare in modo rilevante la statistica delle onde estreme le quali svolgono un ruolo fondamentale per il dimensionamento strutturale delle opere marittime.

Pertanto, risulta sempre di estrema importanza confrontare i dati ondametrici ricostruiti in ri-analisi con dati provenienti da misure dirette per verificare o meno la necessità di effettuare una calibrazione dei dati ricostruiti in condizioni estreme.

Con riferimento alla Figura 4-1, nel caso in esame la stazione di misura diretta selezionata per la calibrazione degli eventi estremi è quella di Alghero facente parte della rete ondametrica nazionale (RON) oggi gestita dall'ISPRA. La Boa di Alghero è stata operativa con intervalli non regolari dal 1989 fino ad 2014. Ha successivamente ricominciato a registrare a partire dal 2021 fino alla fine del 2023.

Tenuto conto che la boa ondametrica di Alghero ricade nella stessa area di generazione delle onde che appartengono a largo al settore di traversia principale del sito di interesse, si è deciso di determinare la necessità o meno di effettuare una calibrazione dei dati ERA5 per il sito di interesse, effettuando un confronto tra i dati ERA5 e i dati misurati della boa di Alghero.

Per effettuare il confronto in modo corretto si sono quindi acquisiti i dati ERA5 per il punto di griglia più vicino alla posizione dove la boa ondametrica di Alghero è stata operativa tra il 1989 e il 2014 (vedi Figura 4-1). Questo punto è stato definito ERA5 Alghero.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 39 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

Come di seguito illustrato, si sono utilizzati due approcci differenti per confrontare i dati di moto ondoso ricostruiti ERA5 con quelli osservati dall'ondametro di Alghero.

Il primo confronto, di seguito indicato come "confronto sincrono", fornisce delle indicazioni sull'errore che viene mediamente commesso con la tecnica di ricostruzione del moto ondoso in ri-analisi. La seconda metodologia di confronto, di seguito indicata come "confronto asincrono", è di interesse per valutare l'eventuale necessità di calibrare i valori di  $H_s$  raggiunti al culmine delle singole mareggiate necessari per analizzare gli stati di mare estremi e quindi per definire la correlazione  $H_s$  – Tempo di ritorno ( $T_r$ ).

Queste tecniche di confronto, sviluppate teoricamente da De Girolamo et al. (2017), si basano sul concetto che gli errori, tra le misure e i dati ricostruiti, valutati nello stesso istante, errori sincroni, risentono spesso di un errore legato alla tempistica (timing) con cui si sviluppa l'evento meteomarinario. Tale errore può essere eliminato facendo ricorso al confronto asincrono, ovvero confrontando i valori di  $H_s$  al culmine delle mareggiate, i quali possono avvenire anche in tempi leggermente diversi, purché appartenenti allo stesso evento meteorologico estremo. L'applicazione di questa tecnica consente di confrontare e quindi di calibrare agevolmente i dati da utilizzare per effettuare la statistica degli eventi estremi.

### 8.3 Confronto degli eventi sincroni al largo di Alghero

Per quanto riguarda la prima metodologia di analisi (confronto sincrono), i dati ricostruiti ERA5 al largo di Alghero sono stati posti a confronto con i dati sincroni estratti dalle due serie storiche, per i periodi di tempo in comune.

I risultati del confronto sincrono, mostrati nel grafico di destra della Figura 8-6, evidenziano che mediamente i dati ricostruiti ERA5 tendono a sottostimare i dati misurati.

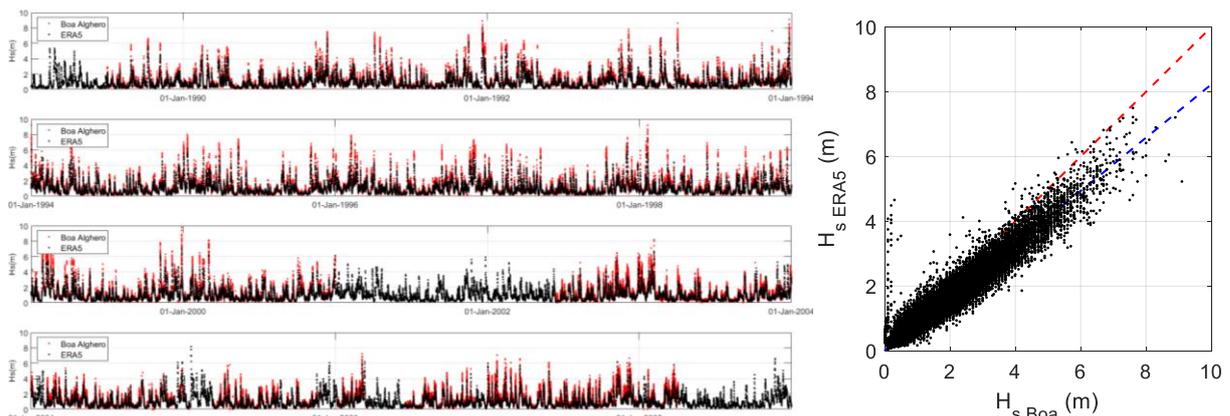


Figura 8-6 – Confronto dei dati di moto ondoso ricostruita dall'ECMWF (ERA5 Alghero) con i dati sincroni registrati dalla boa ondometrica di Alghero per il periodo 1989-2014.

### 8.4 Confronto degli eventi estremi asincroni al largo di Alghero

Nei grafici polari di Figura 8-7 sono riportati i valori di altezza significativa e direzione di provenienza al colmo delle mareggiate, definite secondo quanto specificato nel seguito, estratte dalla serie storica di misure di moto ondoso effettuate dalla boa ondometrica di Alghero (pannello di sinistra) e dalla serie di dati ricostruiti di moto ondoso ERA5 Alghero (pannello di destra).

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 40 di 72	<b>Rev.</b> 01

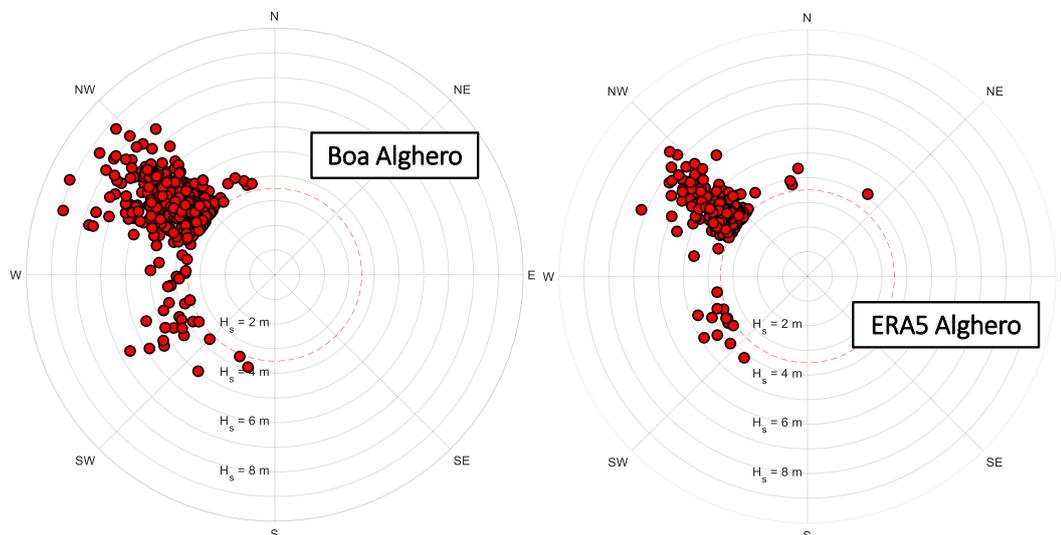
Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

I dati fanno riferimento alle stesse mareggiate ma, come detto, non sono sincroni, ovvero si accetta che i colmi delle singole mareggiate possano avvenire in istanti diversi pur appartenendo allo stesso evento meteorologico.

La singola mareggiata è stata identificata in base al soddisfacimento contemporaneo dei seguenti requisiti:

- altezza d'onda  $H_s$  sopra la soglia di 1.0 m per più di 12 ore;
- altezza d'onda  $H_s$  al colmo dell'evento meteorologico uguale o superiore alla soglia 2.0 m;
- distanza tra due mareggiate pari ad almeno 48 ore.

Il soddisfacimento di questi requisiti consente di definire i valori estremi di moto ondoso raggiunti al culmine delle mareggiate che risultano statisticamente indipendenti l'uno dall'altro.



**Figura 8-7 – Distribuzione dei valori di altezza d'onda  $H_s$  al colmo delle mareggiate registrate dalla boa di Alghero (sinistra) e ricostruiti dall'ECMWF (ERA5 Alghero) nel medesimo periodo.**

Il campione delle mareggiate coesistenti è stato ulteriormente ristretto limitando il confronto agli eventi che presentano al loro culmine valori  $H_s > 4.5$  m, ottenendo un totale di circa 50 eventi.

I grafici polari di Figura 8-7 mostrano che dal punto di vista direzionale i due set di dati risultano molto simili.

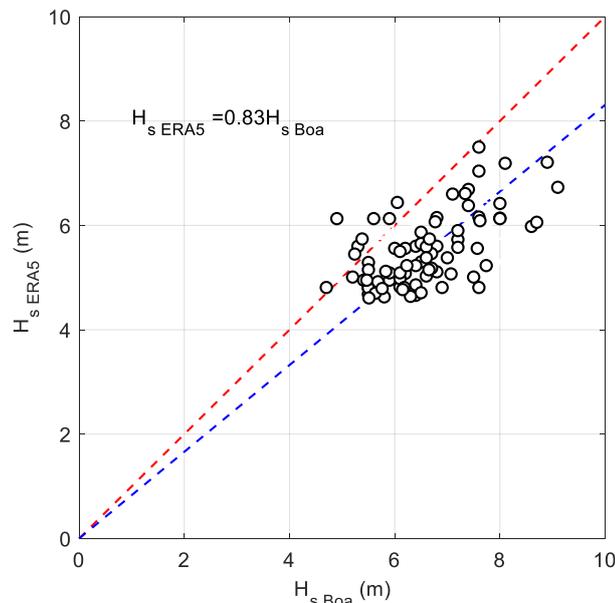
Nella Figura 8-8 gli stessi dati sono confrontati prendendo in esame solo i valori di  $H_s$  riportando in ordinata i valori ERA5 Alghero e in ascissa i valori misurati dalla boa ondometrica. Il confronto mostra di nuovo una sottostima dei valori ricostruiti.

Per calcolare un coefficiente di calibrazione medio da applicare solo agli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti in re-analisi, è stata presa in esame la retta di interpolazione di equazione  $HP = A+B \cdot HM$ . Imponendo alla stessa retta il passaggio per l'origine ( $A=0$ ), si è calcolato applicando il metodo dei minimi quadrati il coefficiente B per il quale si è ottenuto  $B = 0.83$ . Sostanzialmente per correggere la sottostima degli eventi estremi individuata nel database ERA5 è necessario incrementare i valori di  $H_s$  ricostruiti di circa il 20% (coefficiente di calibrazione 1.2).

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 41 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

Ipotizzando che anche il punto ERA5 Alghero di coordinate 40.50°N-8.00°E, posto a largo di Alghero e ricadente nella stessa area di generazione delle onde di Porto Torres sia soggetto ad un errore uguale a quello individuato per Alghero, si è deciso di introdurre nella analisi delle onde estreme del punto ERA5 lo stesso coefficiente di calibrazione determinato per Alghero.



**Figura 8-8 Confronto asincrono tra i valori al colmo delle mareggiate (con  $H_s$  maggiore di 4.5 m) registrati dalla boa di Alghero tra il 1989 e il 2014 e quelli ricostruiti dall'ECMWF in prossimità della boa ondametrica.**

## 8.5 Analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo

### 8.5.1 Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati

Per determinare la correlazione  $H_s - Tr$  ( $Tr$ = tempo di ritorno) a largo di Porto Torres, è stata eseguita l'analisi statistica degli eventi estremi utilizzando come campione di dati la serie dei colmi delle mareggiate estratti dalle serie storiche ERA5 Porto Torres calibrati come descritto nel paragrafo precedente.

Per eseguire l'analisi statistica delle altezze d'onda risulta necessario selezionare preliminarmente dei campioni di dati che rispondano al doppio requisito di risultare tra di loro statisticamente indipendenti ed omogenei.

Per quanto riguarda l'indipendenza statistica si è utilizzato il metodo POT (Peaks Over Threshold) che consiste nel prendere in esame il solo valore massimo di altezza d'onda significativa (valore di picco) che si verifica al culmine di una singola mareggiata. L'individuazione di ciascuna mareggiata nell'ambito della serie storica viene effettuata introducendo una soglia di altezza d'onda e considerando che il singolo evento (mareggiata) abbia inizio quando l'altezza d'onda significativa superi per la prima volta il valore della soglia prestabilito.

Conseguentemente si ipotizza che l'evento termini quando l'altezza d'onda significativa assume per la prima volta un valore inferiore a quello di soglia oppure quando si verifica un forte scarto della direzione del moto ondoso.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 42 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

Selezionati gli “eventi di picco”, l’omogeneità dei dati di solito viene assicurata raggruppando gli stessi dati in eventi caratterizzati da una simile genesi meteorologica. Ciò normalmente si traduce nel separare i valori massimi di altezze d’onda registrati in distinti settori di provenienza degli stati di mare.

Gli stati di mare, caratterizzati da una altezza d’onda significativa ( $H_s$ ) superiore alla soglia individuata, sono quindi oggetto di una elaborazione statistica al fine di ricavare le caratteristiche del moto ondoso da associare ad assegnati tempi di ritorno TR (o probabilità di occorrenza).

Le leggi di distribuzione di probabilità cumulata di non superamento (funzione di ripartizione) utilizzate sono:

Distribuzione di Weibull:

$$P_{Xmax}(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x - B}{A} \right)^k \right]$$

Distribuzione di Gumbel:

$$P_{Xmax}(x) = \exp \left[ - \exp \left( \frac{x - B}{A} \right) \right]$$

dove Xmax è la variabile aleatoria, x il valore di non superamento mentre A, B e k sono le costanti delle distribuzioni, che rappresentano rispettivamente il parametro di scala, di posizione e di forma. Il parametro k per la distribuzione di Weibull è assunto pari a 0.75, 1.0, 1.4 e 2.0.

La valutazione dei parametri della distribuzione richiede la preliminare stima della frequenza campionaria dei dati. Il campione dei dati viene ordinato in senso decrescente e per ogni m-esimo evento viene calcolata la frequenza campionaria di non superamento utilizzando la seguente formula di generale (plotting position):

$$\widehat{F}_m = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta}, m = 1, 2, K, \dots, N$$

Introducendo la variabile ridotta:

$$y_{(m)} = \left[ -\ln(1 - \widehat{F}_m) \right]^{\frac{1}{k}}$$

viene applicato il metodo dei minimi quadrati per determinare i parametri A e B della retta:

$$x_{(m)} = B + A \times y_{(m)}$$

Definita la funzione di probabilità di non superamento e tenendo conto che la probabilità cumulata di non superamento è legata al tempo di ritorno dell’evento dalla relazione:

$$T_r(X \leq x) = \frac{1}{(1 - P(X \leq x))}$$

è possibile valutare il valore massimo dell’altezza d’onda significativa, corrispondente ad un tempo di ritorno assegnato.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 43 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

Una volta eseguite le elaborazioni di regolarizzazione statistica (Gumbel e Weibull), occorre verificare la bontà dei risultati ottenuti. A tale scopo, Goda definisce due diversi criteri da seguire per scartare le distribuzioni statistiche non adatte:

1. Deviation of OutLier (DOL) - dove si controlla che l'evento con il maggiore valore di  $H_s$  ricada all'interno di un determinato campo di validità;
2. REsidue of Correlation coefficient (REC) - il coefficiente di correlazione residuo ( $\Delta r = 1 - r$ ) deve essere inferiore ad una determinata soglia definita come  $\Delta r = 95\%$ .

Il criterio MIR (Minimum ratio of Residual correlation coefficient), proposto sempre da Goda, consente infine di selezionare, tra le distribuzioni rimaste valide, quella che meglio si adatta al campione esaminato; tale criterio si basa sul rapporto tra il coefficiente di correlazione residuo ( $\Delta r$ ) e quello medio, che può essere stimato attraverso una relazione empirica (funzione della numerosità del campione e della distribuzione); la distribuzione di migliore adattamento è quella che presenta il minimo valore di tale rapporto.

Il metodo POT prevede che le sole mareggiate che hanno all'interno del settore di competenza un'altezza significativa massima superiore ad una certa soglia vengano utilizzate per la successiva analisi statistica degli eventi estremi; viene quindi definito il parametro di taglio (censoring parameter):

$$v = \frac{N}{N_{tot}}$$

con  $N$  = numero degli eventi sopra la soglia e  $N_{tot}$  = numero totale delle mareggiate.

La scelta del valore di soglia rappresenta uno dei limiti nell'uso del metodo POT, infatti considerare una soglia eccessivamente piccola comporta di dare maggiore peso agli eventi di modesta entità (mareggiate frequenti), mentre con una soglia eccessivamente elevata viene selezionato un numero di eventi che può risultare piccolo a discapito della bontà della regolarizzazione statistica.

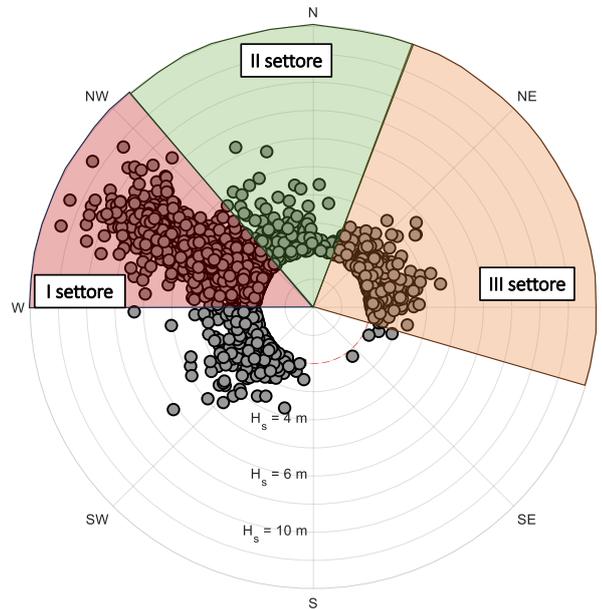
Per la definizione della soglia si è fatto riferimento al metodo di Goda il quale prevedere di scegliere un valore di soglia tale da poter includere nel campione un numero di eventi compreso tra 2 e 5 per anno.

#### 8.5.2 Statistica degli eventi estremi di moto ondoso per il punto ERA5 Porto Torres

Come precedentemente esposto, l'analisi degli estremi è stata effettuata tramite l'utilizzo del metodo POT. Il risultato dell'analisi condotta prendendo in considerazione tutte le direzioni ( $0^\circ\text{N}$ - $360^\circ\text{N}$ ) ha portato all'individuazione di tre settori di traversia, come riportato in Figura 8-9. Nella figura ogni singolo punto rappresenta il valore di  $H_s$  al culmine di un evento estremo di moto ondoso al quale è stato applicato il coefficiente di calibrazione determinato in precedenza.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 44 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002



**Figura 8-9. Distribuzione direzionale dei valori di  $H_s$  al colmo delle mareggiate estratte dalla serie storica ERA5 Porto Torres e individuazione dei settori di traversia principali.**

Il primo settore di traversia (in seguito indicato come Settore I) è compreso tra  $270^\circ\text{N}$  e  $320^\circ\text{N}$ . Questo settore risulta essere quello prevalente in quanto caratterizzato dai valori più elevati di altezza d'onda al colmo delle mareggiate e dal più elevato numero di eventi (circa 300 eventi individuati nel periodo 1940-2022).

Nella Tabella 8-4 sono riportate le caratteristiche del moto ondoso raggiunte al culmine dei 40 eventi estremi di moto ondoso di maggiore intensità in termini di  $H_s$  individuate nel Settore I.

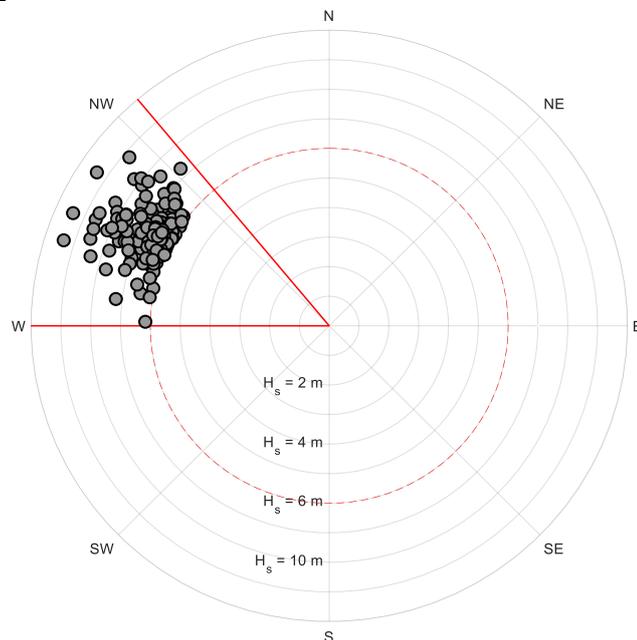
Per effettuare l'analisi statistica dei valori estremi di  $H_s$ , applicando il metodo P.O.T., è stata selezionata un'altezza d'onda di troncamento di 6.0 m.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 45 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 8-4 Elenco dei 40 eventi estremi di maggiore intensità per il Settore I.**

Settore I - [270°N - 320°N]							
Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
1987-01-11 21:00	9.40	12.58	293.92	1976-12-02 19:00	7.80	10.34	289.02
1991-12-20 16:00	9.36	11.07	303.66	2017-03-07 05:00	7.79	11.22	308.76
1999-12-28 11:00	9.36	11.30	287.99	1964-12-04 01:00	7.78	11.09	298.94
1968-01-07 23:00	8.80	11.27	310.37	1994-01-01 16:00	7.78	10.91	298.80
1952-11-07 16:00	8.62	11.18	294.65	1964-12-27 00:00	7.73	12.39	284.28
1961-11-04 19:00	8.59	11.15	296.33	2015-11-22 00:00	7.73	10.88	295.83
1997-12-03 12:00	8.56	11.30	292.50	1993-02-21 16:00	7.68	10.71	297.85
1995-05-13 17:00	8.53	11.89	290.16	1941-01-17 15:00	7.61	12.20	292.04
1959-10-29 01:00	8.34	11.31	286.36	1984-02-09 03:00	7.58	11.01	311.75
1971-11-20 03:00	8.29	11.13	300.16	2005-01-19 06:00	7.55	11.50	305.50
1978-03-22 00:00	8.21	11.11	307.18	1952-12-16 03:00	7.54	10.62	295.16
2017-12-28 05:00	8.11	11.13	293.45	1986-01-25 04:00	7.52	10.70	303.24
1972-02-12 23:00	8.09	10.97	298.45	1995-01-11 09:00	7.50	11.11	295.23
1998-01-20 15:00	8.04	10.90	308.36	1972-04-16 06:00	7.43	10.99	292.57
2022-11-22 14:00	8.00	11.11	294.47	1960-01-12 17:00	7.39	11.26	295.09
1979-01-02 03:00	7.98	11.20	297.02	1988-02-12 20:00	7.38	10.90	300.88
1979-12-31 12:00	7.87	11.13	307.11	1950-02-27 10:00	7.33	11.46	293.40
2008-11-21 22:00	7.86	10.92	293.64	1973-12-15 06:00	7.33	10.71	292.76
1986-02-10 03:00	7.82	11.33	297.51	1967-03-13 19:00	7.31	10.21	301.29
1971-11-22 22:00	7.80	10.88	295.41	2020-09-26 05:00	7.31	11.04	300.36



**Figura 8-10 Individuazione tramite metodo POT degli eventi estremi per il punto ERA5 Porto Torres 270°N – 320°N. La soglia scelta risulta pari a 6.0 m**

Il secondo settore di traversia (indicato in seguito come Settore II) risulta compreso tra le direzioni 320 °N e 20 °N.

Nella seguente Tabella 8-5 sono riportate le caratteristiche del moto ondoso raggiunte al culmine dei 40 eventi estremi di moto ondoso di maggiore intensità in termini di Hs ricadenti nel Settore II.

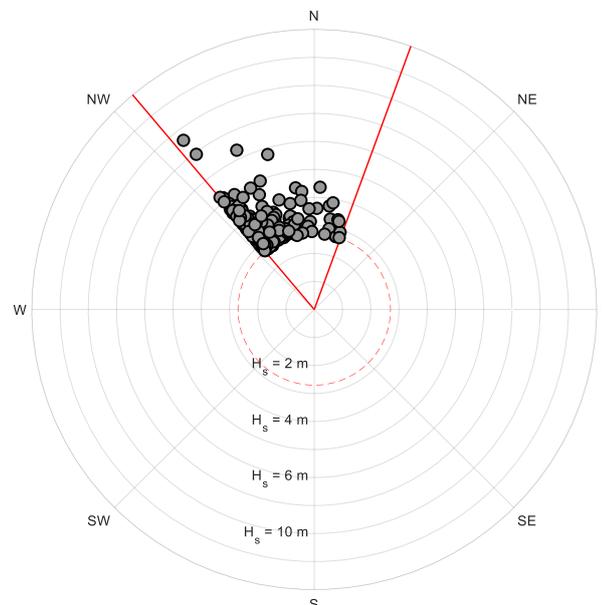
	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 46 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 8-5. Elenco dei 40 eventi estremi di maggiore intensità per il Settore II.**

Settore II - [320°N - 20°N]							
Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
1961-11-05 03:00	7.61	11.86	322.52	1978-11-29 03:00	4.54	10.44	334.62
1943-12-31 14:00	6.94	11.24	322.99	1999-11-07 17:00	4.54	11.50	320.77
1944-03-05 14:00	6.31	10.19	334.25	1995-03-30 01:00	4.50	10.14	320.25
1953-02-15 14:00	5.77	9.95	343.42	1949-03-02 16:00	4.48	10.08	322.53
1984-02-09 21:00	5.21	11.29	320.20	1974-12-30 19:00	4.48	10.26	320.10
1953-11-07 01:00	5.12	10.11	321.08	2003-12-23 05:00	4.48	11.43	321.89
1951-01-16 13:00	5.02	10.80	320.98	2020-11-20 14:00	4.42	10.48	323.02
2015-02-25 04:00	4.99	10.66	320.31	1967-01-06 10:00	4.40	8.70	324.36
1969-02-04 23:00	4.98	9.62	325.43	1967-12-12 14:00	4.39	9.51	351.34
2000-12-31 06:00	4.97	10.66	337.33	1946-11-06 21:00	4.37	7.89	2.71
2012-02-01 06:00	4.88	8.30	332.51	1989-02-14 21:00	4.37	10.82	324.07
1981-01-20 21:00	4.84	9.83	321.47	1956-02-03 02:00	4.31	11.87	323.19
2015-03-05 07:00	4.73	10.74	327.78	2013-11-11 11:00	4.31	10.85	320.48
1982-03-05 16:00	4.70	10.25	321.44	1949-02-28 17:00	4.26	10.13	322.27
1943-11-08 09:00	4.64	9.92	320.26	1998-03-24 21:00	4.24	9.40	353.99
1975-03-23 22:00	4.62	8.81	320.89	2004-12-29 15:00	4.21	11.53	320.76
1951-11-29 15:00	4.61	9.32	323.66	2016-01-16 19:00	4.20	11.20	321.49
1989-10-09 00:00	4.57	10.23	324.23	1962-12-20 06:00	4.18	9.52	322.60
2006-03-12 22:00	4.56	11.88	320.75	1943-01-03 22:00	4.14	10.21	320.75
1986-03-22 03:00	4.55	9.72	321.54	2010-03-04 09:00	4.14	6.90	323.73

Per effettuare l'analisi dei valori estremi, ponendo una soglia pari a  $H_s = 2.7$  m, si sono individuati in totale circa 210 eventi estremi per il settore II (come mostrato in Figura 8-11).



**Figura 8-11. Individuazione tramite metodo POT degli eventi estremi per il punto ERA5 Porto Torres 320°N-20°N. La soglia scelta risulta pari a 2.70 m**

Infine, si è individuato il terzo settore di traversia compreso tra 20°N e 105°N (Settore III). Al fine di ottenere lo stesso numero di eventi per il Settore III (20°N-105°N), si è posta una soglia per il troncamento degli estremi pari a  $H_s = 2.2$  m.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 47 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

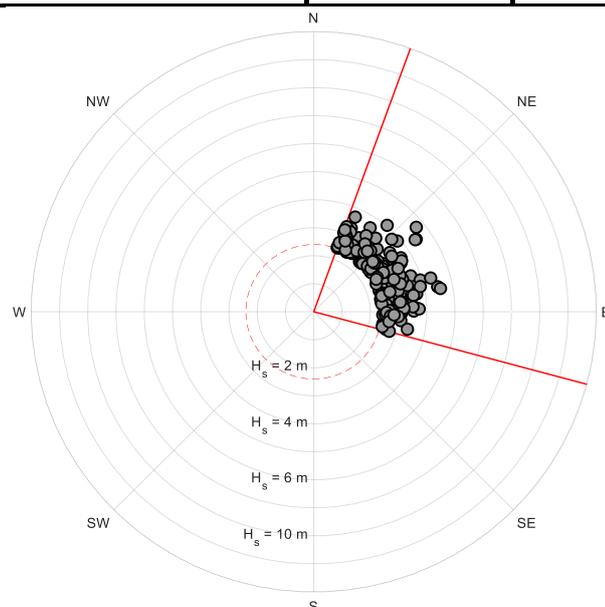
Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

Il risultato è riportato in Figura 8-12. Gli eventi estremi caratterizzate dai valori più elevati di altezza d'onda significativa  $H_s$  per il Settore III, sono riportati in Figura 8-11.

In Tabella 8-6 sono riportati gli eventi più significativi (di maggiore intensità) verificatisi dal 1940 al 2022.

**Tabella 8-6 Elenco dei 40 eventi estremi di maggiore intensità per il Settore III.**

Settore III - [20°N - 105°N]							
Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
1997-10-29 05:00	4.72	7.90	50.29	1956-02-25 09:00	3.54	7.07	60.63
1948-02-27 05:00	4.56	7.60	79.51	1974-03-21 08:00	3.54	6.42	89.63
1947-01-25 10:00	4.48	7.53	78.52	1957-01-22 23:00	3.52	6.67	80.00
2001-11-11 06:00	4.45	7.49	54.48	2010-03-03 12:00	3.52	6.46	87.14
2001-12-14 16:00	4.42	7.53	54.40	1974-03-29 19:00	3.44	6.68	74.22
2017-01-21 19:00	4.31	7.60	73.79	1964-11-08 09:00	3.42	6.54	51.85
1963-12-24 17:00	4.03	7.56	40.11	1992-12-28 21:00	3.42	7.09	39.87
1953-03-15 18:00	3.94	7.46	73.29	1998-12-03 18:00	3.40	6.87	54.35
1953-03-09 06:00	3.89	7.59	49.56	2013-03-05 22:00	3.37	5.65	100.69
1961-12-17 08:00	3.88	7.03	76.57	2006-01-30 21:00	3.36	6.84	62.61
1960-02-08 10:00	3.78	7.11	46.87	1979-12-21 22:00	3.35	6.22	69.69
2003-12-03 21:00	3.73	6.78	88.46	1980-12-28 09:00	3.31	6.90	66.93
1951-10-14 20:00	3.70	6.96	80.08	2007-12-17 17:00	3.29	6.86	34.35
1967-12-12 07:00	3.68	6.92	23.49	1941-12-26 17:00	3.26	5.87	23.95
1944-02-24 13:00	3.66	6.89	69.56	1946-11-07 04:00	3.25	8.46	21.02
1971-11-27 15:00	3.64	7.19	58.02	2019-12-04 09:00	3.23	6.40	72.02
1942-03-22 13:00	3.60	6.54	87.64	2010-03-08 21:00	3.19	6.22	87.77
1952-12-05 09:00	3.60	6.37	33.66	1946-12-18 19:00	3.18	6.45	59.40
1972-12-31 13:00	3.60	6.22	59.70	2001-11-15 13:00	3.18	6.67	61.66
2003-10-18 04:00	3.58	6.88	80.58	1946-10-11 21:00	3.17	6.76	77.39



**Figura 8-12 Individuazione tramite metodo POT degli eventi estremi per il punto ERA5 Porto Torres 20°N-105°N. La soglia scelta risulta pari a 2.40 m**

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 48 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

Sui suddetti campioni statistici si è quindi effettuata un'analisi di statistica adottando una funzione di probabilità tipo Weibull che è risultata la più adatta a rappresentare gli eventi estremi. In Figura 8-14 è mostrato il risultato dell'adattamento dei valori estremi di  $H_s$  osservati per i tre settori di traversia alla legge tipo Weibull con fattore  $k = 1$ .

Nella Tabella 8-7 sono riportati, per i tre settori di traversia, i valori di  $H_s$  e  $T_p$  relativi ai tempi di ritorno compresi tra 2 anni, 500 anni.

Ai valori estremi di  $H_s$  determinati, si sono associati i valori del periodo di picco spettrale  $T_p$  tramite la legge esponenziale:

$$T = aH_s^b$$

I risultati ottenuti, applicando il metodo dei minimi quadrati ai soli eventi estremi sopra soglia, sono riportati in Figura 8-13 nel pannello di sinistra per il Settore I, nel pannello centrale per il Settore II e nel pannello di destra per il Settore III.

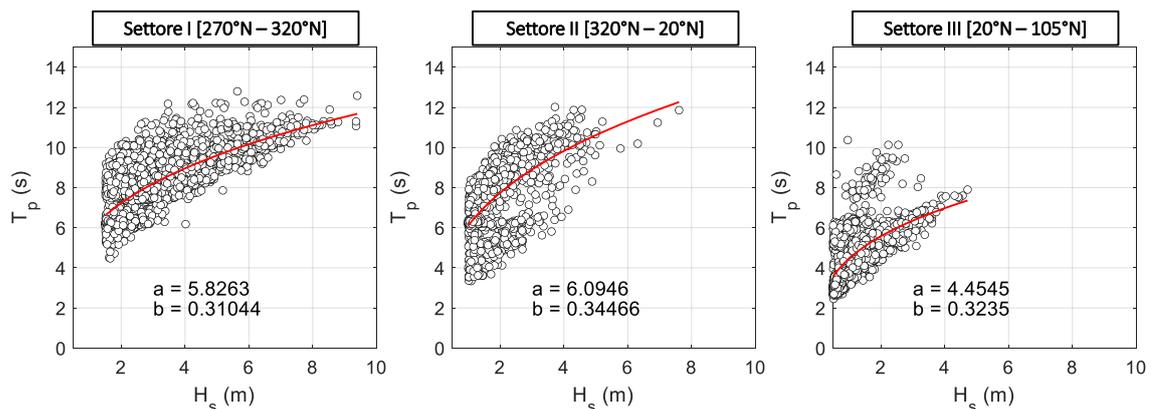


Figura 8-13. Legge  $H_s$ - $T_p$  per il Settore I (sinistra), Settore II (centro) e Settore III (destra).

Tabella 8-7. Valori estremi di  $H_s$  e  $T_p$  relativi ai tempi di ritorno compresi tra 2 anni, 500 anni per il Settore I, Settore II e Settore III.

Settore I			Settore II			Settore III		
Tr (anni)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Tr (anni)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Tr (anni)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)
2	7.20	10.75	2	4.05	9.87	2	3.19	6.49
5	7.89	11.06	5	4.77	10.44	5	3.63	6.76
10	8.42	11.29	10	5.32	10.84	10	3.96	6.95
15	8.73	11.41	15	5.64	11.06	15	4.15	7.06
20	8.95	11.50	20	5.87	11.21	20	4.29	7.14
25	9.11	11.57	25	6.04	11.33	25	4.40	7.19
50	9.64	11.77	50	6.59	11.67	50	4.73	7.36
100	10.17	11.97	100	7.13	12.00	100	5.06	7.53
150	10.48	12.08	150	7.45	12.18	150	5.25	7.62
250	10.86	12.22	250	7.86	12.40	250	5.50	7.73
500	11.39	12.40	500	8.40	12.69	500	5.83	7.88

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 49 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

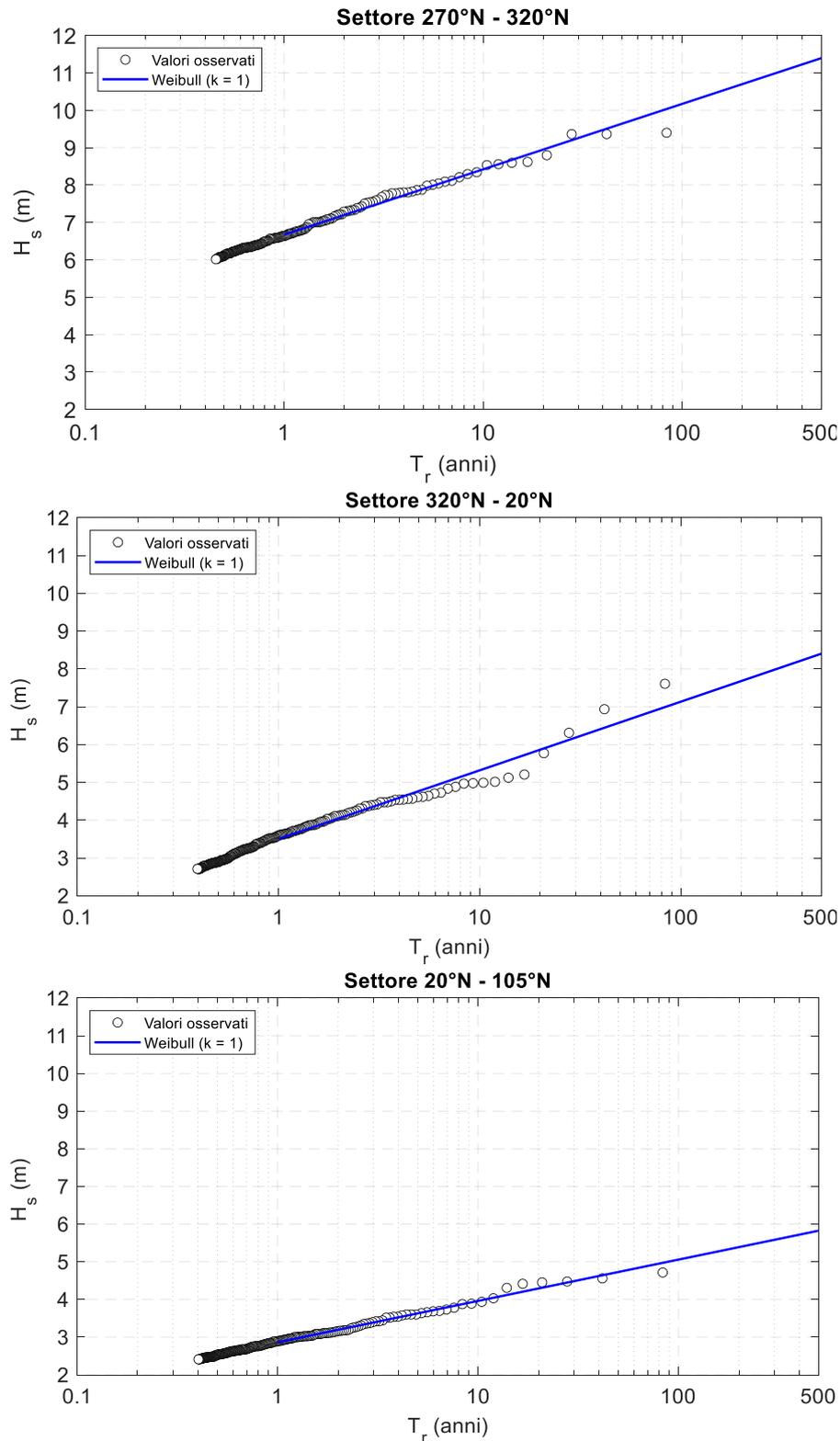


Figura 8-14. Adattamento dei valori estremi di moto ondoso estratti dalla serie ERA5 Porto Torres con la distribuzione Weibull ( $k=1.0$ ). In alto settore I (270 – 320 °N), al centro settore II (320 - 20 °N), in basso settore III (20 – 105 °N).

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 50 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## 8.6 Propagazione del moto ondoso da largo a riva

La propagazione largo-riva degli eventi estremi calcolati sulla base della serie storica ERA5 ha permesso di definire gli eventi estremi in prossimità del porto di Porto Torres.

Per effettuare la propagazione degli eventi estremi selezionati si è applicato il modello numerico di propagazione inversa spettrale MEROPE, sviluppato dalla società Modimar S.r.l..

Il modello numerico MEROPE risolve la rifrazione inversa spettrale di stati di mare (con energia dispersa in frequenza e direzione) e consente di determinare in un punto posizionato in costa (denominato punto d'inversa) le caratteristiche spettrali del moto ondoso che si propagano da largo a riva utilizzando una griglia di calcolo costruita sulla base dei dati batimetrici del paraggio d'interesse.

Il modello simula l'evoluzione spaziale di stati di mare rappresentati da uno spettro con energia distribuita in frequenza e direzione e riproduce gli effetti indotti sul moto ondoso dalla rifrazione e dallo shoaling causati dal fondale senza tenere conto degli effetti dissipativi dovuti al frangimento e dall'attrito sul fondo, utilizzando pertanto un approccio conservativo.

Il punto di inversa è stato posizionato in prossimità della diga foranea su un fondale naturale di circa 22 m.

In Figura 8-15 è rappresentato il dominio di calcolo utilizzato per le simulazioni effettuate con il modello MEROPE, definito sulla base dei dati batimetrici forniti integrati con quelli delle carte nautiche disponibili e del database opensource EMODNET.

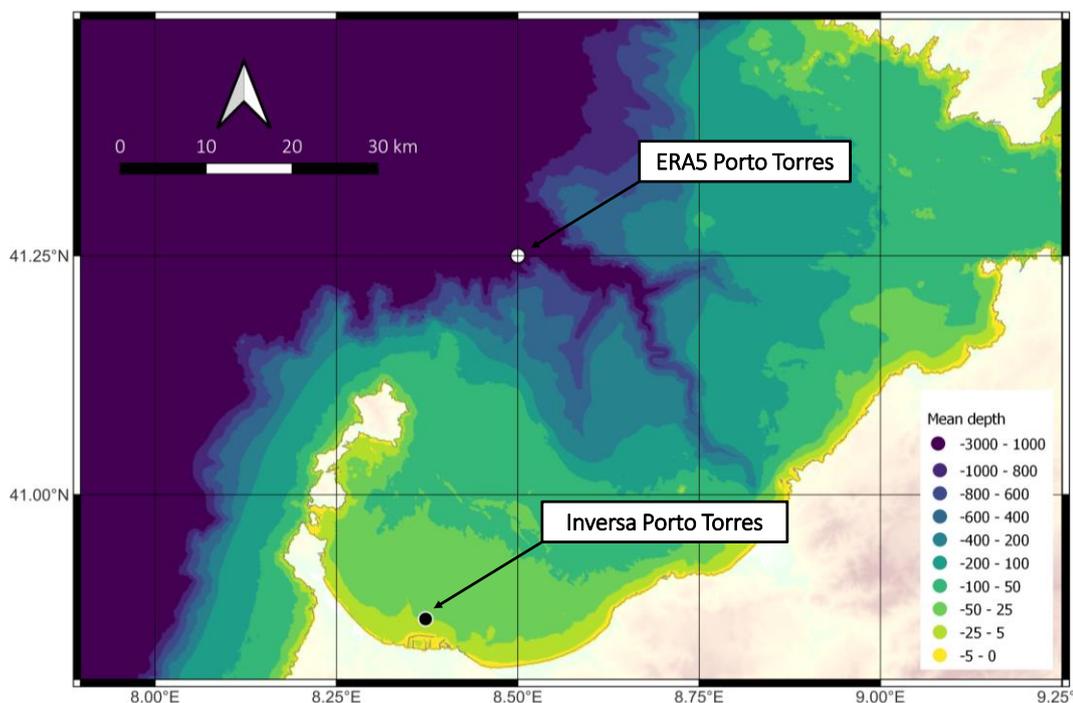


Figura 8-15 Griglia di calcolo utilizzata dal modello di inversa spettrale MEROPE

Il suddetto dominio di calcolo ha dimensioni 35000 m x 25000 m ed è numericamente definito da una griglia di calcolo rettangolare con passo di discretizzazione di 25 m in entrambe le direzioni.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 51 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

All'interno della griglia di calcolo è stato selezionato un punto di propagazione, indicato in Figura 8-15 come "Punto Inversa Porto Torres". La posizione è stata scelta in modo tale che il punto si trovasse poco al largo rispetto alla diga foranea ad una profondità di circa -22 m sul l.m.m. In Figura 8-15 è rappresentato inoltre il punto di ricostruzione del moto ondoso (hindcasting) indicato come "ERA5 Porto Torres".

### 8.6.1 Condizioni al contorno e dati di calcolo

Per il punto in costa Inversa Porto Torres sono stati calcolati 20 piani d'onda d'inversa per altrettanti periodi compresi tra 2 e 22 secondi, tracciando una serie di raggi (ortogonali ai fronti d'onda), spazati di 0.5°, sino a coprire l'intero settore (geografico) di traversia effettivo sotto costa. In Figura 8-16 sono rappresentati, a titolo di esempio, i raggi dell'inversa spettrale centrati nel punto di propagazione sotto costa ottenuti per il periodo di 5 s.

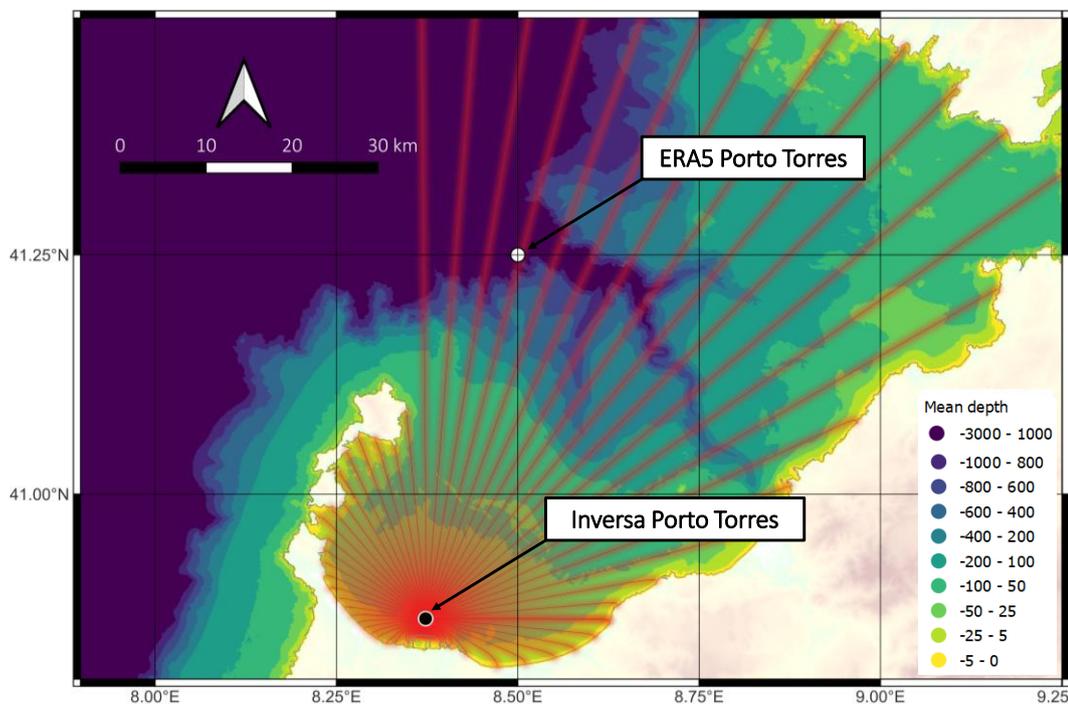


Figura 8-16 Esempio di tracciamento inverso dei raggi eseguito mediante il modello MEROPE per onde caratterizzate da periodo di 5s.

I 4000 piani d'onda inversi (20 x 200) così calcolati hanno consentito di costruire un database di correlazione largo-riva. Mediante questo database gli eventi estremi calcolati sulla base della serie storica dei dati ERA5 al largo di Porto Torres sono stati propagati nel punto prospiciente la diga foranea del porto Porto Torres ("Inversa Porto Torres").

Per simulare la dispersione dell'energia in frequenza e direzione si è utilizzata la funzione di densità spettrale:

$$S(f,\theta)=S(f)G(f,\theta)$$

dove la funzione  $S(f)$  è stata espressa con uno spettro JONSWAP con  $\gamma = 3.3$ .

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 52 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

La funzione  $G(f,\theta)$  viene esplicitata nel modello MEROPE sulla base dell'equazione fornita da Goda ponendo  $s_{max} = 18$  (onde di mare vivo). Si ricorda che le "onde di mare vivo" (sea), tipiche dell'area di generazione (fetch), hanno una elevata dispersione direzionale dell'energia e per tale ragione vengono anche chiamate "onde a cresta corta".

### 8.6.2 Propagazione degli eventi estremi

I risultati della propagazione degli eventi estremi sono riportati nella Tabella 8-8 ( $Tr = 2$  anni), nella Tabella 8-9 ( $Tr = 10$  anni), nella Tabella 8-10 ( $Tr = 50$  anni) e nella Tabella 8-11 ( $Tr = 100$  anni).

Data la equi probabilità del verificarsi degli eventi estremi ricadenti a largo in ciascuno dei tre settori di traversia individuati, ciascun settore a largo è stato discretizzato ogni  $5^\circ$ , assegnando per ciascuno di questi, a parità di tempo di ritorno, lo stesso valore di  $H_s$  e  $T_p$ .

**Tabella 8-8 Eventi estremi a largo e propagati per il tempo di ritorno  $Tr = 2$  anni.**

Tr (anni)	Settore I [230°N - 320°N]									Settore II [320°N - 20°N]									Settore III [20°N - 105°N]								
	ONDE LARGO			ONDE RIVA			ONDE LARGO			ONDE RIVA			ONDE LARGO			ONDE RIVA			ONDE LARGO			ONDE RIVA					
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)			
2	10.17	11.97	300	1.22	14.24	6.13	7.13	12.00	320	1.12	11.40	6.37	5.06	7.53	20	1.81	7.30	14.69									
	10.17	11.97	305	1.40	14.24	6.11	7.13	12.00	325	1.26	11.40	6.72	5.06	7.53	25	1.76	7.30	16.08									
	10.17	11.97	310	1.60	14.24	6.11	7.13	12.00	330	1.41	11.40	7.19	5.06	7.53	30	1.69	7.30	17.70									
	10.17	11.97	315	1.82	11.40	6.18	7.13	12.00	335	1.56	11.40	7.63	5.06	7.53	35	1.61	7.30	19.56									
	10.17	11.97	320	2.07	11.40	6.41	7.13	12.00	340	1.70	11.40	8.13	5.06	7.53	40	1.52	5.43	21.68									
							7.13	12.00	345	1.83	11.40	8.77	5.06	7.53	45	1.43	5.43	24.02									
							7.13	12.00	350	1.95	11.40	9.44	5.06	7.53	50	1.33	5.43	26.49									
							7.13	12.00	355	2.05	11.40	10.20	5.06	7.53	55	1.23	5.43	28.97									
							7.13	12.00	360	2.12	11.40	11.01	5.06	7.53	60	1.14	5.43	31.12									
							7.13	12.00	5	2.16	11.40	11.80	5.06	7.53	65	1.04	5.43	33.21									
							7.13	12.00	10	2.19	11.40	12.77	5.06	7.53	70	0.95	5.43	35.21									
							7.13	12.00	15	2.18	10.58	13.82	5.06	7.53	75	0.86	5.43	36.62									
							7.13	12.00	20	2.15	10.58	14.98	5.06	7.53	80	0.77	5.43	37.64									
													5.06	7.53	85	0.68	5.43	38.31									
													5.06	7.53	90	0.60	5.43	39.32									
													5.06	7.53	95	0.51	5.43	40.56									
												5.06	7.53	100	0.43	5.43	42.14										
												5.06	7.53	105	0.36	5.43	44.26										

**Tabella 8-9 Eventi estremi a largo e propagati per il tempo di ritorno  $Tr = 10$  anni.**

Tr (anni)	Settore I [230°N - 320°N]									Settore II [320°N - 20°N]									Settore III [20°N - 105°N]								
	ONDE LARGO			ONDE RIVA			ONDE LARGO			ONDE RIVA			ONDE LARGO			ONDE RIVA			ONDE LARGO			ONDE RIVA					
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)			
10	10.17	11.97	300	1.48	14.24	6.16	7.13	12.00	320	1.53	11.40	6.42	5.06	7.53	20	2.23	7.30	14.78									
	10.17	11.97	305	1.70	14.24	6.15	7.13	12.00	325	1.72	11.40	6.76	5.06	7.53	25	2.17	7.30	16.12									
	10.17	11.97	310	1.95	14.24	6.17	7.13	12.00	330	1.92	11.40	7.20	5.06	7.53	30	2.08	7.30	17.67									
	10.17	11.97	315	2.21	11.40	6.26	7.13	12.00	335	2.12	11.40	7.62	5.06	7.53	35	1.98	7.30	19.46									
	10.17	11.97	320	2.50	11.40	6.49	7.13	12.00	340	2.30	11.40	8.10	5.06	7.53	40	1.87	7.30	21.51									
							7.13	12.00	345	2.47	11.40	8.68	5.06	7.53	45	1.75	7.30	23.79									
							7.13	12.00	350	2.61	11.40	9.32	5.06	7.53	50	1.63	7.30	26.22									
							7.13	12.00	355	2.72	11.40	10.04	5.06	7.53	55	1.52	7.30	28.69									
							7.13	12.00	360	2.79	11.40	10.84	5.06	7.53	60	1.40	7.30	30.87									
							7.13	12.00	5	2.84	11.40	11.64	5.06	7.53	65	1.28	5.43	32.96									
							7.13	12.00	10	2.84	11.40	12.60	5.06	7.53	70	1.18	5.43	34.88									
							7.13	12.00	15	2.81	11.40	13.65	5.06	7.53	75	1.07	5.43	36.25									
							7.13	12.00	20	2.75	10.58	14.80	5.06	7.53	80	0.96	5.43	37.22									
													5.06	7.53	85	0.85	5.43	37.84									
													5.06	7.53	90	0.75	5.43	38.80									
													5.06	7.53	95	0.64	5.43	39.98									
												5.06	7.53	100	0.55	5.43	41.41										
												5.06	7.53	105	0.46	10.58	43.34										

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 53 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 8-10. Eventi estremi a largo e propagati per il tempo di ritorno  $T_r = 50$  anni.**

Tr (anni)	Settore I [230°N - 320°N]						Settore II [320°N - 20°N]						Settore III [20°N - 105°N]					
	ONDE LARGO			ONDE RIVA			ONDE LARGO			ONDE RIVA			ONDE LARGO			ONDE RIVA		
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
50	10.17	11.97	300	1.76	14.24	6.25	7.13	12.00	320	2.00	11.40	6.57	5.06	7.53	20	2.64	7.30	14.95
	10.17	11.97	305	2.02	14.24	6.25	7.13	12.00	325	2.24	11.40	6.91	5.06	7.53	25	2.57	7.30	16.25
	10.17	11.97	310	2.31	14.24	6.27	7.13	12.00	330	2.48	11.40	7.34	5.06	7.53	30	2.48	7.30	17.75
	10.17	11.97	315	2.62	14.24	6.37	7.13	12.00	335	2.71	11.40	7.76	5.06	7.53	35	2.36	7.30	19.46
	10.17	11.97	320	2.95	11.40	6.60	7.13	12.00	340	2.92	11.40	8.23	5.06	7.53	40	2.22	7.30	21.40
							7.13	12.00	345	3.12	11.40	8.79	5.06	7.53	45	2.08	7.30	23.55
							7.13	12.00	350	3.27	11.40	9.41	5.06	7.53	50	1.94	7.30	25.84
							7.13	12.00	355	3.39	11.40	10.11	5.06	7.53	55	1.80	7.30	28.19
							7.13	12.00	360	3.46	11.40	10.88	5.06	7.53	60	1.66	7.30	30.31
							7.13	12.00	5	3.51	11.40	11.69	5.06	7.53	65	1.53	7.30	32.36
							7.13	12.00	10	3.50	11.40	12.60	5.06	7.53	70	1.40	7.30	34.27
							7.13	12.00	15	3.46	11.40	13.59	5.06	7.53	75	1.28	7.30	35.68
							7.13	12.00	20	3.38	10.58	14.68	5.06	7.53	80	1.15	10.58	36.73
													5.06	7.53	85	1.04	10.58	37.44
													5.06	7.53	90	0.92	10.58	38.45
													5.06	7.53	95	0.80	10.58	39.62
												5.06	7.53	100	0.69	10.58	40.91	
												5.06	7.53	105	0.58	10.58	42.57	

**Tabella 8-11. Eventi estremi a largo e propagati per il tempo di ritorno  $T_r = 100$  anni.**

Tr (anni)	Settore I [230°N - 320°N]						Settore II [320°N - 20°N]						Settore III [20°N - 105°N]					
	ONDE LARGO			ONDE RIVA			ONDE LARGO			ONDE RIVA			ONDE LARGO			ONDE RIVA		
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
100	10.17	11.97	300	1.89	14.24	6.31	7.13	12.00	320	2.22	11.40	6.66	5.06	7.53	20	2.83	7.30	15.03
	10.17	11.97	305	2.17	14.24	6.30	7.13	12.00	325	2.47	11.40	7.00	5.06	7.53	25	2.75	7.30	16.33
	10.17	11.97	310	2.47	14.24	6.32	7.13	12.00	330	2.73	11.40	7.43	5.06	7.53	30	2.65	7.30	17.81
	10.17	11.97	315	2.80	14.24	6.42	7.13	12.00	335	2.97	11.40	7.84	5.06	7.53	35	2.52	7.30	19.50
	10.17	11.97	320	3.15	14.24	6.65	7.13	12.00	340	3.20	11.40	8.32	5.06	7.53	40	2.38	7.30	21.41
							7.13	12.00	345	3.39	11.40	8.86	5.06	7.53	45	2.23	7.30	23.52
							7.13	12.00	350	3.55	11.40	9.48	5.06	7.53	50	2.08	7.30	25.77
							7.13	12.00	355	3.67	11.40	10.18	5.06	7.53	55	1.93	7.30	28.06
							7.13	12.00	360	3.75	11.40	10.94	5.06	7.53	60	1.78	7.30	30.15
							7.13	12.00	5	3.80	11.40	11.74	5.06	7.53	65	1.64	7.30	32.17
							7.13	12.00	10	3.79	11.40	12.63	5.06	7.53	70	1.51	10.58	34.05
							7.13	12.00	15	3.74	11.40	13.59	5.06	7.53	75	1.37	10.58	35.45
							7.13	12.00	20	3.65	10.58	14.63	5.06	7.53	80	1.24	10.58	36.50
													5.06	7.53	85	1.12	10.58	37.24
													5.06	7.53	90	0.99	10.58	38.24
													5.06	7.53	95	0.87	10.58	39.40
												5.06	7.53	100	0.75	10.58	40.63	
												5.06	7.53	105	0.64	10.58	42.19	

Dalle tabelle è possibile identificare per ciascun tempo di ritorno la direzione a riva (e quindi anche la corrispondente direzione largo) alla quale corrisponde il maggior valore dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  in costa. I periodi di picco  $T_p$  al largo sono stati calcolati attraverso la legge di correlazione  $H_s$ - $T_p$  relativa ad entrambi i settori di traversia identificati.

### 8.7 Caratteristiche del moto ondoso in prossimità del punto di ormeggio

Per definire le condizioni di moto ondoso in prossimità del punto di ormeggio è stato applicato il modello numerico di diffrazione/riflessione VEGA sviluppato dalla Modimar srl.

Il modello VEGA è in grado di simulare la propagazione di onde armoniche lineari all'interno di un dominio di calcolo riproducendo i processi di diffrazione e riflessione del moto ondoso, che risultano dominanti nel caso della propagazione delle onde all'interno di specchi portuali.

Il modello numerico di calcolo è basato sull'equazione differenziale alle derivate parziali di Helmholtz, risolta con la tecnica degli elementi di contorno (boundary elements).

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 54 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

Le simulazioni sono state condotte prendendo a riferimento, per ogni settore di traversia, gli stati di mare più significativi ai fini dell'agitazione ondosa all'interno dello specchio acqueo portuale, caratterizzati da tempi di ritorno rispettivamente di 2, 10, 50 e 100 anni.

Le simulazioni sono state condotte a fondo fisso assumendo una profondità di 20 m per tutto il dominio di calcolo. Le simulazioni sono state effettuate tenendo conto della dispersione in direzione dell'energia associata al moto ondoso.

A titolo di esempio in Figura 8-17 è riportato il risultato della simulazione dello stato di mare con direzione di provenienza 15°N e periodo di 12 s, rappresentativo di stati di mare caratterizzati da tempi di ritorno di 50-100 anni. In allegato sono riportati tutti i risultati delle simulazioni condotte.

Porto industriale di Porto Torres - Configurazione di progetto  
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

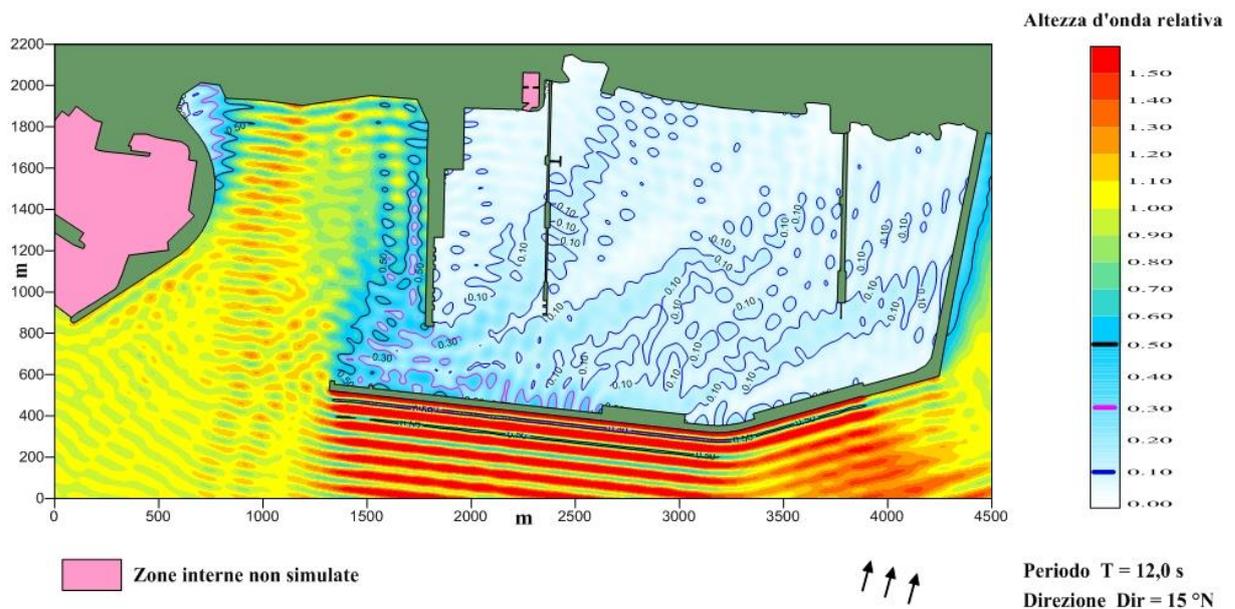


Figura 8-17. Campo di altezza d'onda relativa ottenuto per lo stato di mare da 15°N e periodo  $T=12$  s.

Essendo il modello lineare, i risultati possono essere rappresentati utilizzando il coefficiente di altezza d'onda relativa (o c.d. coeff. di diffrazione  $C_d$ ), che esprime il rapporto tra l'altezza d'onda calcolata nel punto e l'altezza d'onda incidente all'esterno del porto. Per ottenere il valore dell'altezza d'onda in un punto è sufficiente moltiplicare il coefficiente di diffrazione/riflessione mostrato nel diagramma per il valore dell'altezza dell'onda incidente.

Come riportato in Tabella 8-12, i valori di  $C_d$  ottenuti in corrispondenza della zona di ormeggio risultano compresi tra un minimo di 0.120 e un massimo di 0.165 in relazione alle diverse direzioni dell'onda incidente e dei diversi valori del periodo esaminati.

Applicando i valori del coefficiente  $C_d$  ai valori di  $H_s$  all'imboccatura del porto sono stati determinati i valori di altezza d'onda in corrispondenza della zona di ormeggio (Tabella 8-12).

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 55 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

Per stati di mare provenienti da ponente (270-320°N), che sottocosta si presentano da Nord, i valori di altezza d'onda attesi all'ormeggio sono compresi tra un minimo di 0.3 m (Tr 2 anni) e un massimo di 0.4 m (Tr 100 anni).

Per stati di mare provenienti da maestrale (320 – 20°N), che si presentano in prossimità del porto con direzione 15°N, i valori di altezza d'onda attesi all'ormeggio sono compresi tra un minimo di 0.4 m (Tr 2 anni) e un massimo di 0.6 m (Tr 100 anni).

Infine per gli stati mare provenienti da grecale-levante, caratterizzati da periodo inferiore a 7 secondi, assumendo una direzione di provenienza sottocosta di 30°N, i valori attesi di altezza d'onda risultano compresi tra un minimo di 0.2 m e un massimo di 0.3 m sempre in relazione ai diversi tempi di ritorno presi in esame.

**Tabella 8-12. Caratteristiche del moto ondoso in corrispondenza dell'ormeggio della FSRU per stati di mare caratterizzati da tempi di ritorno di 2, 10, 50 e 100 anni.**

Settore di provenienza del moto ondoso al largo	Moto ondoso sottocosta all'esterno del porto		Altezza d'onda relativa (coeff. di diffrazione)	Tempo di ritorno	Altezza d'onda all'imboccatura	Altezza d'onda zona di ormeggio
	Dir	Periodo Tp				
	°N	(s)	-	(anni)	(m)	Cd × Hs (m)
I [270-320°N]	0	10-12	0.13	2	2.1	0.3
II [320 - 20°N]	15	10-12	0.165	2	2.2	0.4
III [20 - 105°N]	30	7	0.12	2	1.8	0.2
I [270-320°N]	0	10-12	0.13	10	2.5	0.3
II [320 - 20°N]	15	10-12	0.165	10	2.8	0.5
III [20 - 105°N]	30	7	0.12	10	2.2	0.3
I [270-320°N]	0	10-12	0.13	50	3.0	0.4
II [320 - 20°N]	15	10-12	0.165	50	3.5	0.6
III [20 - 105°N]	30	7	0.12	50	2.6	0.3
I [270-320°N]	0	12	0.13	100	3.2	0.4
II [320 - 20°N]	15	10-12	0.165	100	3.8	0.6
III [20 - 105°N]	30	7	0.12	100	2.8	0.3

Nell'ambito del presente studio è stata inoltre effettuata una stima preliminare delle onde di lungo periodo (Bound-long waves, BLW) "legate" agli stati di mare estremi di breve periodo generati dal vento. Tali onde di lungo periodo sono risultate di modesta entità e pertanto poco rilevanti per la nave all'ormeggio. Nelle successive fasi di progettazione questo aspetto verrà comunque ulteriormente approfondito.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 56 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## 9 VARIAZIONI DEL LIVELLO DEL MARE

### 9.1 Maree astronomiche e meteorologiche

Le variazioni del livello del mare in prossimità della costa sono dovute a varie cause, tra le quali risultano prevalenti le seguenti:

- maree astronomiche: variazioni del livello del mare dovute all'interazione tra le masse oceaniche e il campo gravitazionale degli astri posti in prossimità della terra tra i quali quelli della luna e del sole risultano i più importanti. Poiché si può assumere che i moti relativi degli astri e della terra e le loro periodicità siano note con ottima approssimazione, si può ritenere che le maree astronomiche siano ricostruibili e prevedibili in senso deterministico;
- maree meteorologiche: variazioni del livello del mare dovute a perturbazioni atmosferiche (processo stocastico). La componente meteorologica della marea è indotta essenzialmente da due fenomeni che si esplicano contemporaneamente:
  - (i) l'effetto barometrico inverso;
  - (ii) l'azione esercitata dal vento sulle masse oceaniche ("wind set-up").

In presenza di perturbazioni meteorologiche di tipo ciclonico (depressioni atmosferiche) con vento che spira verso la costa, si verifica un aumento del livello del mare comunemente indicato con il termine sovrizzo di tempesta ("storm surge").

In presenza di alte pressioni (anticicloni) i venti sono generalmente deboli per cui prevale l'effetto barometrico inverso che dà origine ad un abbassamento del livello medio marino.

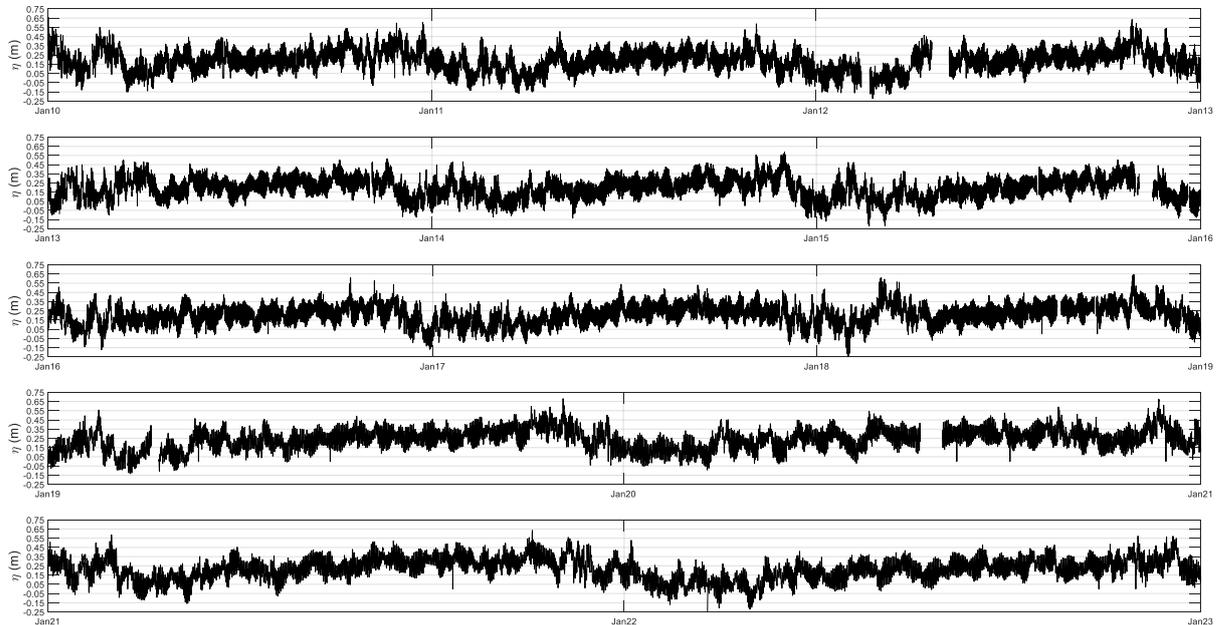
Per analizzare le variazioni del livello del mare si è fatto riferimento ai dati registrati dalla stazione mareografica di Porto Torres, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (RMN) gestita da ISPRA. La stazione acquisisce, oltre alla misura del livello idrometrico, anche i valori di temperatura e pressione atmosferica, nonché i venti (velocità e direzione).

I grafici di Figura 9-1 riportano i livelli idrometrici registrati dalla stazione mareografica di Porto Torres nel periodo 2010-2023. Da osservare che lo zero dello strumento non coincide con il livello medio del mare.

La marea astronomica a Porto Torres è di tipo misto semidiurno (periodo 12 ore e 30 minuti) con due alte e due basse maree, di diversa ampiezza. L'ampiezza di marea presenta escursioni di livello medie di circa 0,2 m. Durante le fasi sizigiali si ha un aumento dell'ampiezza della marea che può raggiungere una escursione di circa 40 cm.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 57 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

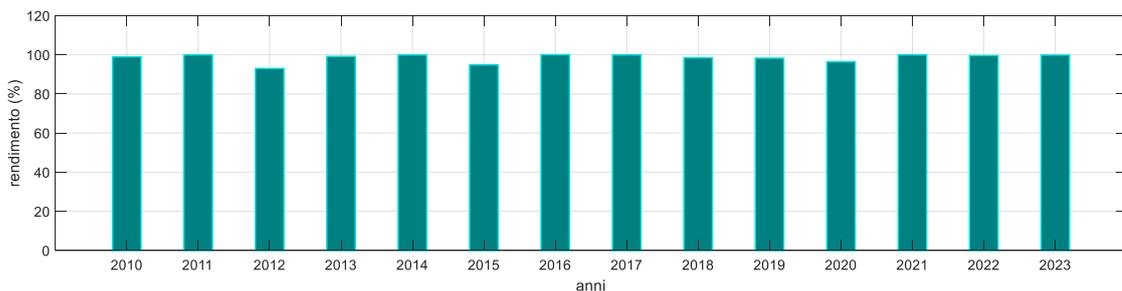


**Figura 9-1. Livelli idrometrici osservati dalla stazione mareografica di Porto Torres periodo 2010 - 2023.**

Per la valutazione della componente astronomica della marea, le misure mareografiche effettuate dalla stazione di Porto Torres sono più che sufficienti per valutare le costanti armoniche di marea.

I livelli rappresentati in Figura 9-1 sono riferiti allo zero dello strumento (zero idrometrico) che in generale non è detto che coincida con il livello medio del mare.

Come è desumibile dalla Figura 9-2, il rendimento della stazione mareografica si può considerare elevato.



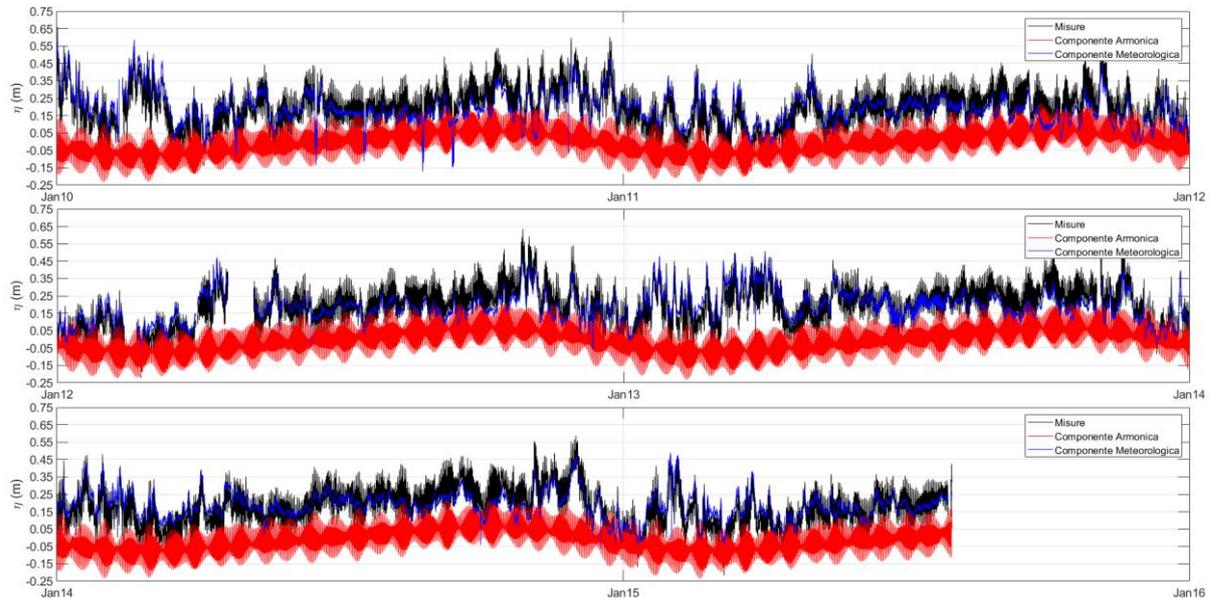
**Figura 9-2. Rendimento annuale della stazione mareografica di Porto Torres periodo di riferimento 2010-2023.**

Le misure acquisite dallo strumento sono state processate mediante l'algoritmo T-Tide di Pawlowicz et al., 2002, comunemente utilizzato a livello mondiale, al fine di ottenere le costanti armoniche relative alla marea astronomica.

Una volta determinato il segnale di livello dovuto alla sola marea astronomica, i livelli indotti dalla sola componente meteorologica (residuo) sono stati ottenuti sottraendo alle misure la componente astronomica.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 58 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002



**Figura 9-3** Analisi di una porzione della serie storica delle misure di livello misurate presso la stazione RMN di Porto Torres: identificazione della componente armonica e meteorologica.

La Figura 9-3 mostra a titolo di esempio una porzione del risultato dell'analisi condotta. Nel grafico sono rappresentate: le misure di livello (in nero), la componente armonica (in rosso) e la componente residua dovuta prevalentemente alla marea meteorologica (in blu).

I valori caratteristici della marea astronomica a Porto Torres sono sintetizzati in Tabella 9-1 dove si è utilizzata la nota simbologia internazionale per la loro caratterizzazione.

**Tabella 9-1** Livelli caratteristici della marea astronomica per la stazione di Porto Torres. Ricostruzione basata su circa quattordici anni di misura.

	Zero - Idrometrico (m)	L.M.M. (m)
HAT	0.41	0.22
MHWS	0.32	0.13
MHWN	0.28	0.09
MSL	0.19	0.00
MLWN	0.11	-0.08
MLWS	0.05	-0.14
LAT	-0.05	-0.24

Una volta identificata la serie storica della sola componente meteorologica (residuo) è stata effettuata l'analisi dei valori estremi dei valori massimi del segnale ottenuto. L'analisi degli eventi estremi è stata effettuata utilizzando il metodo dei picchi sopra soglia (POT) con valore di soglia del sovrizzo meteorologico pari a +0.4 m sul l.m.m.

La distribuzione di probabilità che meglio approssima i dati è risultata essere la distribuzione di Weibull ( $k = 1$ ).

In Figura 9-4 viene riportato l'andamento del sovrizzo meteorologico in funzione del tempo di ritorno  $T_r$ , mentre la Tabella 9-2 mostra i valori numerici associati ad alcuni tempi di ritorno selezionati.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 59 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

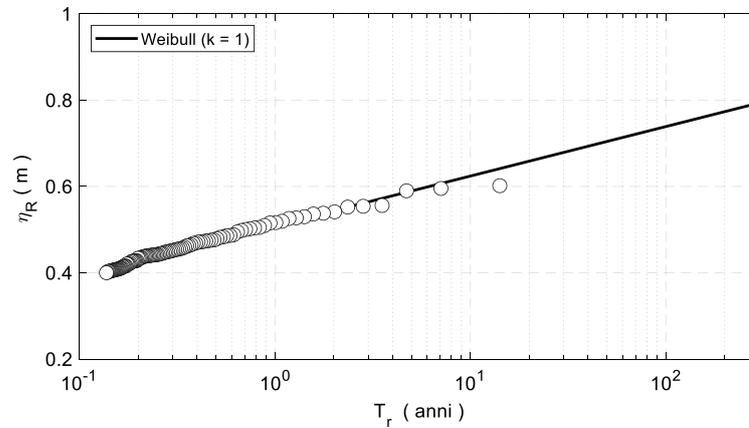


Figura 9-4 Analisi degli estremi con soglia pari a 0.4 m per Porto Torres.

Tabella 9-2 Valori estremi del sovrizzo residuo in funzione del tempo di ritorno  $T_r$  per il porto di Porto Torres.

$T_r$ (anni)	Livello (m)
2	0.54
5	0.59
10	0.62
15	0.64
20	0.66
25	0.67
50	0.70
100	0.74
250	0.78

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 60 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## 10 VALUTAZIONE DELLA TRACIMAZIONE

### 10.1 Introduzione

Il nuovo terminale prevede la realizzazione di una nuova banchina di ormeggio per la nave FSRU ubicata a ridosso della diga foranea di sopraflutto del porto industriale di Porto Torres.

La diga foranea esistente protegge efficacemente la zona di ormeggio dal moto ondoso prevalente proveniente dal I° ma può essere soggetta a fenomeni di tracimazione in occasione di stati di mare estremi. La diga foranea a parete verticale è costituita da cassoni cellulari con coronamento di calcestruzzo sul quale è presente un muro paraonde che presenta una quota sommitale di +7.35 m sul l.m.m..

Per garantire la sicurezza delle navi all'ormeggio, delle attrezzature e degli impianti previsti in banchina, e del personale operativo è necessario verificare che la diga assicuri una adeguata protezione nei confronti della tracimazione del moto ondoso, anche in condizioni meteomarine estreme.

In questo contesto l'obiettivo del presente paragrafo è quello di fornire una valutazione preliminare delle portate e dei volumi di tracimazione della diga foranea che si possono verificare in occasione di eventi di mareggiata estremi.

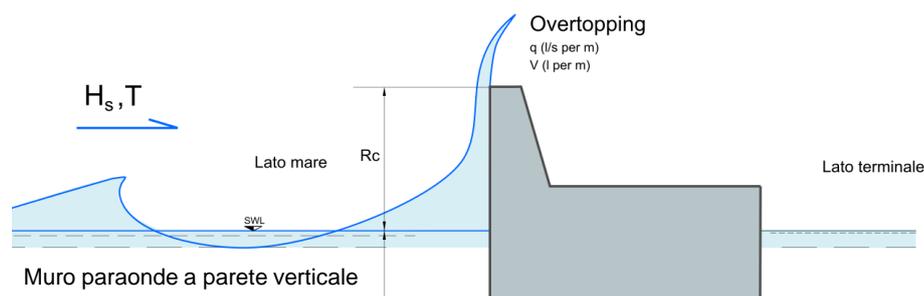
Lo studio fa riferimento al manuale "EurOtop 2018 - Manual on wave overtopping of sea defences and related structures" che rappresenta a livello internazionale la guida più aggiornata ed esaustiva in merito alle problematiche dovute alla tracimazione del moto ondoso e alle conseguenze che possono essere causate dal moto ondoso che tracima le strutture.

La tracimazione (overtopping) di un'opera foranea a parete verticale si verifica a causa delle onde che impattano e risalgono sulla parete. Se i livelli di risalita delle onde sono sufficientemente alti, l'acqua raggiunge e supera la cresta. In questo caso avviene il sormonto della struttura ed una lama d'acqua diretta verso l'alto viene lanciata oltre la cresta del muro.

Per descrivere l'overtopping si ricorre alla portata media di tracimazione per metro lineare di coronamento  $q$  ( $l/s/m$ ) espressa in litri al secondo. Un altro parametro molto importante è il volume massimo di acqua che tracima la diga associato ad ogni singola onda  $V_{max}$ , espresso in litri per metro lineare di coronamento.

L'overtopping dipende da molti fattori che sono strettamente collegati alle condizioni di moto ondoso e livello del mare e alle caratteristiche geometriche e tipologiche dell'opera in esame.

Per un'opera foranea a parete verticale il parametro più influente sulla tracimazione è certamente la quota della cresta del muro paraonde  $R_c$ .



	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 61 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

Il manuale EuroTop, in relazione alla tipologia dell'opera e al rischio per opere, equipaggiamenti e persone che si trovano in prossimità del coronamento, definisce dei limiti sia per le portate  $q$  che per il volume  $V_{max}$ .

Il coronamento di una diga foranea a parete verticale, come quella in esame, è generalmente costituito da un getto massivo di calcestruzzo armato che può resistere anche a rilevanti tracimazioni. Per questa tipologia di strutture la definizione delle portate e dei volumi di tracimazione non è quindi legata alla progettazione strutturale dell'opera, ma piuttosto al suo utilizzo, quando sono presenti imbarcazioni all'ormeggio, quando su di essa sono presenti particolari attrezzature (come ad esempio tubazioni, gru, ecc.) e/o viene correntemente utilizzata anche da personale operativo.

Per equipaggiamenti posti dietro al muro paraonde, ad una distanza di 5-10 m, il valore limite per la portata media indicato dal manuale è:  $q < 1.0$  l/s/m, con un volume massimo per una singola onda pari a  $V < 1000$  l/m ( $1.0$  m<sup>3</sup>/m).

I limiti di tracimazione indicati dall'EuroTop per le persone presenti a tergo del muro paraonde sono più stringenti e sono compresi tra  $0.1 < q < 10$  l/s/m in relazione all'altezza dell'onda incidente, con un volume massimo overtopping di 600 l/m ( $0.6$  m<sup>3</sup>/m).

Table 3.2: General limits for overtopping for property behind the defence

Hazard type and reason	Mean discharge $q$ (l/s per m)	Max volume $V_{max}$ (l per m)
Significant damage or sinking of larger yachts; $H_{m0} > 5$ m	>10	>5,000 – 30,000
Significant damage or sinking of larger yachts; $H_{m0} = 3-5$ m	>20	>5,000 – 30,000
Sinking small boats set 5-10 m from wall; $H_{m0} = 3-5$ m Damage to larger yachts	>5	>3,000-5,000
Safe for larger yachts; $H_{m0} > 5$ m	<5	<5,000
Safe for smaller boats set 5-10 m from wall; $H_{m0} = 3-5$ m	<1	<2,000
Building structure elements; $H_{m0} = 1-3$ m	$\leq 1$	<1,000
Damage to equipment set back 5-10m	$\leq 1$	<1,000

## 10.2 Geometria della sezione trasversale di calcolo

Per il calcolo della tracimazione è stata presa in esame la sezione trasversale della diga foranea esistente a parete verticale di tipo composto, con cassoni cellulari prefabbricati, imbasati alla quota -15.0 m s.l.m. su uno scanno di imbasamento protetto da una mantellata costituita da massi naturali.

La quota del coronamento  $R_c$  è uguale a + 7.35 m sul l.m.m., la profondità al piede dell'opera risulta pari a  $h = - 21$  m, la profondità sulla berma della scogliera di protezione al piede del cassone, risulta  $d = - 14.0$  m.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 62 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

### 10.3 Condizioni per il calcolo della portata di tracimazione

Il calcolo della tracimazione è stato effettuato per stati di mare contraddistinti da un tempo di ritorno 2, 10 e 50 anni.

Utilizzando i risultati della propagazione del moto ondoso sottocosta e i risultati dell'analisi dei livelli precedentemente illustrati sono stati definiti i seguenti stati di mare:

Tr (anni)	Hs (m)	Tp (s)	SWL (m)
2	2.2	10	0.50
10	3.0	11	0.72
50	3.5	12	0.75

Ad ogni condizione di moto ondoso estrema è stato associato un livello del mare (SWL) dato dalla somma della massima alta marea in fase sizigiale MHWS e dal sovrizzo di tempesta atteso.

Data la scarsa probabilità che i due eventi avvengano simultaneamente, si è assunto che l'evento di moto ondoso con Tr 50 anni possa avvenire in concomitanza di un livello del sovrizzo con Tr 10 anni.

Il calcolo della tracimazione è stato effettuato, seguendo un approccio cautelativo, assumendo condizioni di attacco ortogonali per il moto ondoso incedente.

### 10.1 Calcolo della portata media di tracimazione secondo EuroTop

Il manuale EuroTop II fornisce un metodo di calcolo per la stima della portata media di tracimazione basandosi sulla seguente equazione generale:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = a \cdot \exp \left[ - \left( b \frac{R_c}{H_{mo}} \right)^c \right]$$

che mette in relazione la portata adimensionale di overtopping, calcolata per un metro lineare di diga, ovvero  $q/\sqrt{(gH_{mo}^3)}$  con il valore del bordo libero relativo (relative freeboard)  $R_c/H_{mo}$  dell'opera.

Nella equazione sopra riportata i parametri  $a$ ,  $b$ , e  $c$  devono essere definiti come di seguito esposto.

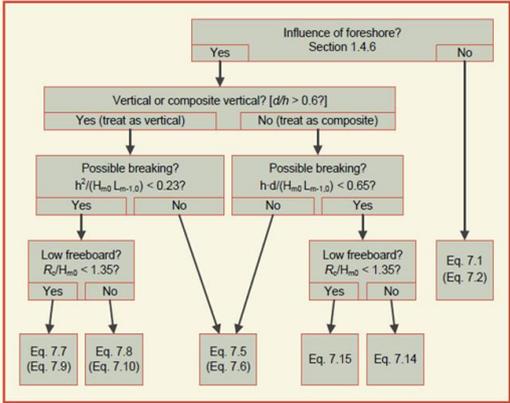
Per opere a parete verticale il manuale fornisce diverse formulazioni nelle quali i parametri della precedente equazione sono definiti in relazione alle condizioni di moto ondoso al piede dell'opera e ai risultati di numerosi test di laboratorio di tracimazione.

La seguente Tabella 10-1 riporta i risultati del calcolo della tracimazione per i diversi stati di mare presi in esame.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 63 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 10-1. Calcolo delle portate di tracimazione della diga foranea esistente a parete verticale per stati di mare con tempo di ritorno 2, 10 e 50 anni**

<b>ONDA DA GRECALE - ATTACCO NORMALE</b>			<b>Tr2</b>	<b>Tr10</b>	<b>Tr50</b>	
<b>CONDIZIONI DI LIVELLO E MOTO ONDOSO</b>			Tr = 2 anni	Tr = 10 anni	Tr = 50 anni	
Livello del mare	SWL	m	<b>0.5</b>	<b>0.72</b>	<b>0.75</b>	
Altezza d'onda al largo	$H_{mo, deep}$	m	<b>4.0</b>	<b>5.3</b>	<b>7.1</b>	
Altezza significativa dell'onda	$H_{mo}$	m	<b>2.2</b>	<b>3.0</b>	<b>3.5</b>	
Periodo di picco	$T_p$	s	<b>10.0</b>	<b>11.0</b>	<b>12.0</b>	
Periodo dell'onda spettrale	$T_{m-1,0}$	s	<b>9.1</b>	<b>10.0</b>	<b>10.9</b>	
Angolo di attacco del moto ondoso	$b$	°	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
Lunghezza d'onda in acqua profonda	$L_{m-1,0}$	m	129	156	186	
Ripidità dell'onda	$S_{m-1,0}$		0.02	0.02	0.02	
Fattore di riduzione dovuto all'obliquità dell'onda	$g_b$		1.0	1.0	1.0	
<b>GEOMETRIA DELLA SEZIONE</b>						
Pendenza del fondale	m	-	1/200	1/200	1/200	
Profondità al largo	$h_o$	m	21.5	21.5	21.5	
Profondità al piede	$h$	m	<b>21.0</b>	<b>21.0</b>	<b>21.0</b>	
Profondità della berma al piede	$d$	m	<b>14.0</b>	<b>14.0</b>	<b>14.0</b>	
Altezza del muro paraonde	$R_c$	m	<b>7.35</b>	<b>7.35</b>	<b>7.35</b>	
	$h^*$	m	21.5	21.7	21.8	
	$d^*$	m	14.5	14.7	14.8	
Altezza della cresta rispetto a SWL	$R_c^*$	m	6.9	6.6	6.6	
Altezza relativa della cresta	$R_c^*/H_{mo}$	-	3.11	2.21	1.89	
	$h^*/H_{mo}$	-	9.8	7.2	6.2	
	$d^*/h^*$	-	0.7	0.7	0.7	
			<b>STEP1</b>	deep water	deep water	shallow water
			<b>STEP2</b>	vertical	vertical	vertical
			<b>STEP3</b>	non impulsive	non impulsive	non impulsive
			<b>STEP4</b>	-	-	-
			<b>EQ.</b>	<b>7.1 (7.2)</b>	<b>7.1 (7.2)</b>	<b>7.5 (7.6)</b>
<b>PORTATA DI TRACIMAZIONE</b>						
Portata media di tracimazione	$q$	m <sup>3</sup> /s/m	<b>8.1E-07</b>	<b>1.5E-04</b>	<b>5.4E-03</b>	
	$q$	l/s/m	<b>0.00</b>	<b>0.15</b>	<b>5.4</b>	

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> <b>001</b>
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 64 di 72	<b>Rev.</b> <b>01</b>

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## 10.2 Calcolo del volume di tracimazione

Durante una mareggiata su un numero totale di onde incidenti,  $N_w$ , solo un certo numero di onde,  $N_{ow}$ , riescono a sormontare il coronamento causando la tracimazione della diga. Ad ogni singola onda che sormonta la diga è associato un volume di tracimazione.

Per valutare le condizioni di tracimazione della diga occorre stimare anche il volume massimo di tracimazione associato ad una singola onda.

Il primo passo per stimare il volume massimo di tracimazione associato ad una singola onda, consiste nello stimare la proporzione di onde che sormontano la diga ( $N_{ow}/N_w$ ) in una sequenza di onde incidenti  $N_w$ .

Seguendo la metodologia proposta nel manuale EuroTop II la probabilità di accadimento dell'overtopping può essere calcolata ipotizzando una distribuzione di Rayleigh e per opere a parete verticale, con condizioni di attacco di moto ondoso non impulsivo, è rappresentata dalla seguente relazione:

$$P_{ov} = \frac{N_{ow}}{N_w} = \exp \left[ -1.21 \left( \frac{R_c}{H_{mo}} \right)^2 \right]$$

La distribuzione di probabilità del volume di tracimazione associato ad una singola onda può essere rappresentata da una legge a due parametri del tipo Weibull:

$$P_V = P(V_i \geq V) = \exp \left[ - \left( \frac{V}{a} \right)^b \right]$$

dove  $P_V$  è la probabilità (compresa tra 0 e 1) che il volume di tracimazione ( $V_i$ ) sia superiore ad un volume specificato ( $V$ ). I due parametri della distribuzione di Weibull sono il fattore di forma non dimensionale,  $b$ , che definisce la coda della distribuzione e il fattore di scala dimensionale,  $a$ , che normalizza la distribuzione.

I parametri  $a$  e  $b$  sono funzione della portata di tracimazione media  $q_m$  del valore di altezza d'onda spettrale  $H_{mo}$  e del periodo medio  $T_m = T_p/1.2$ , relativa al periodo spettrale  $T_{m-1,0}$ , nonché della probabilità di accadimento di overtopping  $P_{ov}$ .

$$a = \left( \frac{q_m \cdot T_m}{P_{ov}} \right) \cdot \left( \Gamma \left( 1 + \frac{1}{b} \right) \right)^{-1}$$

Per condizioni non impulsive (come nel caso in esame) il parametro di forma  $b$  è definito dalle seguenti relazioni in funzione della ripidità dell'onda al largo  $s_{m-1,0}$ .

$$b = 0.66 \quad \text{per} \quad s_{m-1,0} = 0.02$$

$$b = 0.82 \quad \text{per} \quad s_{m-1,0} = 0.04$$

Per la previsione del volume massimo di overtopping  $V_{max}$ , associato ad una singola onda all'interno di uno stato di mare, si può usare la seguente formula, basandosi sul numero di onde  $N_{ow}$  che provocano overtopping:

$$V_{max} = a \cdot \ln(N_{ow})^{1/b}$$

I risultati del calcolo della massima tracimazione sono riportati in Tabella 10-2.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 65 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 10-2. Calcolo del volume massimo di tracimazione associato ad una singola onda**

<b>ONDA DA GRECALE - ATTACCO NORMALE</b>			Tr = 2 anni	Tr = 10 anni	Tr = 50 anni
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO NON-IMPULSIVO					
Altezza d'onda al piede dell'opera	$H_{mo}$	m	2.20	3.00	3.50
Periodo medio	$T_m$	s	8.3	9.2	10.0
Altezza relativa della cresta	$R_c^*/H_{mo}$	-	3.11	2.21	1.89
Ripidità dell'onda al largo (basata su $T_m-1,0$ )	$S_{m-1,0}$		0.02	0.02	0.02
<b>Calcolo volume massimo di tracimazione</b>					
Portata media di tracimazione	$q$	l/s	0.00	0.2	5.4
Probabilità di accadimento del sormonto	$P_{ov}$		0.00	0.00	0.01
Parametri della legge di distribuzione					
	<b>Gamma</b>		0.74	0.74	0.74
	<b>a</b>		0.50	0.39	3.04
	<b>b</b>		0.66	0.66	0.66
Durata della mareggiata		ore	3	3	3
Numero di onde all'interno della mareggiata	$N_w$		1300	1200	1100
Numero di onde che sormontano la diga	$N_{ow}$		0	3	15
Volume massimo di tracimazione	$V_{max}$	m <sup>3</sup>	0	0.4	13.8

### 10.3 Distribuzione spaziale della tracimazione a tergo del muro paraonde

È stata infine esaminata la distribuzione spaziale delle portate di tracimazione, basandosi sulle più recenti formule di letteratura, al fine di valutare la distanza a cui ricade il volume d'acqua che tracima la diga.

In generale è stato osservato che le portate di tracimazione si riducono in modo esponenziale oltre la cresta di un muro paraonde. Per portate modeste il vento può avere un effetto significativo mentre è meno influente per elevati volumi di tracimazione.

In letteratura sono presenti diversi studi basati su prove sperimentali di laboratorio (Franco et al., 1994; Pullen et al. 2006, 2009; Van der Meer and Bruce, 2014; Dong e al. 2020).

Bruce et al. (2005) hanno descritto la distribuzione spaziale della portata di tracimazione dietro a strutture a parete verticale secondo una legge esponenziale in funzione della distanza dalla diga, con l'uso di un parametro spaziale  $k$ , per determinare la forma della distribuzione spaziale.

$$q^* = e^{-k\left(\frac{x}{L_0}\right)} \quad q^* = \frac{q_{x/L_0}}{q_{total}}$$

dove  $qx/L_0$  indica la portata di tracimazione ad una distanza  $x$ ,  $q_{total}$  rappresenta la portata totale di tracimazione,  $L_0$  è la lunghezza d'onda in acqua profonda,  $k$  è il coefficiente empirico che controlla la forma della distribuzione spaziale.

Il parametro  $k$  può essere stimato, in condizioni non impulsive utilizzando la seguente relazione (Dong et al. 2020):

$$k = 21e^{\frac{0.63R_c}{H_{mo}}} \quad (\text{Non - impulsive})$$

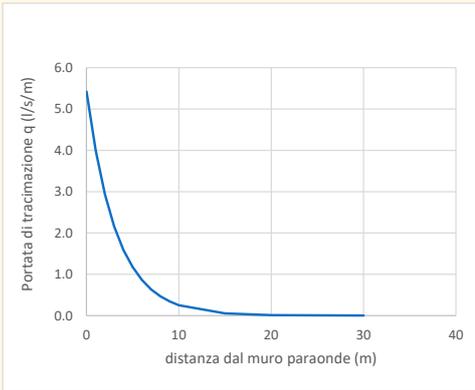
In Tabella 10-3 sono riportati i calcoli della distribuzione spaziale della portata di tracimazione.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 66 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

**Tabella 10-3. Calcolo della distribuzione spaziale della portata di tracimazione a tergo della diga foranea**

<b>ONDA DA GRECALE - ATTACCO NORMALE</b>			<b>Tr2</b>	<b>Tr10</b>	<b>Tr50</b>
<b>CONDIZIONI DI LIVELLO E MOTO ONDOSI</b>					
Periodo di picco	$T_p$	s	10	11	12
Lunghezza d'onda in acqua profonda	$L_0$	m	156	189	225
<b>GEOMETRIA DELLA SEZIONE</b>					
Altezza relativa della cresta	$R_c^*/H_{m0}$	-	3.11	2.21	1.89
<b>PORTATA DI TRACIMAZIONE</b>					
Portata media di tracimazione	$q$	$m^3/s/m$	<b>8.1E-07</b>	<b>1.5E-04</b>	<b>5.4E-03</b>
	$q$	$l/s/m$	<b>0.00</b>	<b>0.15</b>	<b>5.42</b>
<b>CONDIZIONI DI IMPATTO</b>			<b>non impulsive</b>	<b>non impulsive</b>	<b>non impulsive</b>
Parametro di distribuzione	$k$		<b>149</b>	<b>85</b>	<b>69</b>
Distanza dal muro paraonde	$x$		<b><math>q(l/s/m)</math></b>	<b><math>q(l/s/m)</math></b>	<b><math>q(l/s/m)</math></b>
	<b>0</b>		0.00	0.15	5.42
	<b>1</b>		0.00	0.10	3.99
	<b>2</b>		0.00	0.06	2.94
	<b>3</b>		0.00	0.04	2.16
	<b>4</b>		0.00	0.03	1.59
	<b>5</b>		0.00	0.02	1.17
	<b>6</b>		0.00	0.01	0.86
	<b>7</b>		0.00	0.01	0.63
	<b>8</b>		0.00	0.00	0.47
	<b>9</b>		0.00	0.00	0.34
	<b>10</b>		0.00	0.00	0.25
	<b>15</b>		0.00	0.00	0.05
	<b>20</b>		0.00	0.00	0.01
	<b>30</b>		0.00	0.00	0.00



## 10.4 Conclusioni

Per mareggiate aventi un tempo di ritorno di 2 anni, la tracimazione della diga foranea risulta praticamente assente.

Per stati di mare con tempo di ritorno 10 anni si è ottenuta una portata di tracimazione di media entità, pari a circa 0.15 l/s/m con un volume massimo di tracimazione di circa 400 litri per metro, tali valori sono al limite per la sicurezza delle persone presenti a tergo del muro.

Per stati di mare estremi con Tr 50 anni la tracimazione è più significativa, con portate comprese tra circa  $5 < q_m < 6$  l/s/m). In tali circostanze è stato stimato un volume massimo di tracimazione, associato ad una singola onda, pari a circa 13.800 litri per metro. I calcoli condotti mostrano comunque che la tracimazione si riduce in modo esponenziale dietro al muro paraonde, già a 10 m risulta ridotta del 95% e a 20 metri è praticamente nulla.

Questi valori di tracimazione sono comunque elevati se confrontati con i limiti indicati dall'Eurotop e richiedono pertanto una attenta valutazione nelle successive fasi di progettazione eventualmente anche con l'ausilio di modelli fisici.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 67 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## 11 CAMBIAMENTI CLIMATICI

È noto che le analisi statistiche dei vari fenomeni meteomarinari che condizionano il progetto per un'opera marittima (in particolare onde e livelli) devono tenere conto delle possibili tendenze attese nel prossimo futuro in un arco temporale comparabile con la vita utile delle opere in progetto. È anche noto che negli ultimi anni molti studiosi hanno indicato scenari futuri con variazioni significative, legate in gran parte alle interferenze antropiche sulla climatologia terrestre.

È abbastanza certo che nei prossimi decenni si avrà un aumento delle temperature medie e un conseguente aumento dei livelli marini, anche se è ancora piuttosto incerta l'entità di questi innalzamenti, in relazione ai possibili scenari di emissione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera terrestre.

Più incerte sono invece le previsioni relative alle eventuali modifiche delle statistiche relative alle eventuali modifiche delle statistiche relative al regime dei venti e delle onde nei diversi mari e oceani.

### 11.1 Variazioni a lungo termine dei livelli del mare a Porto Torres

Le variazioni del livello marino a Porto Torres sono contenute.

Le analisi mareografiche hanno evidenziato nell'ultimo secolo un innalzamento del livello medio marino di circa 12 cm.

Per quanto riguarda le previsioni al futuro il tasso di incremento è sicuramente più elevato in relazione ai nuovi cambiamenti climatici. È noto che tali stime sono periodicamente aggiornate dalla commissione internazionale di scienziati "International Panel on Climate Change" (IPCC), in relazione ai possibili scenari sulle emissioni di anidride carbonica: lo scenario più ottimista è denominato SSPs 2.6, mentre quello più pessimista SSPs 8.5 (SSPs "Shared Socioeconomic Pathways").

La Figura 11-1 mostra la previsione di innalzamento del livello del mare per il nostro secolo fornita dall'IPCC nel 2021 (AR6). Le linee colorate presenti nella figura mostrano gli scenari in termini di innalzamento di livello forniti da diversi modelli climatologici in relazione ad emissioni variabili.

La previsione della variazione del livello che potrebbe registrarsi per il sito di Porto Torres entro la fine di questo secolo (2100) è molto ampia essendo compresa tra un minimo di circa 38 cm (4.1 mm/anno) ad un massimo di circa 77 cm (7.2 ÷ 12.1 mm/anno).

Sea level changes		SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
<b>Total (2100)</b>	(m)	0.38 (0.28–0.55)	0.44 (0.32–0.61)	0.56 (0.43–0.76)	0.68 (0.55–0.90)	0.77 (0.63–1.01)
<b>Rate (2040-2060)</b>	(mm/yr)	4.1 (2.8–6.0)	4.8 (3.5–6.8)	5.8 (4.4–8.0)	6.4 (5.0–8.7)	7.2 (5.6–9.7)
<b>Rate (2080-2100)</b>	(mm/yr)	4.2 (2.4–6.6)	5.2 (3.2–8.0)	7.7 (5.2–11.6)	10.4 (7.4–14.8)	12.1 (8.6–17.6)

Prendendo a riferimento lo scenario intermedio (SSP2-4.5) si può ipotizzare per il 2100 un incremento massimo del livello marino pari a poco più di mezzo metro. Per una previsione a breve termine (25 anni), è possibile ipotizzare un innalzamento del livello medio di 0.15 m.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 68 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

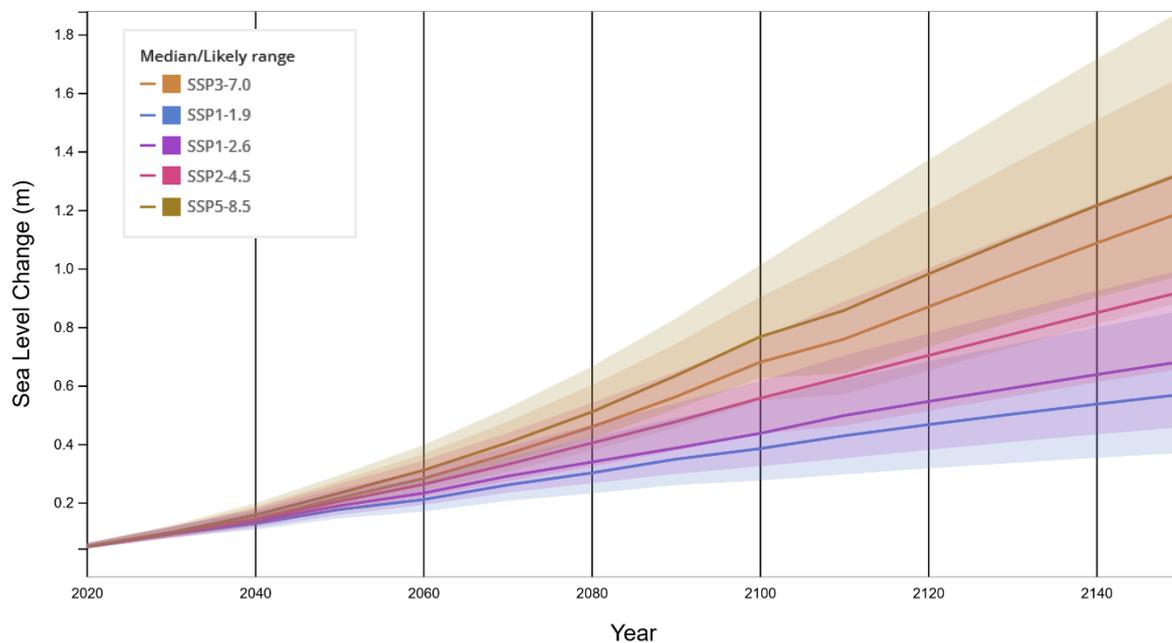


Figura 11-1 - Previsione per il Sea Level Rise fornita dall'IPCC per il sito di Porto Torres.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> <b>NQ/R21300/L01</b>	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 69 di 72	<b>Rev.</b> 01

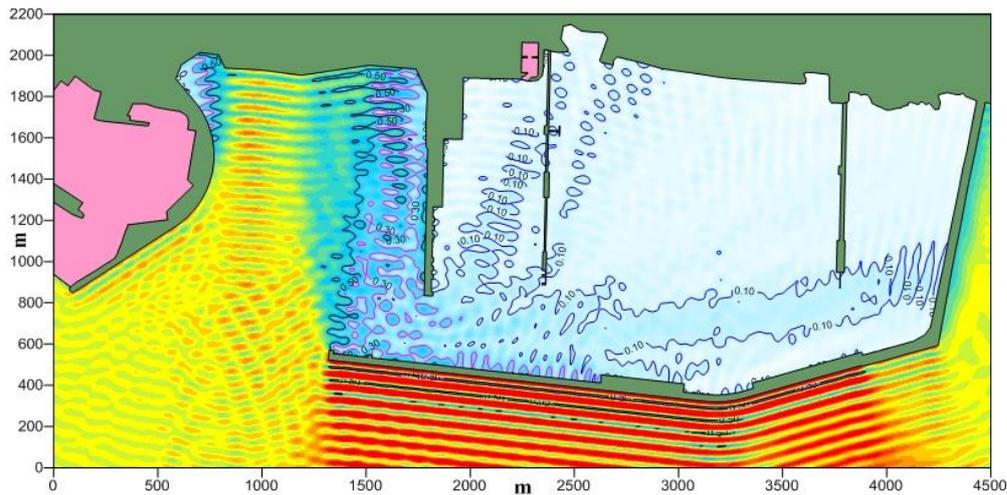
Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

## ALLEGATO 1 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI CONDOTTE CON IL MODELLO NUMERICO DI AGITAZIONE ONDOSA VEGA

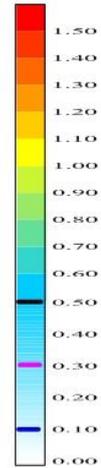
	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 70 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

Porto industriale di Porto Torres - Configurazione di progetto  
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa

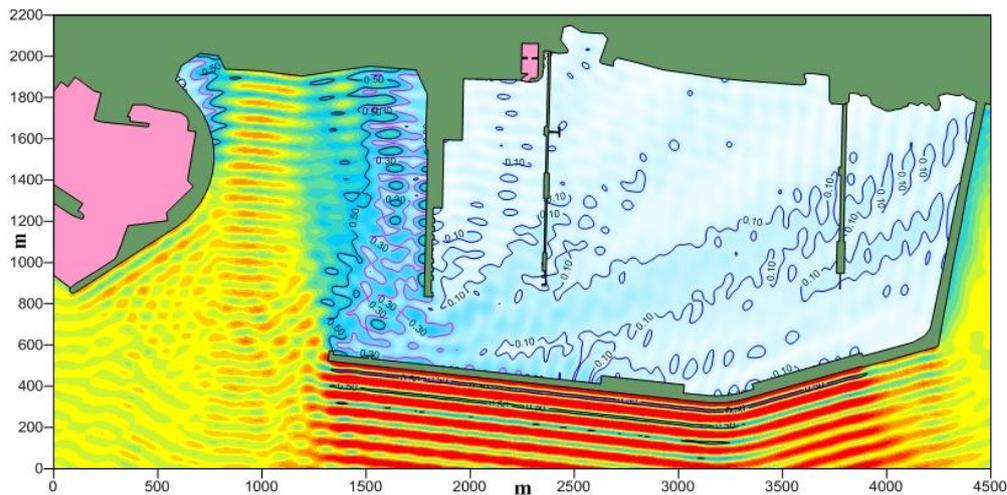


 Zone interne non simulate

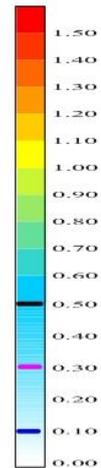


Periodo  $T = 10,0$  s  
 Direzione Dir =  $0^\circ$  N

Porto industriale di Porto Torres - Configurazione di progetto  
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



 Zone interne non simulate



Periodo  $T = 12,0$  s  
 Direzione Dir =  $0^\circ$  N

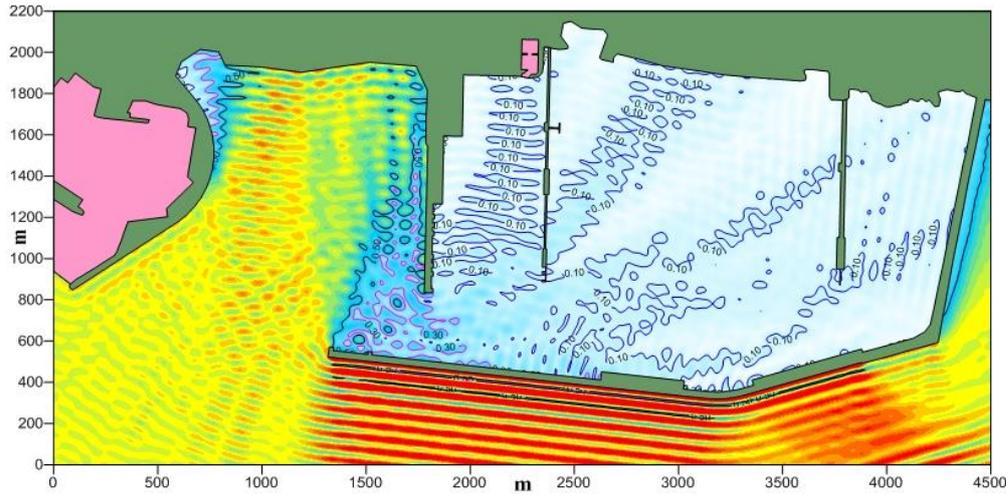
	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 71 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

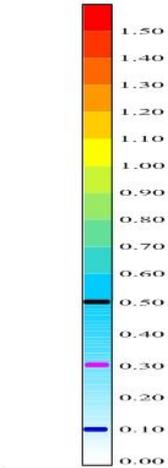
Porto industriale di Porto Torres - Configurazione di progetto  
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



 Zone interne non simulate

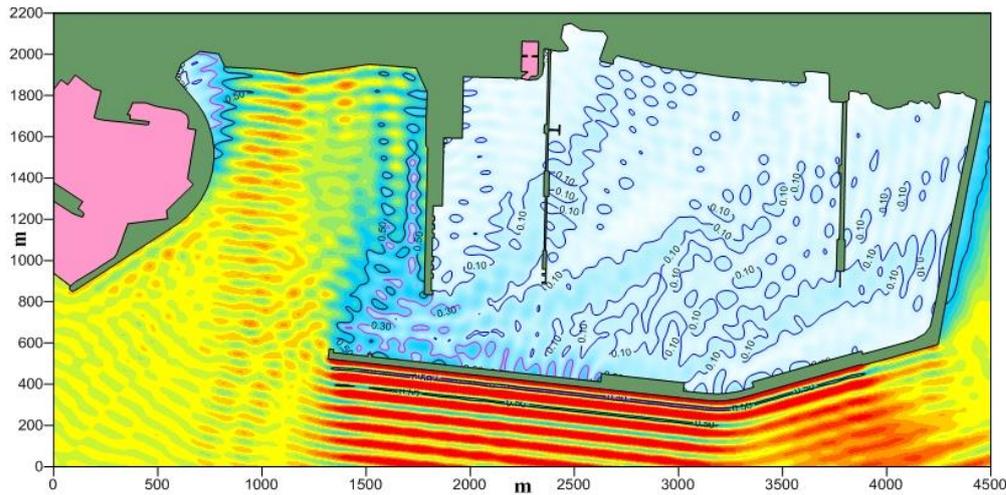


Periodo  $T = 10,0$  s  
 Direzione Dir =  $15^\circ$  N

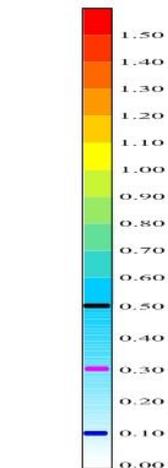
Porto industriale di Porto Torres - Configurazione di progetto  
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



 Zone interne non simulate

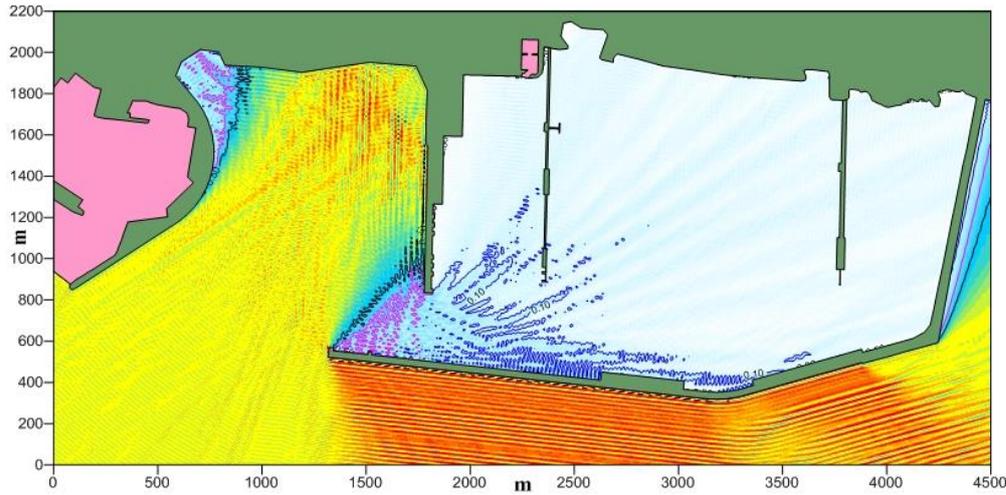


Periodo  $T = 12,0$  s  
 Direzione Dir =  $15^\circ$  N

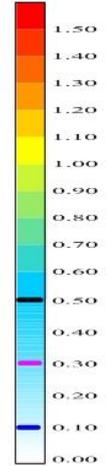
	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>COMMESSA</b> NQ/R21300/L01	<b>UNITA'</b> 001
	<b>LOCALITÀ</b> PORTO TORRES (SS)	<b>001-ZB-E-15002</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> TERMINALE DI PORTO TORRES E OPERE CONNESSE	Fg. 72 di 72	<b>Rev.</b> 01

Rif. T.EN Italy Solutions: 217871C-060-RT-3600-002

Porto industriale di Porto Torres - Configurazione di progetto  
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa

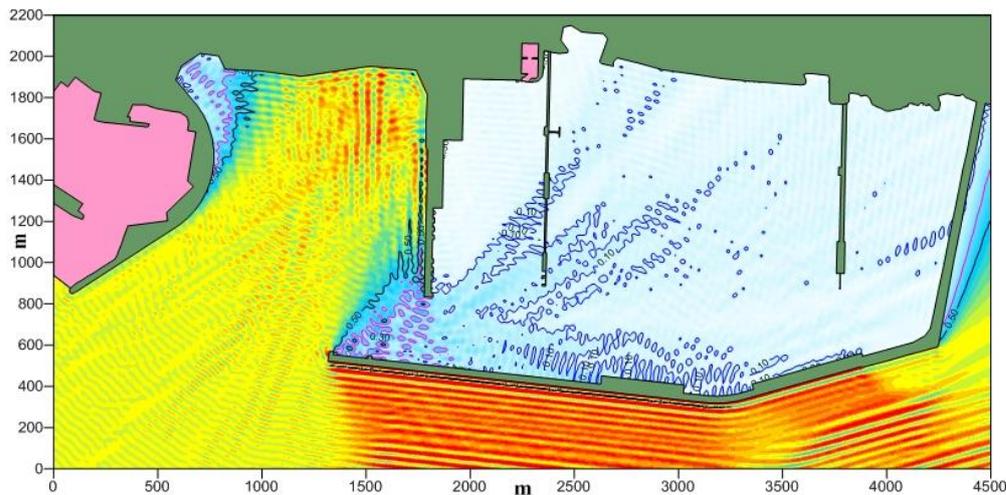


 Zone interne non simulate

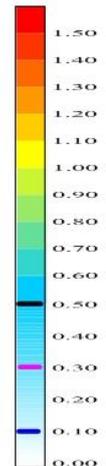


Periodo  $T = 5,0$  s  
 Direzione Dir =  $30^\circ$  N

Porto industriale di Porto Torres - Configurazione di progetto  
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna



Altezza d'onda relativa



 Zone interne non simulate



Periodo  $T = 7,0$  s  
 Direzione Dir =  $30^\circ$  N