

Committente  	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 1 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

## TERMINALE DI PORTOVESME

Studio della risonanza portuale indotta dalle "bound long waves" (onde lunghe)



01	Emissione per enti	P. DE GIROLAMO	G. SAGARIA	G.MONTI	15/11/2021
00	Emissione per commenti	P. DE GIROLAMO	G. SAGARIA	G.MONTI	01/07/2021
<b>Rev.</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Elaborato</b>	<b>Verificato</b>	<b>Approvato Autorizzato</b>	<b>Data</b>

Committente  	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 2 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

## INDICE

1.	INTRODUZIONE	3
2.	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DI PORTOVESME	4
3.	OBIETTIVI E METODOLOGIA DI LAVORO	5
4.	ANALISI DEI PERIODI E MODI PROPRI DI RISONANZA DEL BACINO PORTUALE	8
5.	ANALISI DI RISONANZA PORTUALE INDOTTA DALLE "BOUND LONG WAVES"	16
5.1.	Descrizione della metodologia e del modello numerico XBeach Surfbeat	16
5.2.	Risultati dello studio di risonanza portuale eseguito con XBeach surfbeat	19

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 3 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

## 1. INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO

La Società Snam Rete Gas ("SRG"), società 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 di Portovesme un terminale di rigassificazione per consentire su un mezzo navale permanentemente ormeggiato:

- 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 SpA, Società soggetta all'attività di direzione e coordinamento di Snam;
- Servizi di Small Scale LNG attraverso:
  - La distribuzione di GNL tramite autocisterne (truck loading);
  - La distribuzione di GNL con apposite navi metaniere "bunkering vessels".

In particolare, il Terminale sarà costituito da una unità navale di stoccaggio e rigassificazione flottante (FSRU, Floating Storage Regasification Unit) con una capacità di stoccaggio di circa 130.000 m<sup>3</sup> di GNL e una capacità di rigassificazione massima di circa 330.000 Sm<sup>3</sup>/h. La FSRU sarà permanentemente ormeggiata lungo la banchina Est del porto di Portovesme (SU).

Il progetto è parte integrante del più ampio progetto di "Collegamento Virtuale" (Virtual Pipeline) per l'approvvigionamento di gas naturale alla Sardegna, che Snam, in qualità di principale operatore di trasporto e dispacciamento di gas naturale sul territorio nazionale, intende realizzare, anche attraverso le sue controllate e partecipate come Snam Rete Gas ed Enura, in coerenza con la legge del 11 settembre 2020, n. 120 «Misure urgenti per la semplificazione e l'innovazione digitali» (c.d. Decreto Semplificazioni).

Il presente rapporto descrive lo studio della risonanza portuale indotto dalle onde lunghe generate dalla interazione non lineare tra le componenti spettrali ("bound long waves") condotto a supporto del progetto che prevede l'installazione nel porto commerciale di Portovesme (frazione di Portoscuso, provincia di Sud Sardegna) di una nave gasiera opportunamente modificata (FSRU) per consentire lo stoccaggio e la vaporizzazione di GN liquido (GNL) proveniente principalmente dal sito SNAM di Panigaglia (SP).

Lo studio è stato eseguito dal Prof. Ing. Paolo De Girolamo che si è avvalso della collaborazione del Dott. Ing. Myrta Castellino e del Dott. Ing. Gioele Ruffini, entrambi PhD e specialisti nel campo dell'idraulica marittima.

Committente  	Progettista  	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località  PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 4 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

## 2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DI PORTOVESME

Con riferimento alla Figura 2-1, Portovesme è localizzato sulla costa Sud-occidentale della Sardegna e si affaccia sulla porzione di mare protetta dalle Isole di S. Pietro e di S. Antioco la quale è caratterizzata da bassi fondali e da secche rocciose anche affioranti dal livello del mare. L'accesso al porto è garantito da un canale dragato, segnalato da mede, orientato lungo la direzione Ovest-Nord-Ovest. Si prevede di ormeggiare la FSRU lungo la banchina Est del Porto.

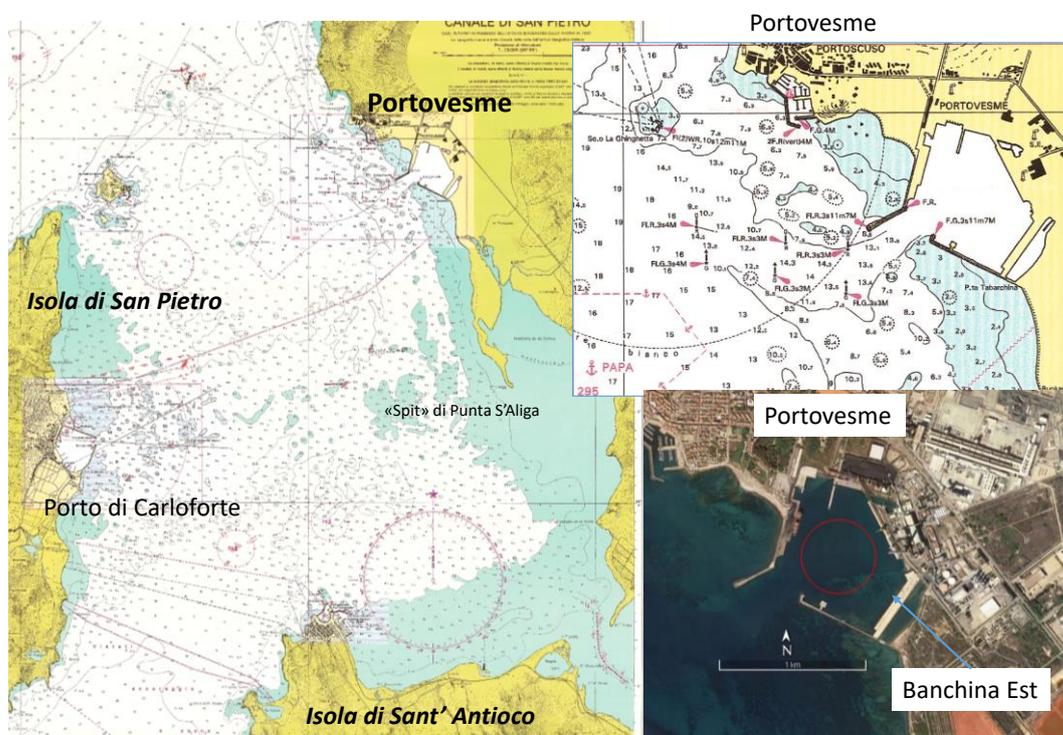


Figura 2-1 - Localizzazione geografica di Portovesme e della banchina Est dove si prevede di ormeggiare la FSRU.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 5 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

### 3. OBIETTIVI E METODOLOGIA DI LAVORO

Come già riportato nel rapporto "100-ZA-E-10017 Studio agitazione interna portuale – onde corte", l'obiettivo dell'analisi dell'agitazione interna portuale è quello di definire, in senso probabilistico, le onde estreme generate dal vento che possono agire sullo scafo della FSRU durante il periodo di tempo, pari a circa 25 anni, in cui la nave sarà ormeggiata alla banchina Est di Portovesme.

Tali onde, insieme al vento che agisce sull'opera morta dello scafo, determinano:

- le forze che la nave esercita sui dispositivi di accosto (parabordi) e di ormeggio (bitte) tramite le linee di ormeggio;
- i movimenti della nave ormeggiata e in particolar modo i suoi spostamenti verticali.

Per quanto riguarda i periodi delle onde generate dal vento, si possono distinguere:

- a) le onde corte, o di breve periodo;
- b) le onde lunghe generate dall'interazione non lineare tra le componenti spettrali.

Nel presente rapporto vengono riportati i risultati dello studio di risonanza portuale indotta dalle onde lunghe generate dall'interazione non lineare delle onde corte ("bound long waves").

I processi non lineari che si esplicano tra le componenti spettrali delle onde di vento, tendono ad aumentare al diminuire dei fondali e diventano rilevanti quando le onde corte sono soggette a fenomeni di frangimento indotti dal fondale. In queste condizioni le onde lunghe vengono forzate dai gruppi costituiti dalle onde corte di diversa frequenza, a causa dei gradienti tra i così detti "radiation stresses" che si verificano in corrispondenza delle onde più alte, poste al centro dei gruppi, e di quelli che si verificano in corrispondenza delle onde più basse, poste all'estremità dei gruppi. I "radiation stresses" sono definiti come i valori medi del flusso di quantità di moto indotto dal moto oscillatorio delle onde.

Con riferimento alla Figura 3-1 le onde lunghe che si generano in acqua bassa, denominate "bound long waves" (onde lunghe legate), sono costituite da oscillazioni del livello marino le quali si propagano con la celerità dei gruppi - costituiti dalle onde corte - e non con la celerità che gli competerebbe in base alla relazione di dispersione a ragione del loro periodo. Per questa ragione queste oscillazioni, propagandosi insieme ai gruppi, sono definite "onde lunghe legate" o "bound long waves".

Le onde lunghe, oltre a propagarsi insieme ai gruppi, si presentano in opposizione di fase rispetto ad essi, poiché al centro del gruppo – dove le onde corte presentano una maggiore altezza - si verifica il cavo dell'onda lunga, mentre agli estremi dei gruppi – dove le onde corte presentano una minore altezza - si verifica la cresta.

Per quanto riguarda la penetrazione del moto ondoso all'interno di un porto, in generale si può affermare che mentre le onde corte vengono attenuate in termini di energia dalle opere foranee del porto, la stessa cosa può non accadere per le onde lunghe, poiché queste ultime, essendo caratterizzate da periodi maggiori rispetto a quelli delle onde corte, possono presentare periodi simili rispetto a quelli propri principali di oscillazione del bacino portuale.

Ciò può dar luogo ad una amplificazione delle onde lunghe nel bacino portuale (ovvero ad un fenomeno di risonanza delle onde lunghe) o comunque ad una loro minore attenuazione rispetto a quella che caratterizza le onde corte.

Nel caso di Portovesme i bassi fondali che caratterizzano la porzione di mare compresa tra lo stesso porto e le Isole di S. Pietro e di S. Antioco inducono il frangimento del moto ondoso

Committente  	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 6 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

riducendo considerevolmente l'altezza delle onde estreme di vento provenienti da largo. Tuttavia allo stesso tempo il frangimento può determinare un aumento dell'energia delle "bound long-waves" che potrebbero essere soggette a fenomeni di risonanza quando penetrano nel porto.

Data l'estesa porzione di mare caratterizzata dai bassi fondali compresa tra il mare aperto e il porto, allo stato attuale risulta praticamente impossibile seguire contemporaneamente l'evoluzione delle onde corte e di quelle lunghe con un unico codice di calcolo fino ad entrare nello specchio d'acqua portuale.

Per tale ragione è risultato necessario separare i processi fisici e studiare con codici di calcolo diversi la propagazione delle onde da largo fino all'interno del porto.

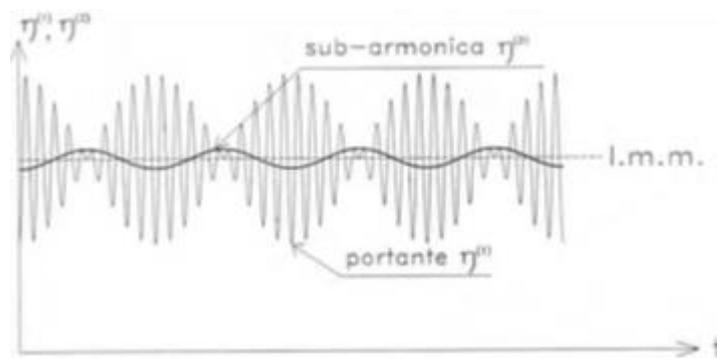


Figura 3-1 Sub-armoniche legate a gruppi di onde (bound long waves).

In particolare lo studio dell'evoluzione delle onde corte (oggetto di due precedenti rapporti) è stato eseguito in due fasi:

- nella prima (vedi rapporto: "100-ZA-E-10009 Propagazione del moto ondoso da largo a riva") si è studiata la propagazione da largo a riva delle onde mediante il codice spettrale SWAN che non tiene conto dei fenomeni di diffrazione e riflessione delle onde i quali invece sono importanti quando le onde penetrano nel bacino portuale.
- nella seconda (vedi rapporto: "100-ZA-E-10017 Studio agitazione interna portuale – onde corte") i risultati del codice SWAN sono stati utilizzati per fornire le condizioni al contorno al modello GEMMA che risolve l'equazione detta di "mild-slope" (Berkhoff, 1972) mediante il quale è stata studiata la penetrazione delle onde corte nel porto.

Il presente rapporto conclude l'attività connessa allo studio dell'agitazione ondosa portuale, prendendo in esame le onde lunghe.

Il lavoro è stato organizzato in due fasi.

Nella prima fase sono stati definiti i modi e i periodi propri di risonanza del porto mediante uno studio di oscillazioni forzate. I risultati dello studio sono stati utilizzati per interpretare i risultati forniti dallo studio eseguito nella seconda fase che ha riguardato le oscillazioni portuali indotte dalle onde lunghe.

Nella seconda fase è stato applicato il codice XBeach Surfbeat il quale è in grado simulare contemporaneamente i gruppi costituiti dalle onde corte, mediante il codice spettrale HISWA mediato sulla fase, e le oscillazioni di lungo periodo indotte dai gruppi di onde corte mediante l'applicazione delle equazioni non lineari in acqua bassa.

Committente  	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 7 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

L'applicazione del codice, che è stata effettuata prendendo in esame tre stati di mare incidenti da largo caratterizzati dai tempi di ritorno di 25, 50 e 100 anni, ha consentito di calcolare, in relazione ai tre stati di mare esaminati, le oscillazioni di lungo periodo lungo la banchina dove verrà ormeggiata la FSRU.

Committente  	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 8 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

#### 4. ANALISI DEI PERIODI E MODI PROPRI DI RISONANZA DEL BACINO PORTUALE

L'analisi dei periodi e modi propri di risonanza del bacino portuale è stata eseguita mediante lo studio delle oscillazioni forzate del porto, il quale è stato condotto con il modello GEMMA che risolve l'equazione di "mild-slope" mediante la tecnica numerica degli elementi finiti ed è in grado di tenere conto dei fenomeni combinati di rifrazione, shoaling, riflessione e diffrazione. Per la descrizione del modello si rimanda al rapporto "100-ZA-E-10017 Studio agitazione interna portuale – onde corte".

Nella Figura 4-1 è riportata la griglia di calcolo utilizzata per eseguire le simulazioni numeriche, mentre la Figura 4-2 mostra la batimetria del porto ed i punti P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub> localizzati lungo la banchina Est in corrispondenza dei quali sono stati calcolati i coefficienti di amplificazione al variare del periodo delle onde incidenti.



Figura 4-1 - Griglia di calcolo utilizzata per l'analisi di risonanza.

Committente  	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 9 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

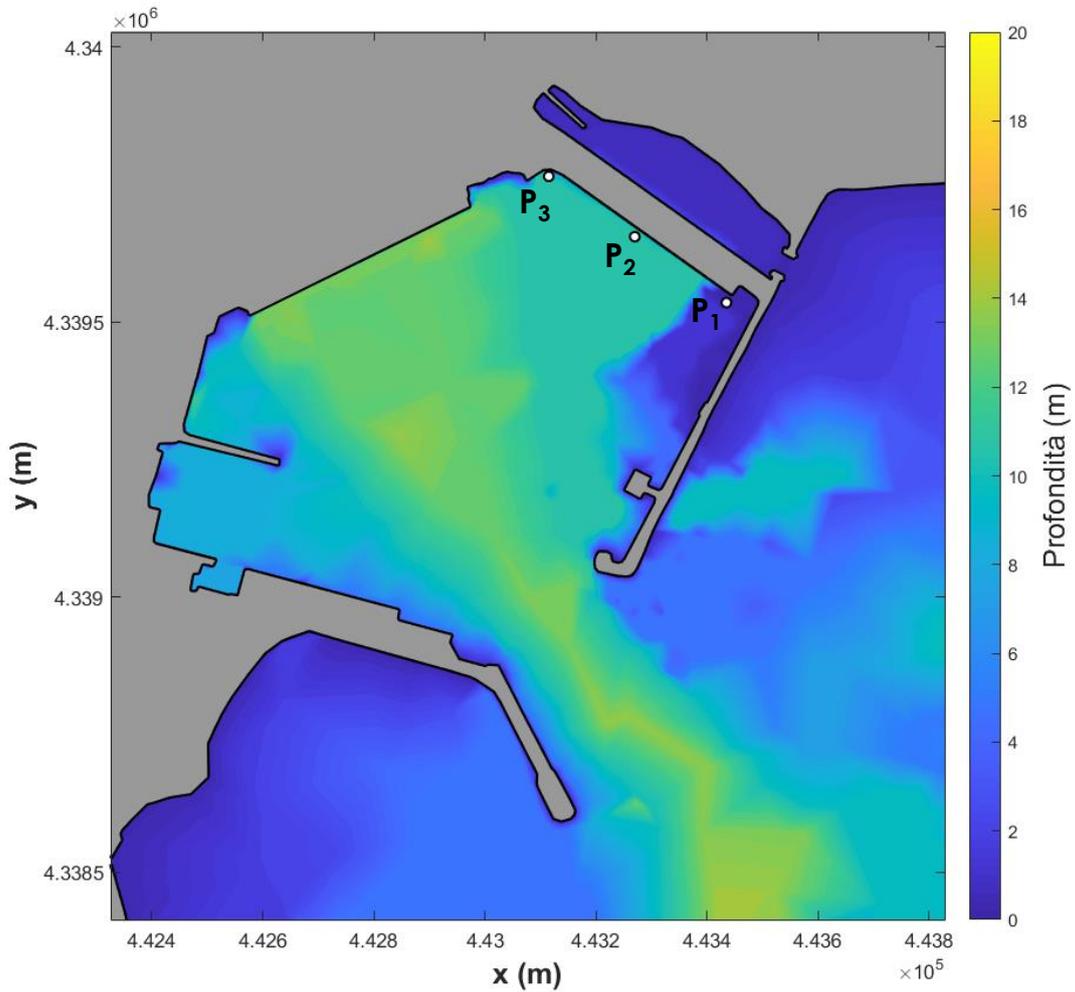
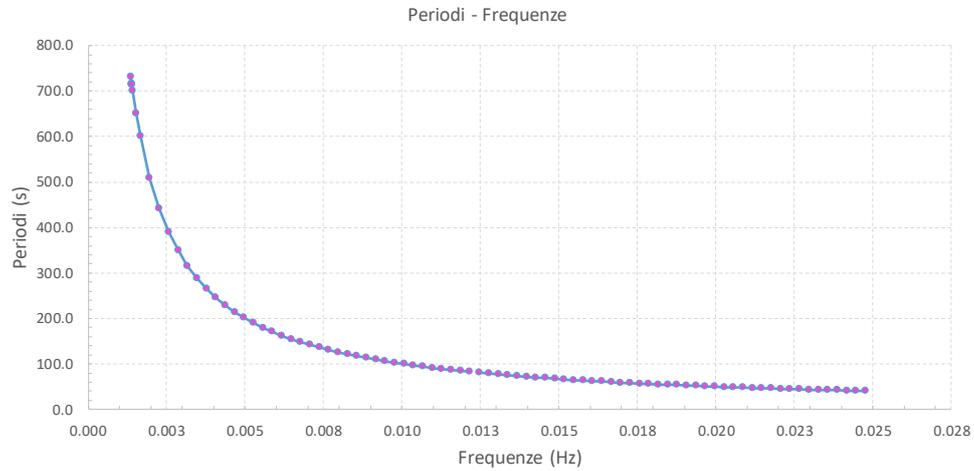


Figura 4-2 – Rappresentazione della batimetria all'interno del dominio di calcolo con indicazione dei punti di estrazione per l'analisi dei risultati.

Committente  	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 10 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005



*Figura 4-3 – Corrispondenza periodo-frequenza per gli stati di mare utilizzati nell'analisi della propagazione delle onde di lungo periodo.*

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località <b>PORTOVESME (SU)</b>	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto <b>TERMINALE DI PORTOVESME</b>	Pag. 11 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

Tabella 4-1 – Periodi e frequenze utilizzate per l'analisi della propagazione delle onde di altezza unitaria e lungo periodo.

N°	H (m)	f (Hz)	T (s)	Dir (°N)	N°	H (m)	f (Hz)	T (s)	Dir (°N)
1	1.0	0.0014	731.71	270	44	1.0	0.0125	80.21	270
2	1.0	0.0014	716.00	270	45	1.0	0.0128	78.33	270
3	1.0	0.0014	715.00	270	46	1.0	0.0131	76.53	270
4	1.0	0.0014	714.00	270	47	1.0	0.0134	74.81	270
5	1.0	0.0014	713.00	270	48	1.0	0.0137	73.17	270
6	1.0	0.0014	700.00	270	49	1.0	0.0140	71.60	270
7	1.0	0.0015	650.00	270	50	1.0	0.0143	70.09	270
8	1.0	0.0017	600.00	270	51	1.0	0.0146	68.65	270
9	1.0	0.0020	508.47	270	52	1.0	0.0149	67.26	270
10	1.0	0.0023	441.18	270	53	1.0	0.0152	65.93	270
11	1.0	0.0026	389.61	270	54	1.0	0.0155	64.66	270
12	1.0	0.0029	348.84	270	55	1.0	0.0158	63.42	270
13	1.0	0.0032	315.79	270	56	1.0	0.0161	62.24	270
14	1.0	0.0035	288.46	270	57	1.0	0.0164	61.10	270
15	1.0	0.0038	265.49	270	58	1.0	0.0167	60.00	270
16	1.0	0.0041	245.90	270	59	1.0	0.0170	58.94	270
17	1.0	0.0044	229.01	270	60	1.0	0.0173	57.92	270
18	1.0	0.0047	214.29	270	61	1.0	0.0176	56.93	270
19	1.0	0.0050	201.34	270	62	1.0	0.0179	55.97	270
20	1.0	0.0053	189.87	270	63	1.0	0.0182	55.05	270
21	1.0	0.0056	179.64	270	64	1.0	0.0185	54.15	270
22	1.0	0.0059	170.45	270	65	1.0	0.0188	53.29	270
23	1.0	0.0062	162.16	270	66	1.0	0.0191	52.45	270
24	1.0	0.0065	154.64	270	67	1.0	0.0194	51.64	270
25	1.0	0.0068	147.78	270	68	1.0	0.0197	50.85	270
26	1.0	0.0071	141.51	270	69	1.0	0.0200	50.08	270
27	1.0	0.0074	135.75	270	70	1.0	0.0203	49.34	270
28	1.0	0.0077	130.43	270	71	1.0	0.0206	48.62	270
29	1.0	0.0080	125.52	270	72	1.0	0.0209	47.92	270
30	1.0	0.0083	120.97	270	73	1.0	0.0212	47.24	270
31	1.0	0.0086	116.73	270	74	1.0	0.0215	46.58	270
32	1.0	0.0089	112.78	270	75	1.0	0.0218	45.94	270
33	1.0	0.0092	109.09	270	76	1.0	0.0221	45.32	270
34	1.0	0.0095	105.63	270	77	1.0	0.0224	44.71	270
35	1.0	0.0098	102.39	270	78	1.0	0.0227	44.12	270
36	1.0	0.0101	99.34	270	79	1.0	0.0230	43.54	270
37	1.0	0.0104	96.46	270	80	1.0	0.0233	42.98	270
38	1.0	0.0107	93.75	270	81	1.0	0.0236	42.43	270
39	1.0	0.0110	91.19	270	82	1.0	0.0239	41.90	270
40	1.0	0.0113	88.76	270	83	1.0	0.0242	41.38	270
41	1.0	0.0116	86.46	270	84	1.0	0.0245	40.87	270
42	1.0	0.0119	84.27	270	85	1.0	0.0248	40.38	270
43	1.0	0.0122	82.19	270					

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 12 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

Le simulazioni numeriche sono state eseguite imponendo lungo il contorno Ovest della griglia di calcolo (vedi Figura 4-1) una altezza d'onda incidente unitaria proveniente da Ponente e facendo variare il periodo delle onde tra circa 40 s e 730 s per un totale di 85 simulazioni (vedi Tabella 4-1). La corrispondenza periodo-frequenza per le simulazioni eseguite è riportata nella Figura 4-3.

Lungo i bordi della griglia di calcolo esterni al porto si è considerata una condizione di totale assorbimento ( $C_r = 0.0$ ), mentre lungo i bordi interni del porto si è considerato un coefficiente di riflessione pari a 1.

Nella Figura 4-4, Figura 4-5 e nella Figura 4-6 si riportano i risultati ottenuti in termini di andamento del coefficiente di amplificazione  $C_a$  nel dominio della frequenza rispettivamente per i punti  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ . Il coefficiente di amplificazione  $C_a = H/H_i$  esprime il rapporto tra l'altezza dell'onda ottenuta nel punto in analisi e l'altezza dell'onda incidente.

L'analisi dei coefficienti di amplificazione ottenuti nel dominio della frequenza per i tre punti selezionati, ha portato ad individuare i primi sette periodi propri di oscillazione (autovalori) del bacino portuale che sono stati riportati nella Tabella 4-2.

Come si evince dalla Figura 4-4, Figura 4-5 e dalla Figura 4-6, in corrispondenza del primo periodo proprio ( $T = 716.00$  s equivalente alla frequenza  $0.00139$  Hz) si ottiene per i tre punti della banchina Est lo stesso coefficiente di amplificazione che risulta pari a circa 1. Nel pannello di sinistra della Figura 4-7 è rappresentato il corrispondente modo di oscillazione (autovettore) dal quale si deduce che il bacino in corrispondenza di questo periodo oscilla in fase. Questa frequenza corrisponde alla frequenza di Helmholtz (o frequenza fondamentale) del bacino. Il fatto che il coefficiente di amplificazione risulti unitario e quindi all'interno del bacino non si verifica una amplificazione della forzante, è giustificato dal fatto che per questo modo la linea nodale è posta all'esterno del bacino e intercetta il pennello del molo di sopraflutto coinvolgendo nell'oscillazione del bacino anche una porzione di volume posto all'esterno di esso.

I modi di oscillazione dei primi sette periodi individuati sono rappresentati nella Figura 4-7, nella Figura 4-8, nella Figura 4-9 e nella Figura 4-10.

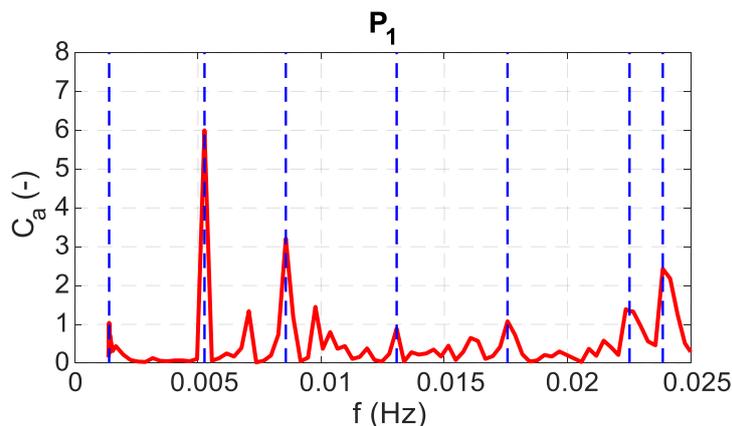


Figura 4-4 – Andamento del coefficiente di amplificazione ottenuto per la configurazione di progetto per il punto  $P_1$ .

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 13 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

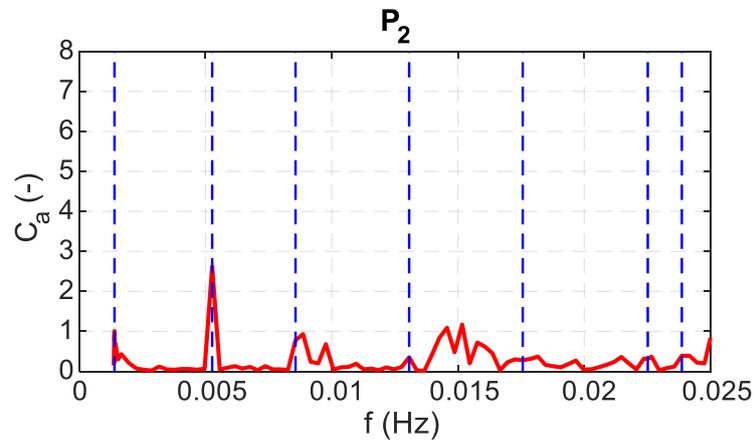


Figura 4-5 - Andamento del coefficiente di amplificazione ottenuto per la configurazione di progetto per il punto P2.

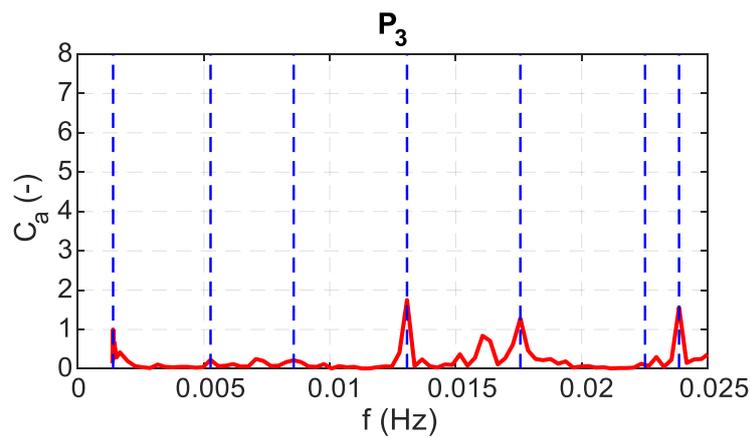


Figura 4-6 - Andamento del coefficiente di amplificazione ottenuto per la configurazione di progetto per il punto P3.

Tabella 4-2 – Principali modi di oscillazione del bacino nel dominio delle frequenze.

Periodo proprio	f (Hz)	T (s)
1	0.00139	716.00
2	0.00526	189.87
3	0.00856	116.73
4	0.01306	76.53
5	0.01756	56.93

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località <b>PORTOVESME (SU)</b>	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto <b>TERMINALE DI PORTOVESME</b>	Pag. 14 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

6	0.02251	44.41
7	0.02386	41.90

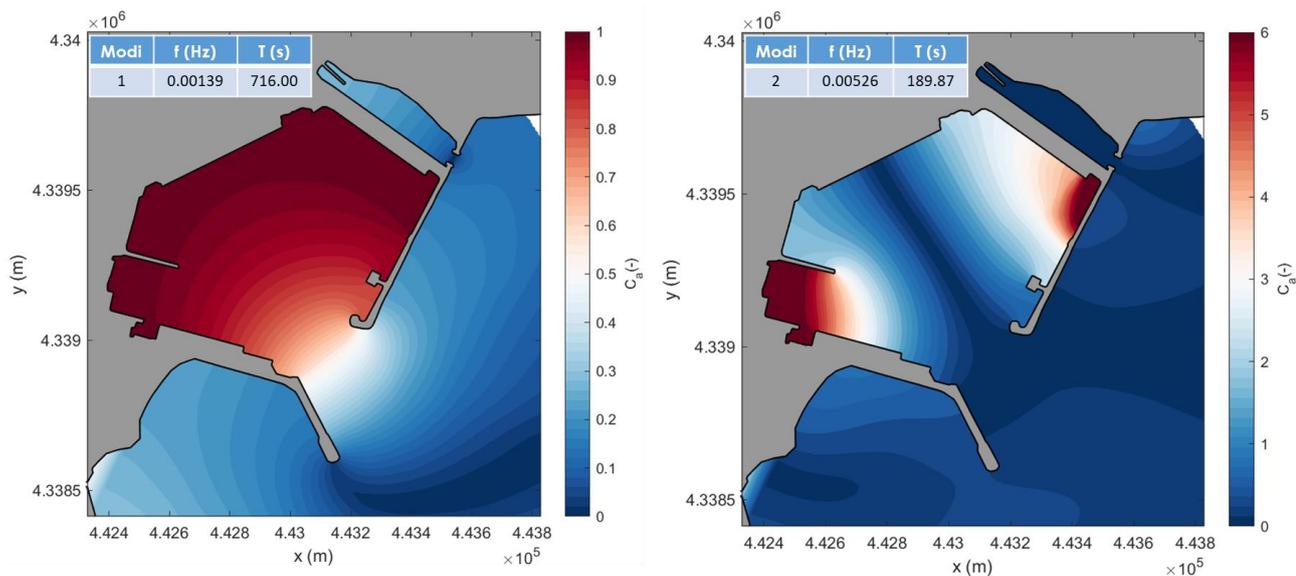


Figura 4-7 – Modi di oscillazione 1 e 2

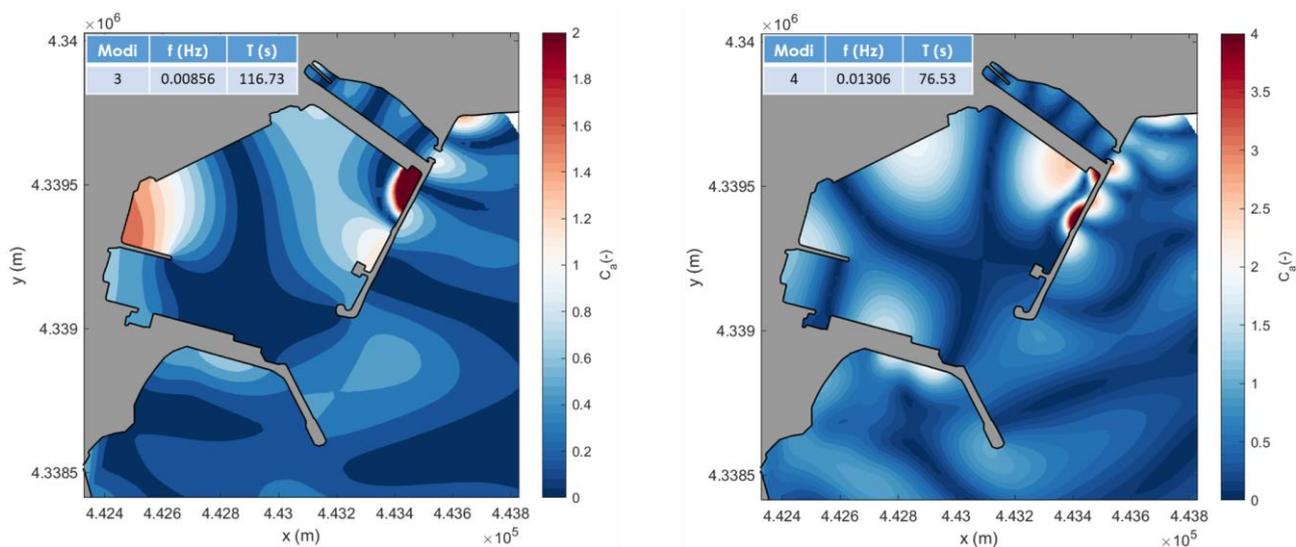


Figura 4-8 - Modi di oscillazione 3 e 4.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località <b>PORTOVESME (SU)</b>	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto <b>TERMINALE DI PORTOVESME</b>	Pag. 15 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

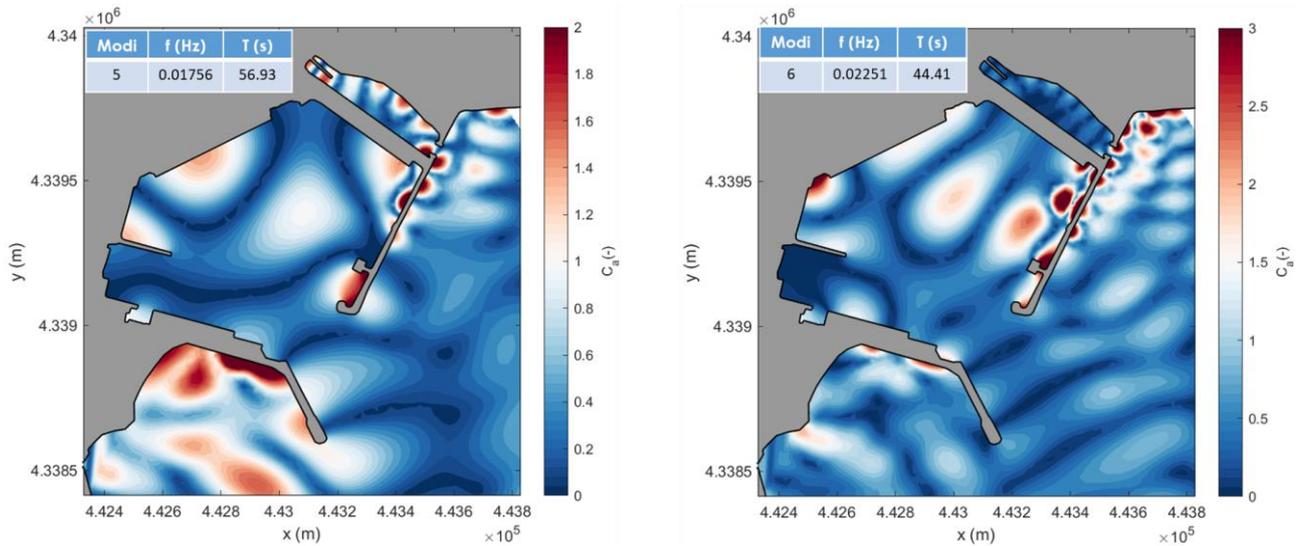


Figura 4-9 - Modi di oscillazione 5 e 6.

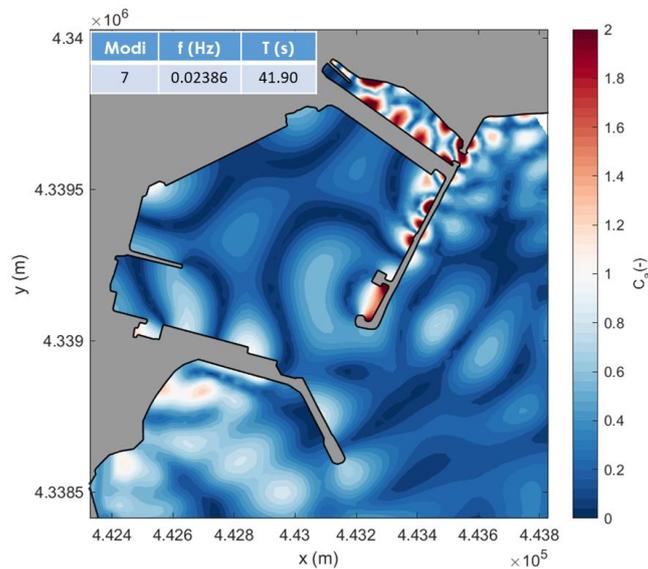


Figura 4-10 - Modo di oscillazione 7.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 16 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

## 5. ANALISI DI RISONANZA PORTUALE INDOTTA DALLE “BOUND LONG WAVES”

### 5.1. Descrizione della metodologia e del modello numerico XBeach Surfbeat

Il codice “open source” XBeach è stato sviluppato per simulare processi idrodinamici e morfodinamici costieri.

Lo sviluppo del codice è stato supportato dal Corpo degli Ingegneri dell'esercito statunitense (U.S. Corps of Engineers), dai Geologi statunitensi (U.S. Geological Survey), dal Dipartimento dei Lavori Pubblici Olandese (Dutch Public Works Department), dall'Unesco e dall'Università olandese di Delft.

Nel modello XBeach Surfbeat la propagazione delle onde corte è risolta per mezzo dell'equazione di bilancio dell'energia scritta in forma spettrale (wave action) che include le dissipazioni di energia per frangimento e attrito sul fondo. Questa equazione consente di calcolare gli sforzi indotti dai gruppi delle onde corte i quali costituiscono le forzanti delle equazioni non lineari delle acque basse (non linear shallow water equations) mediante le quali viene calcolato il campo idrodinamico.

Nel presente caso il modello è stato applicato per calcolare esclusivamente le oscillazioni indotte nel bacino portuale dalle onde infra-gravitazionali (infragravity waves,  $f < 0.03$  Hz) generate non linearmente dalle onde corte.

Il modello numerico XBeach surfbeat è stato applicato all'area avente dimensioni di 10 x 9.5 km riportata in Figura 5-1.

Tutto il dominio è stato schematizzato con una griglia a maglia regolare con passo 10 m. La Figura 5-2 riporta un ingrandimento della griglia di calcolo nell'area portuale.

Committente  	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 17 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

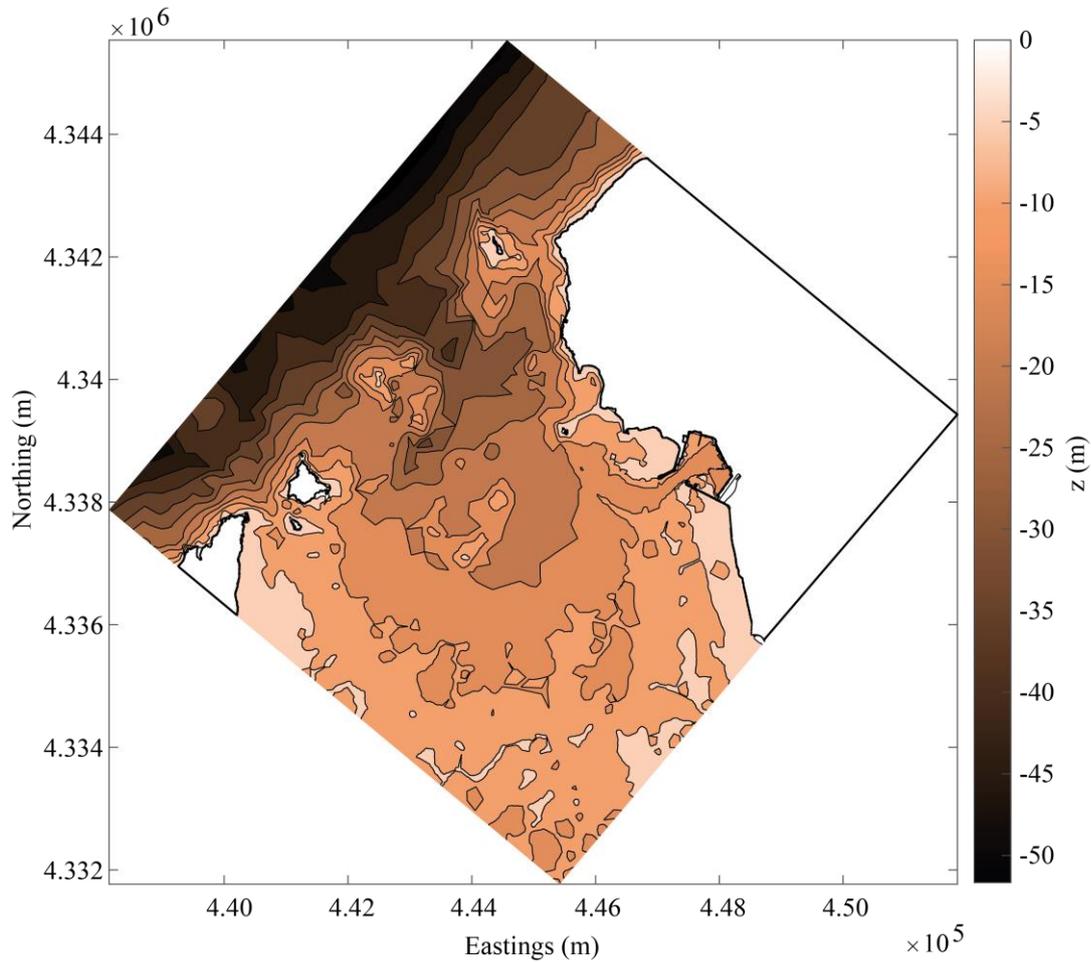


Figura 5-1 - Griglia di calcolo XBeach Surfbeat.

Committente  	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località <b>PORTOVESME (SU)</b>	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto <b>TERMINALE DI PORTOVESME</b>	Pag. 18 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

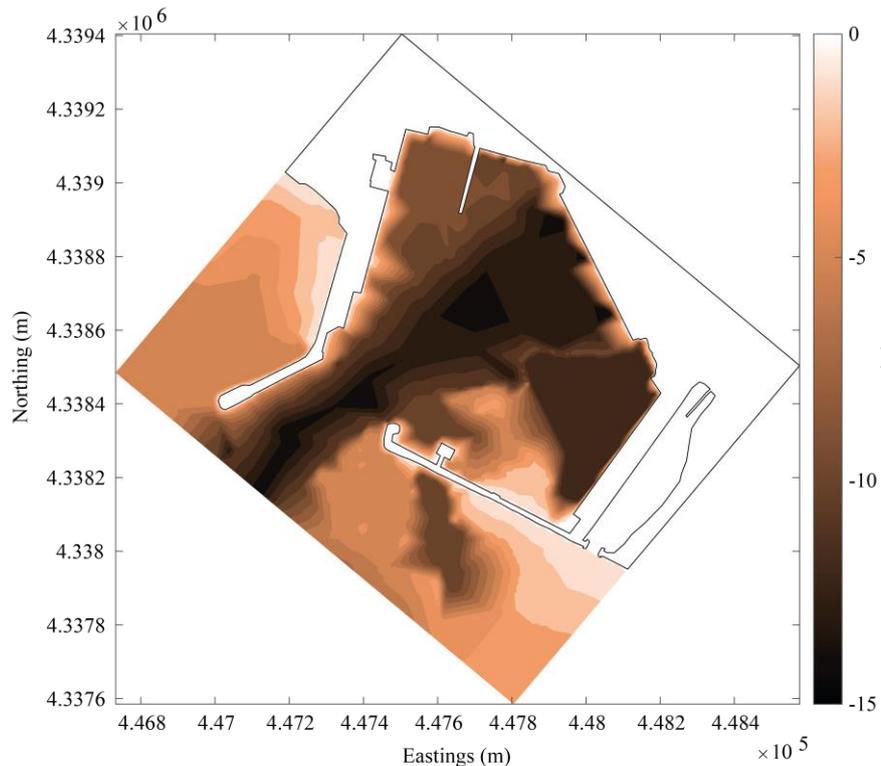


Figura 5-2 - Griglia di calcolo XBeach Surfbeat (zoom nell'area portuale).

Con riferimento al documento "100-ZA-E-10017 Studio agitazione interna portuale – onde corte", le applicazioni hanno riguardato solo gli stati di mare provenienti a largo dalla direzione  $300^\circ$  N e caratterizzati dai tempi di ritorno  $Tr = 25, 50$  e  $100$  anni in quanto sono quelli che hanno dato luogo ad una maggiore penetrazione delle onde corte nel bacino portuale.

Le condizioni di moto ondoso in ingresso al modello numerico, fornite in termini spettrali lungo il contorno NO della griglia di calcolo (vedi Figura 4-1), sono state estratte dai risultati della griglia NEST utilizzata nell'ambito dello studio di propagazione del moto ondoso da largo a riva (vedi documento 100-ZA-E-10009).

Lungo i contorni SO, SE e NE della griglia di calcolo (vedi Figura 4-1) è stata imposta la condizione di totale assorbimento. Le opere interne portuali sono state assunte totalmente riflettenti.

La durata di ciascuna simulazione è stata di circa 6000 s.

I risultati forniti dalle simulazioni sono stati estratti in corrispondenza dei tre punti localizzati lungo la banchina EST e indicati nella Figura 4-2.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 19 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

## 5.2. Risultati dello studio di risonanza portuale eseguito con XBeach surfbeat

Nella Figura 5-3, nella Figura 5-5 e nella Figura 5-7 sono riportate le serie temporali della superficie libera relative alle sole componenti di lungo periodo (infragravity waves,  $f < 0.03$  Hz) registrate nei punti  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  della banchina EST (vedi Figura 4-2) forzate dagli stati di mare estremi provenienti a largo da  $300^\circ$  N e caratterizzati dai tempi di ritorno  $Tr = 25$  anni,  $Tr = 50$  anni e  $Tr = 100$  anni.

Le serie temporali riportate nelle figure sono riferite al livello medio della simulazione il quale deve essere combinato con il corrispondente valore del sovrizzo di tempesta:

- $Tr = 25$  anni SWL (m)  $+0,54 + 0,13$ ;
- $Tr = 50$  anni SWL (m)  $+0,58 + 0,13$ ;
- $Tr = 100$  anni SWL (m)  $+0,62 + 0,13$ ;

Nella Figura 5-4, nella Figura 5-6 e nella Figura 5-8 sono riportati gli spettri di energia nel dominio della frequenza relativi alle serie temporali della superficie libera delle componenti di lungo periodo (infragravity waves,  $f < 0.03$  Hz) registrate nei punti  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  della banchina EST.

Tutti gli spettri registrati presentano un picco principale di energia in corrispondenza del primo periodo proprio di oscillazione del bacino pari a 716 s. Quindi tutti gli stati di mare forzano il primo modo di oscillare del bacino. Una limitata quantità di energia è presente per alcune condizioni in corrispondenza del secondo, terzo e quarto modo di oscillare.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località <b>PORTOVESME (SU)</b>	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto <b>TERMINALE DI PORTOVESME</b>	Pag. 20 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

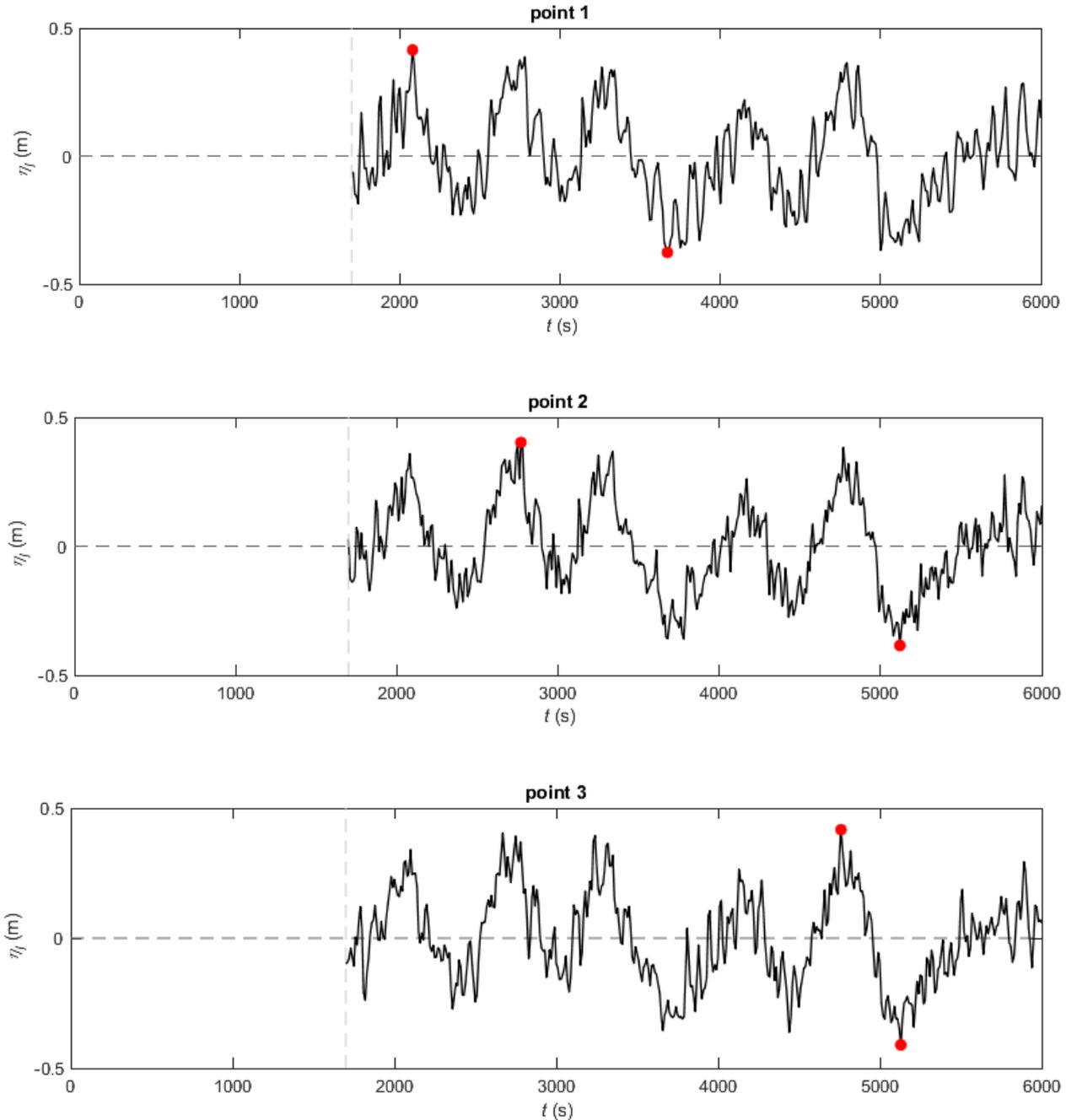


Figura 5-3 - Serie temporali della superficie libera delle onde lunghe registrate nei punti P1, P2 e P3 della banchina EST forzate da uno stato di mare estremo con  $T_r = 25$  anni. La linea orizzontale tratteggiata rappresenta il livello medio della simulazione.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 21 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

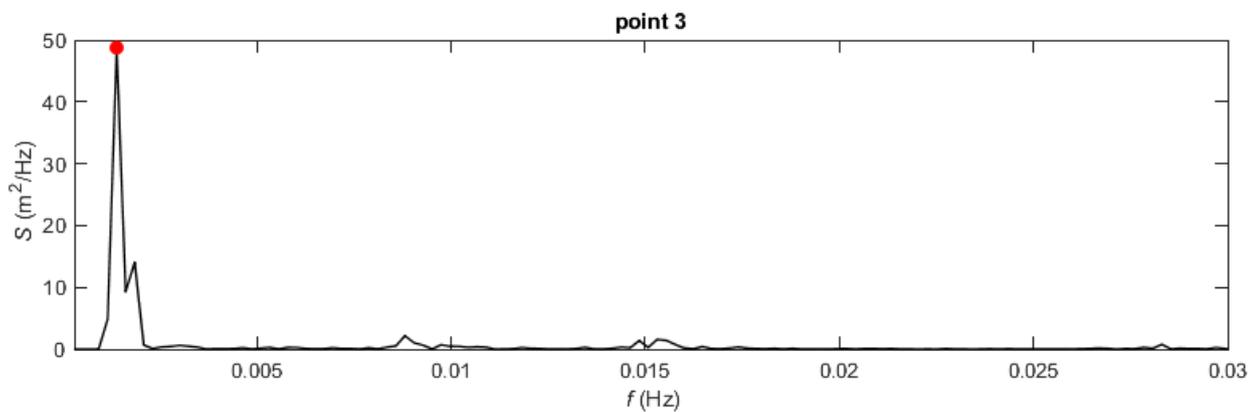
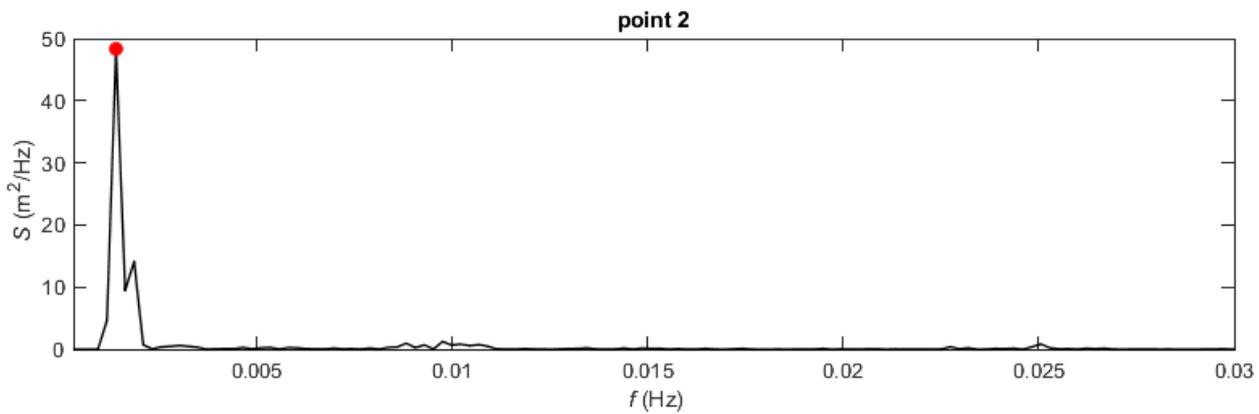
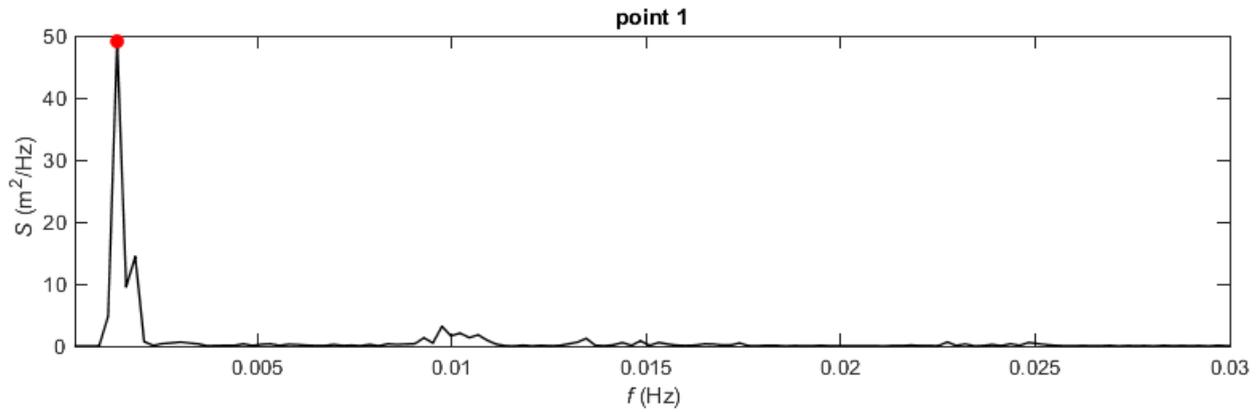
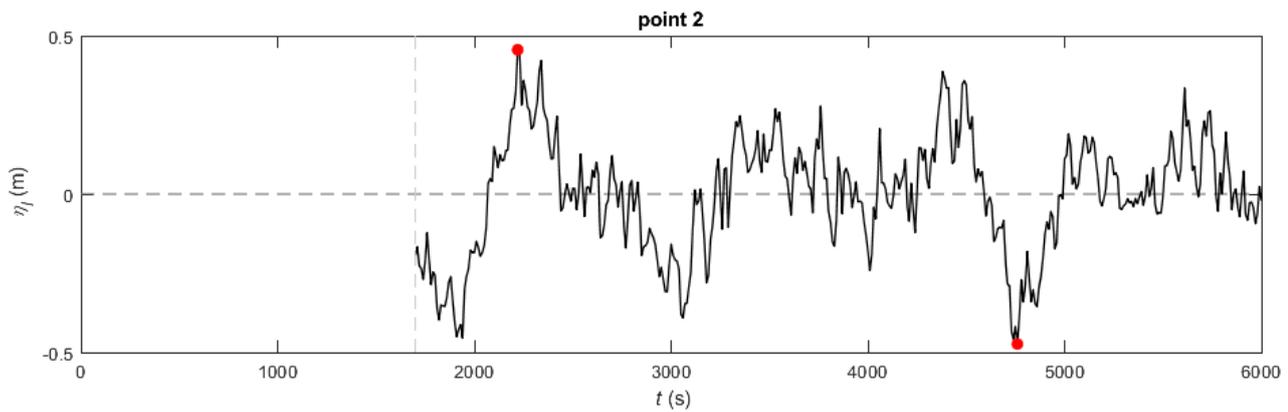
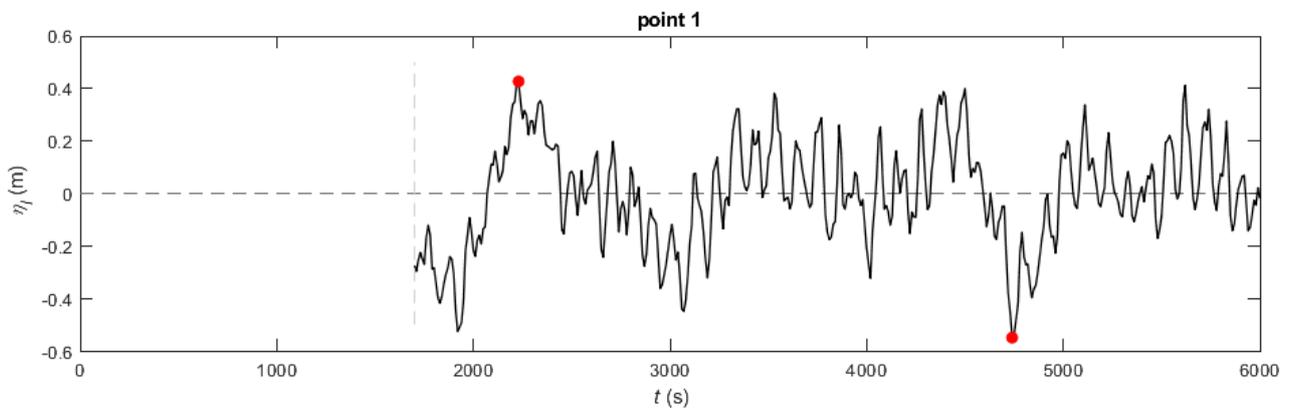


Figura 5-4 Spettri delle serie temporali della superficie libera delle onde lunghe registrate nei punti P1, P2 e P3 della banchina EST forzate da uno stato di mare estremo con  $T_r = 25$  anni.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 22 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005



Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 23 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

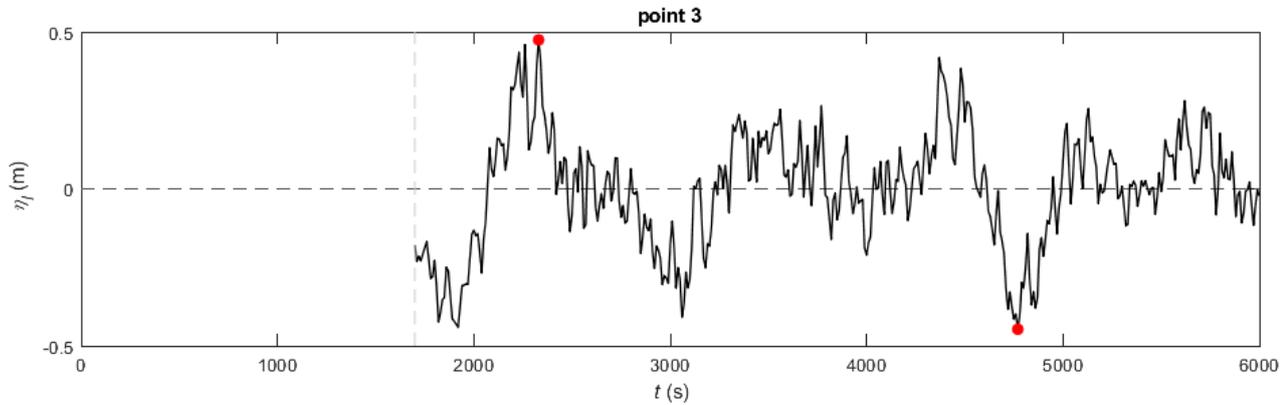
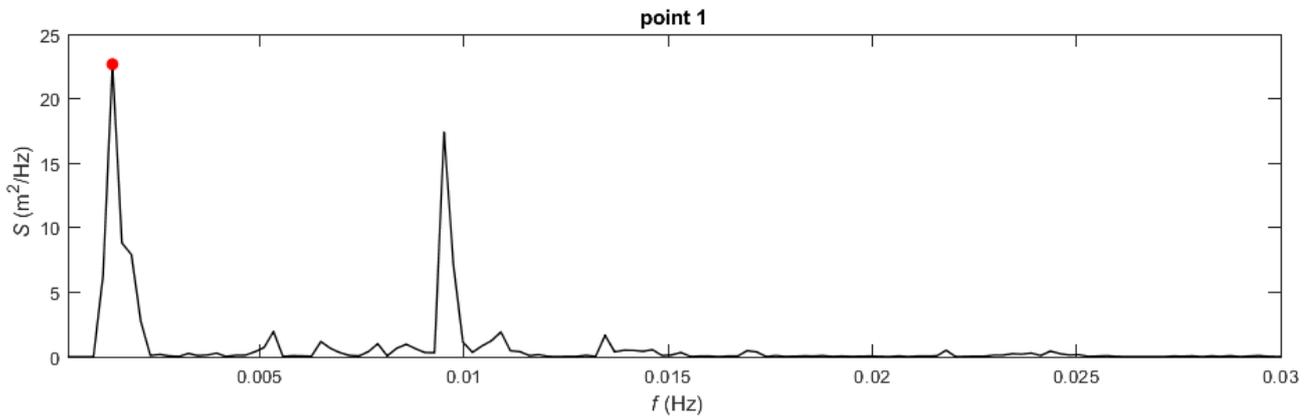
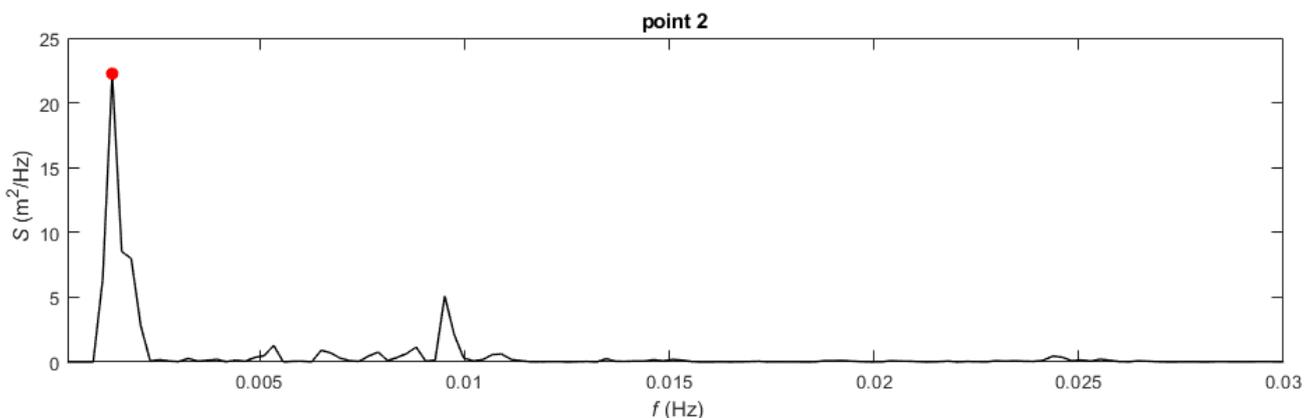


Figura 5-5 - Serie temporali della superficie libera delle onde lunghe registrate nei punti P1, P2 e P3 della banchina EST forzate da uno stato di mare estremo con  $T_r = 50$  anni. La linea orizzontale



ppresenta il livello medio della simulazione.



t  
r  
a  
t  
t  
e  
g  
g  
i  
a  
t  
a  
  
r  
a

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 24 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

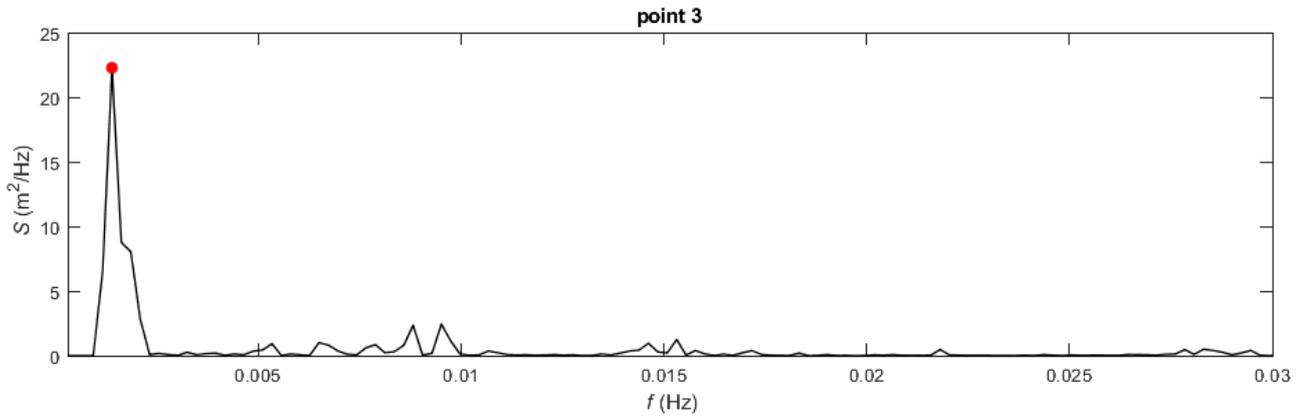
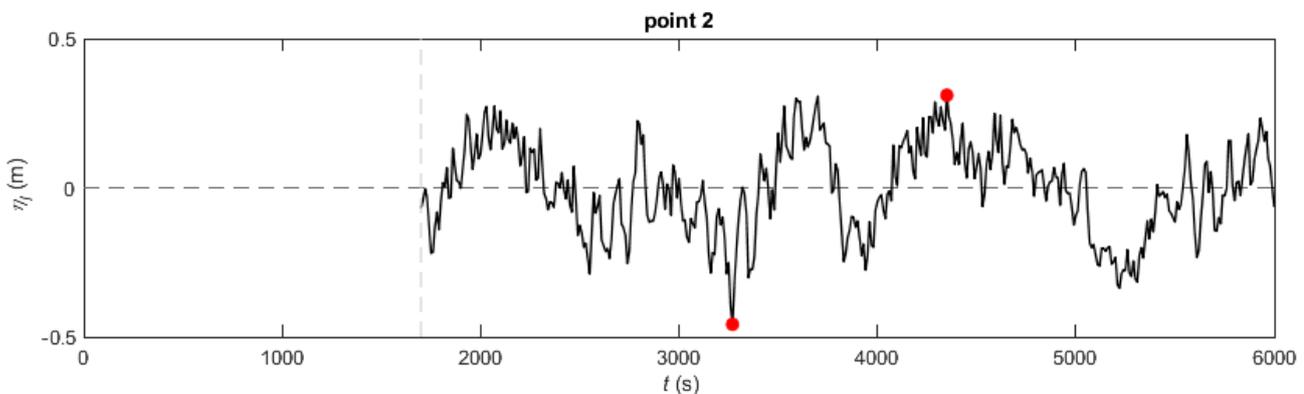
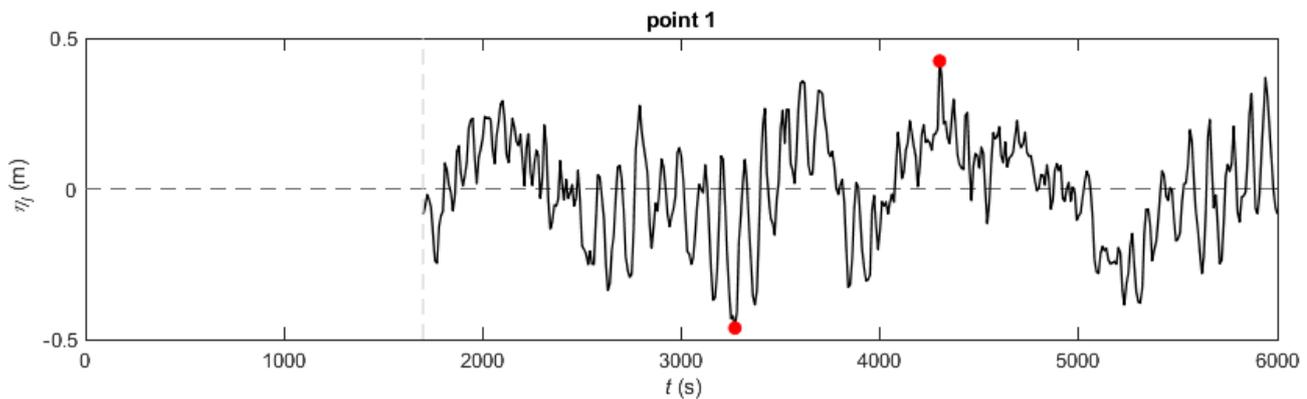


Figura 5-6 - Spettri delle serie temporali della superficie libera delle onde lunghe registrate nei punti P1, P2 e P3 della banchina EST forzate da uno stato di mare estremo con  $T_r = 50$  anni.



Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 25 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

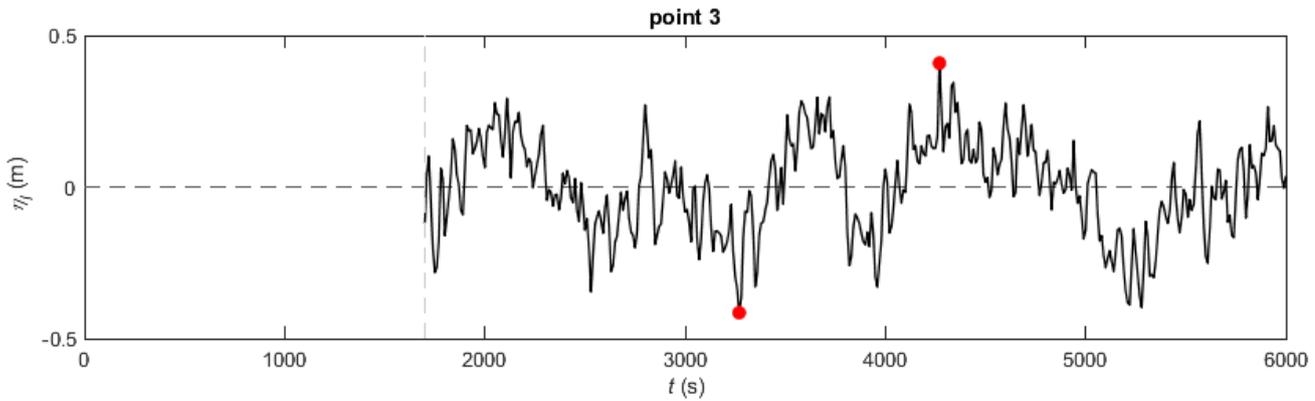
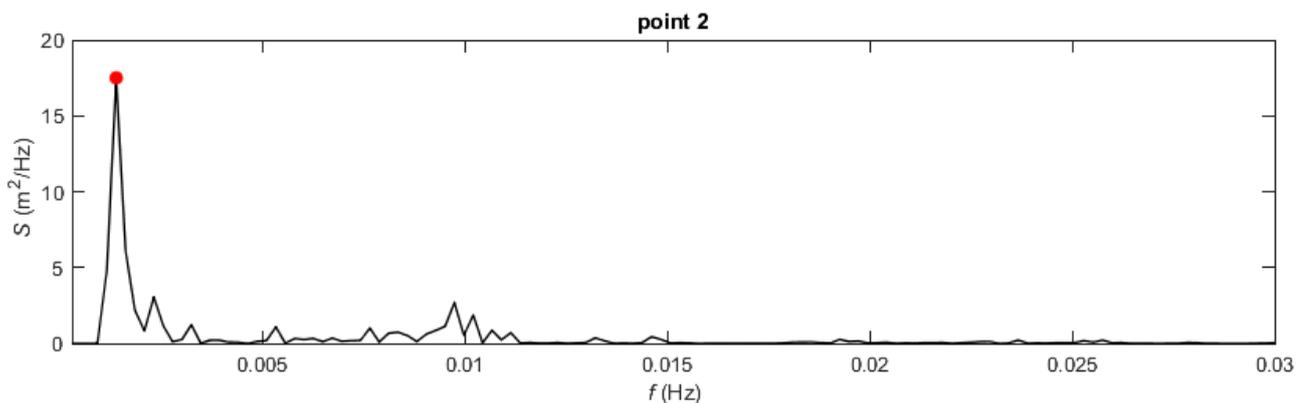
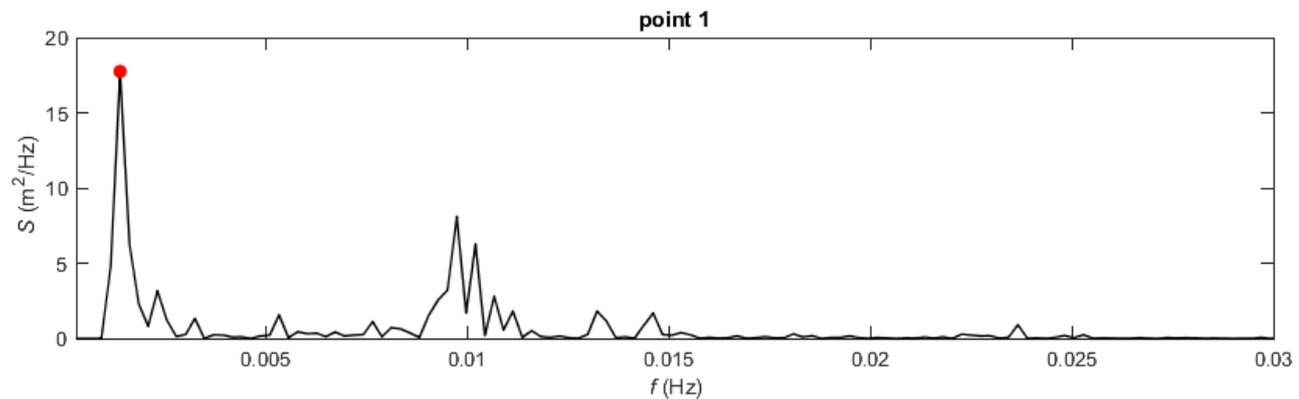


Figura 5-7 - Serie temporali della superficie libera delle onde lunghe registrate nei punti P1, P2 e P3 della banchina EST forzate da uno stato di mare estremo con  $Tr = 100$  anni. La linea orizzontale tratteggiata rappresenta il livello medio della simulazione.



Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 26 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

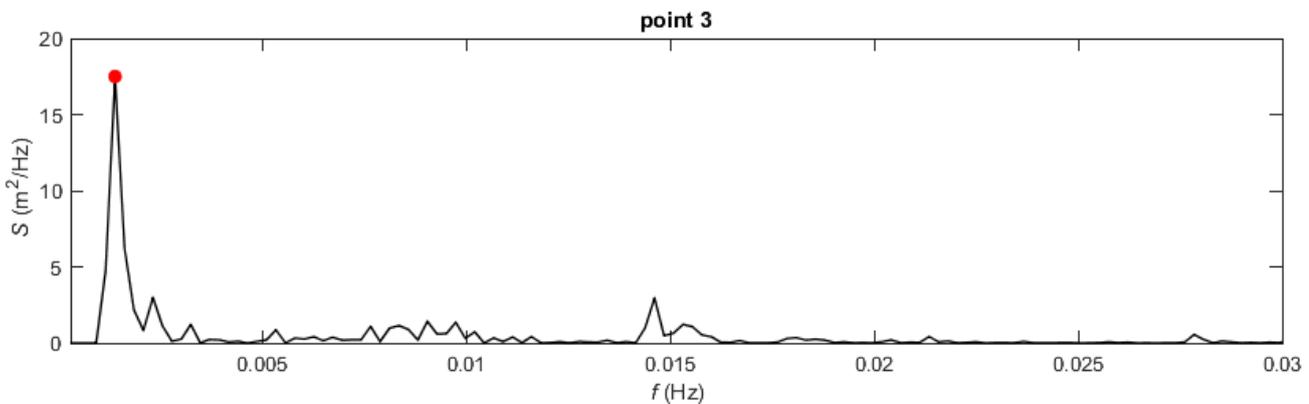


Figura 5-8 - Spettri delle serie temporali della superficie libera delle onde lunghe registrate nei punti P1, P2 e P3 della banchina EST forzate da uno stato di mare estremo con  $Tr = 100$  anni.

In ogni pannello della Figura 5-3, della Figura 5-5 e della Figura 5-7 sono stati evidenziati con un cerchio rosso i valori massimi e minimi della superficie libera.

Poiché l'andamento della superficie libera risulta per ogni stato di mare simulato in fase nei tre punti posti lungo la banchina EST, tenendo peraltro conto che i valori massimi e minimi della superficie libera nei tre punti risultano tra di loro comparabili, nella Tabella 5-1 viene riportata la sintesi dei risultati ottenuti.

La tabella riporta per ogni tempo di ritorno degli stati di mare incidenti analizzati, i valori massimi e minimi registrati per la variazione della superficie libera indotta dalle onde di lungo periodo ed il relativo periodo di picco.

Come si vede dalla tabella i risultati risultano molto simili al variare del tempo di ritorno. Ciò è dovuto al fatto che i bassi fondali posti all'esterno del porto causando il frangimento del moto ondoso, determinano un "filtro" per l'energia del moto ondoso incidente per cui le oscillazioni di lungo periodo nel porto non cambiano sostanzialmente tra uno stato di mare e l'altro. Un risultato simile si è ottenuto per le onde corte. Le modeste differenze dei livelli massimi e minimi riportati nella Tabella 5-1 sono dovute alla fase con le quali si presentano le oscillazioni più corte rispetto a quelle più lunghe.

Da un punto di vista operativo si suggerisce di prendere in esame per gli aspetti connessi alla dinamica della nave i valori corrispondenti al tempo di ritorno di 50 anni.

Tabella 5-1 - Valori massimi e minimi della superficie libera e periodo di picco delle oscillazioni di lungo periodo per ogni stato di mare delle onde corte analizzato corrispondente a  $Tr = 25, 50$  e  $100$  anni.

<b>Tr (anni)</b>	<b><math>\eta_l</math> MAX (m)</b>	<b><math>\eta_l</math> min (m)</b>	<b><math>T_{pl}</math> (s)</b>
25	+0.42	-0.41	716
50	+0.48	-0.55	716
100	+0.42	-0.46	716

Committente  	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 27 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

In corrispondenza dei tre punti della banchina di riva si sono registrate anche le velocità del flusso indotto dalle onde di lungo periodo. I valori massimi del modulo delle velocità indotte dalle onde di lungo periodo sono riportati nella Tabella 5-2 in relazione a ciascuno stato di mare analizzato.

*Tabella 5-2 Valori del modulo delle velocità per la banchina est per i vari stati di mare analizzati e corrispondenti a  $Tr = 25, 50$  e  $100$  anni.*

<b>Tr (anni)</b>	<b>vMAX (m/s)</b>
25	0.18
50	0.20
100	0.21

Nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti nel tempo delle velocità registrate nei tre punti della banchina in modulo, lungo la direzione x (ortogonale alla banchina) e lungo la direzione y (parallela alla banchina). Si osserva che le velocità del flusso idrico sono molto modeste.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 28 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

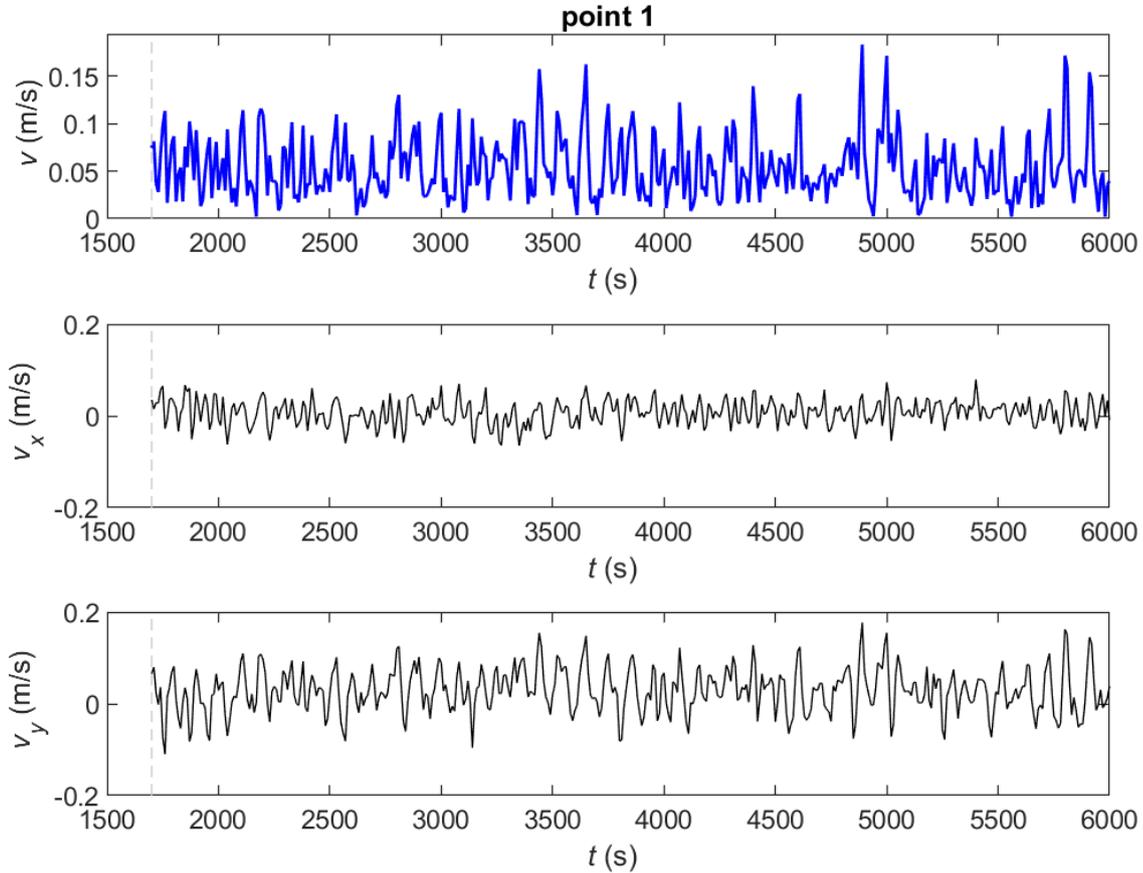


Figura 5-9 - Velocità per il punto  $P_1$  per lo stato di mare con  $Tr = 25$  anni.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 29 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

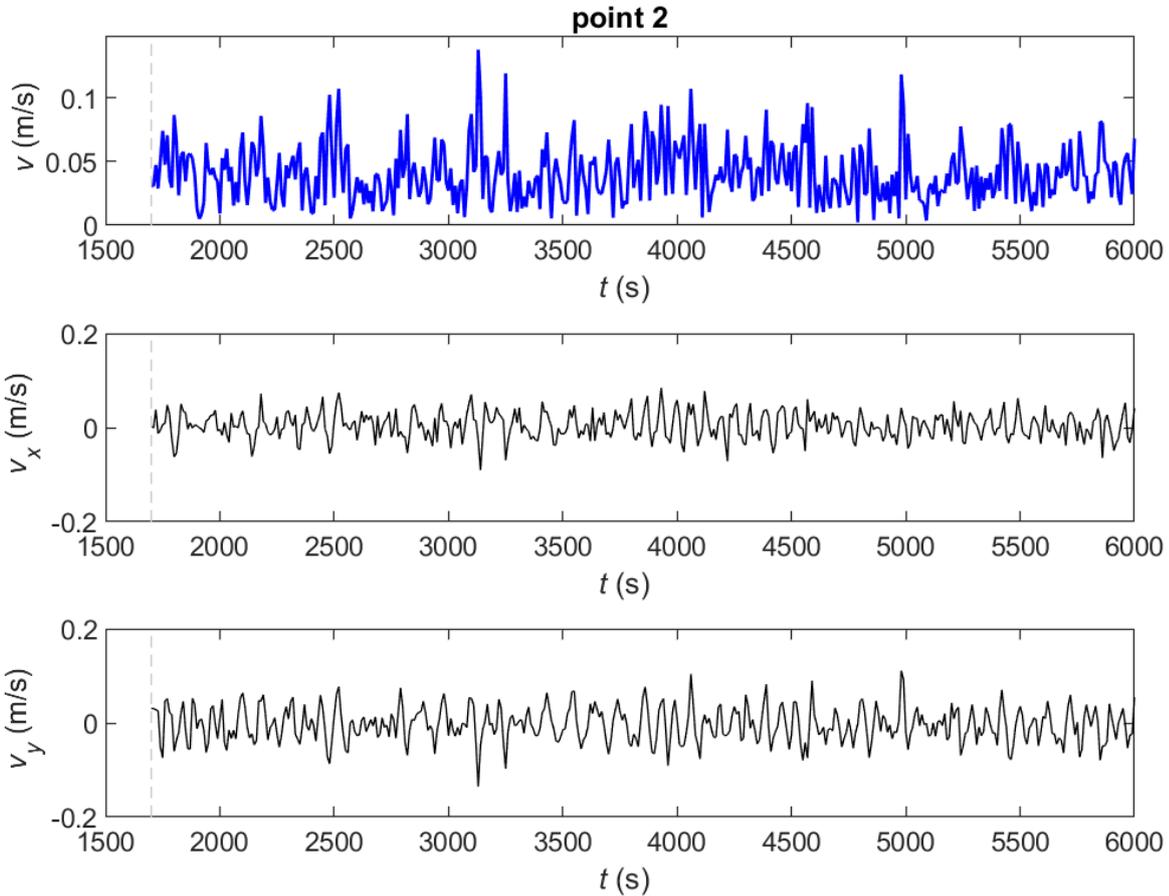


Figura 5-10 Velocità per il punto  $P_2$  per lo stato di mare con  $Tr = 25$  anni.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 30 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

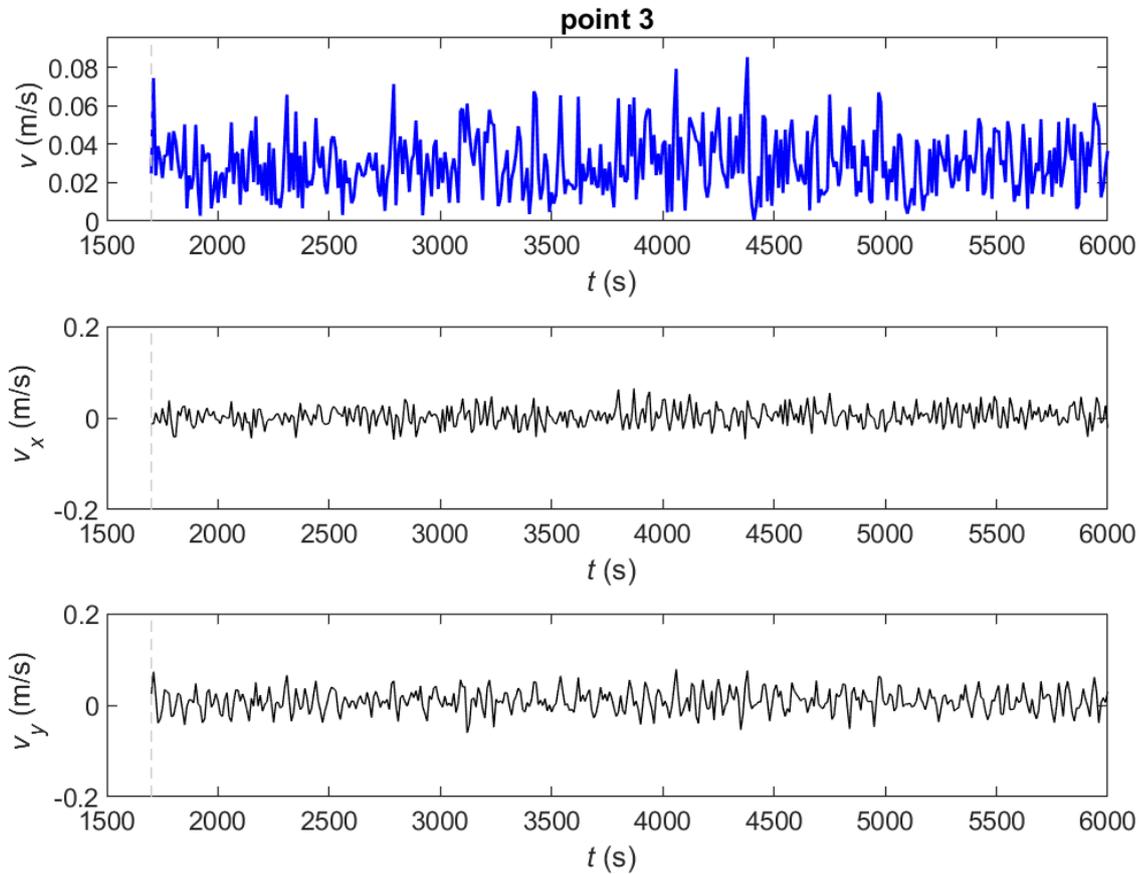


Figura 5-11 - Velocità per il punto  $P_3$  per lo stato di mare con  $Tr = 25$  anni.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 31 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

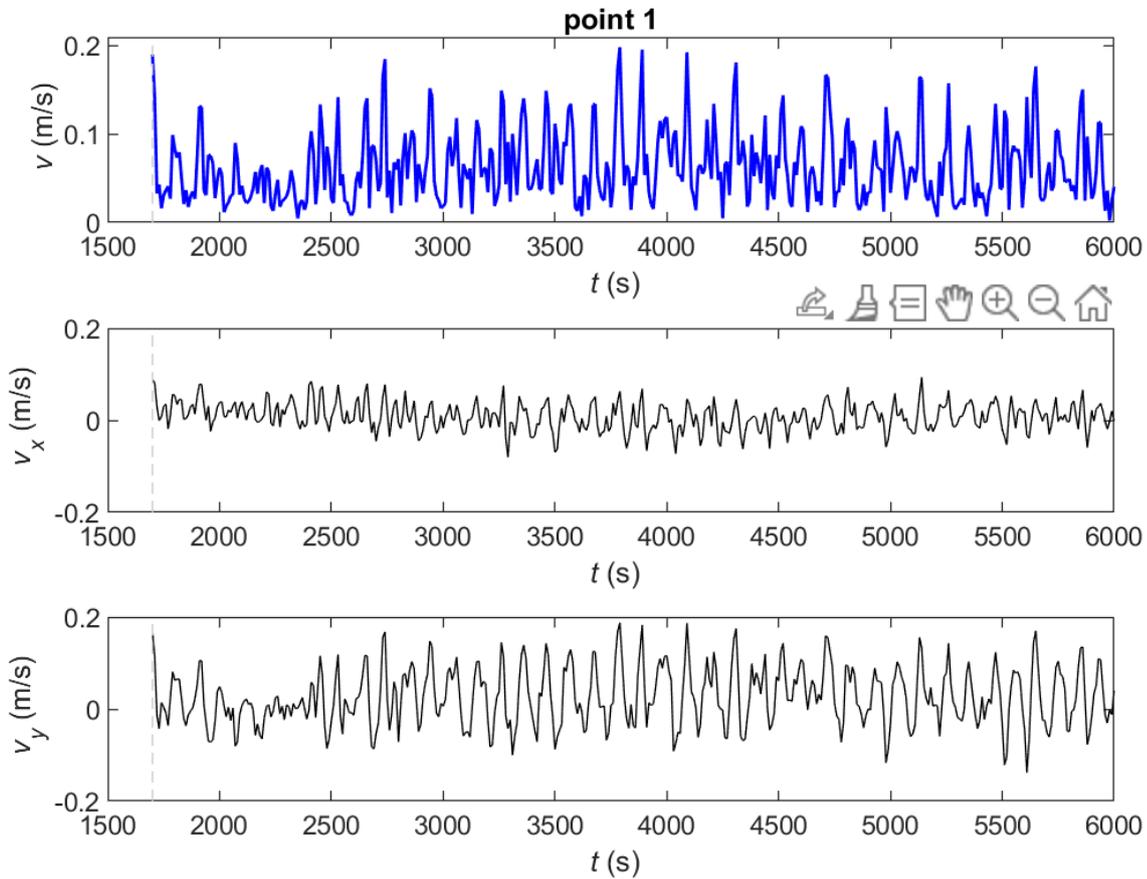


Figura 5-12 - Velocità per il punto  $P_1$  per lo stato di mare con  $Tr = 50$  anni.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 32 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

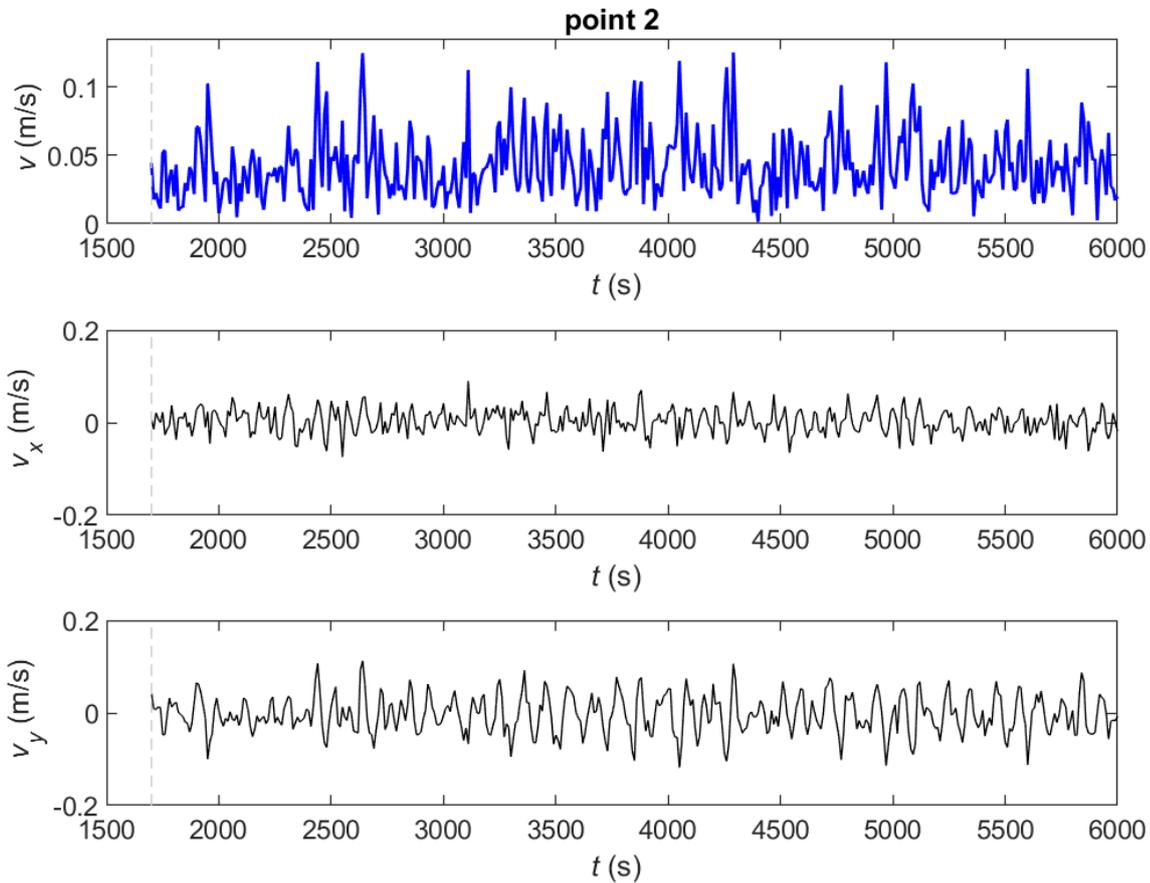


Figura 5-13 - Velocità per il punto  $P_2$  per lo stato di mare con  $Tr = 50$  anni.

Committente  	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 33 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

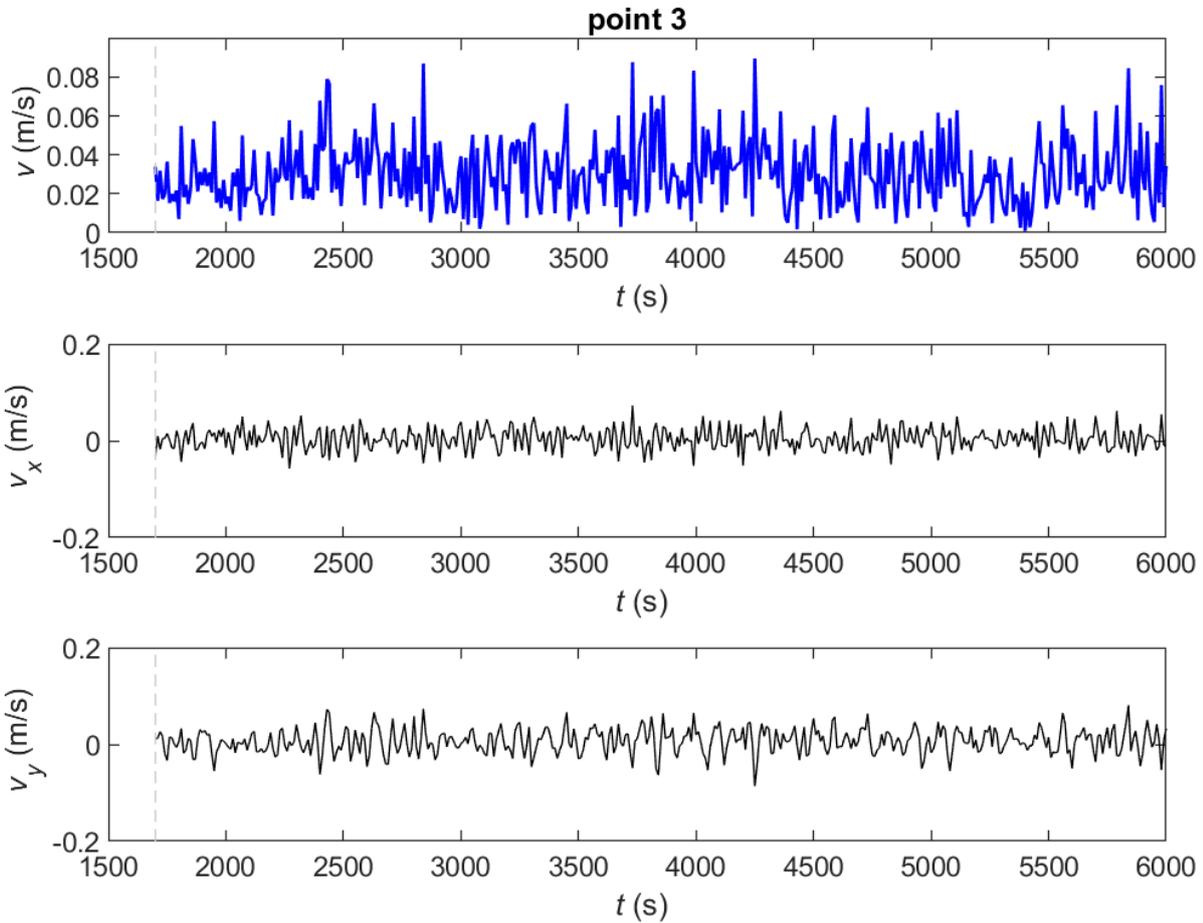


Figura 5-14 – Velocità per il punto  $P_3$  per lo stato di mare con  $Tr = 50$  anni.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 34 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

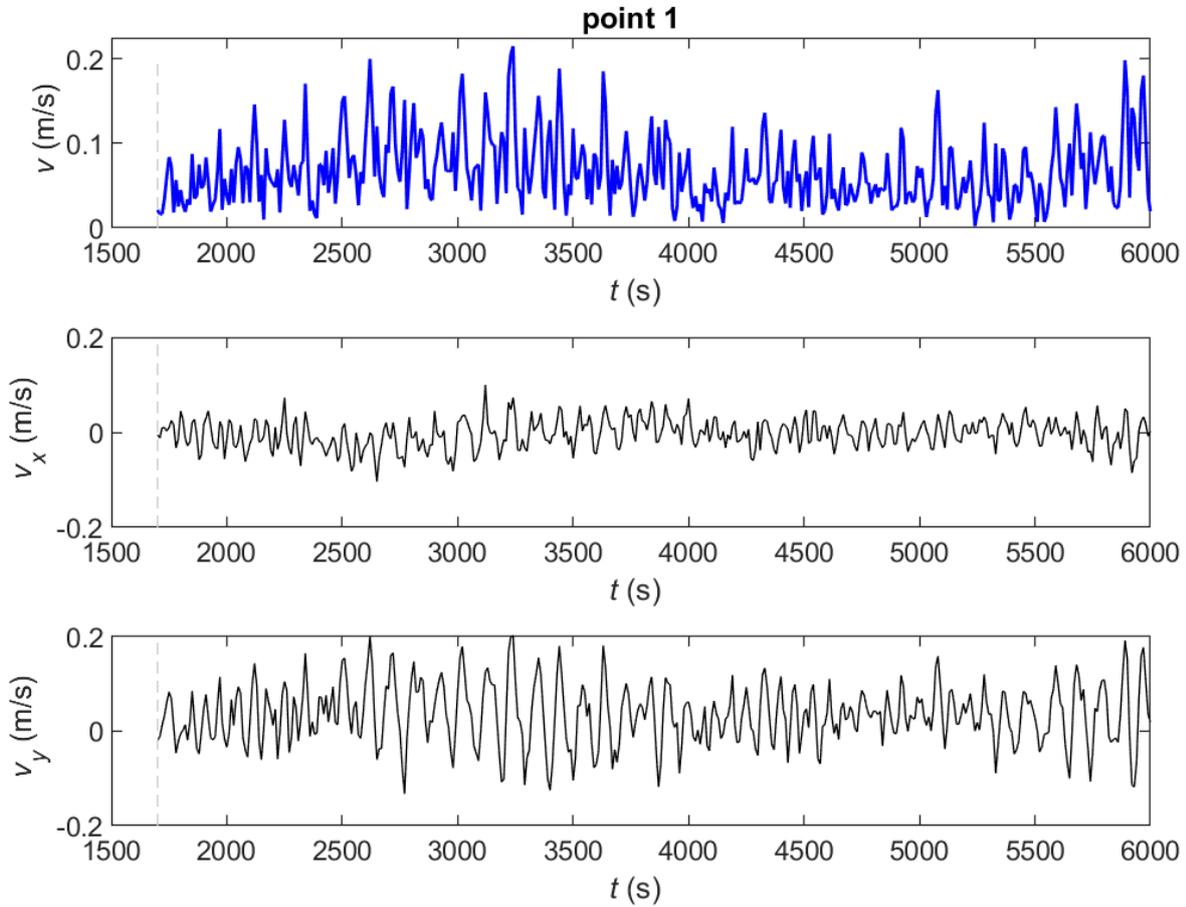


Figura 5-15 - Velocità per il punto  $P_1$  per lo stato di mare con  $Tr = 100$  anni.

Committente  	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 35 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

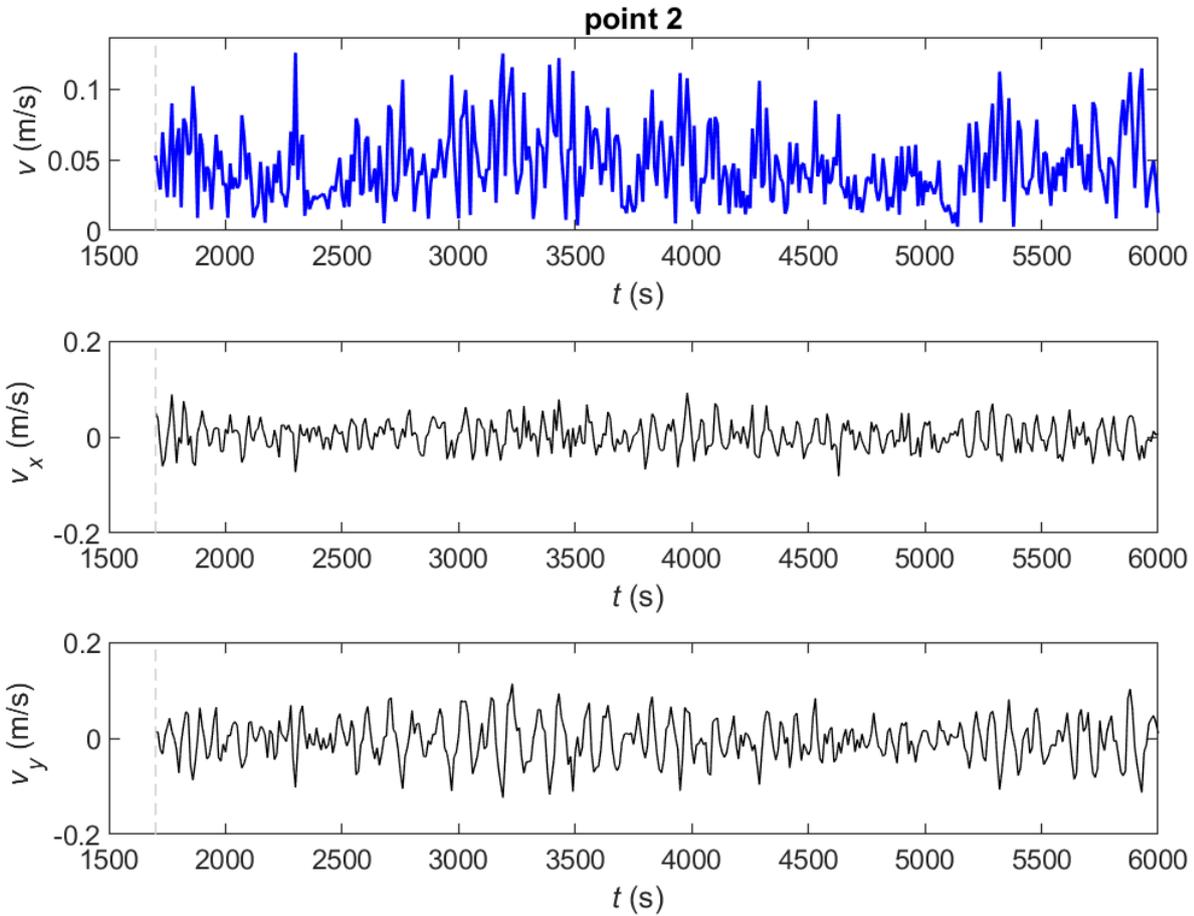


Figura 5-16 - Velocità per il punto  $P_2$  per lo stato di mare con  $Tr = 100$  anni.

Committente 	Progettista 	<b>COMMESSA</b> GC/R2004	<b>UNITA'</b> 001
	Località PORTOVESME (SU)	Riferimento Committente <b>100-ZA-E-10019</b>	
	Progetto / Impianto TERMINALE DI PORTOVESME	Pag. 36 di 36	<b>Rev.</b> 01

Riferimento TPIDL: 201969C-100-RT-3301-005

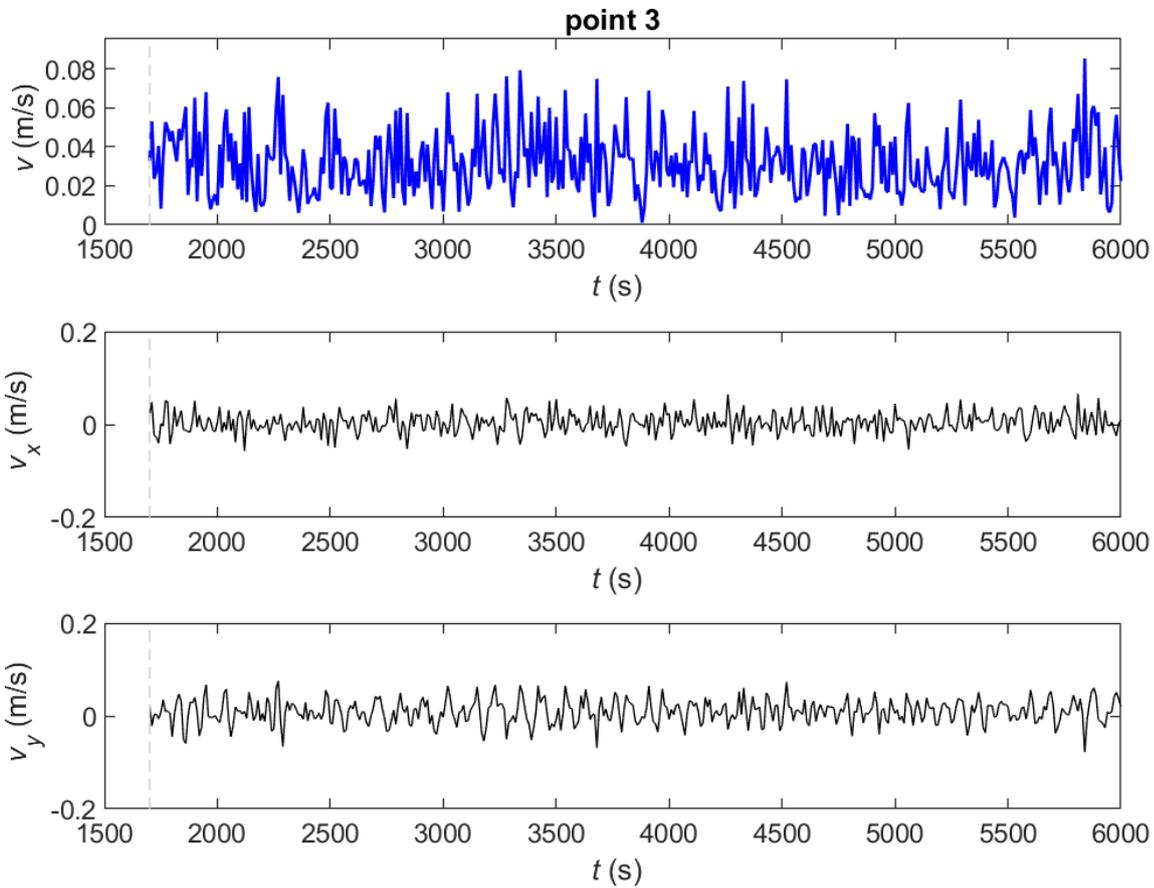


Figura 5-17 - Velocità per il punto  $P_3$  per lo stato di mare con  $Tr = 100$  anni.