Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Esecuzione di prove sperimentali su prototipo in scala 1:8 del dispositivo a colonna d'acqua oscillante REWEC3-GV

F. Arena, V. Fiamma, G. Malara,
A. Romolo, F. Strati, V. Laface,
C. Ruzzo, G. Barbaro, V Russo, G Sannino

Report RdS/PAR2014/225

ESECUZIONE DI PROVE SPERIMENTALI SU PROTOTIPO IN SCALA 1:8 DEL DISPOSITIVO A COLONNA D'ACQUA OSCILLANTE REWEC3-GV

Arena F. , Fiamma V., Malara G., Romolo A,. Strati F. , Laface V. Ruzzo C. , Barbaro G. (Università Mediterranea di Reggio Calabria)
Russo V., Sannino G. (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2014
Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente
Progetto: Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine a dal moto ondoso
Obiettivo: Esecuzione di prove sperimentali e numeriche CFD su prototipo in scala 1:8 del dispositivo a colonna d'acqua oscillante REWEC3-GV
Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione dal titolo "Esecuzione di prove sperimentali e numeriche CFD su prototipo in scala 1:8 del dispositivo a colonna d'acqua oscillante REWEC3-GV"

Responsabile scientifico ENEA: Dott. Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico, Natural Ocean Engineering Laboratory, Dipartimento Diceam, Universita' degli Studi Mediterranea Di Reggio Calabria: prof. Felice Arena

Si ringrazia la società WAVENERGY.IT s.r.l., Spin Off dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria (www.wavenergy.it) per il supporto fornito nella redazione del rapporto, sui dispositivi REWEC3

Indice

SOMMARIO 4

1 INTRODUZIONE 5

2 IL LABORATORIO NATURALE DI INGEGNERIA MARITTIMA, NOEL, PRESSO L'UNIVERSITÀ MEDITERRANEA DI REGGIO CALABRIA 7

2.1 INTRODUZIONE 7
2.2 UN SITO ECCEZIONALMENTE FAVOREVOLE 7
2.3 DESCRIZIONE SINTETICA DEGLI ESPERIMENTI EFFETTUATI DAL 1990 AL 1994, NEL 2001 E NEL 2005 8
2.4 GRADO DI INNOVAZIONE RISPETTO ALLE TRADIZIONALI VASCHE DI LABORATORIO 10
2.5 MARZO 2009: SI AVVIA IL LABORATORIO NATURALE DI INGEGNERIA MARITTIMA NOEL 11
2.6 NUOVE ATTIVITÀ SPERIMENTALI NEL NOEL (2009-2015) 12

3 MODELLO IN SCALA RIDOTTA DI UN CASSONE RESONANT WAVE ENERGY CONVERTER A GEOMETRIA VARIABILE REWEC3-GV PER ATTIVITÀ SPERIMENTALE PRESSO IL NOEL 14

3.1 DESCRIZIONE GENERALE DEI CASSONI REWEC3 14
3.2 ATTIVITÀ SPERIMENTALE PRESSO IL NOEL 15
3.3 ATTIVITÀ SPERIMENTALE SUL CASSONE REWEC3-GV PRESSO IL NOEL 15
3.4 STRUMENTI DI MISURA UTILIZZATI DURANTE L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE 24
3.5 ANALISI DEI DATI 24
3.4.1 ANALISI DI DETTAGLIO DEL RECORD N° 77 24
3.4.2 SINTESI DEI DATI REGISTRATI 29
3.4.3 ANALISI DI DETTAGLIO DEL RECORD N° 405 49
3.4.4 ANALISI DI DETTAGLIO DEL RECORD N° 708 52

4 CONCLUSIONI 56

5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 56

6 ACRONIMI 58

Sommario

Il rapporto illustra i risultati delle attività sperimentali in mare, eseguite presso il laboratorio NOEL (Natural Ocean Engineering Laboratory) dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria, su un modello in scala ridotta di un dispositivo a colonna oscillante di tipo U-OWC (U-Oscillating Water Column, o REWEC3).
Le attività sperimentali sono state eseguite utilizzando il cassone U-OWC a geometria variabile, denominato REWEC3-GV, installato presso il NOEL nel corso delle attività dell'anno 2013.
Il cassone è stato realizzato con pannelli interni alla camera di assorbimento rimuovibili, in modo da potere modificare la larghezza della stessa camera. La configurazione iniziale, con tutti i setti interni montati, prevede tre celle indipendenti da 1.27m. La seconda configurazione prevede lo smontaggio di un setto interno, al fine di avere una camera più grande, con due celle comunicanti: il monitoraggio viene eseguito sulla cella di 2.54m. La terza configurazione prevede una unica cella, smontando i setti interni, avente lunghezza di 3.8m.

Le analisi sperimentali sono finalizzate sia a validare il comportamento del sistema REWEC3 per l'assorbimento dell'energia ondosa e la produzione di energia elettrica, sia a validare il modello CFD implementato da ENEA con la collaborazione della Mediterranea.

1 Introduzione

Nel presente report sono riportati i risultati di attività sperimentali di campo, presso il laboratorio NOEL, su un modello in scala ridotta di un nuovo dispositivo a colonna d'acqua oscillante OWC (*Oscillating Water Column*), ottimizzato per la conversione dell'energia ondosa incidente e per la produzione di energia elettrica. Si tratta di un dispositivo U-OWC (o Resonant Wave Energy Converter - REWEC3, inventato dal prof. Paolo Boccotti) che presenta un'ottima resa energetica rispetto a sistemi più tradizionali.

Le attività sperimentali sono state eseguite utilizzando un cassone in acciaio caratterizzato da elevata modularità delle sue parti attive. Le camere di assorbimento presentano setti interni rimovibili, che permettono di partizione della stessa camera pneumatica in tre configurazioni differenti. Tale cassone è stato installato presso il laboratorio NOEL nel 2014 (nel corso delle attività 2013). Le prove eseguite hanno riguardato l'ottimizzazione delle prestazioni idrodinamiche dell'impianto. La dinamica di un impianto U-OWC è fondamentale per la progettazione di un impianto sia per le stime dell'assorbimento di energia ondoso sia per aspetti di stabilità strutturale. In particolare, per la stima dei carichi massimi che l'onda esercita sulla struttura, dati fondamentali in fase di progettazione.
Su due pali sono state eseguite le misure di campo indisturbato, utilizzando due ultrasuoni e due trasduttori di pressione. Tali misure forniscono lo spettro delle onde incidenti e quindi consentono di calcolare l'energia incidente.
I cassoni U-OWC sono stati equipaggiati con trasduttori di pressione all'interno della camera di assorbimento ed all'esterno e con sonde ultrasoniche per le misure di livello. In dettaglio, sulla copertura della camera di assorbimento sono stati montati ultrasuoni per le misure dell'elevazione dell'acqua nelle camere; trasduttori di pressione sono stati posizionati a diverse quote, uno sul fondo ed altri posizionati sia sotto il livello medio del mare sia al di sopra. Un traduttore sulla sommità della camera misura la pressione dell'aria. Sull'imbocco del condotto verticale è stato infine posizionato un trasduttore di pressione per misurare la pressione dovuta all'onda. Tale pressione rappresenta la forzante del nostro sistema consente di eseguire le opportune analisi dinamiche.
Sono state eseguite le prove sperimentali in tre differenti configurazioni:

1) configurazione con tre celle indipendenti (celle non sono comunicanti tra loro);
2) cassone con due celle comunicanti tra di loro;
3) cassone con le tre celle comunicanti tra di loro e cioè con una cella singola.

In ciascuna configurazione sperimentale si è proceduto ad analizzare il coefficiente di assorbimento dell'impianto. Tale coefficiente consente di determinare l'energia assorbita l'impianto in quanto esso rappresenta appunto il rapporto tra l'energia assorbita è l'energia ondosa incidente.
Trasduttori di pressione hanno poi consentito di determinare le sollecitazioni che le onde producono sui setti della struttura. Tali sollecitazioni risultano fondamentali per la progettazione strutturale. Esse rappresentano infatti l'azione che le onde nel corso di mareggiate producono sulla struttura in condizioni estreme.
Sono state infine eseguite alcune prove sperimentali finalizzate al confronto con prove numeriche e ad ottimizzare le prestazioni idrodinamiche dell'impianto. Tali misurazioni sono state seguite nelle differenti

configurazioni. I risultati sono stati utilizzati per implementare e tarare un nuovo modello CFD di del sistema in oggetto ottimizzato dal punto di vista computazionale.

2 Il laboratorio naturale di ingegneria marittima, NOEL, presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria

2.1 Introduzione

Nel periodo 1989-94 il gruppo di docenti dell'Università di Reggio Calabria coordinato dal prof. Paolo Boccotti ha portato a termine con successo sei esperimenti in mare sulla meccanica delle onde generate dal vento e sull'interazione onde-strutture, i cui risultati sono stati pubblicati su prestigiose riviste internazionali del settore: *Journal of Fluid Mechanics*, *Physics of Fluids*, *European Journal of Mechanics*, *Ocean Engineering*, e sono stati diffusamente illustrati nei volumi 'Idraulica Marittima' (UTET, 1997) e 'Wave Mechanics for Ocean Engineering' (Elsevier Science, 2000). I predetti esperimenti prevedevano, per la prima volta al mondo, l'esecuzione direttamente in mare di modelli (in scala ridotta di Froude) di strutture marittime, operando con tecniche da laboratorio.

Nel 1996 si sono avviati i lavori per l'esecuzione di un laboratorio stabile sul lungomare della città di Reggio Calabria. Nel corso dei lavori di realizzazione del laboratorio, nel dicembre 2001 si è eseguito un nuovo esperimento, per la verifica del funzionamento di una barriera sommersa di tipo REWEC1 per l'assorbimento e lo sfruttamento dell'energia ondosa. I risultati sono stati pubblicati su *Ocean Engineering* e su *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* .

Il laboratorio è stato inaugurato nell'aprile 2005, con un nuovo importante esperimento che ha riguardato la verifica in mare di un nuovo dispositivo per la produzione di energia elettrica dalle onde di mare: si tratta dell'U-OWC, o REWEC3, Resonant Wave Energy Converter. I risultati dell'esperimento sono stati pubblicati su *Ocean Engineering* nel 2007.

Il Laboratorio, tra il 2005 e l'inizio del 2009 è stato gestito dal Consorzio OKEANOS.

A partire da marzo 2009 il laboratorio è gestito direttamente dall'Università Mediterranea, ed è stato rinominato Natural Ocean Engineering Laboratory, NOEL. Responsabile Scientifico del laboratorio è il prof. Felice Arena, Ordinario di Costruzioni Marittime nell'Università Mediterranea, con il Coordinamento scientifico del prof. Paolo Boccotti.

Con il passaggio all'Università Mediterranea, nella primavera del 2009, si è avviata una nuova fase del laboratorio, con una nuova serie di esperimenti in mare (due a maggio 2009, due esperimenti nell'autunno del 2009, due nel 2010, e successivamente esperimenti eseguiti con continuità fino al 2013), una serie di eventi seminariali di carattere internazionale, corsi per studenti di ingegneria o per dottorandi di ricerca, congressi e workshops. Le attività sono state svolte sotto la direzione del prof. Arena, la supervisione scientifica del prof. Boccotti e la partecipazione di Dottorandi e Dottori di Ricerca e di studenti di Laurea Magistrale.

2.2 Un sito eccezionalmente favorevole

In mare è molto difficile trovare onde con dimensioni da vasca di laboratorio, che siano anche pure onde di vento. Di solito, onde di quelle dimensioni sono sovrapposizioni di onde di vento ed onde di mare-lungo le quali conservano i periodi che avevano nell'area di generazione, ma hanno altezze evidentemente

ridotte. Pertanto per tali onde, la similitudine di Froude tra lo stato di mare cui è sottoposto il modello e lo stato di mare cui è sottoposto il prototipo (dimensioni reali) non è più rispettata.

Le prove eseguite a Reggio Calabria con modelli di strutture diverse hanno avuto successo grazie alle condizioni eccezionalmente favorevoli del sito.

La prima fondamentale condizione è che frequentemente si formano degli stati di mare con dimensioni tipiche da grossa vasca di laboratorio (altezze significative H_s comprese tipicamente tra 0.2m e 0.6m, periodi dominanti T_p compresi tra 1.8s e 2.8s) i quali consistono di onde pure di vento. Trovare in mare onde con H_s<0.50m e spettri da pure onde di vento non è per niente facile; a Reggio Calabria tale condizione si verifica per alcuni giorni al mese, grazie alla concomitanza di tre condizioni favorevoli:

i) la grande stabilità del vento locale di NNW, il cosiddetto "vento di canale", che soffia da Messina verso Reggio;
ii) l'orientamento locale della costa : il tratto di litorale davanti al centro della città piega verso NE per chi risale lo Stretto da SUD, e pertanto risulta naturalmente protetto dalle onde di mare-lungo che provengono dall'imboccatura SUD dello Stretto;
iii) l'estensione relativamente limitata (circa 10 km) del fetch sul quale agisce il vento di canale.

E' probabile che condizioni simili in termini di caratteristiche delle onde possano realizzarsi in alcuni laghi; ed infatti è soprattutto ai laghi che bisogna guardare per sviluppare la modellistica naturale. Tuttavia il laboratorio pioneristico di Reggio Calabria possiede una serie di ulteriori vantaggi che lo rendono difficilmente superabile.

1. La grande stabilità del "vento di canale" che, spirando da NNW, contrasta le onde di mare-lungo provenienti da SUD e ne contiene l'incidenza. La stabilità del vento è utile anche perché fornisce giornate intere perfettamente sfruttabili sul piano operativo.
2. La piccola escursione di marea (ampiezza tipicamente contenuta entro i .1m) che è un requisito necessario per la buona riuscita degli esperimenti su modelli in scala ridotta.
3. La limpidezza dell'acqua davvero impensabile davanti ad un centro urbano. L'acqua è limpidissima perché viene ricambiata dalla corrente dello Stretto la quale fluisce due volte al giorno. E' del tutto evidente che la limpidezza dell'acqua è un altro prerequisito per l'attività di laboratorio in ambiente naturale. Infatti nel mare o nei laghi i montaggi dei modelli delle strutture e degli strumenti di misura vanno fatti per via subacquea. Inoltre la possibilità di controllare visivamente le parti sommerse di un modello si rivela molto utile.

In sintesi, grazie ad una serie straordinaria di fattori naturali, il mare di Reggio Calabria è un grande laboratorio naturale per le sperimentazioni di Ingegneria Marittima.
E proprio nel lungomare (in località Rada delle Mura Greche), l'Università Mediterranea ha realizzato il Natural Ocean Engineering Laboratory NOEL.

2.3 Descrizione sintetica degli esperimenti effettuati dal 1990 al 1994, nel 2001 e nel 2005

La possibilità di operare in mare con tecniche di laboratorio è stata dimostrata per la prima volta con l'esperimento eseguito nel maggio 1990, i cui risultati sono pubblicati sul prestigioso Journal of Fluid Mechanics. Nel corso dell'esperimento furono montati in mare nove tralicci, ciascuno dei quali fungeva da sostegno di una sonda a ultrasuoni e di un trasduttore di pressione.

Negli anni successivi è stato studiato il comportamento di diversi modelli in scala ridotta di strutture marittime soggette all'azione di mareggiate. In particolare nel 1991 è stato provato in mare il modello in scala 1:30 di un nuovo tipo di diga foranea di lunghezza 12m e di altezza 2.1m (i risultati sono pubblicati su Ocean Engineering, sui Proceedings Int. Conf. Coastal Engineering e sul Giornale del Genio Civile; inoltre i risultati di tale esperimento sono alla base delle nuove Istruzioni per la Progettazione delle Dighe Marittime, emanate nel 1994 dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici).

Nel 1992 è stato montato il modello scala 1:50 di una grande piattaforma petrolifera del Mare del Nord, avente alla base un diametro di 2 m e un'altezza di 3 m (risultati pubblicati su Ocean Engineering).

Nel 1993 è stato realizzato il modello in scala 1:30 del cosiddetto "tunnel di Archimede" per il collegamento stabile Sicilia-Calabria (risultati pubblicati su Ocean Engineering). L'esperimento consisteva in due fasi. Una prima fase fu posto in mare il modello del tunnel per sola ferrovia diametro 0.90 m (diametro del prototipo d =27m), in una seconda fase si effettuarono le stesse prove con un modello del tunnel per sola ferrovia di diametro d=0.45 m (diametro del prototipo d= 13.5 m) .

Infine nel 1994 è stata studiata la stabilità di un modello di diga a muro (lunghezza 12 m su un fondale di 1.7 m) sotto l'azione delle onde di mare. Nel corso dell'esperimento è stata misurata la forza prodotta dalle onde in una sezione della parete; sono stati inoltre esaminati gli effetti indotti dalla realizzazione di tale struttura sul litorale circostante (risultati pubblicati sul volume Idraulica Marittima, UTET).

Si ricorda che il primo ciclo di 6 esperimenti nel mare di Reggio Calabria ha consentito tra l'altro:

a) di verificare la recente teoria di quasi-determinismo delle onde di mare sia per quanto riguarda le onde in campo libero da ostacoli, sia per quanto riguarda le onde soggette a riflessione e a diffrazione;
b) di scoprire alcuni fenomeni di base della meccanica dei caratteristici gruppi di onde alte che si formano nel corso delle mareggiate;
c) di verificare le teorie più recenti sulla riflessione delle onde irregolari generate dal vento;
d) di scoprire il motivo per cui i coefficienti di inerzia (fattori di amplificazione della forza) assumono valori compresi tra 1 e 2 sia per le strutture cilindriche verticali (tipo piattaforme offshore) sia per le strutture cilindriche orizzontali (tipo tunnel di Archimede);
e) di scoprire una marcata asimmetria caratteristica nelle fluttuazioni della spinta di galleggiamento prodotte dalle onde su corpi immersi;
f) di scoprire che la forza di risucchio verso mare sulle dighe a parete verticale su alti fondali supera in modo netto, e contro le aspettative, la spinta verso terra;
g) di individuare una caratteristica caduta di pressione sulle pareti delle dighe negli istanti in cui esse sono investite dalle creste delle onde più alte.

Nel dicembre 2001 è stato eseguito un esperimento su un nuovo impianto, brevettato dal prof. Boccotti, formato da un cassone completamente sommerso, appoggiato sul fondale marino (U.S. patent n° 6,450,732B1). Un condotto verticale attraversa la copertura del cassone per tutta la sua lunghezza. All'interno del cassone è contenuta una sacca d'aria. Quando le onde transitano sopra il cassone, la pressione sull'imboccatura superiore del condotto verticale subisce delle pulsazioni che imprimono un movimento alterno (a pistone) all'acqua contenuta nel condotto verticale. La sacca d'aria all'interno del cassone funziona come una molla. L'altezza di questa 'molla' viene regolata in modo che il periodo proprio di oscillazione sia vicino al periodo delle onde. In tale condizione si produce un fenomeno di risonanza grazie al quale l'impianto riesce ad assorbire una fetta veramente grande dell'energia ondosa. Per l'esperimento è stato realizzato un cassone, il quale è stato successivamente posizionato nel mare di Reggio

Calabria. L'esperimento ha confermato che le masse d'acqua e aria all'interno del cassone riescono a entrare in risonanza con le onde irregolari di mare esattamente come previsto. I risultati sono apparsi sulla rivista americana Ocean Engineering.

Nel 2005 è stato poi realizzato un esperimento per la verifica del funzionamento di un impianto REWEC3. L'esperimento mirava a verificare alcuni risultati analitici elaborati da Boccotti, il quale aveva previsto che un impianto può assorbire fino al 100% dell'energia ondosa incidente. Questo grazie ad una amplificazione delle onde, in presenza di swells. I risultati hanno confermato in pieno l'efficienza degli impianti REWEC, nonché l'efficacia del modello teorico per determinare il campo di onde davanti ad una diga assorbente. I risultati, analitici e sperimentali, sono stati pubblicati in tre articoli sullo stesso volume della rivista internazionale Ocean Engineering (2007).

Vi è poi tutta una serie di risultati più specifici che sarebbe lungo elencare qui, e per i quali si rimanda alle memorie scientifiche illustrative degli esperimenti. Di seguito vengono elencate alcune memorie significative (su International Journals o su libri) relative alle attività sperimentali nel mare di Reggio Calabria tra il 1989 ed il 2005.

2.4 Grado di innovazione rispetto alle tradizionali vasche di laboratorio

La modellistica in scala ridotta è fondamentale per la progettazione di manufatti interagenti con fluidi in moto. I manufatti di ingegneria marittima vengono provati in vasche coperte attrezzate per la generazione di onde. Le vasche moderne hanno dimensioni molto rilevanti: lati dell'ordine della centinaia di metri, e sono dotate di sofisticati sistemi di generazione delle onde. Tuttavia la rappresentazione in scala delle mareggiate è sempre approssimata causa la notevole complessità del fenomeno da riprodurre, e causa gli effetti parassiti (disturbi) dovuti alla presenza dei bordi delle vasche. A fronte di queste imprecisioni e disturbi ci sono costi elevatissimi di impianto e di gestione. Per questo in tutta l'U.E. ci sono solo pochi impianti avanzati. Alcuni esempi: Wallingford (UK), Delft (NL), Lingby (DK), Hannover (D).

Gli esperimenti in mare hanno richiesto una radicale innovazione nelle tecniche operative. Basti pensare che per realizzare il modello in scala ridotta, diciamo di un porto turistico, in una vasca di laboratorio, si rimuove l'acqua dalla vasca stessa, e si procede ad un montaggio all'asciutto. Questo evidentemente in mare non è possibile, e pertanto è stato necessario sviluppare tutta una serie di nuove tecniche operative subacquee.

Inoltre il montaggio e la gestione della rete elettrica aerea di alimentazione della strumentazione, nelle vasche può essere montata mediante carri-ponte e, nelle vasche più grandi, a mezzo di imbarcazioni. In mare si è utilizzato un gommone, con la maggiore difficoltà di dovere operare anche in presenza di onde (mentre nelle vasche come è evidente quando si fanno le operazioni sulla rete elettrica di alimentazione si fermano le macchine per la generazione delle onde).

A Reggio Calabria si è riusciti ad operare con successo in ben sei esperimenti (fino al 1994) avendo a disposizione soltanto una struttura provvisoria (la struttura del Lido Comunale di Reggio Calabria assolutamente sprovvista di mezzi meccanici). Il laboratorio stabile dell'Università Mediterranea NOEL ha consentito un salto di qualità, puntando ad una forte innovazione nel campo della modellistica fisica nell'ingegneria marittima e navale.

2.5 *Marzo 2009: si avvia il laboratorio naturale di ingegneria marittima NOEL*

Il laboratorio, a partire da marzo 2009, è gestito dall'Università Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento DICEAM (ex Dip. MEC MAT). Direttore e responsabile scientifico del laboratorio è il prof. Felice Arena, Ordinario di Costruzioni Marittime. Supervisore scientifico è, infine, il fondatore del laboratorio e della scuola di ingegneria marittima di Reggio Calabria, prof. Paolo Boccotti.

Il laboratorio è posizionato sul lungomare di Reggio Calabria, all'altezza delle mura greche, ed utilizza un'area demaniale di 1200 m^2 e lo specchio acqueo antistante di 4500 m^2, in *consegna* all'Università di Reggio Calabria per la realizzazione del laboratorio.

La struttura in cemento armato che ospita il laboratorio ha una superficie di 250 m^2 ed ospita:

a) stazioni elettroniche di acquisizione dei dati rilevati dagli strumenti dislocati nel tratto di mare antistante il laboratorio;
b) una sala per seminari e corsi di formazione (per circa 50 persone);
c) una piccola officina per la manutenzione degli strumenti;
d) tre locali operativi.

Il laboratorio può contare su strumentazioni ed utensili messi insieme con i fondi di ricerca e fondi da convenzioni esterne. Tale strumentazione consiste in una batteria di oltre 100 trasduttori per la misura delle pressioni, una batteria di 50 sonde ultrasoniche per il rilievo delle onde, celle di carico, accelerometri, 12 tralicci per il sostegno in mare degli strumenti fino a profondità di 3 m, un portale di supporto in acciaio INOX (fino a 4metri di altezza), cinque stazioni elettroniche con 128 canali per acquisire i dati.

Con la nuova gestione, avviata a marzo del 2009 dal prof. Arena, il laboratorio ha visto il coinvolgimento dei dottorandi di Ingegneria Marittima dell'Università Mediterranea, di titolari di Assegno di Ricerca, di Tesisti e di studenti. Da ottobre 2009, nel laboratorio si svolge direttamente attività didattica per gli studenti iscritti al corso di Ingegneria Civile. Si sono svolte attività seminariali ed incontri con esperti internazionali (il prof. Pol D. Spanos, della Rice University di Houston, USA, il prof. Carlos Guedes Soares, della Technical University di Lisbona, il prof. Franco Einaudi, della NASA Goddard Space Flight Center, USA; il prof. Francesco Fedele,GeorgiaTech, USA, il prof. Sundar, IIT Madras, India, il prof. Murali, IIT Madras, India) e si sono ospitati dottorandi di altre sedi (la dott.ssa Petya Petrova e la dott.ssa Ewa Antao, dottoranda presso la Technical University di Lisbona, a Reggio Calabria rispettivamente per 5 mesi nel 2008 e per tre mesi nell'estate 2009, per svolgere attività di ricerca sotto il coordinamento del prof. Arena; i dottorandi Anand Karur Vaideeswaran e Senthil Kumar Ramasamy dell'IIT Madras, Chennai, India, hanno svolto attività i ricerca presso il NOEL tra il 2014 e il 2015).

Tutte le attività sono aggiornate sul sito web del laboratorio www.noel.unirc.it.

Infine, sono stati organizzati seminari per studenti in Ingegneria della Facoltà, iscritti al secondo e terzo anno.

2.6 Nuove attività sperimentali nel NOEL (2009-2015)

CALCOLO SPETTRO DIREZIONALE IN MARE

Il primo esperimento della nuova gestioneriguardava gli spettri direzionali, ed in particolare la verifica di un nuovo criterio per il calcolo dello spettro direzionale in mare, a partire da due punti di misura delle onde (due sonde a ultrasuoni per la misura dell'elevazione d'onda o due trasduttori per la misura delle fluttuazioni di pressione).

FORZE SU DIGHE A PARETE VERTICALE – EXP I: PROFONDITÀ INTERMEDIA

Il secondo esperimento della primavera 2009 era finalizzato all'analisi delle pressioni delle onde di mare su una parete verticale. La profondità del fondale d era maggiore di 0.15 volte la lunghezza d'onda L_{p0} su alti fondali.

FORZE SU DIGHE A PARETE VERTICALE – EXP II: BASSA PROFONDITÀ

L'esperimento era finalizzato allo studio delle pressioni prodotte dalle onde alte su una parete verticale. Rispetto all'attività della primavera, sono state considerate profondità relative più piccole, in generale minori di $0.15L_{p0}$.

FORZE IDRODINAMICHE SU CILINDRI VERTICALI

L'esperimento era finalizzato allo studio dei criteri per il calcolo delle forze idrodinamiche su cilindri verticali. L'esperimento mirava sia a verificare l'equazione di Morison, sia i coefficienti idrodinamici in presenza di onde di mare, e la loro variabilità in funzione del numero di Keulegan-Carpenter e del numero di Reynolds. La forza era misurata attraverso una batteria di otto trasduttori di pressione, posizionata su una sezione orizzontale del cilindro.

ONDE DI MARE ALTE NEL DOMINIO SPAZIO TEMPO IN CAMPO INDISTURBATO

L'esperimento riguardava la meccanica dei gruppi di onde. La teoria di Quasi Determinismo di Boccotti prevede tra l'altro che le Onde più alte nel corso di una tempesta si aggreghino in gruppi o famiglie che hanno tutte una medesima conformazione e subiscono tutte la stessa trasformazione via via che avanzano.

L'esperimento è stato eseguito con 26 strumenti di misura delle onde, funzionanti contemporaneamente, ed ha portato a quella che senza dubbio è la più spettacolare tra le verifiche della teoria di Boccotti.

Si è trovato che le famiglie di onde molto alte rispetto alla media del mare in cui si formano, registrate anche a giorni di distanza le une dalle altre sono pressoché identiche tra loro.

Il risultato che va veramente al di la delle più ottimistiche aspettative prefigura una svolta radicale nell'ingegneria marittima.

Basti dire che le onde così dette "anomale" in una data tempesta sono pressoché identiche tra loro e si trasformano allo stesso modo via via che avanzano.

FORZE IDRODINAMICHE SU CONDOTTE SOTTOMARINE

L'esperimento riguardava le sollecitazioni che il mare esercita sulle grandi condotte sottomarine.

Il cilindro subacqueo è sostenuto dai piedritti del telaio che si vede affiorare alle estremità nord dello specchio acque del laboratori.

Le onde vengono rilevate dalle due sonde ultrasoniche fissate al traverso del telaio. Le sollecitazioni sul cilindro subacqueo vengono rilevate a mezzo di una batteria di otto trasduttori di pressione.

Si tratta del primo esperimento (primo in assoluto) sulle sollecitazioni delle onde sulle condotte sottomarine, eseguito direttamente in mare con tecniche da laboratorio.

ONDE DI MARE IN RIFLESSIONE NEL DOMINIO SPAZIO TEMPORALE

L'esperimento riguardava lo studio delle onde di mare in riflessione, davanti ad una parete verticale, nel dominio spazio tempo.

Per l'esperimento, si è montata una trave davanti alla diga, sotto il livello medio del mare, sulla quale sono stati alloggiati 26 trasduttori di pressione, per la misura delle onde.

Si è verificato che le onde, anche in un campo non stazionario, obbediscono alla teoria di quasi determinismo, quando si realizzano altezze d'onda molto grandi.

FORZE IMPULSIVE SU DIGHE A PARETE VERTICALE – EXP III: AZIONE DI ONDE FRANGENTI

L'esperimento consisteva nel montaggio di una diga su fondali estremamente bassi, in modo da raggiungere valori di altezza significativa Hs al largo maggiori della profondità al piede della diga!

I dati sono in corso di elaborazione.

Attività in corso:

1. ***FUNZIONAMENTO DI UN CASSONE REWEC3: IDRODINAMICA DEL SISTEMA***

2. ***FUNZIONAMENTO DI UN CASSONE REWEC3: FUNZIONAMENTO DI UNA TURBINA DI WELLS ASSOCIATA AL SISTEMA***

3. ***MODELLO DI UNA STRUTTURA SPAR DI SUPPORTO PER UNA TURBINA EOLICA***

Figura 1. Localizzazione del laboratorio sul lungomare di Reggio Calabria e vista esterna della struttura.

3 Modello in scala ridotta di un cassone Resonant Wave Energy Converter a Geometria Variabile REWEC3-GV per attività sperimentale presso il NOEL

3.1 Descrizione generale dei cassoni REWEC3

Un nuovo cassone per la produzione di energia elettrica dal moto ondoso, denominato REWEC3 (REsonant Wave Energy Converter – realization 3), è stato ideato e brevettato dal Professore Boccotti (2002, Brevetto Italiano N.1332519 e Brevetto Europeo N.EP1518052B1), Ordinario di Costruzioni Marittime presso l'Università Mediterranea. La Wavenergy.it, Spin-Off dell'Università Mediterranea, è licenziataria esclusiva del brevetto.

L'impianto REWEC3, che è possibile incorporare in tradizionali dighe portuali, appartiene alla famiglia dei sistemi a colonna oscillante, OWC (Oscillating Water Column), ma rispetto a tali sistemi tradizionali presenta delle importanti caratteristiche di innovazione che ne migliorano l'efficienza e le prestazioni energetiche.

Un cassone di tipo REWEC3 (REsonant Wave Energy Converter) per la conversione di energia ondosa in energia elettrica è costruttivamente molto simile ad una tradizionale diga portuale a cassoni cellulari, in cui la parte lato mare è opportunamente modificata per consentire lo sfruttamento dell'energia associata al moto ondoso incidente. Uno schema di tale tipo di struttura è riportato in Figura 2. Il cassone modificato è costituito da un condotto verticale (1) interagente con il moto ondoso incidente mediante un'imboccatura superiore. Tale condotto è, poi, collegato ad una camera pneumatica di assorbimento (3) attraverso una luce di fondo (2). La camera di assorbimento è posta in contatto con l'atmosfera mediante un condotto (5) nel quale è alloggiata una turbina self-rectifying (6), quale ad esempio del tipo di Wells. Perciò, la camera di assorbimento contiene massa d'acqua (3) nella parte inferiore e una sacca d'aria (4) nella parte superiore. Per effetto del campo di moto ondoso interagente con la struttura, si generano sull'imboccatura del condotto verticale (1) delle fluttuazioni di pressione, le quali determinano delle oscillazioni all'interno della massa d'acqua contenuta nel condotto e nella camera di assorbimento, corrispondenti alle fasi di cresta e di cavo d'onda. Conseguentemente la sacca d'aria all'interno della camera pneumatica (4) viene alternativamente compressa ed espansa, generando una corrente alterna all'interno del condotto (5) che collega la camera con l'atmosfera, capace di mettere in funzione la turbina self-rectifying (6).

Rispetto ai tradizionali sistemi OWC di conversione di energia ondosa, i REWEC3 sono definiti da un tubo ad U (costituito dal condotto verticale e dalla camera di assorbimento) nella parte anteriore della diga lato mare; pertanto possono essere considerati degli U-OWC.

Sebbene l'introduzione del condotto verticale lato mare non determina una sostanziale modifica strutturale dell'U-OWC rispetto al tradizionale OWC, esso determina delle differenze sostanziali nell'idrodinamica che si instaura all'interno dell'impianto. In particolare, nei REWEC3 le onde non entrano all'interno della struttura ma agiscono da forzante per instaurare il moto di compressione e decompressione della sacca d'aria all'interno dell'impianto. Questa fondamentale differenza ha delle notevoli conseguenze sulle performance del dispositivo. Infatti, come provato da Boccotti (2007), gli U-OWC hanno un periodo proprio maggiore di un analogo OWC. Inoltre, l'ampiezza delle fluttuazioni di pressione all'imboccatura è maggiore negli U-OWC. Conseguentemente, questo particolare tipo di impianto è in grado di assorbire una maggiore

quantità di energia in presenza di stati di mare generati dal vento e di onde di mare lungo. Questo perché un U-OWC, grazie all'introduzione del condotto verticale, può essere progettato al fine di raggiungere la condizione di risonanza naturale per i livelli di agitazione ondosa incidente che convoglino la maggiore quantità di energia durante l'anno.

Gli impianti innovativi REWEC3, rispetto ai classici OWC, risultano perciò essere molto più convenienti sia in termini sia di fattibilità che di performance energetiche.

3.2 Attività sperimentale presso il NOEL

Un'intensa attività di ricerca e di sperimentazione è stata svolta dal gruppo di ricerca dei ricercatori del NOEL dell'Università Mediterranea sugli impianti REWEC3. Un primo esperimento è stato eseguito nel 2005 su un modello in scala ridotta di cassone REWEC3, per lo studio dell'idrodinamica dell'impianto. I risultati hanno dimostrato la validità dei risultati attesi. Nel corso degli ultimi anni si sono avviati e sono ad oggi in corso di svolgimento ulteriori attività sperimentali finalizzate allo studio di una progettazione ottimizzata degli innovativi impianti, sia per quanto concerne gli aspetti idrodinamici sia per quanto attiene alle componenti meccaniche da installare per la produzione dell'energia elettrica. In tale contesto si inquadra l'attività svolta nell'ambito dei progetti di ricerca: i) "Impianto U-OWC e Turbina ad Aria per la Produzione di Energia Elettrica da Onde di mare - POSEIDONE", finanziato dal Ministero dell'Ambiente nell'ambito del Bando per il finanziamento di progetti di ricerca finalizzati ad interventi di efficienza energetica e all'utilizzo delle fonti di energia rinnovabile in aree urbane (GU-SerieV n. 150 del 21/12/2009) - Partners: Università Mediterranea; Università di Roma La Sapienza; Faggiolati Pumps SpA; Wavenergy.it srl.; ii) "Progetto dimostrativo su un modello di cassoni OWC o U-OWC" finanziato a favore di Wavenergy.it s.r.l. con decreto n. 13938 del 8/11/2011, a valere sull'Avviso pubblico per la costituzione e l'ampliamento dei Poli di Innovazione Regionale" POR FESR Calabria 2007/2013 Asse I - Ricerca Scientifica, Innovazione Tecnologica e Società Dell'informazione - Linea d'Intervento 1.1.1.1 e 1.1.2.2 , decreto n. 14225 del 14/10/2010 del Dirigente del Settore 3 del Dip. 11, mediante cui è stato possibile realizzare presso il laboratorio NOEL il modello in scala di una diga in cemento armato sulla cui porzione lato mare è stato alloggiato un cassone di tipo REWEC3 con installata una turbina di tipo Wells. Nello specifico, presso il NOEL si è proceduto alla realizzazione di una diga a parete verticale a T rovescia in cemento armato ubicata alla quota di 2m ed avente un'estensione longitudinale complessiva di 16.10 m (v. Figura 4). Sulla mensola lato mare della diga è ubicata, ed opportunamente solidarizzata, una prima struttura scatolare in acciaio che costituisce la parte 'attiva' dell'impianto REWEC3 (progetto POSEIDONE).

3.3 Attività sperimentale sul cassone REWEC3-GV presso il NOEL

Nel 2014 ENEA ha finanziato il cassone REWEC3-GV, a geometria variabile, con il quale sono state eseguite le attività sperimentali nel 2015, sintetizzate nel presente rapporto.

La struttura in acciaio contiene il condotto verticale, attraverso cui si ha l'interazione con le onde incidenti, e la camera di assorbimento, nella cui parte superiore è presente aria ed è posta in comunicazione con l'atmosfera attraverso tre sfiati.

Il prototipo è costituito da tre camere di assorbimento, per una lunghezza globale di 3.8m, che possono essere messe in comunicazione tra loro asportando i setti interni.

L'affondamento dell'imboccatura è di 0.4m. La larghezza del condotto e della camera sono,

rispettivamente, di 0.5m e 1m. In cima alla camera di assorbimento centrale è alloggiato un tubo di sfiato ad asse orizzontale. Sui coperchi delle due camere di assorbimento laterali sono posizionate due valvole a farfalla (una per camera).
La Figura 5 riporta una foto del cassone in acciaio posizionato in mare. Nelle Figure dalla 6 alla 11 sono riportati elementi costruttivi e di dettaglio del cassone. In particolare, nelle Figure 11 sono evidenziati gli sfiati posizionati sulla copertura superiore dei cassoni che sono stati attivati durante alcune fasi di parzializzazione delle camere interne.

Il cassone REWEC3-GV è stato opportunamente strumentato con misuratori di pressione e di livello per consentire l'acquisizione di tutte le grandezze necessarie ad analizzare l'idrodinamica dell'impianto e l'energia delle onde incidenti.

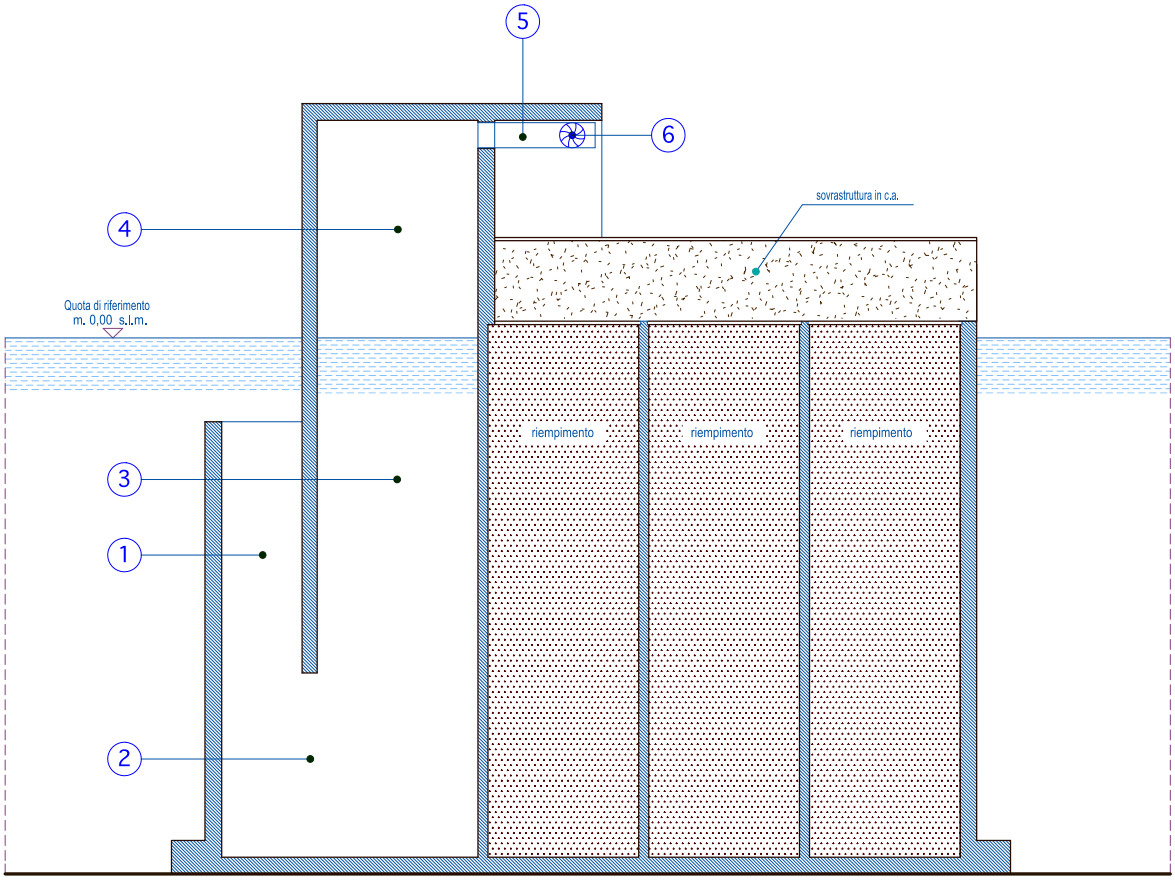


Figura 2 Schema costruttivo di un cassone in c.a. con sistema REWEC3 a celle indipendenti per la conversione di energia ondosa e la produzione di energia elettrica.

Figura 3. Il cassone REWEC3-GV dopo l'installazione presso il NOEL.

Figura 4. Diga in cemento armato, presso il NOEL di Reggio Calabria, con i due cassoni REWEC3. Sulla sinistra è visibile ilREWEC3-GV.

Figura 5. Particolare del cassone REWEC3-GV.

Figura 6. Particolare del cassone REWEC3-GV: cassette per connessionedegli strumenti.

Figura 7. Sonda a ultrasuoni, per le misure di livello, montata sulla camera di assorbimentoo del assone REWEC3-GV

Figura 8a. Trasduttori di pressione montati nella camera di assorbimento del REWEC3-GV.

Figura 8b. Trasduttori di pressione montati nella camera di assorbimento del REWEC3-GV.

Figura 9. Trasduttore di pressione nell'imbocco del condotto verticale del REWEC3-GV.

Figura 10. Passerella per l'accesso al cassone e coperchio del condotto verticale impiegato durante il posizionamento del cassone REWEC3-GV.

Figura 11a. REWEC3-GV con i coperchi e le valvole a farfalla; lo sfiato è relativo alla camera centrale.

Figura 11b. REWEC3-GV: particolare della valvola a farfalla nella camera NORD.

Figura 11c. REWEC3-GV: particolare della valvola a farfalla nella camera SUD.

Figura 11d. REWEC3-GV: particolare della valvola a farfalla.

3.4 Strumenti di misura utilizzati durante l'attività sperimentale

Ai fini di una corretta caratterizzazione delle performance dinamiche del REWEC3 si sono utilizzati strumenti per la misurazione delle caratteristiche idrodinamiche del device e per la caratterizzazione delle onde incidenti. In particolare, il campo di onde è stato misurato attraverso una coppia di trasduttori di pressione e di ultrasuoni sufficientemente distanti da non risentire dell'influenza del REWEC3, ma anche sufficientemente vicini da essere esposti allo stesso stato di mare incidente. Il cassone è stato equipaggiato con trasduttori di pressione posti nell'imboccatura, nella colonna d'acqua oscillante e lungo la parte interna del cassone. In aggiunta, si è installato una sonda ultrasonica in cima alla cella per la misurazione della superficie libera del cassone. Nel loro complesso, essi permettono di caratterizzare la sollecitazione del sistema e la sua risposta. A tal riguardo, si osservi che le pressioni nella colonna d'acqua permettono di stimare indirettamente la quota della superficie libera del cassone.

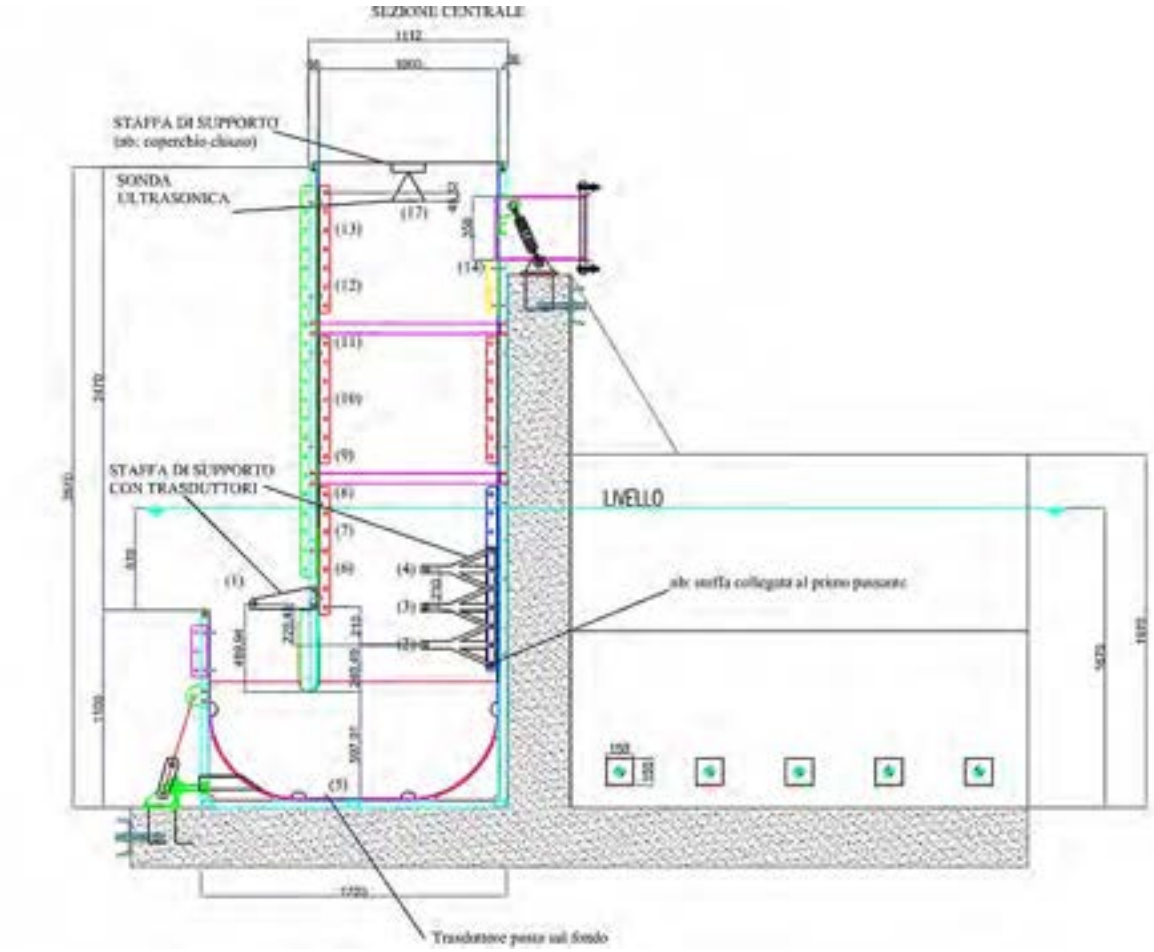


Figura 4. Posizionamento trasduttori di pressione.

3.5 Analisi dei dati

3.4.1 Analisi di dettaglio del record n° 77

Questa sezione illustra la procedura seguita per analizzare il singolo record di uno stato di mare. L'analisi è distinta in due fasi distinte: descrizione del campo di moto incidente; descrizione della risposta dell'impianto U-OWC. La prima fase permette di stimare le caratteristiche salienti del campo di moto

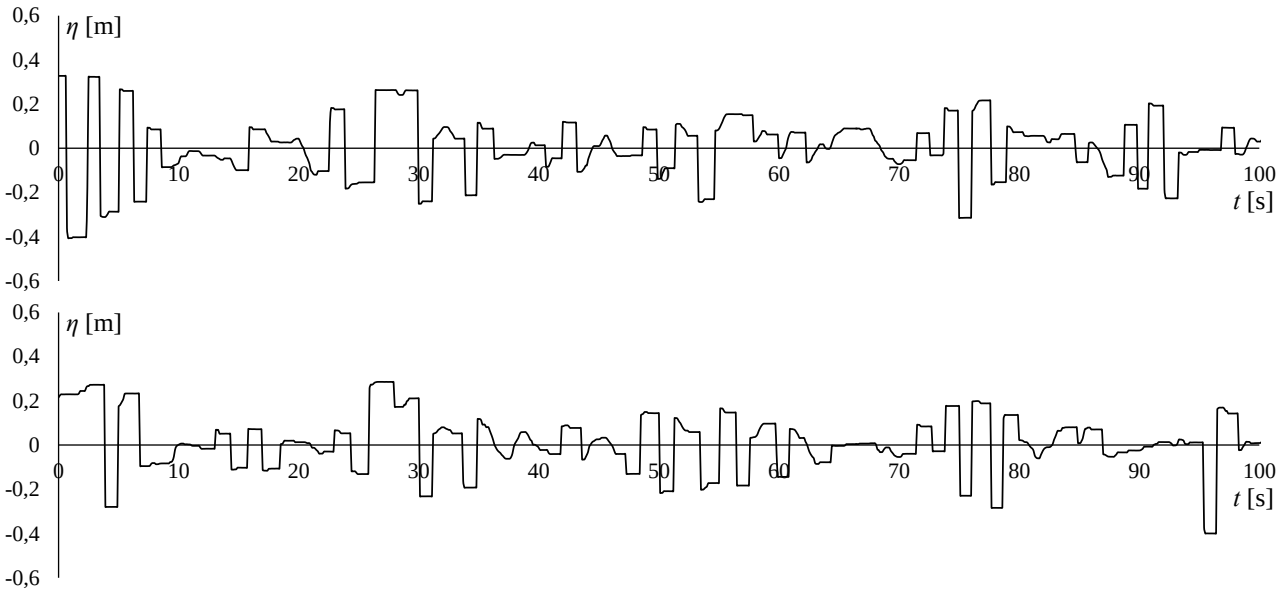
propagato da largo verso riva e permette di inquadrare le caratteristiche più importanti in termini di periodo caratteristico delle onde, energia media per unità di superficie e distribuzione dell'energia delle onde nel dominio delle frequenze. La seconda fase permette di valutare la risposta dinamica dell'impianto e di giudicare le performance dell'impianto in termini di capacità di assorbimento.
La registrazione analizzata in dettaglio è la n°77. Essa è stata scelta in quanto è tra le più severe dell'intero database formato a valle delle campagne di misura.

Fase 1: campo di moto incidente

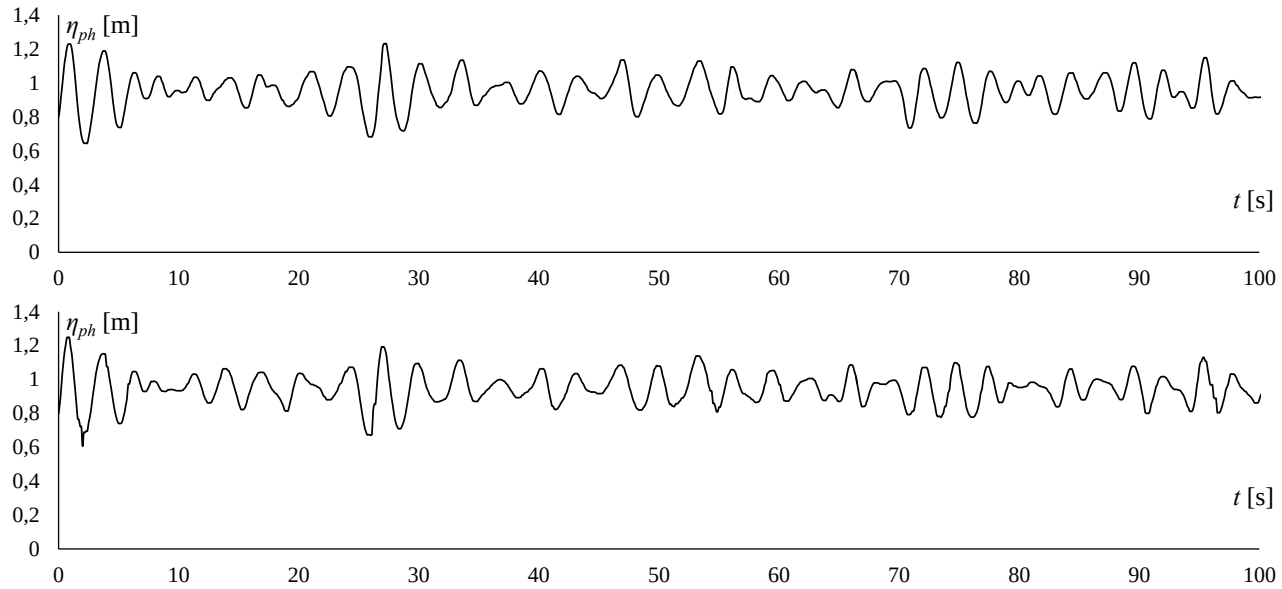
I record di campo indisturbato sono acquisiti tramite due sonde ultrasoniche e due trasduttori di pressione posti lontano dalla strutture, dove non risente delle influenze dovute a modifiche del campo di moto.
Prima di elaborare le misure, è effettuata una fase di pre-processing dei dati in cui sono filtrati rumori in alta frequenza dei segnali ed eliminati eventuali spikes dovuti a locali alterazioni del segnale. Tale fase è condotta direttamente in ambiente Matlab®.
Di seguito, sono rappresentate le storie temporali relative alla registrazione 77. È evidente che la qualità del segnale fornito dalla sonda ultrasonica è marcatamente inferiore a quella del trasduttore di pressione. A tal riguardo, si sottolinea che ai fini delle valutazioni prestazionali si è preferito utilizzare i dati da trasduttore proprio in virtù della loro maggiore affidabilità.
I parametri descrittivi fondamentali sono:

Altezza significativa del moto ondoso: H_s = 0,51 m
Periodo di picco: T_p = 3,10 s
Periodo medio: T_m = 3,72 s
Direzione media di propagazione: ϑ_m = -0,30°
Parametro di strettezza dello spettro: ψ^* = 0,7

Storia temporale dell'elevazione registrata, rispettivamente, dallo strumento a Nord e a Sud

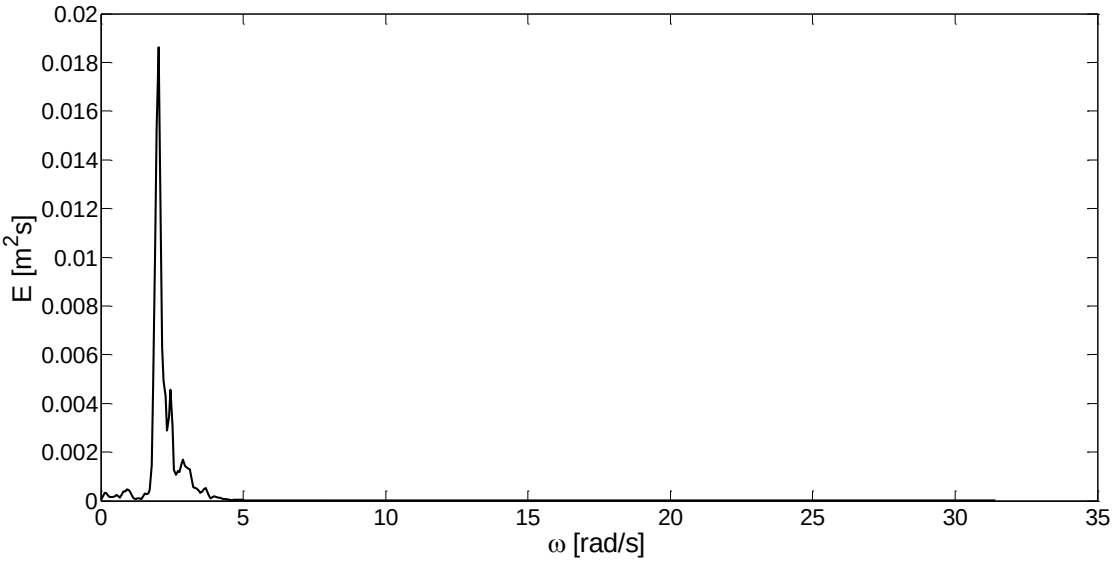


Storia temporale della fluttuazione di pressione registrata, rispettivamente, dallo strumento a Nord e a Sud

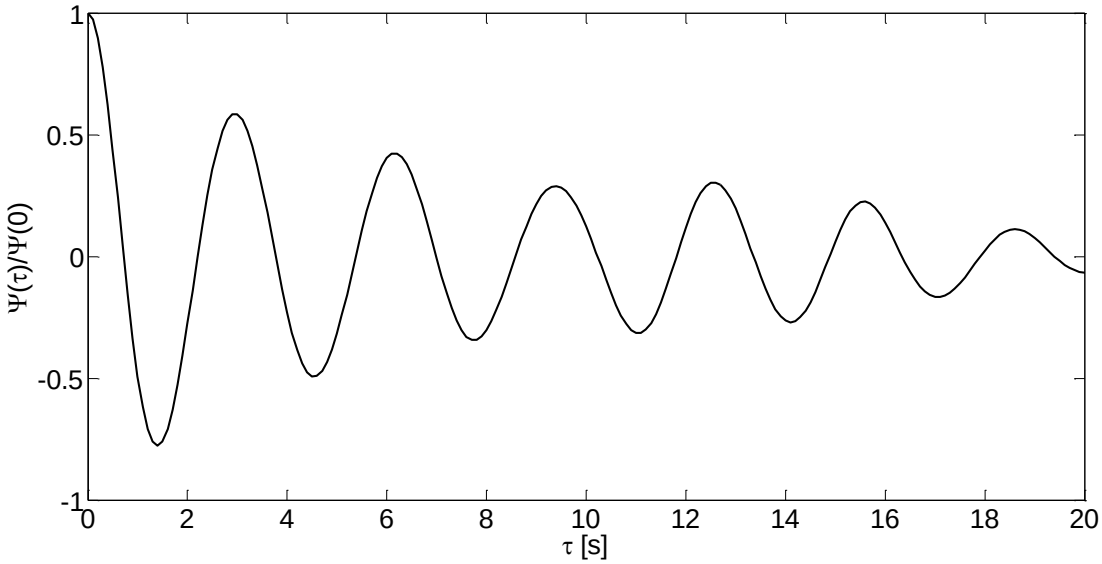


Accanto a tali parametri, si rappresentano le distribuzione dell'energia delle onde nel dominio delle frequenze. In particolare, lo spettro di frequenza del carico di pressione è riportato nella figura seguente. Questa particolare distribuzione è rappresentativa di uno stato di mare generato da onde pure di vento. Infatti, è dotato di un singolo picco dello spettro e di una rapida fase di decadimento in alta frequenza. Accanto a tale rappresentazione, si stima la funzione di autocovarianza dello spettro. Essa è utilizzata per fornire stime quantitative circa la natura degli stati di mare in esame. In particolare, permette di discriminare con parametri oggettivi stati di mare generati dal vento da swells. Inoltre, esso permette di valutare quanto uno stato di mare sia ben rappresentativo di una data forma spettrale. A tal fine, è utilizzato il già citato parametro di strettezza dello spettro, calcolato come il rapporto, in valore assoluto, tra il minimo ed il massimo della funzione di autocovarianza. Nel caso in esame, essendo tale parametro pari a 0.7, si evince che lo stato di mare possiede uno spettro di frequenza ben rappresentato da uno spettro JONSWAP medio.

Spettro di frequenza del carico di pressione.



Funzione di autocovarianza fluttuazione di pressione



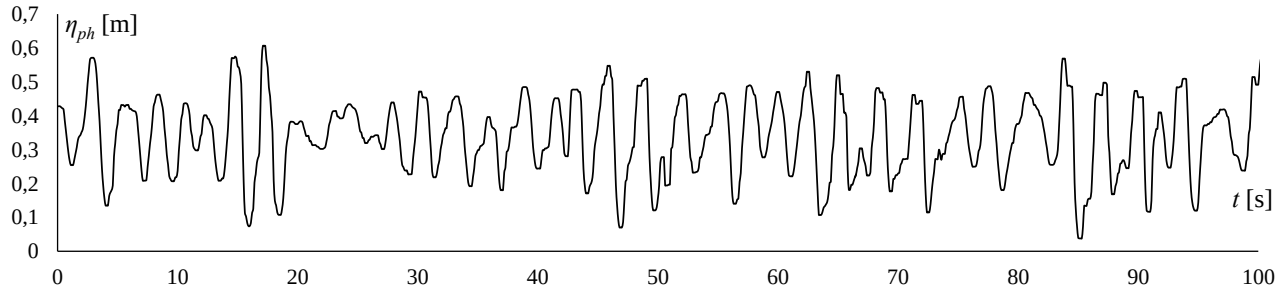
Fase 2: registrazioni degli strumenti installati sul REWEC3

Il cassone REWEC3 è stato equipaggiato con trasduttori di pressione. Tali strumenti sono stati posizionati in modo tale da fornire informazioni circa le capacità di assorbimento dell'impianto e la condizioni di risonanza dello stesso con le onde incidenti. Di seguito si riportano le storie temporali dei carichi di pressione misurati in corrispondenza dell'imboccatura e in tre punti distinti della colonna d'acqua oscillante. Queste quantità permettono di descrivere la dinamica della colonna d'acqua e di stimare la potenza media assorbita dall'impianto. Inoltre, i tre trasduttori sono impiegati per la misura indiretta della oscillazione della superficie libera della colonna d'acqua.

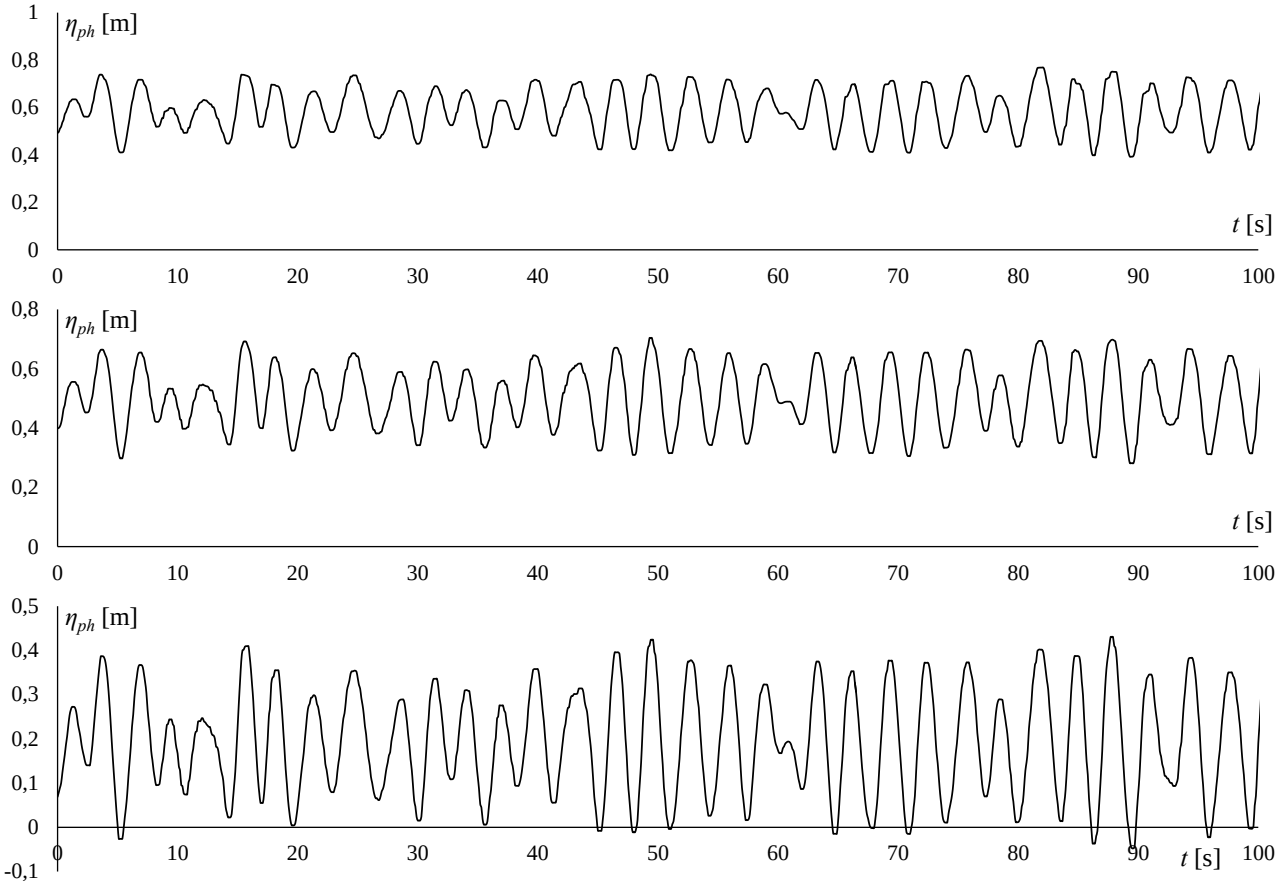
Successivamente, si riportano misurazioni al fondo del cassone e nella camera pneumatica. La prima registrazione è utilizzata per la valutazione prestazionale del modello numerico proposto nell'ambito del progetto. La seconda quantità entra in gioco nella descrizione globale dell'impianto. In questo contesto, è

interessante osservare la maggiore rumorosità del segnale. Tale rumorosità è legata alla complessità dei fenomeni che si verificano all'interno della camera d'aria. Infatti, vortici e flussi in entrata/uscita condizionano non solo l'entità della misura, ma anche la qualità della stessa. Tuttavia, tale rumorosità non inficia le valutazioni energetiche poiché essa viene mediata per mezzo di numerose misure fornite da altri strumenti all'interno dell'impianto.

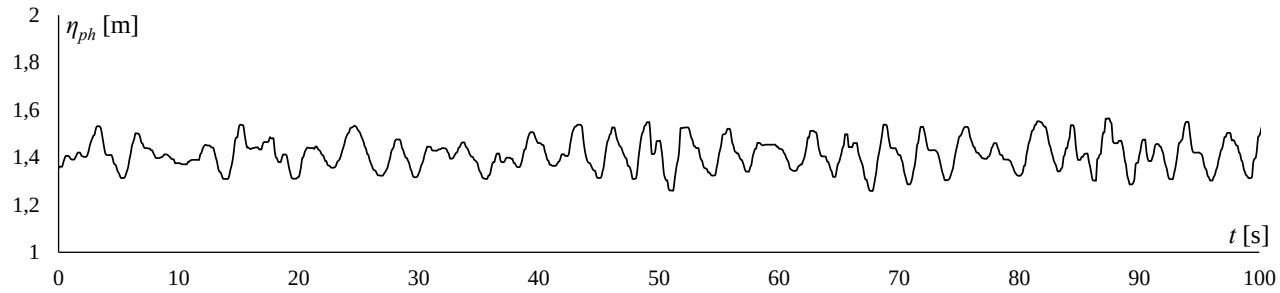
Storia temporale della fluttuazione di pressione all'imboccatura



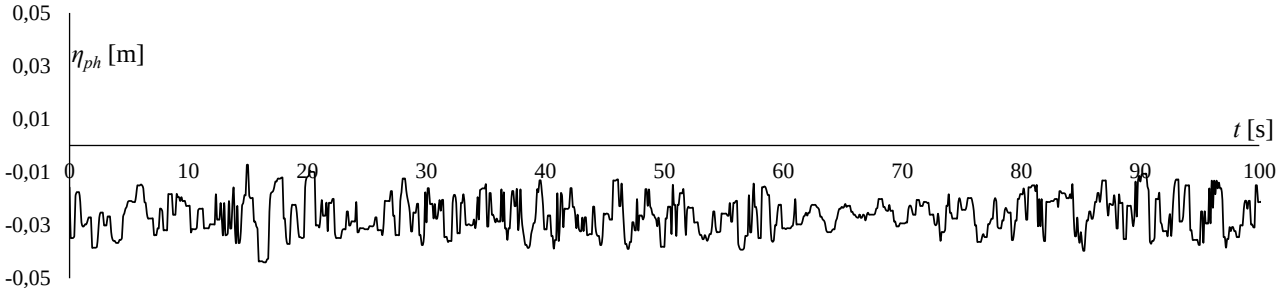
Storia temporale della fluttuazione di pressione nella colonna d'acqua oscillante



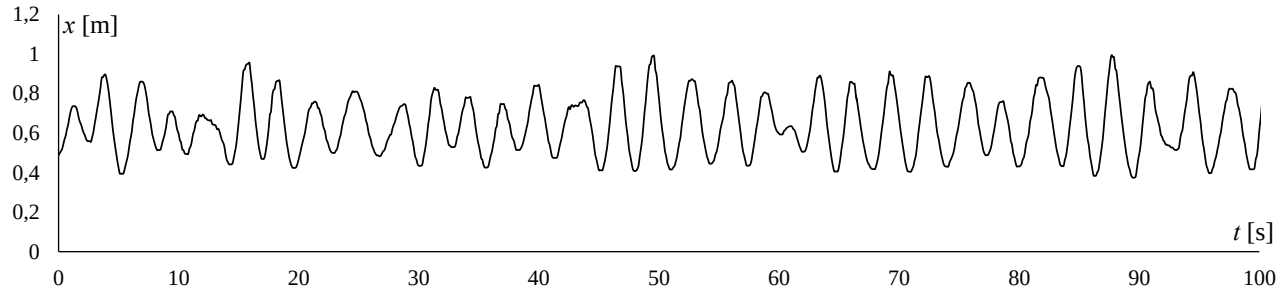
Storia temporale del carico al fondo del REWEC3



Storia temporale del carico della camera pneumatica



Elevazione della superficie libera della colonna oscillante misurata rispetto al trasduttore (2).



Coefficiente di assorbimento C_a = 46%.

3.4.2 *Sintesi dei dati registrati*

Di seguito si riporta una panoramica delle elaborazioni dei dati registrati presso il NOEL. La procedura di elaborazione è stata condotta secondo le linee illustrate precedentemente. Pertanto, si riportano in forma schematica i dati sintetici e successivamente i record significativi. Nella rappresentazione dei record, la seguente notazione è adottata:

η_{nord} = elevazione della superficie libera rispetto al livello di medio mare registrata dall'ultrasuono posto nel palo nord

η_{sud} = elevazione della superficie libera rispetto al livello di medio mare registrata dall'ultrasuono posto nel palo nord

$\eta_{ph\ nord}$ = carico di pressione registrato dal trasduttore nel palo nord

$\eta_{ph\ sud}$ = carico di pressione registrato dal trasduttore nel palo sud

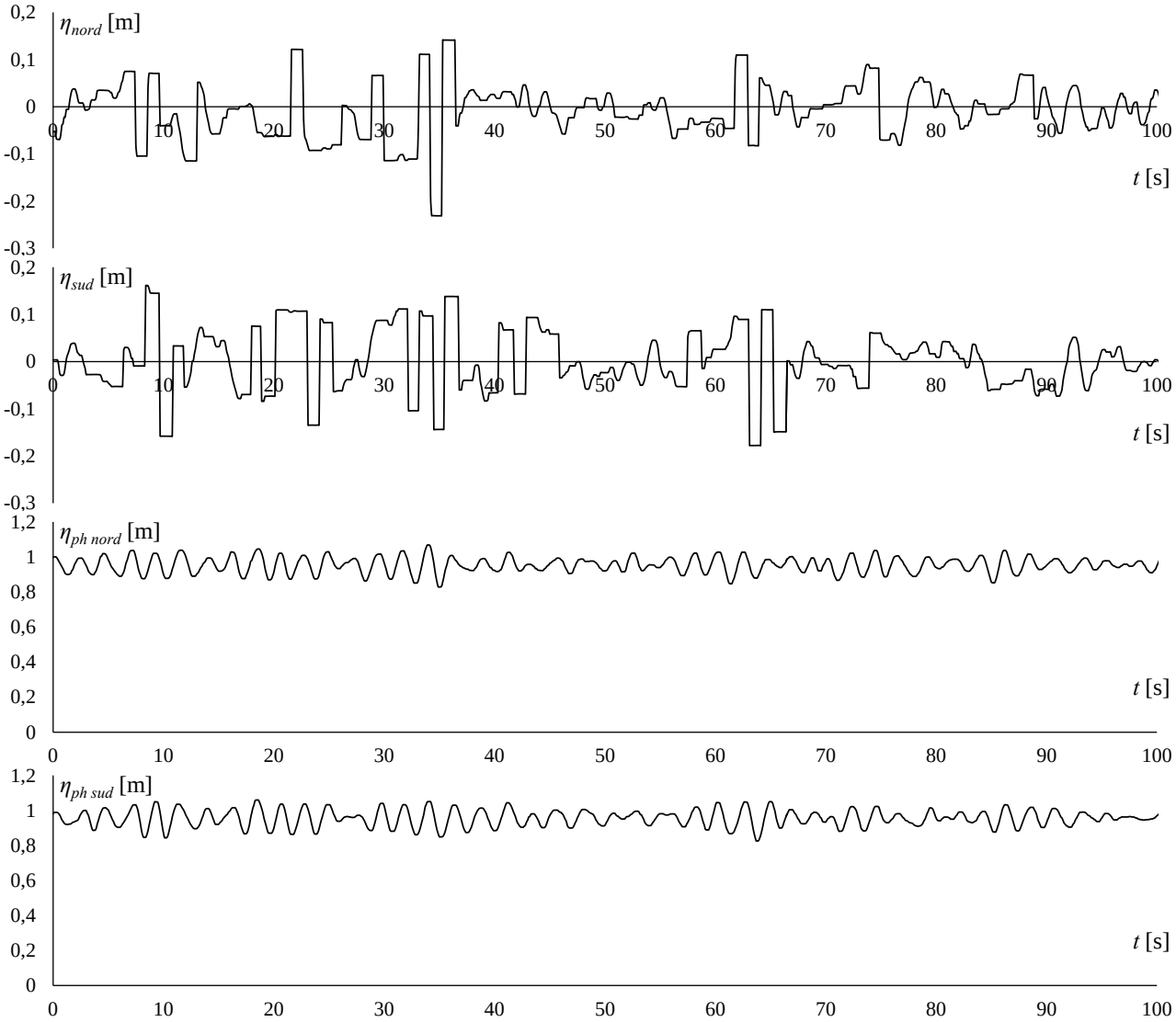
$\eta_{ph\ 1}$ = carico di pressione registrato dal trasduttore nell'imboccatura

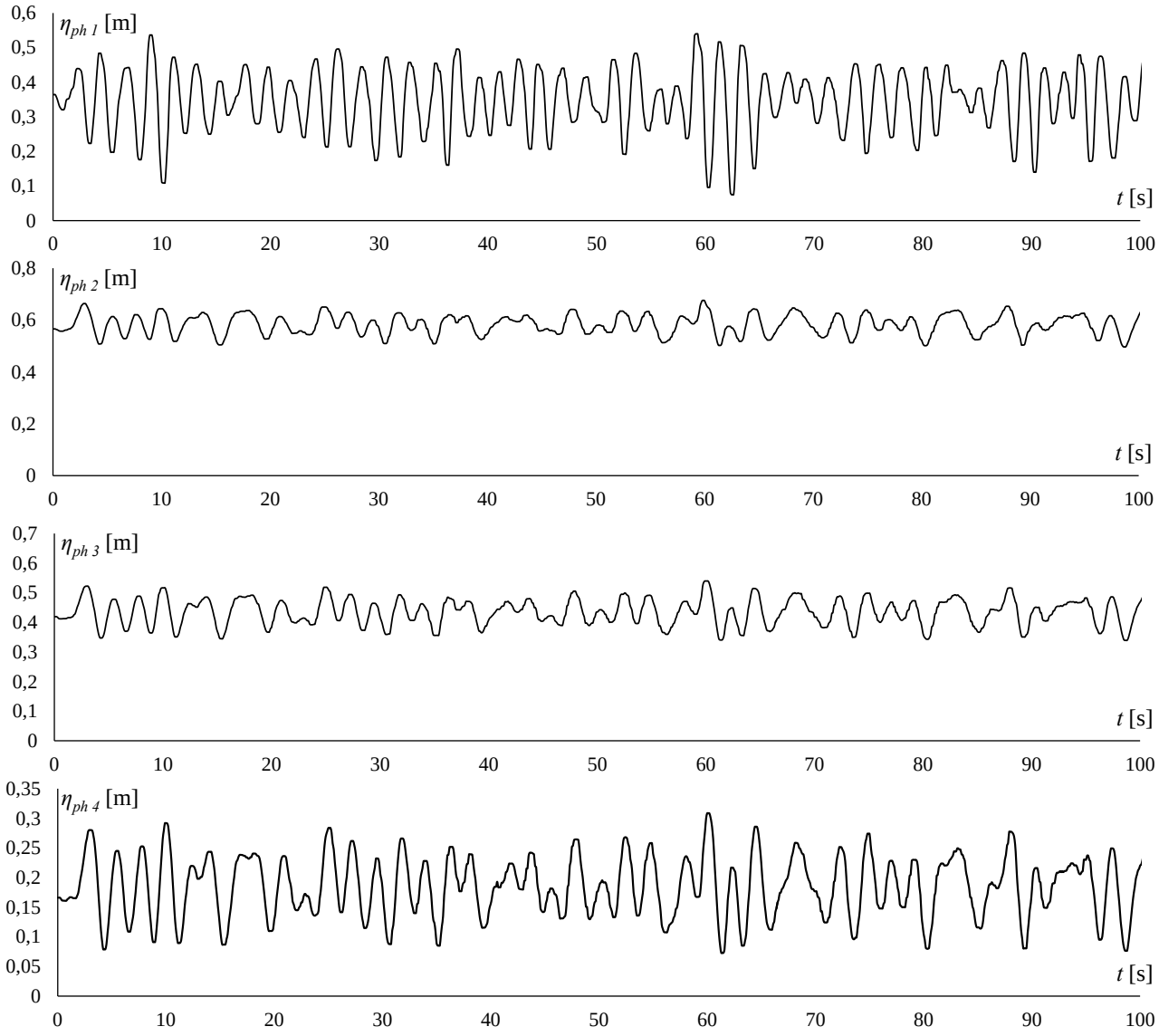
$\eta_{ph\ 2}$ = carico di pressione registrato dal trasduttore (2)

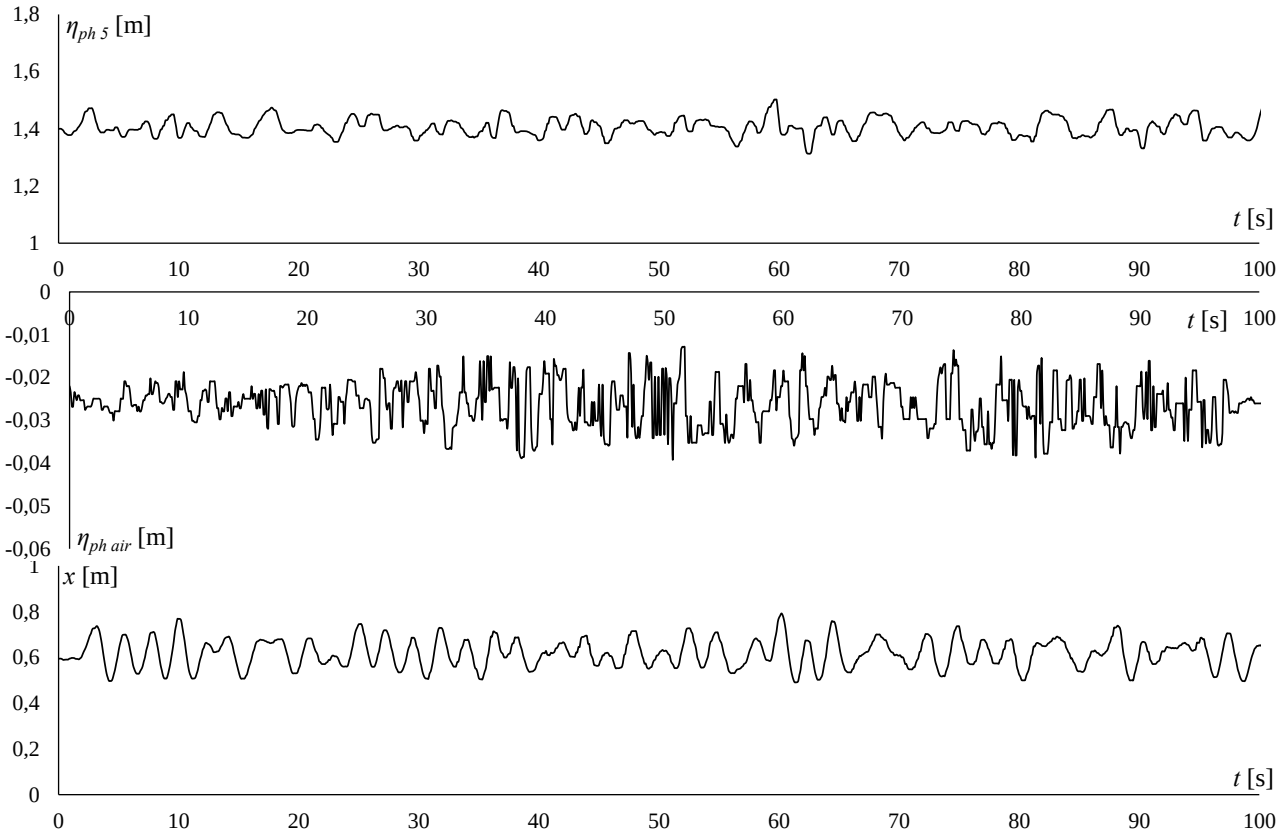
$\eta_{ph\ 3}$ = carico di pressione registrato dal trasduttore (3)

$\eta_{ph\ 4}$ = carico di pressione registrato dal trasduttore (4)
$\eta_{ph\ 5}$ = carico di pressione registrato dal trasduttore (5)
$\eta_{ph\ air}$ = *carico di pressione registrato dal trasduttore (14) posto nella camera pneumatica*
x = quota istantanea della superficie libera della colonna d'acqua misurata rispetto alla quota dello strumento (2).
Come evidenziato nella descrizione del progetto, la modularità del cassone è stata impiegata per testare camere di differente larghezza. Pertanto, si riportano di seguito record relativi a tutte le configurazioni testate. In particolare, i record 16, 44, 91 si riferiscono alla configurazione con cella singola; i record 878, 708, 836 sono relativi alla configurazione con cella doppia; infine, i record 905, 922, 925 sono relativi alla configurazione con tutte le celle comunicanti.

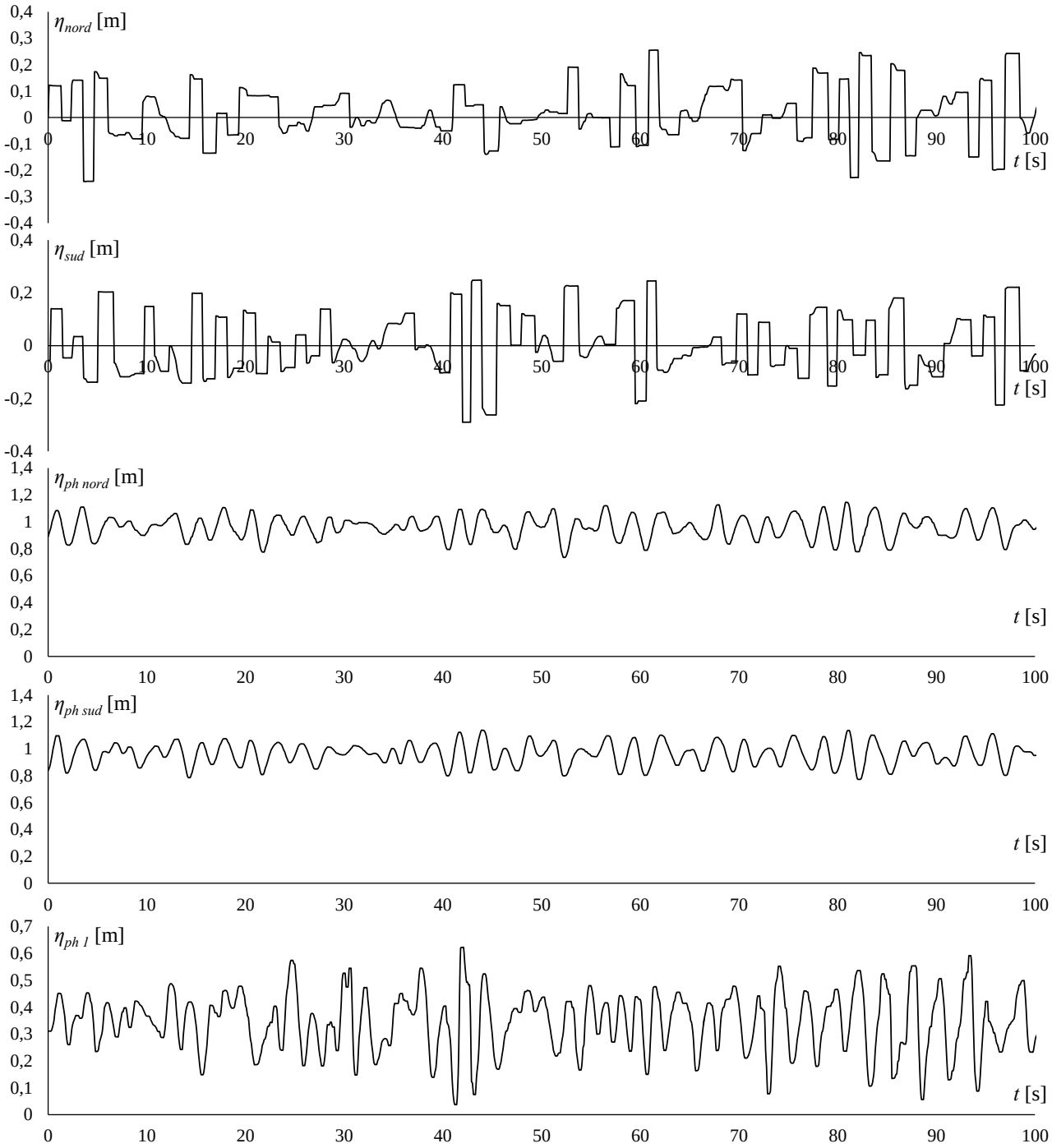
Record n° 16
Altezza significativa = 0.21725 m
Periodo di picco = 8.5333 s
Periodo medio = 3.8229 s
Direzione media di propagazione = -11.1581 °
Parametro di strettezza dello spettro = 0.75825

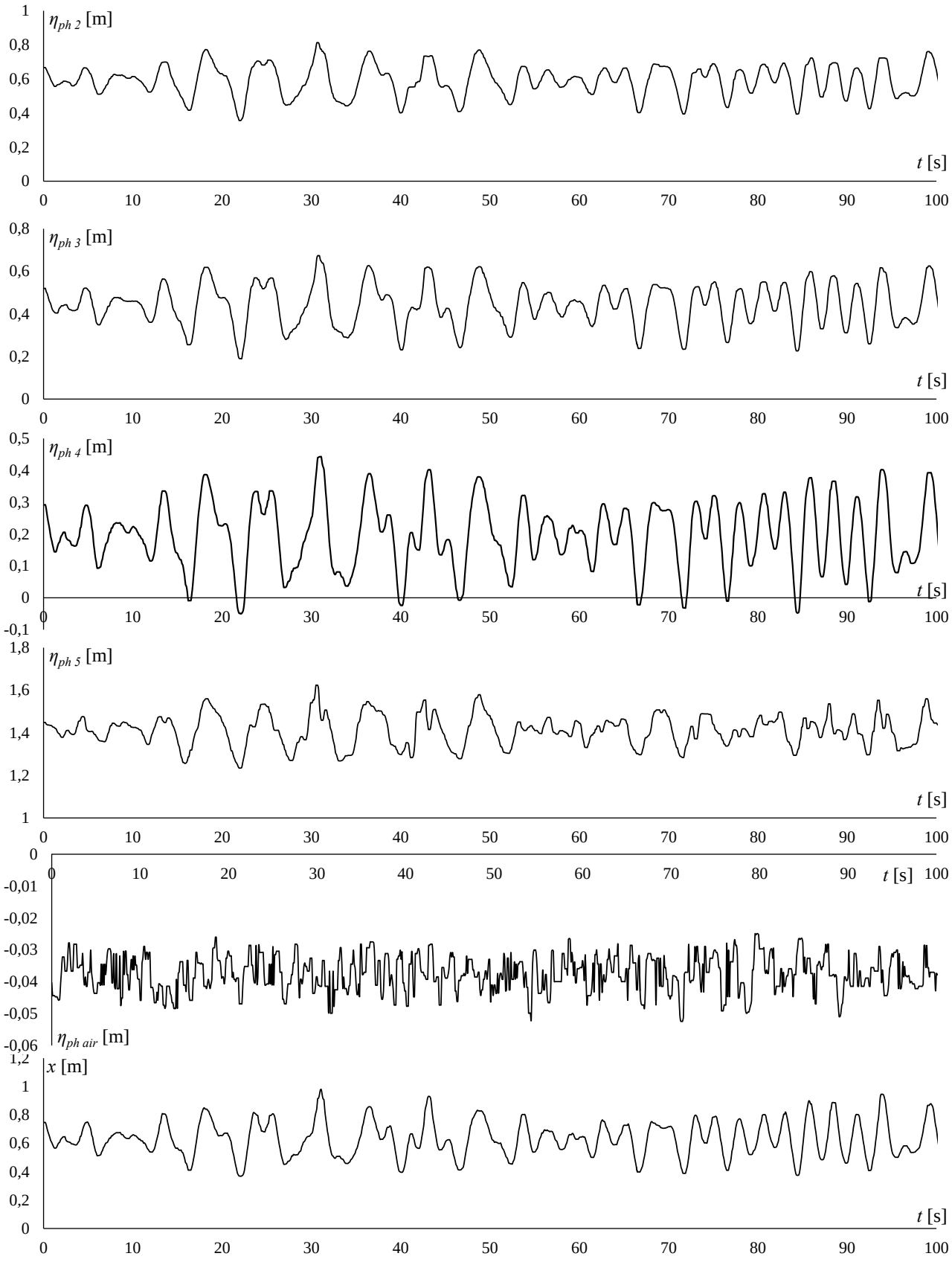



$\eta_{ph\ 1}$ [m]
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
t [s]
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
$\eta_{ph\ 2}$ [m]
0,8
0,6
0,4
0,2
0
t [s]
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
$\eta_{ph\ 3}$ [m]
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
t [s]
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
$\eta_{ph\ 4}$ [m]
0,35
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
t [s]
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

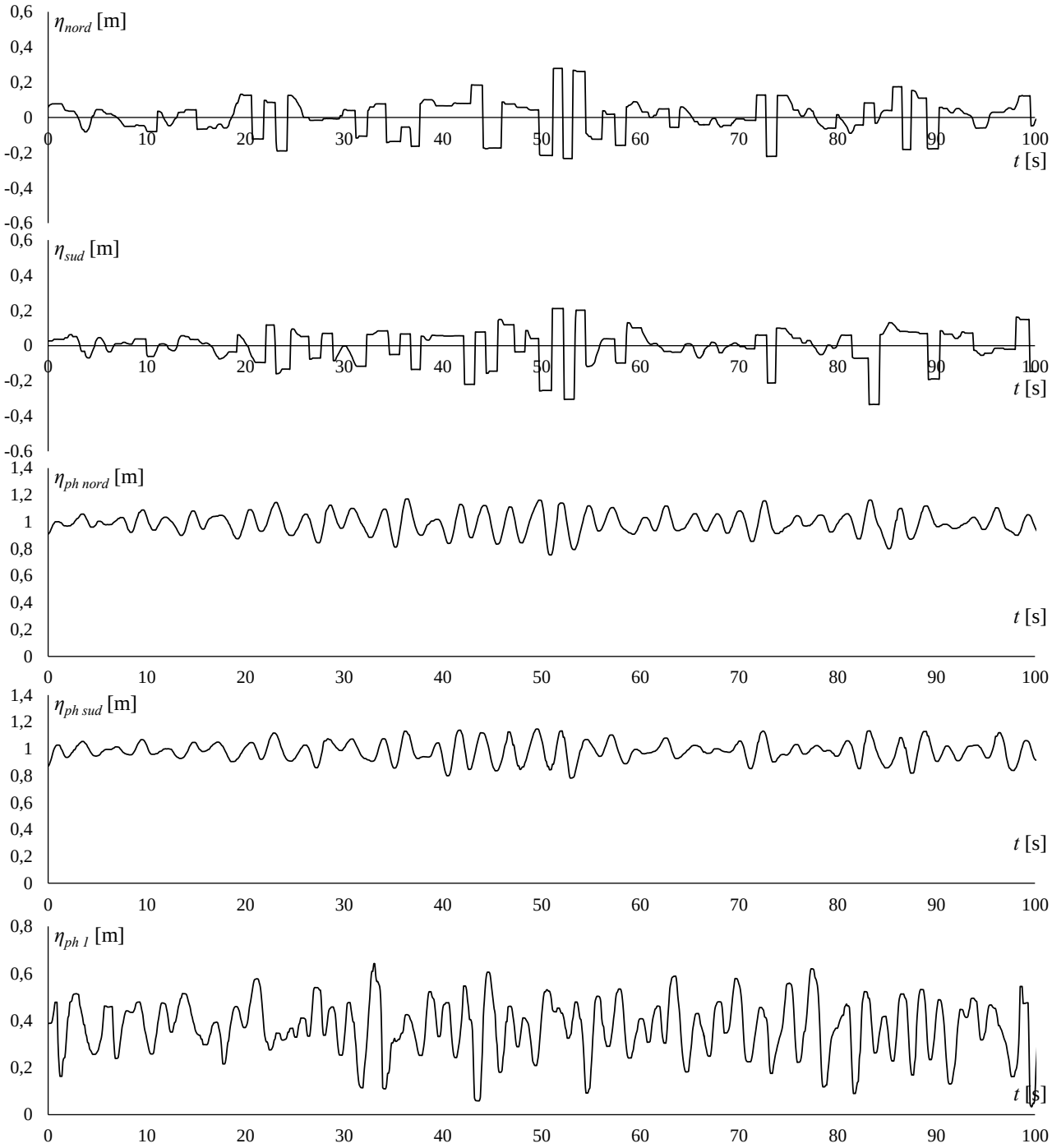

1,8
1,6
1,4
1,2
1
$\eta_{ph\ 5}$ [m]
t [s]
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
0
-0,01
-0,02
-0,03
-0,04
-0,05
-0,06
$\eta_{ph\ air}$ [m]
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
x [m]
t [s]
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

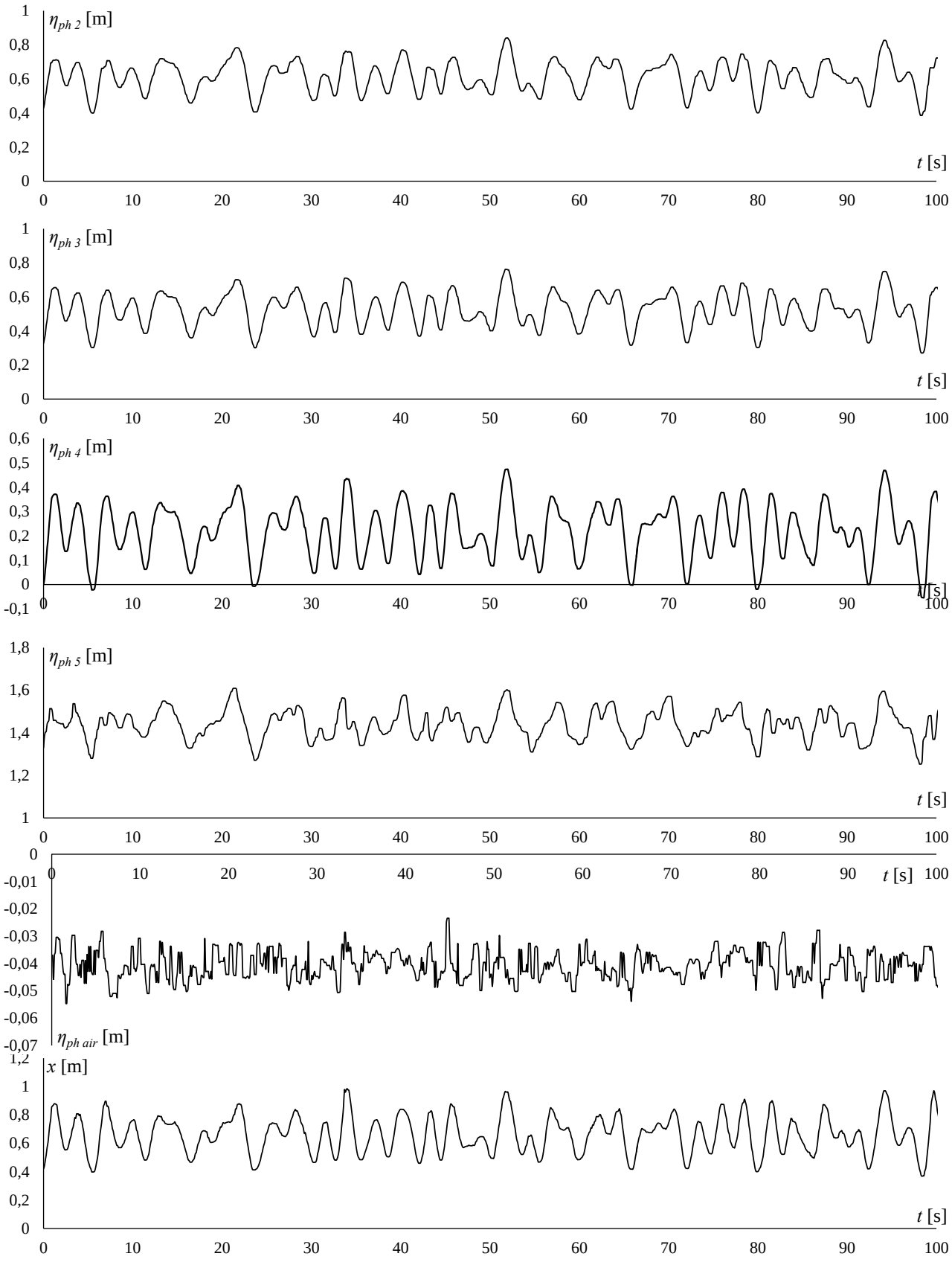
Record n°44
Altezza significativa = 0.3735 m
Periodo di picco = 2.7676 s
Periodo medio = 4.1257 s
Direzione media di propagazione = -0.84329 °
Parametro di strettezza dello spettro = 0.61524



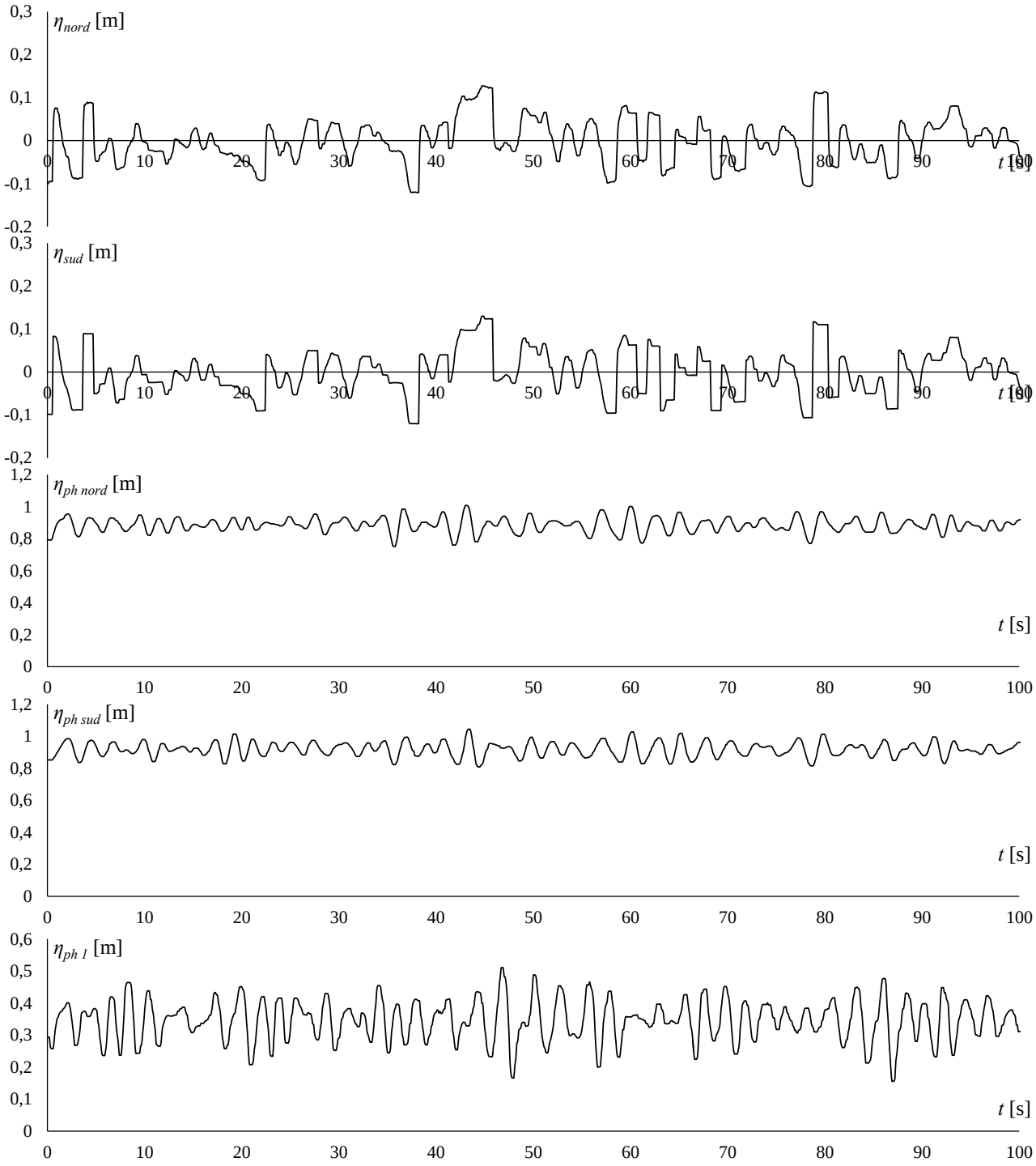

$\eta_{ph\ 2}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 3}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 4}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 5}$ [m]
t [s]
t [s]
$\eta_{ph\ air}$ [m]
x [m]
t [s]

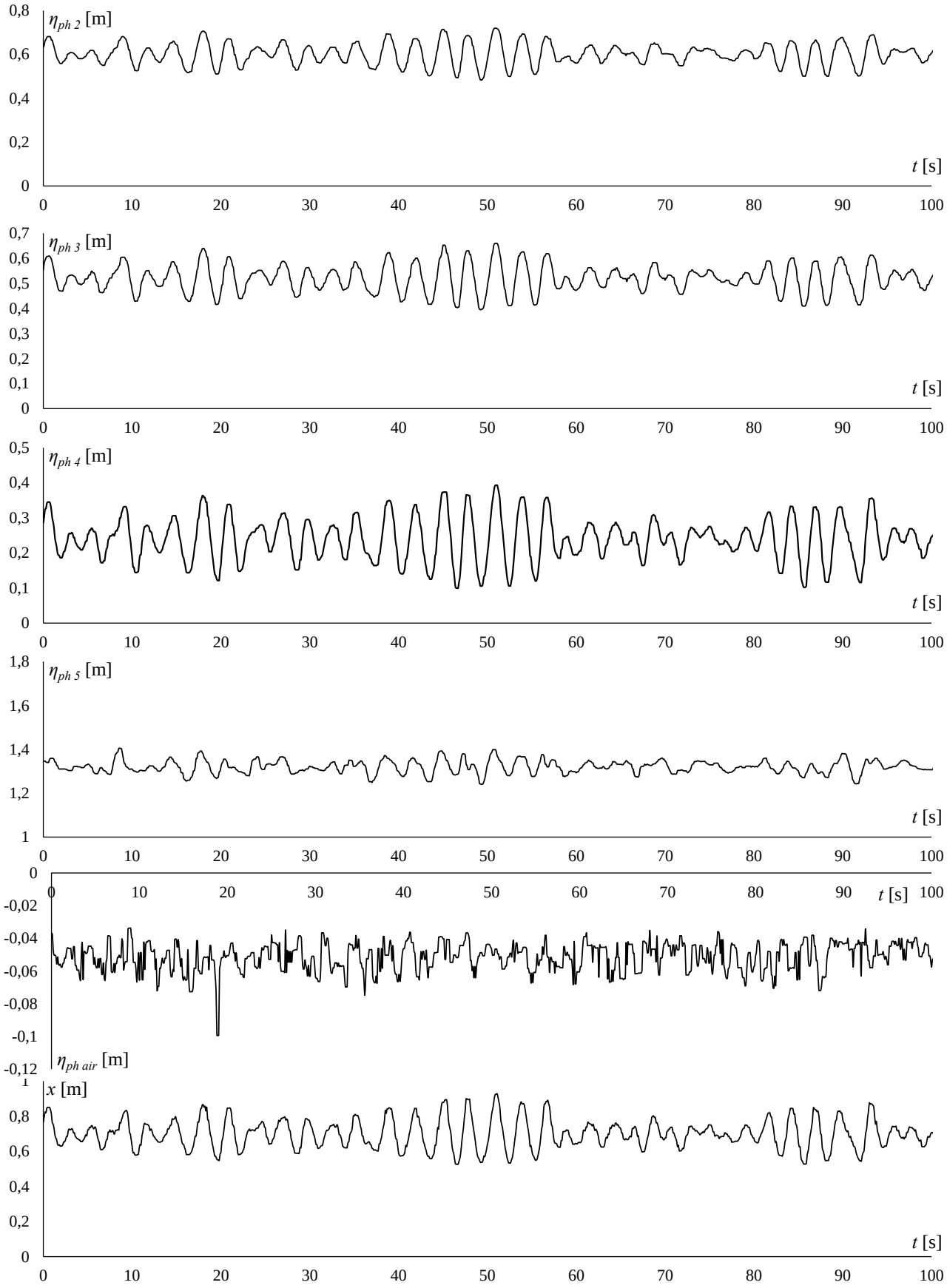
Record n°91
Altezza significativa = 0.50339 m
Periodo di picco = 2.8444 s
Periodo medio = 3.8419 s
Direzione media di propagazione = -0.65826 °
Parametro di strettezza dello spettro = 0.61799



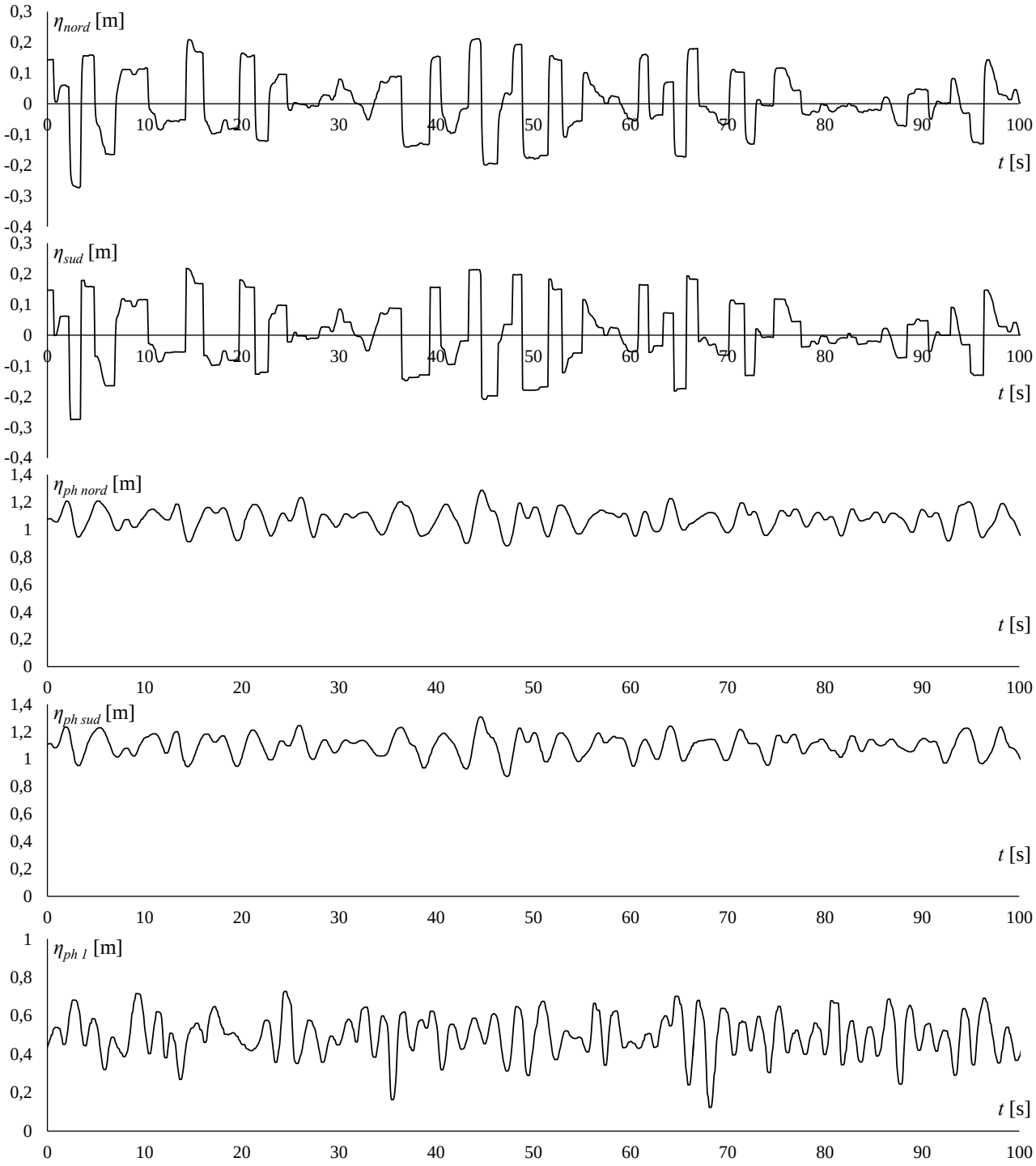

$\eta_{ph\ 2}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 3}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 4}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 5}$ [m]
t [s]
t [s]
$\eta_{ph\ air}$ [m]
x [m]
t [s]

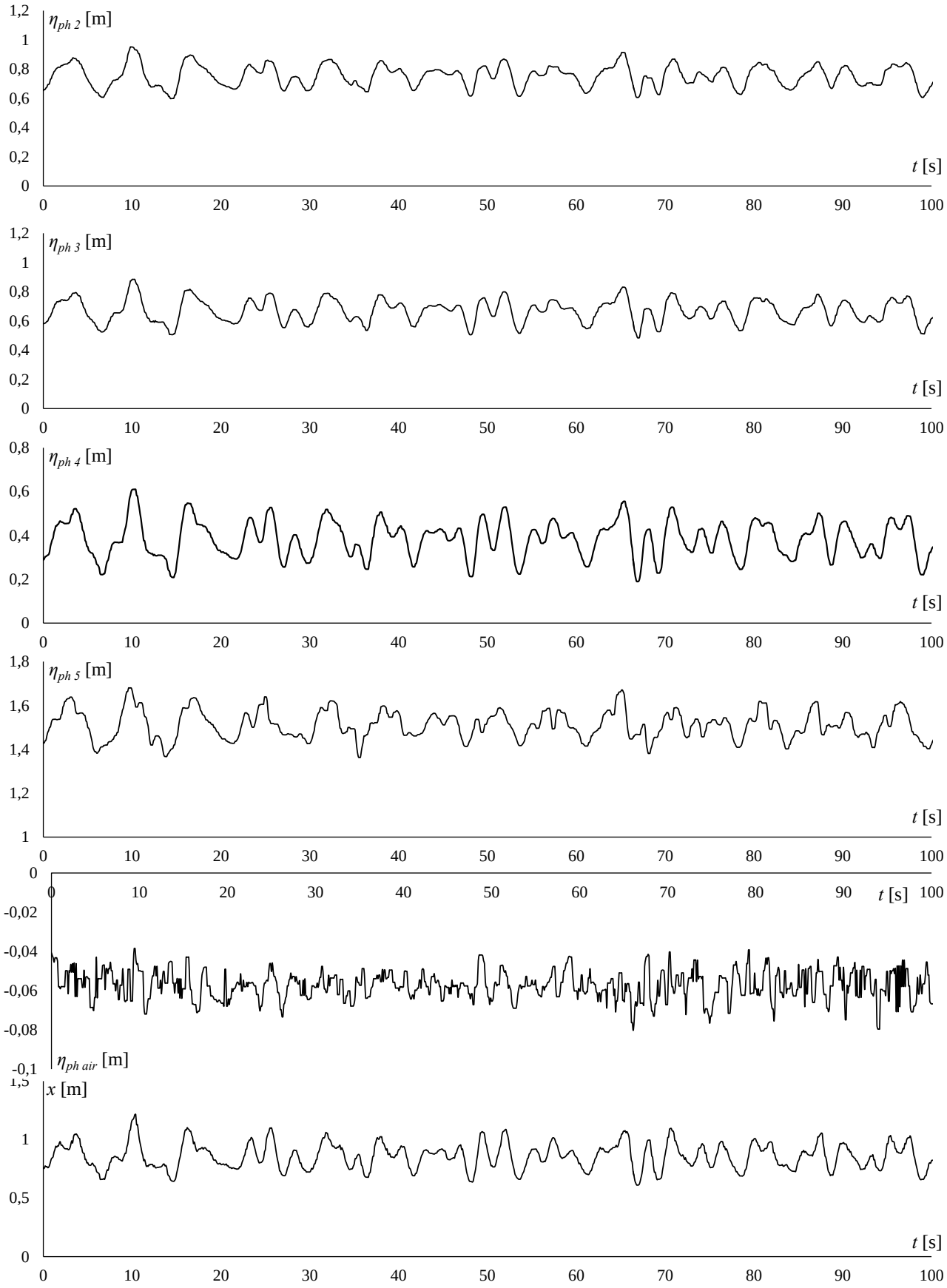
Record n°878
Altezza significativa = 0.20962 m
Periodo di picco = 2.9257 s
Periodo medio = 3.18 s
Direzione media di propagazione = 6.4841 °
Parametro di strettezza dello spettro = 0.69087



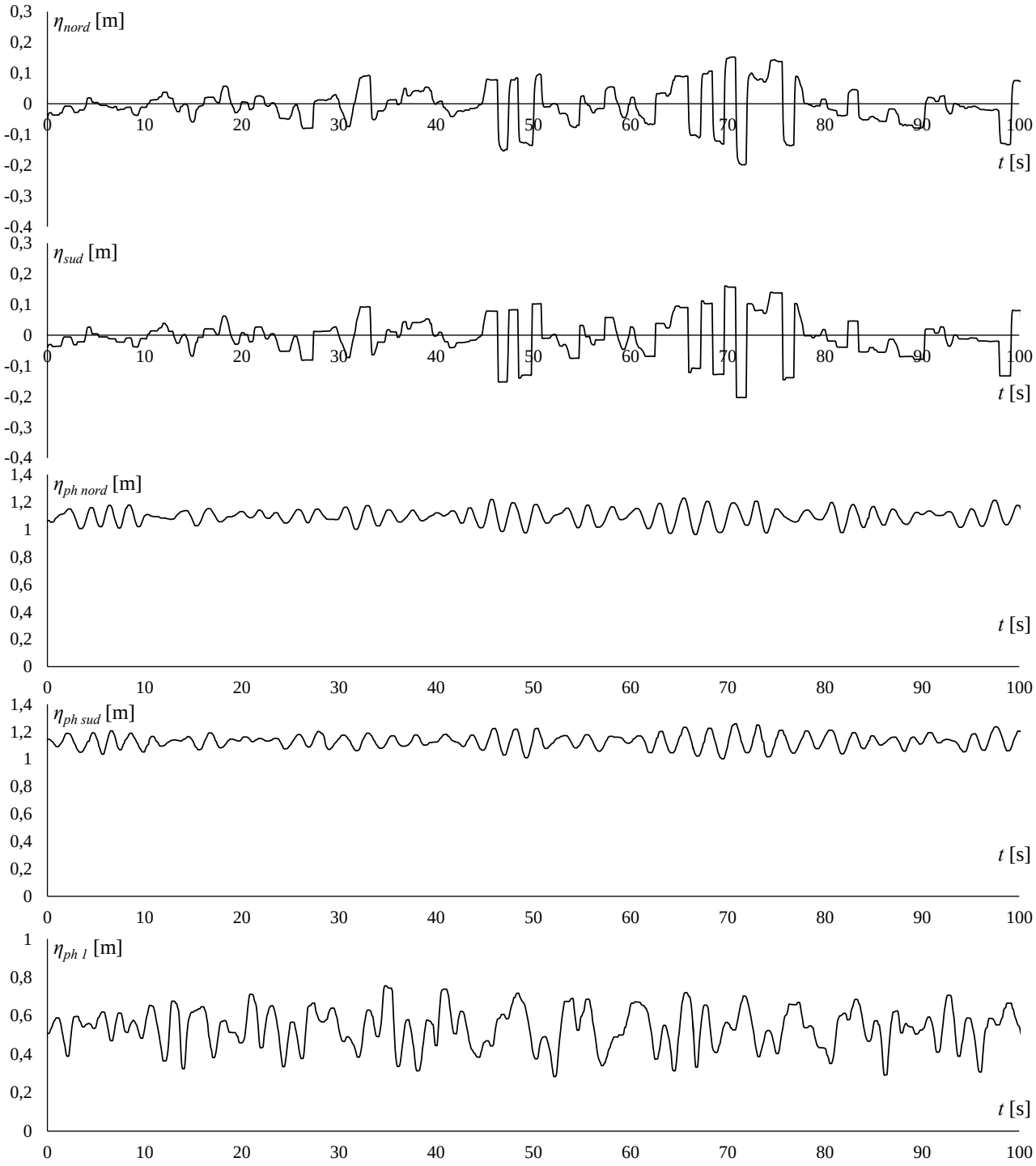

$\eta_{ph\ 2}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 3}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 4}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 5}$ [m]
t [s]
t [s]
$\eta_{ph\ air}$ [m]
x [m]
t [s]

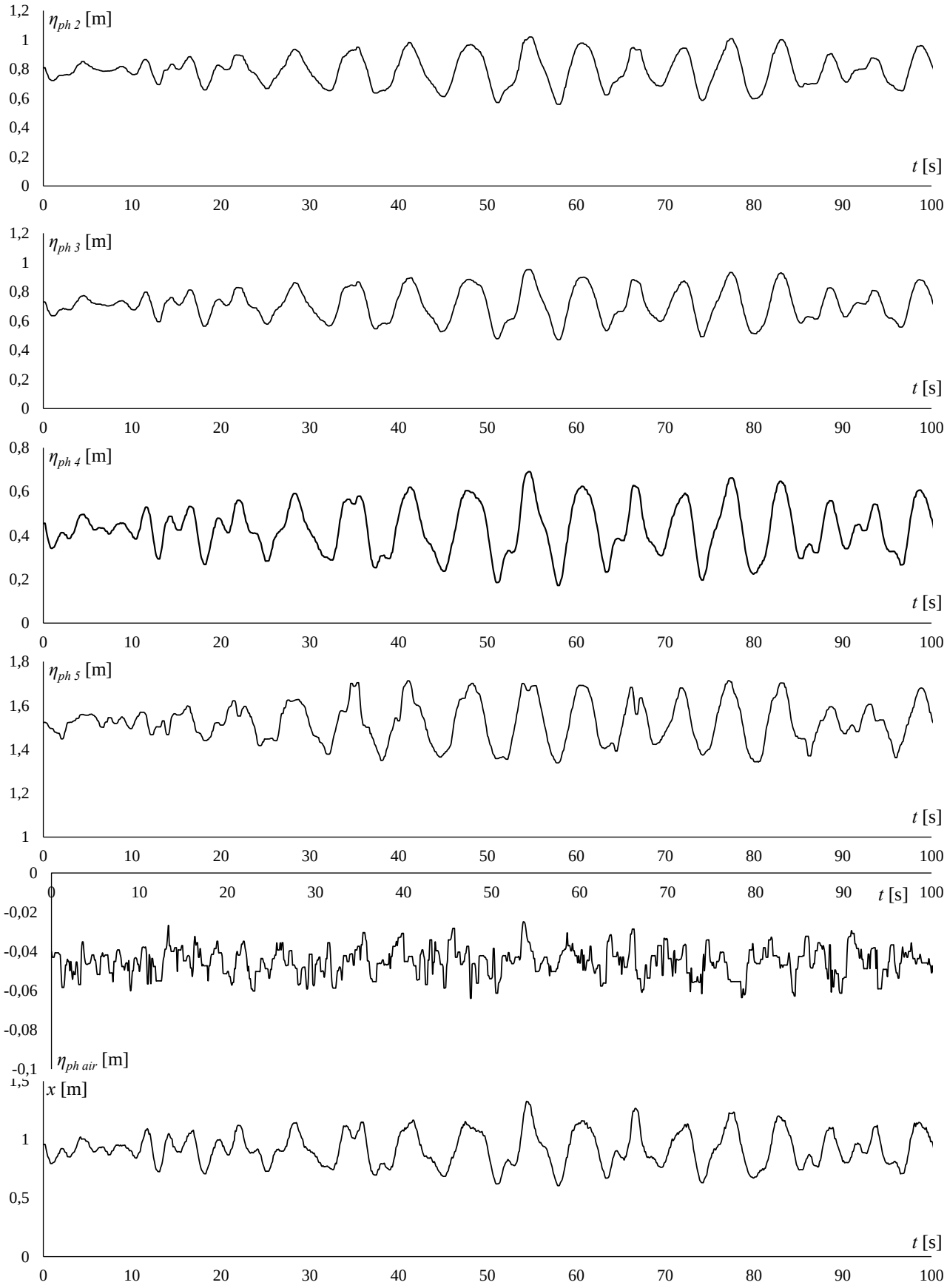
Record n°708
Altezza significativa = 0.3145 m
Periodo di picco = 3.9385 s
Periodo medio = 4.1738 s
Direzione media di propagazione = 7.4331 °
Parametro di strettezza dello spettro = 0.51054



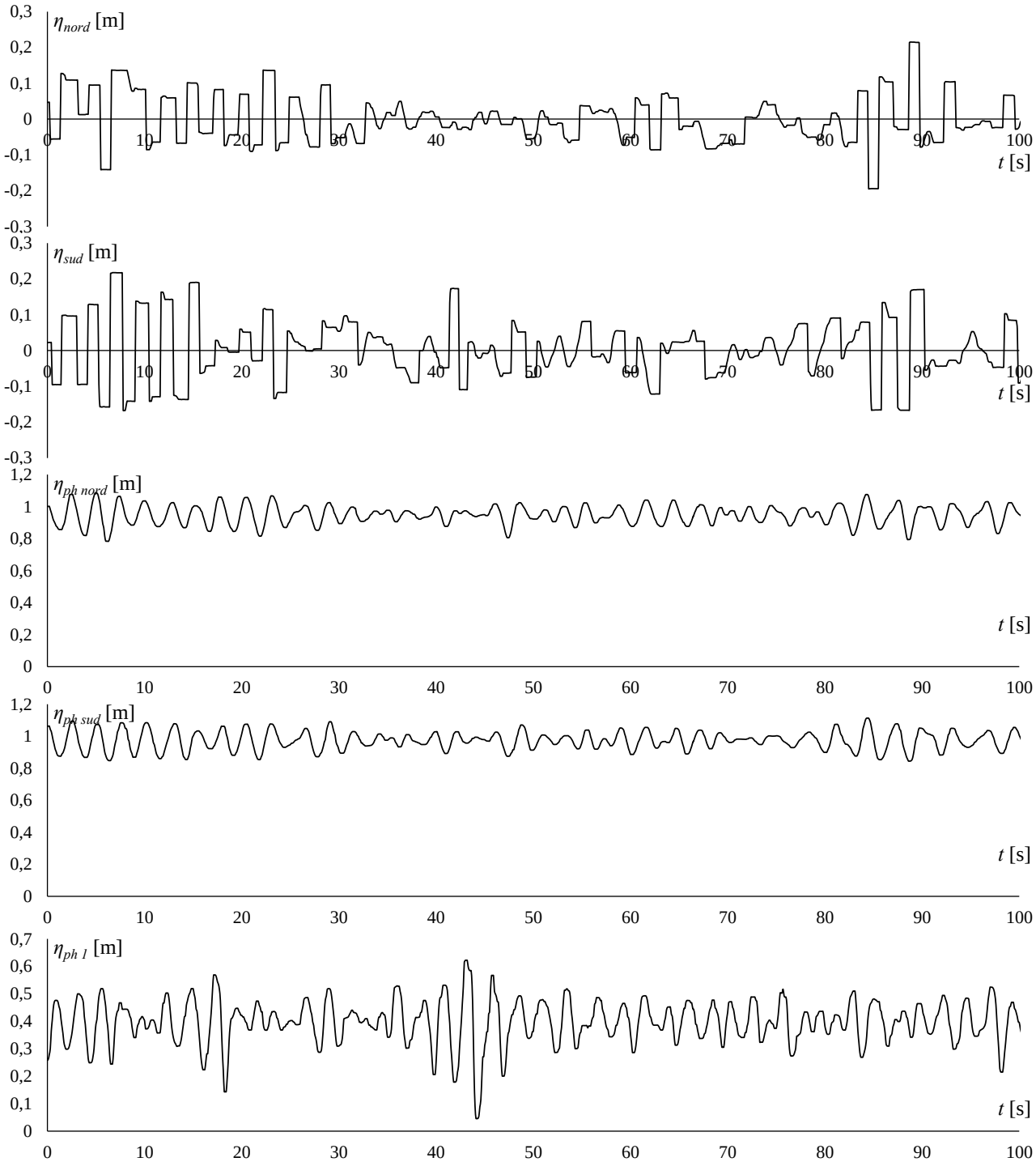

$\eta_{ph\ 2}$ [m]
$\eta_{ph\ 3}$ [m]
$\eta_{ph\ 4}$ [m]
$\eta_{ph\ 5}$ [m]
$\eta_{ph\ air}$ [m]
x [m]
t [s]

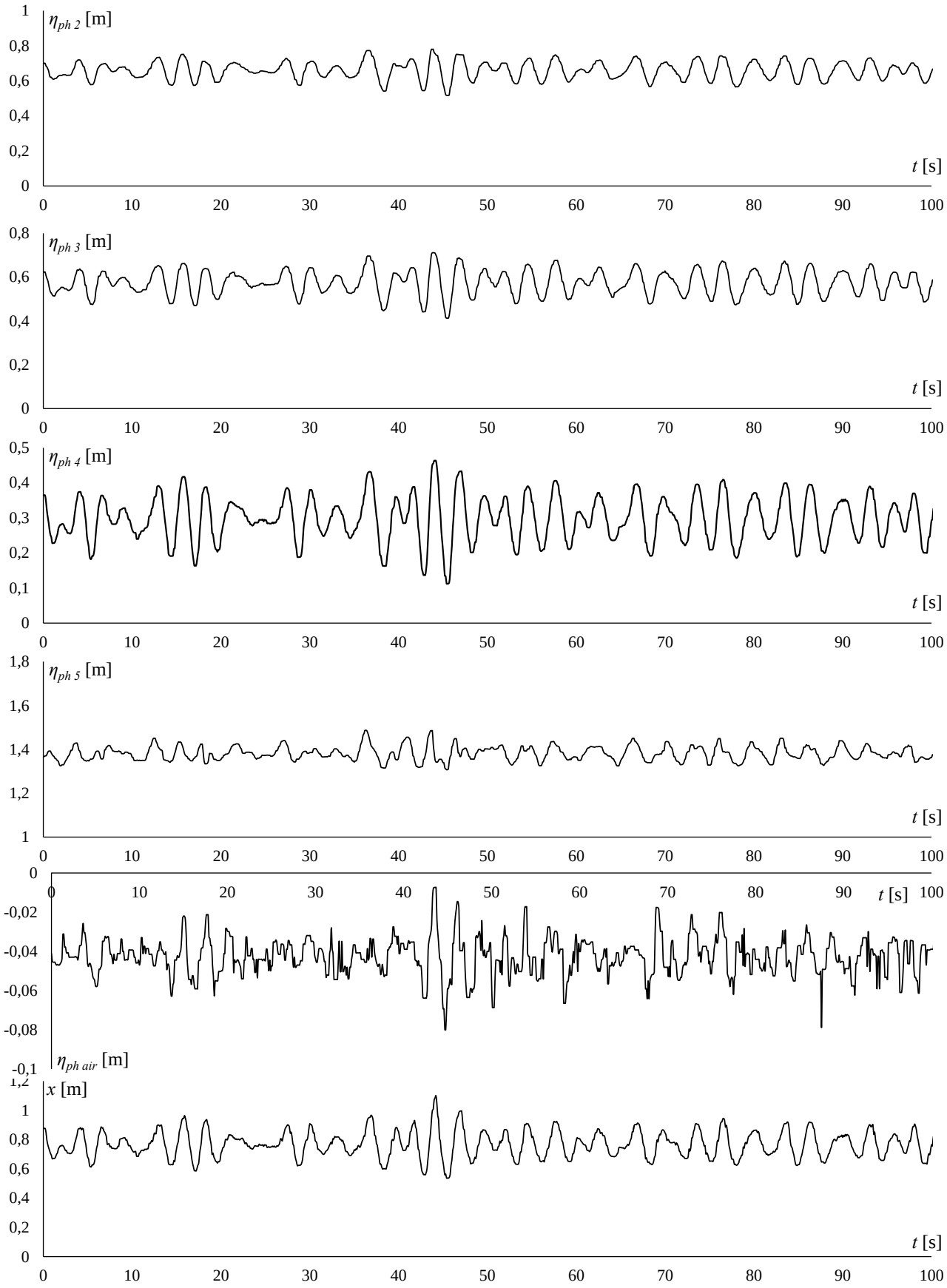
Record n°836
Altezza significativa = 0.31291 m
Periodo di picco = 6.0235 s
Periodo medio = 3.9732 s
Direzione media di propagazione = 6.853 °
Parametro di strettezza dello spettro = 0.46944



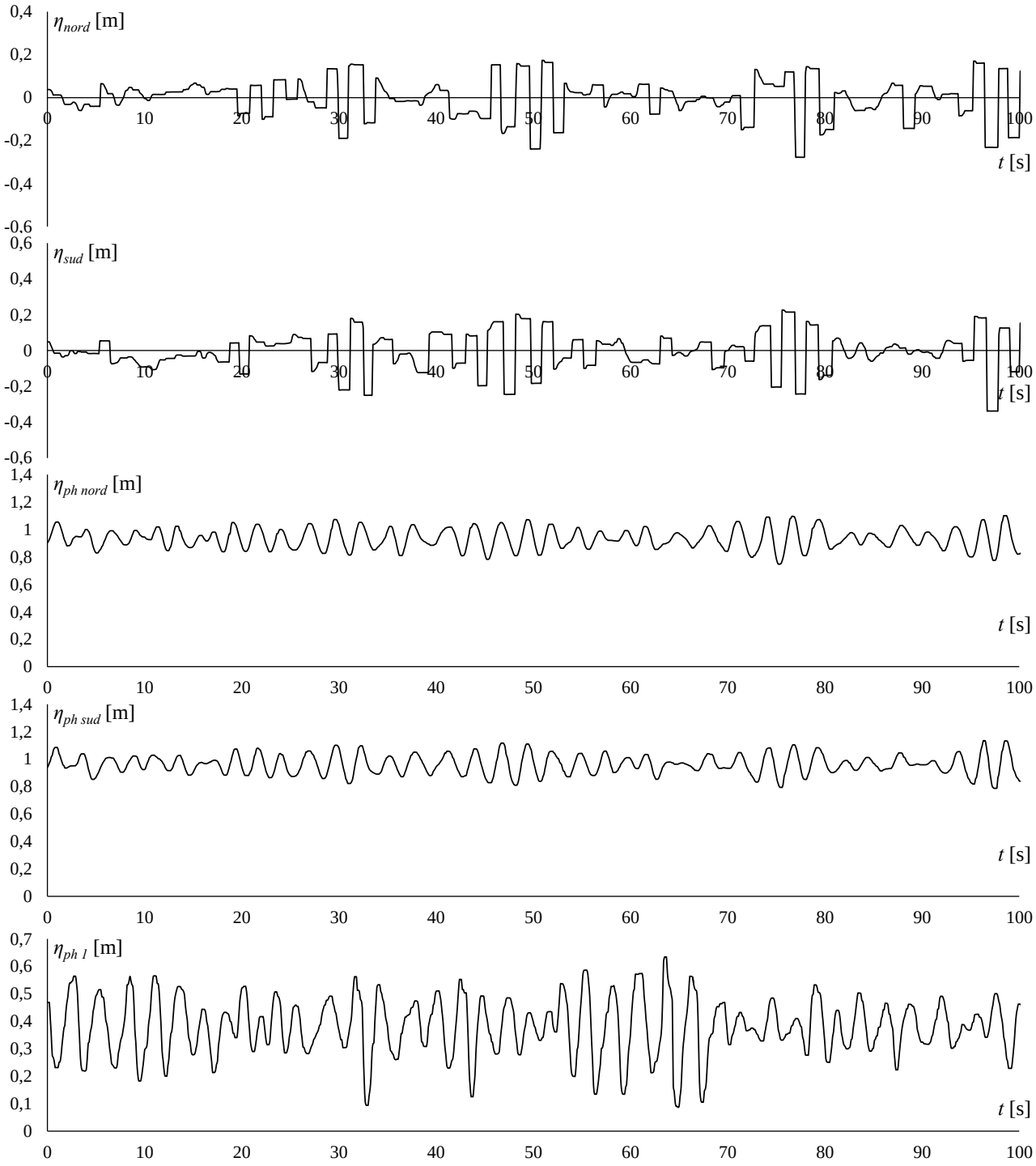

$\eta_{ph\ 2}$ [m]
$\eta_{ph\ 3}$ [m]
$\eta_{ph\ 4}$ [m]
$\eta_{ph\ 5}$ [m]
$\eta_{ph\ air}$ [m]
x [m]
t [s]

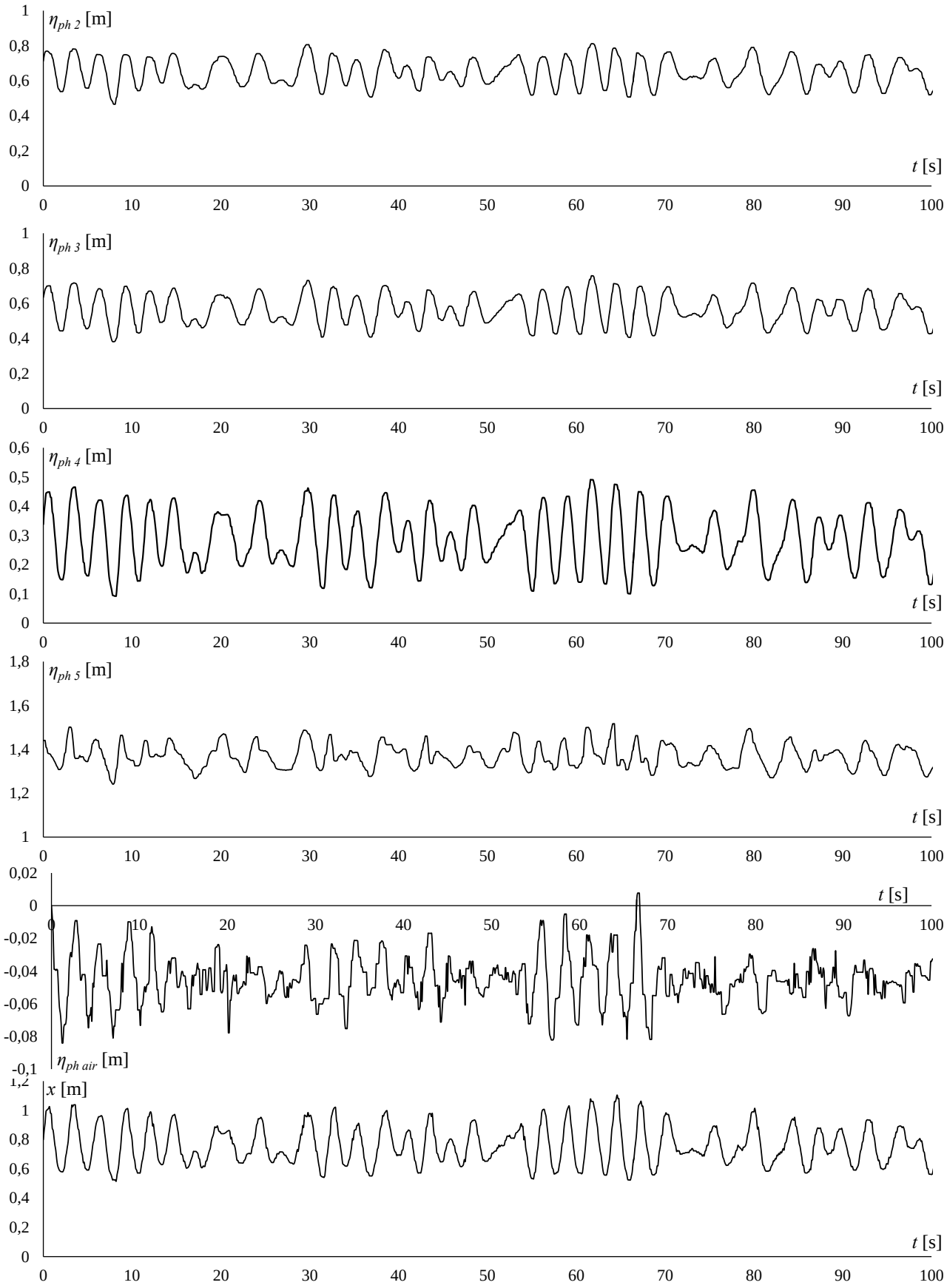
Record n°905
Altezza significativa = 0.23806 m
Periodo di picco = 2.7676 s
Periodo medio = 3.8675 s
Direzione media di propagazione = -0.98188 °
Parametro di strettezza dello spettro = 0.69387



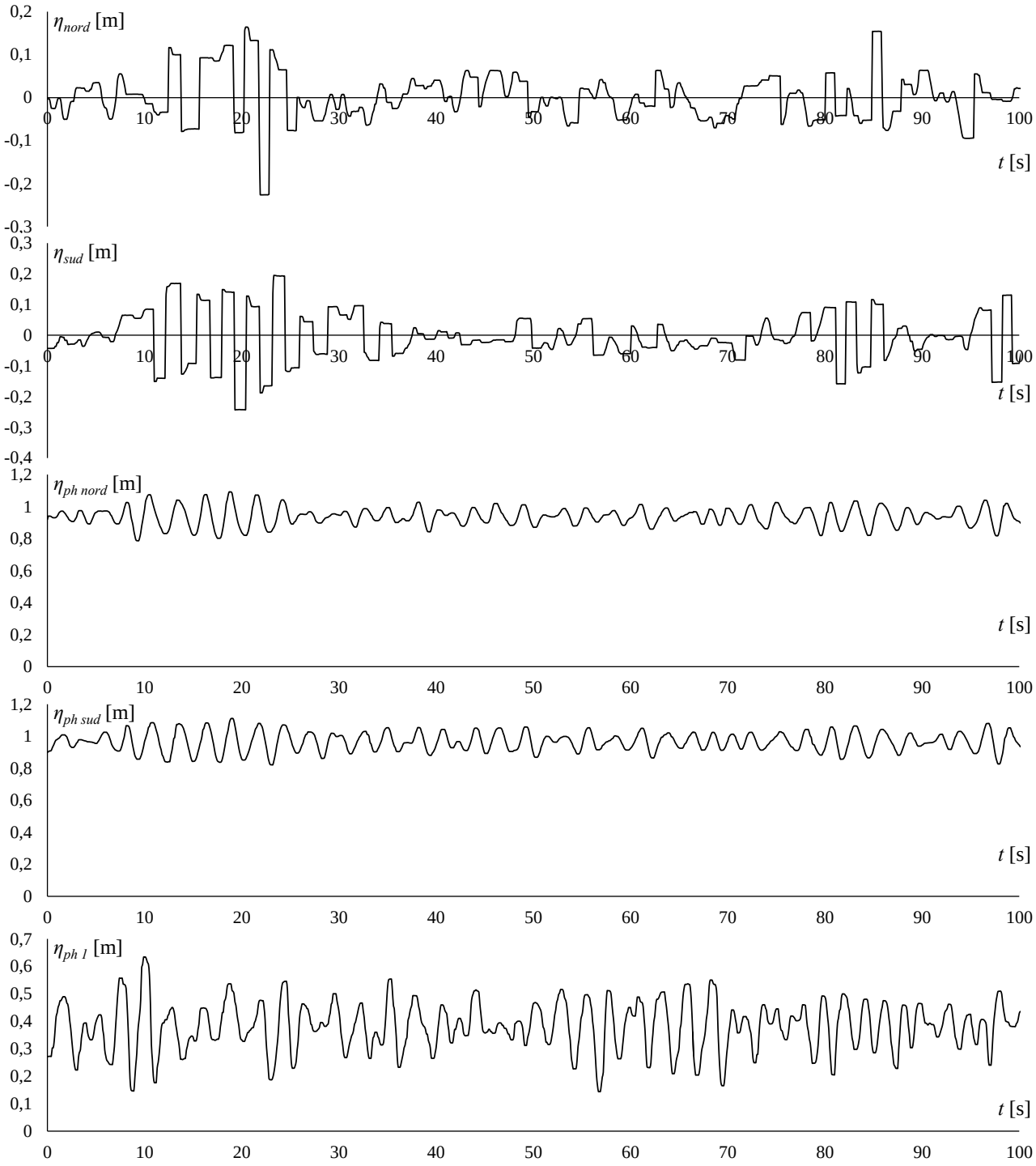

$\eta_{ph\ 2}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 3}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 4}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 5}$ [m]
t [s]
t [s]
$\eta_{ph\ air}$ [m]
x [m]
t [s]

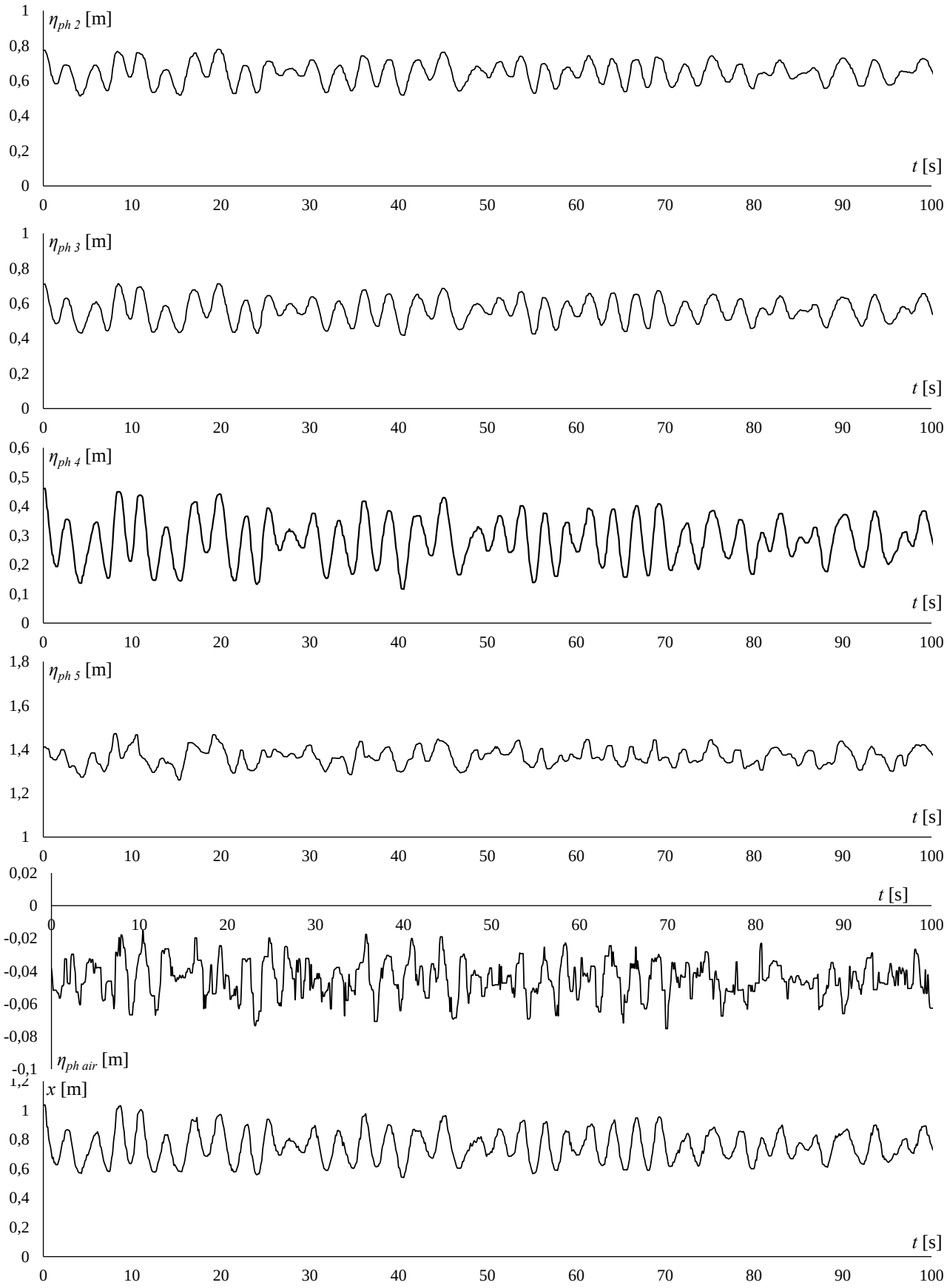
Record n°922
Altezza significativa = 0.39297 m
Periodo di picco = 2.7676 s
Periodo medio = 3.6607 s
Direzione media di propagazione = -7.5142 °
Parametro di strettezza dello spettro = 0.70451




$\eta_{ph\ 2}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 3}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 4}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 5}$ [m]
t [s]
t [s]
$\eta_{ph\ air}$ [m]
x [m]
t [s]

Record n°925
Altezza significativa = 0.25112 m
Periodo di picco = 2.7676 s
Periodo medio = 3.3864 s
Direzione media di propagazione = -4.2779 °
Parametro di strettezza dello spettro = 0.7353




$\eta_{ph\ 2}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 3}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 4}$ [m]
t [s]
$\eta_{ph\ 5}$ [m]
t [s]
t [s]
$\eta_{ph\ air}$ [m]
x [m]
t [s]

3.4.3 *Analisi di dettaglio del record n° 405*

Il record 405 è caratterizzato dalla geometria del cassone REWEC3-GV con la cella della camera di assorbimento avente larghezza di 2.54m e imboccatura del condotto verticale posta a +1.27 m rispetto al piede della struttura.

Con riferimento ai dati di campo indisturbato, si riportano i seguenti valori delle grandezze sintetiche:

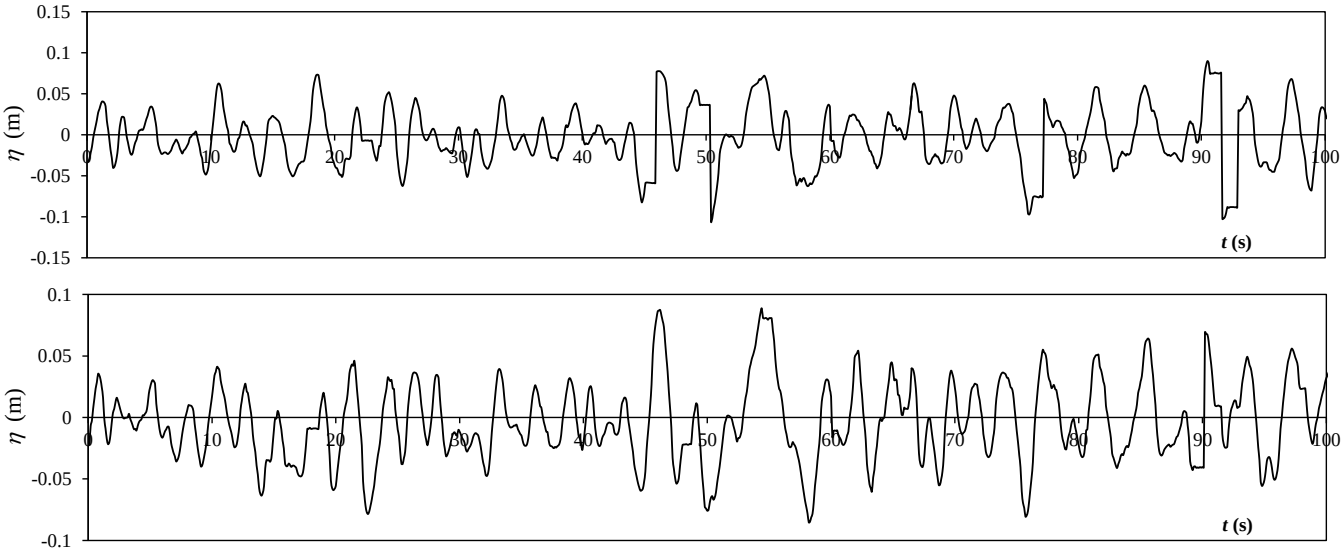
Altezza significativa del moto ondoso: H_s = 0,13 m

Periodo di picco: T_p = 4,2 s

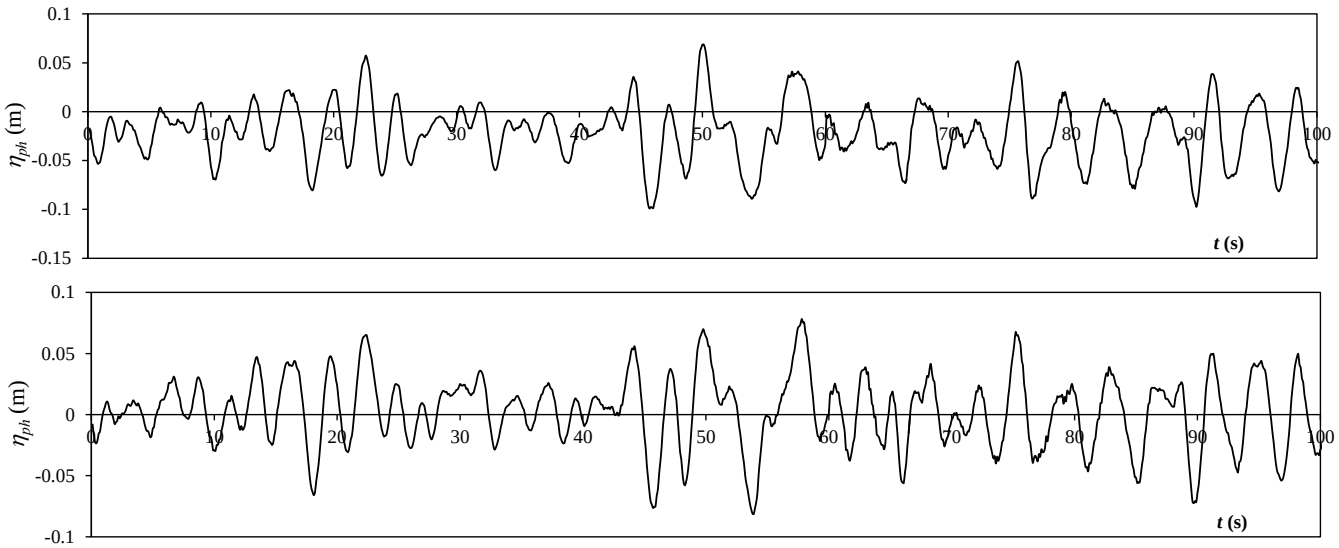
Direzione media di propagazione: ϑ_m = 0,20°

Parametro di strettezza dello spettro: ψ^* = 0,4

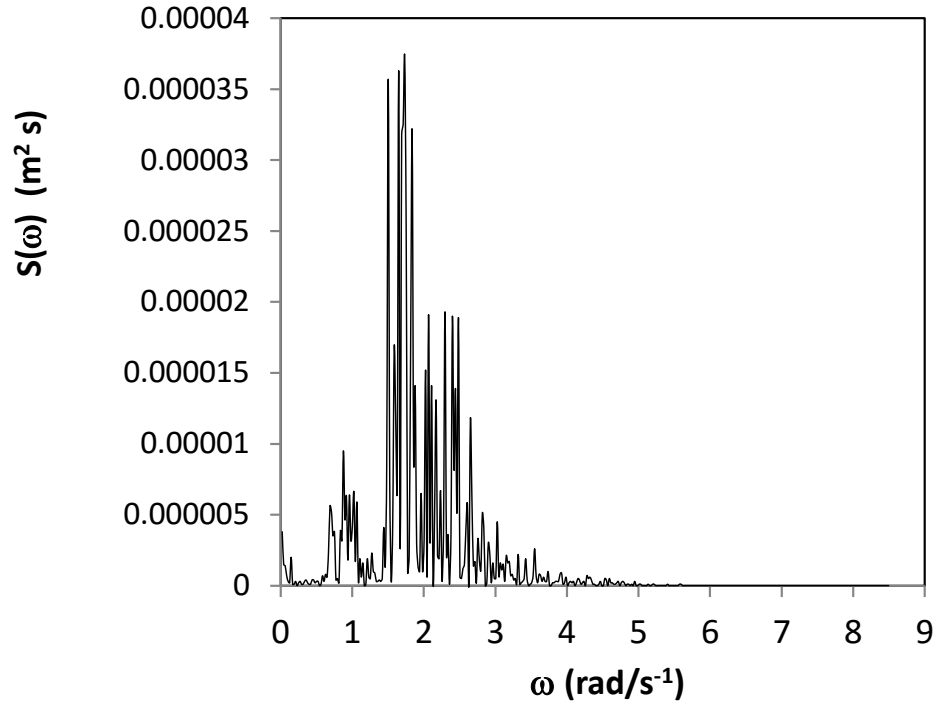
Storia temporale dell'elevazione registrata, rispettivamente, dallo strumento a Nord e a Sud



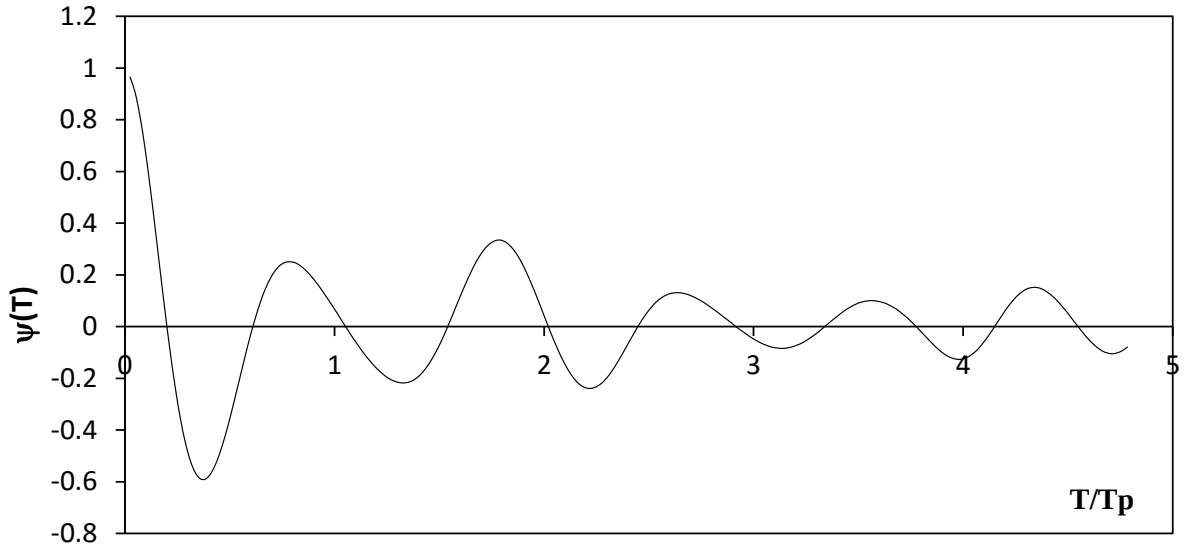
Storia temporale della fluttuazione di pressione registrata, rispettivamente, dallo strumento a Nord e a Sud



Spettro di frequenza del carico di pressione.

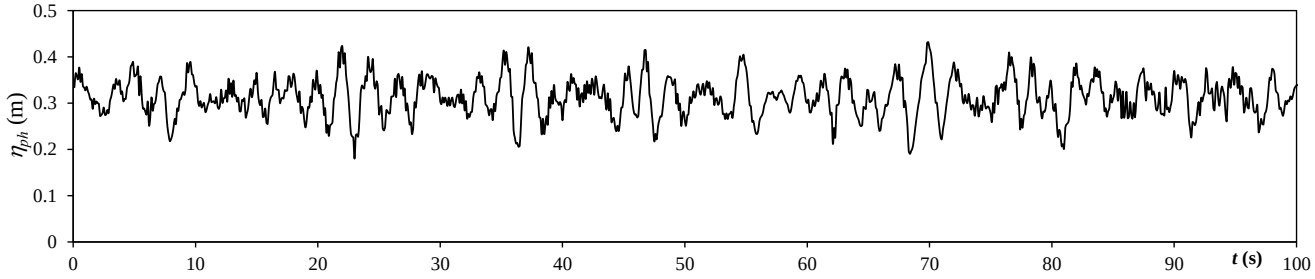


Funzione di autocovarianza fluttuazione di pressione

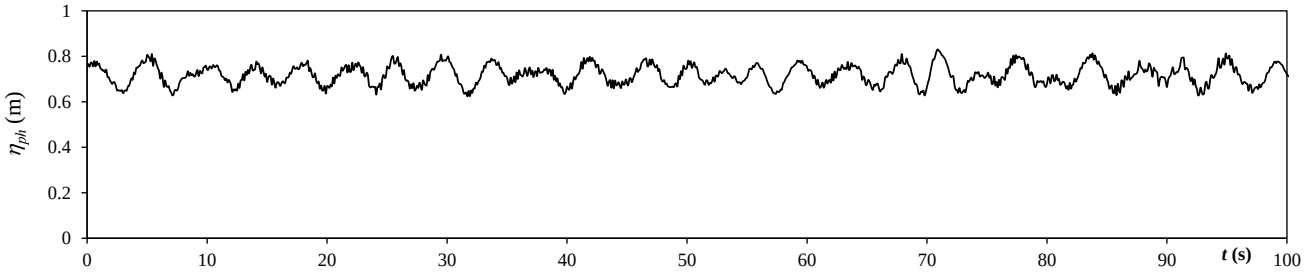


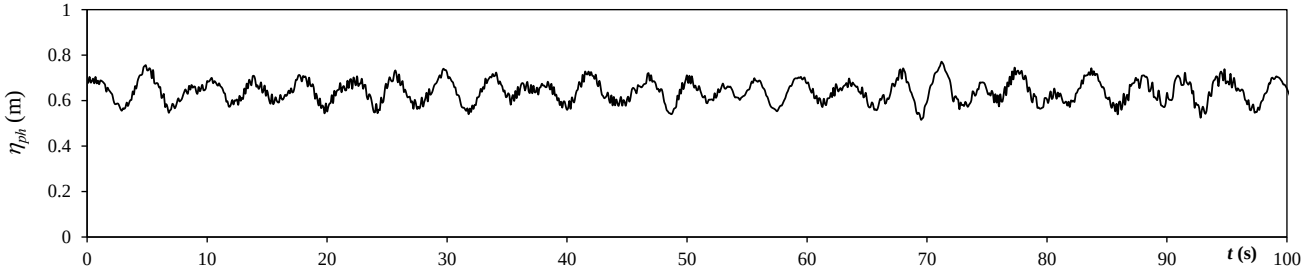
Come evidenziato dall'andamento dello spettro e della relativa funzione di autocovarianza, si tratta di un record in cui si registra una componente di onde di mare lungo (in bassa frequenza) sovrapposta ad onde di vento.

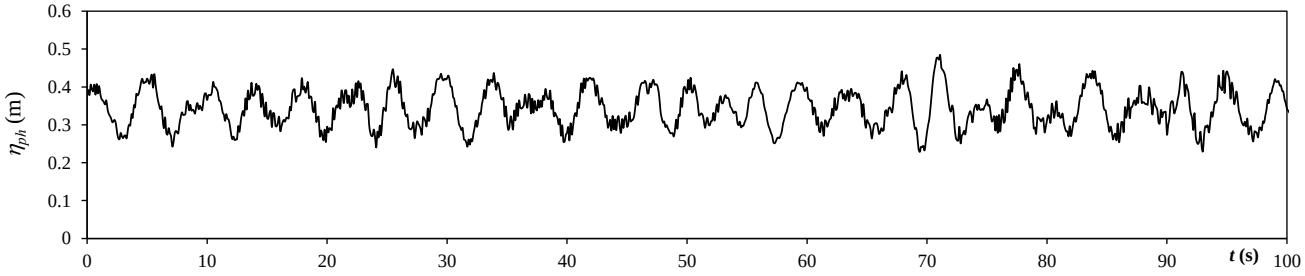
Storia temporale della fluttuazione di pressione all'imboccatura



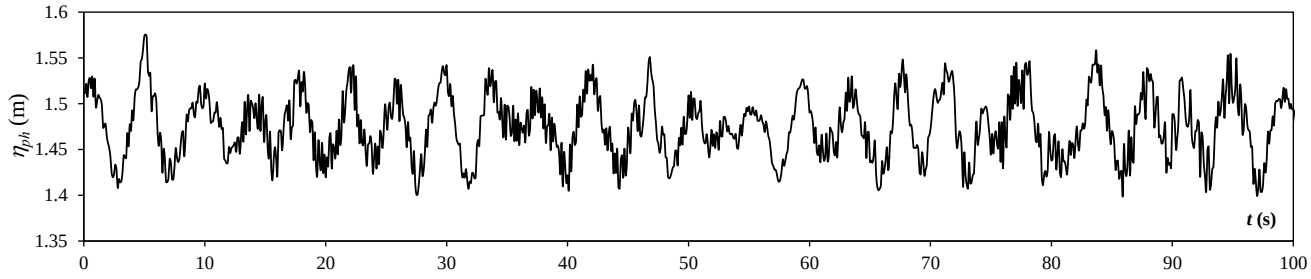
Storia temporale della fluttuazione di pressione nella colonna d'acqua oscillante



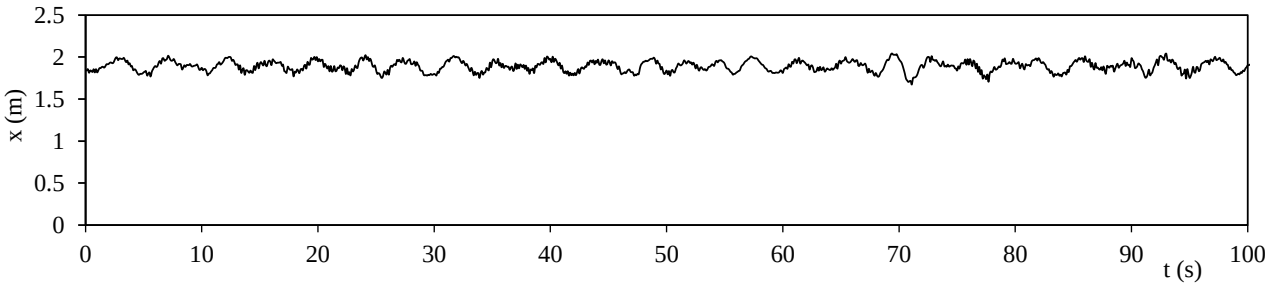




Storia temporale del carico al fondo del REWEC3



Elevazione della superficie libera della colonna oscillante.



Coefficiente di assorbimento C_a = 58%.

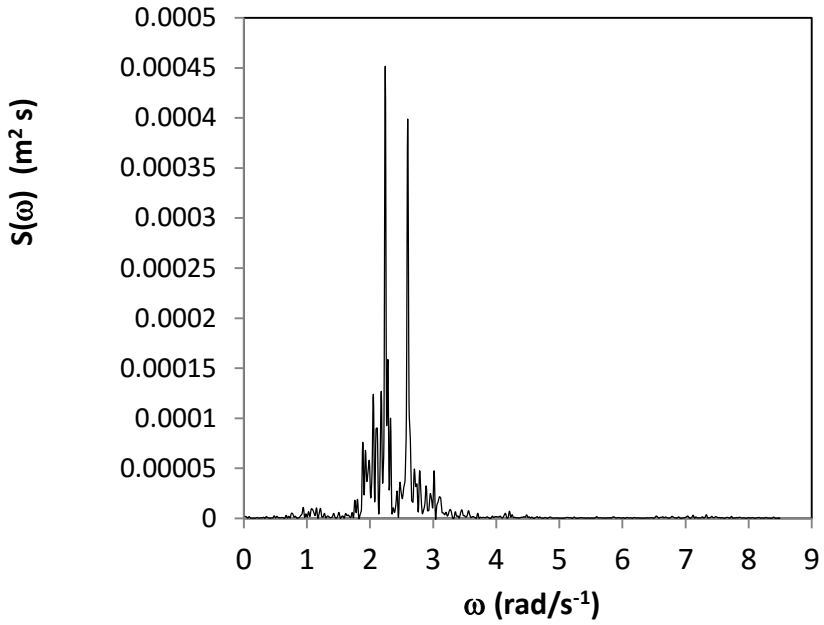
3.4.4 Analisi di dettaglio del record n° 708

Infine si considera il record 708, che è una delle registrazioni in cui sono state misurate le massime forze prodotte dall'onda sulla parete più esterna lato mare.

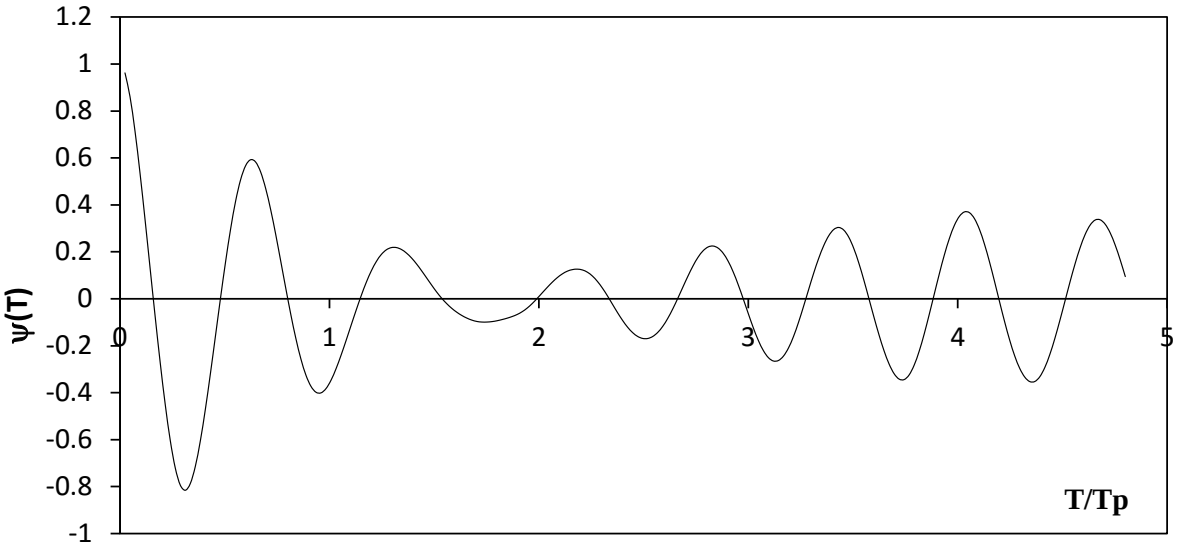
Con riferimento ai dati di campo indisturbato, si riportano i seguenti valori delle grandezze sintetiche:

Altezza significativa del moto ondoso: H_s = 0,24 m
Periodo di picco: T_p = 2,80 s
Direzione media di propagazione: ϑ_m = -0,10°
Parametro di strettezza dello spettro: ψ^* = 0,7

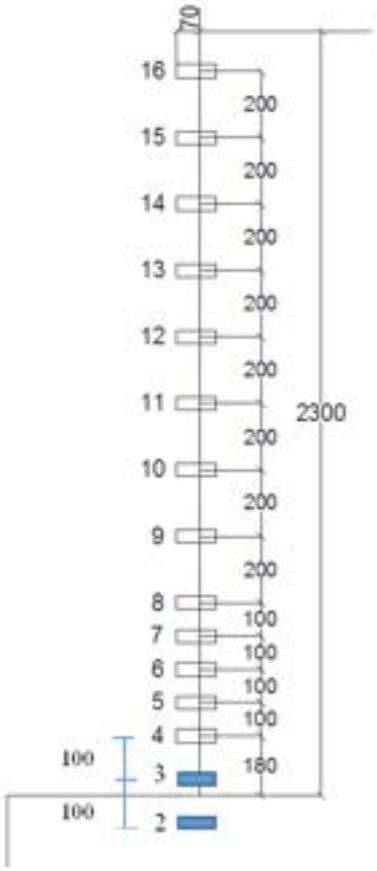
Spettro di frequenza del carico di pressione.

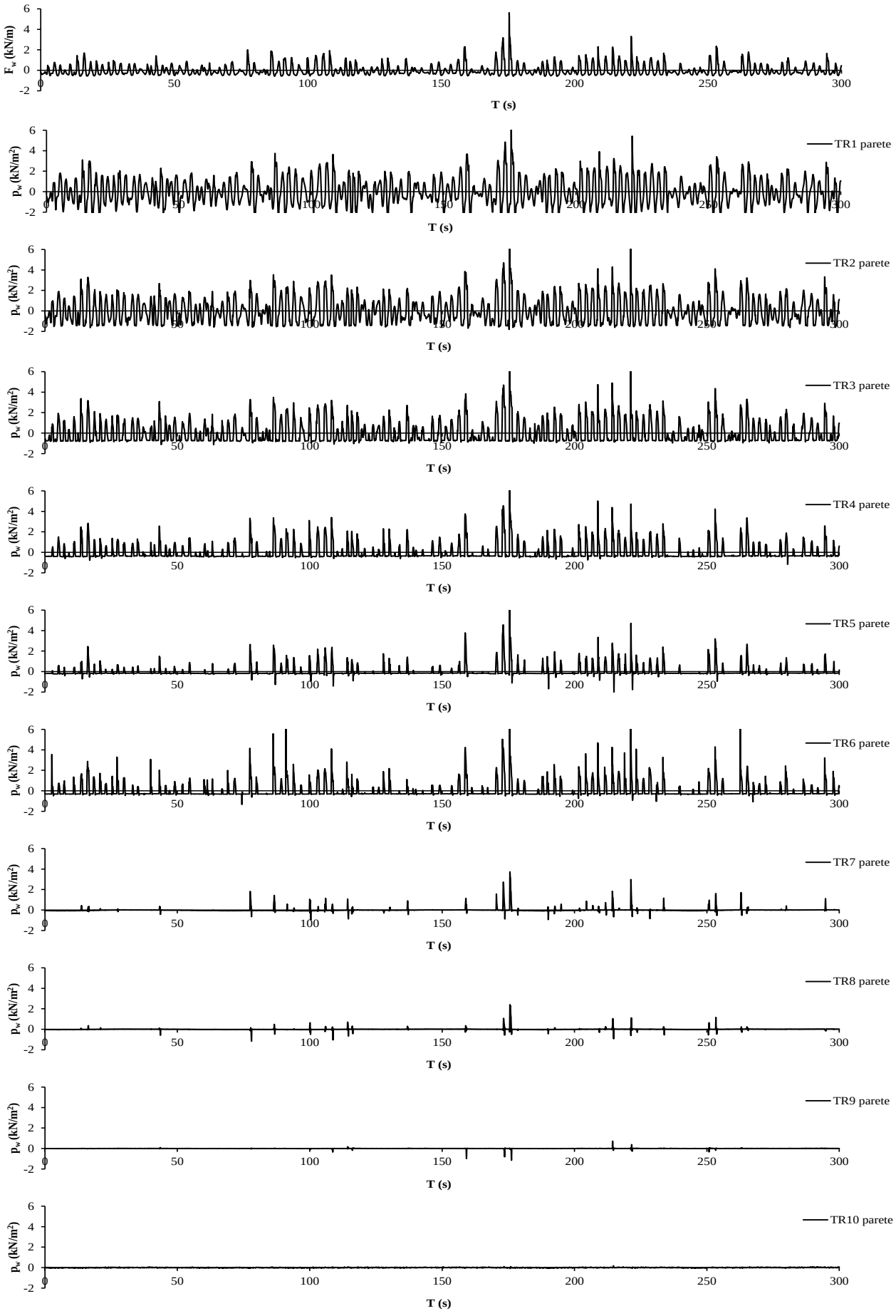


Funzione di autocovarianza fluttuazione di pressione

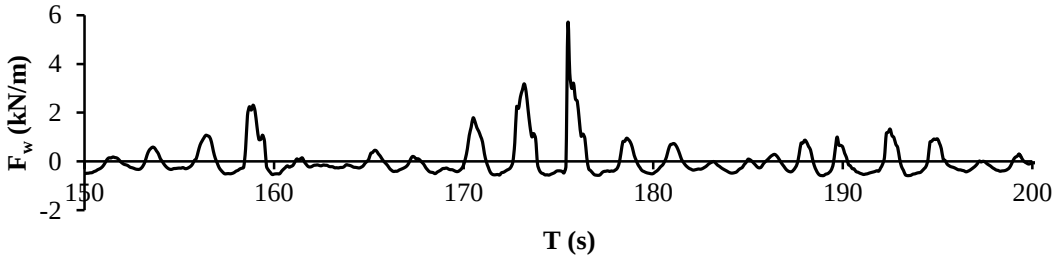


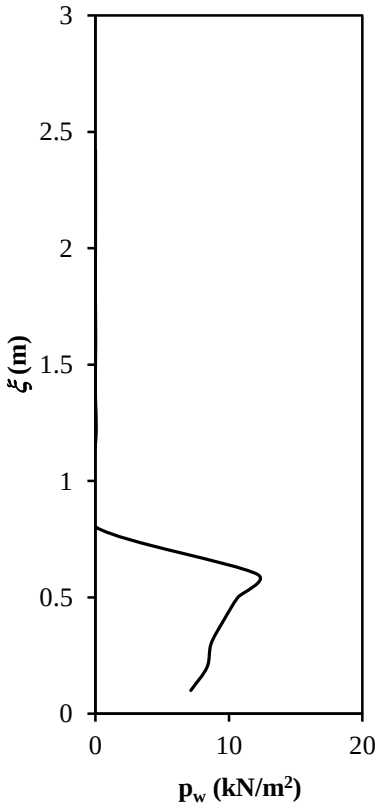
L'analisi delle sollecitazioni agenti sulla struttura sono state ricavate a partire dalle misure dei trasduttori di pressione posti sulla parete esterna secondo lo schema riportato di seguito.




Fw (kN/m)
T (s)
pw (kN/m²)
TR1 parete
TR2 parete
TR3 parete
TR4 parete
TR5 parete
TR6 parete
TR7 parete
TR8 parete
TR9 parete
TR10 parete

Sono stati riportati nella Figura precedente la storia temporale delle pressioni prodotte dall'onda sulla parete alle diverse quote fino al trasduttore 10 (quota in cui il trasduttore registra pressioni quasi nulle).
Nel pannello superiore è rappresentato l'andamento temporale delle forze prodotte dall'onda. La forza massima si è registrata all'istante T=175.5s ed è apri a circa 10.4 σ_{Fw} , essendo σ_{Fw} la deviazione standard del processo forza del record considerato. Infine, l'andamento delle distribuzioni di pressione agenti sulla parete all'istante in cui si realizza il picco positivo della forza è riportato in basso.





4 Conclusioni

Il presente report ha discusso le attività sperimentali condotte presso il laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. L'attività è stata condotta per mezzo di un cassone REWEC3 in scala 1:8.
Il modello è stato strumentato con sensori per la misurazione della pressione e dei livelli idrici posizionati sia in campo indisturbato sia all'interno del cassone. Essi hanno permesso la misurazione diretta delle sollecitazioni ondose e la misura diretta ed indiretta dei livelli idrici all'interno del cassone.
Numerosi stati di mare sono stati registrati per ciascuna configurazione del REWEC3. In particolare, si sono mostrate le storie temporali registrate dalla strumentazione nel caso di cassone singolo, doppio e triplo. Inoltre, si sono valutati i carichi agenti sul cassone in chiave strettamente strutturale.

5 Riferimenti bibliografici

Boccotti P. (2003) On a new wave energy absorber. Ocean Engineering, 30, pp. 1191-1200.
Arena, F. & Filianoti, P. (2003) A new kind of breakwater for converting wave energy into electric power, *Proc. Of the Fifth European Wave Energy Conference EWEC,* University College Cork, Ireland, 17th-20th September 2003, pp. 277-291.
Boccotti P. (2007) Comparison between a U-OWC and a conventional OWC. Ocean Engineering;34, pp. 799-805.
Arena, F. & Filianoti, P. (2007) A small-scale field experiment on a submerged breakwater for absorbing wave energy, *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Volume 133, Issue 2, pp. 161-167,
Boccotti P. (2007) Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening part I: theory. Ocean Engineering; 34, pp.806-819
Boccotti P., Filianoti P., Fiamma, V. & Arena, F. (2007) Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening. Part II: a small scale field experiment, *Ocean Engineering*, Volume 34, Issues 5-6, pp. 820-841,
Romolo, A. & Arena, F. (2008) Mechanics of nonlinear random wave groups interacting with a vertical wall, *Physics of Fluids.* Vol. 20, Issue 3, paper 036604, pp. 1-16.
Boccotti, P., Arena, F., Fiamma, V., Romolo, A. & Barbaro, G. (2011) Estimation of mean spectral directions in random seas, *Ocean Engineering*, Vol. 38, Issue 2-3, pp. 509–518,
Arena, F. (2011) Il mare come fonte di energia, Atti Convegno Lincei 'Acqua ed Energia', XI Giornata Mondiale dell'Acqua, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, 22 marzo, pp. 57-77.
Arena, F. , Ascanelli, A.(2011) On design of a new breakwater to produce electrical power from wave energy, Atti Convegno Lincei 'Acqua ed Energia', XI Giornata Mondiale dell'Acqua, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, 22 marzo, pp. 117-126
Boccotti, P., Arena, F., Fiamma, V., Romolo, A. & Barbaro, G. (2012) A small scale field experiment on wave forces on upright breakwaters, *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 138, Issue 2, pp. 97-114.
Arena, F., Romolo, A., Ascanelli, A., Ferrante, A., Ghiretti, S., Valentino, E. (2012) Green ports: an Italian experience, Proc. of the 2nd Mediterranean Days of Coastal and Port Engineering MEDDAYS 2012, 23rd - 25th May, 2012 Valencia (Spain), pp. 391-405.
Romolo A., Arena F. (2012) Nonlinear wave pressures given by extreme waves on an upright breakwater: theory and experimental validation, Proceedings of 33rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2012) - ASCE, No 33, 1-6 July 2012, Santander, Spain, paper waves.33, pp. 1-15 - ISSN: 2156-1028.
Arena, F., A. Carillo, V. Laface, G. Malara, A. Romolo, G. Sannino (2012). Extreme waves in the Central Mediterranean Sea for design of offshore wind farms and wave energy devices. *Proc. of the European Seminar OWEMES 2012,*Rome*,* 199-213.
Malara, G. and Arena, F. (2013) Analytical modelling of an U - Oscillating Water Column and performance in random waves, *Renewable Energy*, Vol. 60, pp. 116-126
Arena, F., Barbaro, G. (2013) The Natural Ocean Engineering Laboratory, NOEL, in Reggio Calabria, Italy, *Journal of Coastal Research,* Vol. 29, No. 5, pp. vii-x

Arena, F., A. Romolo, G. Malara, A. Ascanelli, S. Ghiretti (2013) A new U-OWC device to produce electrical power from ocean waves: some applications to Italian coasts, Proc. ICE Breakwaters Conference - 17 - 20 September 2013, Edinburgh, UK. In press
Franco, L., Arena, F., Mazzola, O., Petrosemolo, L. (2013) The new deepwater "Marina di Cicerone" at Formia (I), Proc. ICE Breakwaters Conference - 17 - 20 September 2013, Edinburgh, UK.
Malara, G. and Arena, F. (2013) U-Oscillating Water Column in Random Waves: Modelling and Performances,Proc. of the ASME 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2013-10923), June, 9-14, Nantes, France,Vol. 8: Ocean Renewable Energy, pp. V008T09A059;10 pages, ISBN: 978-0-7918-5542-3, doi:10.1115/OMAE2013-10923. ISBN: 978-0-7918-5542-3
Arena, F., Fiamma, V., Laface, V., Romolo, A., Viviano, A., Sannino, G., Carillo, A. (2013) Installing U-OWC devices along Italian coasts, Proc. of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2013-10928), June, 9-14, Nantes, France, Vol. 8: Ocean Renewable Energy, pp. V008T09A061-;11 pages, ISBN: 978-0-7918-5542-3, doi:10.1115/OMAE2013-10928. ISBN: 978-0-7918-5542-3
Arena, F., Romolo, A., Malara, G. and Ascanelli, A. (2013) On design and building of a U-OWC wave energy converter in the Mediterranean sea: a case study, Proc. of the ASME 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2013-11593), June, 9-14, Nantes, France, Vol. 8: Ocean Renewable Energy, pp. V008T09A102-;8 pages doi:10.1115/OMAE2013-11593. ISBN: 978-0-7918-5542-3
Arena F., Laface V., Malara G., Romolo A., Viviano A., Carillo A., Sannino G. (2013) Wave energy and extreme value analysis in coastal zone in the central Mediterranean sea, oriented to the design of energy harvesters, Proc. of the European Wave and Tidal Energy Conference EWTEC 2013, Aalborg, Denmark, 2-5 September
Arena F., Romolo A., Malara G., Fiamma V. (2013) A Small Scale Field Experiment on a U-OWC (REWEC3), Proc. of the European Wave and Tidal Energy Conference EWTEC 2013, Aalborg, Denmark, 2-5 September 2013
Arena, F., Malara, G., Fiamma,V. Romolo, A., (2014) Field experiment on a U-OWC wave energy converter in confused sea waves, Proc. of the 7th Computational Stochastic Mechanics Conference, Santorini, Greece, 15-18 June 2014, in press
Arena, F., Laface, V., Malara, G., Romolo, A., Viviano, A., Fiamma, V., Sannino, G., Carillo, A. (2015) Wave climate analysis for the design of wave energy harvesters in the Mediterranean Sea, Renewable Energy, Vol. 77, pp 125–141
Arena, F., Malara, G., Romolo, A., Fiamma, V., Laface, V., Strati, F.M., Barbaro, G. (2014) A small-scale field experiment to analyze a U-OWC wave energy converter in real seas, Proc. of the 1st International Conference on Renewable Energies Offshore, RENEW 2014, Lisbona, 24-26 novembre 201
Arena, F., Malara G., Romolo, A. (2014) A U-OWC wave energy converter in the Mediterranean Sea: preliminary results on the monitoring system of the first prototype, Proc. of the 1st International Conference on Renewable Energies Offshore, RENEW 2014, Lisbona, 24-26 novembre 2014
Arena, F., Laface, V., Malara G., Strati, F.M. (2014) Optimal configuration of a U-OWC wave energy converter, Proc. of the 1st International Conference on Renewable Energies Offshore, RENEW 2014, Lisbona, 24-26 novembre 2014
Arena, F., Laface, V., Malara, G., Romolo, A. (2015) Modelling of sea storms associated to energy harvesters: downtime and energy losses, Proc. of the ASME 34rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, May 31 – June 5, 2015, St. John's, NL, Canada, paper OMAE2015-42178, pp. 1-8
Strati, F.M., Malara, G., Laface, V., Romolo, A., Arena, F., (2015) A control strategy for PTO systems in a U-OWC device, Proc. of the ASME 34rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, May 31 – June 5, 2015, St. John's, NL, Canada, paper OMAE2015-42207, pp. 1-7
Arena, F., Laface, V. Maisondieu, C., Malara, G., Olagnon, M.,Nuwoklo Komlan, K., Strati F. M. 2015. On wave energy exploitation by U-OWC devices in the West coast of France. Proc. of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference EWTEC 2015, Nantes, France, 6-11 September

Arena, F., Fiamma, V., Laface, V., Malara, G., Romolo, A., Strati F. M. 2015. Monitoring of the U-OWC under construction in Civitavecchia (Rome, Italy) Proc. of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference EWTEC 2015, Nantes, France, 6-11 September

Malara, G., Gomes R. P. F., Arena, F., Henriques J. C. C. , Gato L. M. C., Falcão A. F. O., 2015 Hydrodynamic characteristics of a U-OWC plant: comparison between analytical and numerical results. Proc. of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference EWTEC 2015, Nantes, France, 6-11 September

Arena, F., Laface, V., Malara, G., Strati F. M. 2015. performance of a U-OWC – PTO coupled system using different control laws. Proc. VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering MARINE 2015, Rome, 15-17 June

6 Acronimi

REWEC3 : REsonant Wave Energy Converter, release n. 3

REWEC3-GV : REsonant Wave Energy Converter, release n. 3, a geometria variabile

OWC : Oscillating Water Column