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

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Attività sperimentale di campo su modelli in scala ridotta di dispositivi a colonna oscillante del tipo U-OWC (U-Oscillating Water Column): risultati preliminari

Arena F., V. Fiamma, R. Iannolo, G. Malara,
A. Romolo, A. Fontanella, G. Sannino

NOEL
Natural Ocean
Engineering Laboratory
www.noel.unirc.it

Report RdS/PAR2013/175

ATTIVITÀ SPERIMENTALE DI CAMPO SU MODELLI IN SCALA RIDOTTA DI DISPOSITIVI A COLONNA OSCILLANTE DEL TIPO U-OWC (U-OSCILLATING WATER COLUMS): RISULTATI PRELIMINARI

F. Arena, V. Fiamma, R. lannolo, G. Malara, A. Romolo, (Università Mediterranea di Reggio Calabria)
A. Fontanella, G. Sannino (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2013
Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente
Progetto: Studi e valutazioni sulla produzione d energia elettrica dalle correnti marine e dalmoto ondoso
Obiettivo: Attività sperimentali su dispositivi a colonna d'acqua oscillante OWC
Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Attività sperimentali su dispositivi a colonna d'acqua oscillante OWC"*
Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino
Responsabile scientifico Università Mediterranea di Reggio Calabria: Felice Arena

Si ringrazia la società WAVENERGY.IT s.r.l., Spin Off dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria (vvvvw.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 5

2.1 UNA BREVE PRESENTAZIONE DEL LABORATORIO 5
2.2 LE PECULIARITÀ DEL NOEL 6
2.3 MODELLO IN SCALA RIDOTTA DI UNA DIGA A CASSONI DI TIPO REWEC3 PER SPERIMENTAZIONE DI CAMPO 9

3 CONCLUSIONI 30

4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 30

5 ACRONIMI 32

Sommario

Il rapporto illustra i risultati preliminari di un'attività sperimentale di campo su un modello in scala ridotta di un dispositivo a colonna oscillante del tipo U-OWC (U-Oscillating Water Column, o REWEC3) eseguito presso il laboratorio NOEL dell'università Mediterranea di Reggio Calabria.
Le prove condotte sono state eseguite su un prototipo di cassone REWEC3 (inventato dal prof. Paolo Boccotti) in acciaio, in cui la larghezza della camera di assorbimento e del condotto verticale è, rispettivamente, di 1m e di 0.5m. La lunghezza longitudinale delle camere attive di 6.9m. Sul cassone è installata una turbina di tipo Wells, realizzata nell'ambito del Progetto Poseidone.

Le attività sperimentali eseguite nel 2014 sono state cofinanziate da ENEA, nell'ambito della convenzione in oggetto. Nello specifico, sono state eseguite attività sperimentali, dopo l'installazione del cassone, a partire dal mese di maggio 2014 (fino al 2 settembre 2014).
Sono stati registrati stati di mare in cui la potenza prodotta dalla turbina ha registrato un picco di 1.5 kW.
I risultati ottenuti hanno dimostrato l'ottimo livello di efficienza dell'impianto sia in assenza che in presenza di turbina funzionante. I dati riportati nel rapporto sono riferiti a condizioni ondose variabili, utili ad avere un primo quadro sperimentale sull'idrodinamica dei cassoni REWEC3.

Le analisi effettuate hanno avuto un duplice scopo. Quello di validare il comportamento del sistema REWEC3 per l'assorbimento dell'energia ondosa e la produzione di energia; e dall'altro quello di fungere da base per la validazione del modello CFD implementato da ENEA nonché di progettare un ulteriore fase sperimentale da effettuarsi su un cassone REWEC3, finanziato da ENEA, a geometria variabile per lo studio di una progettazione ottimizzata degli impianti U-OWC.

1 Introduzione

Nel presente report sono riportati i risultati di attività sperimentali di campo su un modelli 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 REWEC3, inventato dal prof. Paolo Boccotti) che presenta un'ottima resa energetica rispetto a sistemi più tradizionali.

Le prove sperimentali sono state eseguite presso il laboratorio NOEL (Natural Ocean Engineering Laboratory) dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria, che è un centro avanzato di ingegneria marittima per la sperimentazione in mare, grazie ad alcune eccezionali peculiarità del mare di Reggio Calabria (v. www.noel.unirc.it).

Le prove sono state eseguite su un cassone in acciaio di tipo REWEC3 avente le seguenti dimensioni: larghezza trasversale della camera di assorbimento pari a 1m, larghezza trasversale del condotto verticale pari a 0.5m, lunghezza longitudinale delle camere attive di 6.9m. Il cassone e la turbina di tipo Wells che è stata installata, sono stati realizzati (attività 2012/2014) mediante i finanziamenti dei progetti: i) "Impianto U-OWC e Turbina ad Aria per la Produzione di Energia Elettrica da Onde di mare - POSEIDONE", finanziato dal Ministero dell'Ambiente (GU-SerieV n. 150 del 21/12/2009) - Partners: Università Mediterranea; Centro Ricerche Aerospaziali della Sapienza Università di Roma; Faggiolati Pumps SpA; Wavenergy.it srl.; ii) "Progetto dimostrativo su un modello di cassoni OWC o U-OWC" finanziato con decreto n. 13938 del 8/11/2011, POR FESR Calabria 2007/2013 Asse I, a favore di wavenergy.it srl.

Nell'ambito del presente report sono state eseguite ulteriori prove sperimentali, per integrare quelle già esistenti, al fine di validare il comportamento dell'impianto e delle sue rese energetiche, sotto l'azione di diverse condizioni ondose.

A partire da tali elaborazioni è stato progettato un ulteriore cassone metallico attivo, realizzato nell'ambito di questo progetto ed oggetto del report RdS/PAR2013/176, avente una lunghezza di 3.8m da integrare a quello oggetto del presente report. Il nuovo cassone presenta il vantaggio della modularità. Come riportato nel report n. 176, le celle possono essere divise attraverso delle paratoie.

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

2.1 Una breve presentazione del laboratorio

Il laboratorio naturale di ingegneria marittima NOEL (http://www.noel.unirc.it/) è localizzato sul lungomare di Reggio Calabria (in località Rada delle Mura Greche), nello Stretto di Messina (vedi Figura 1). Presso il laboratorio dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria si eseguono sperimentazioni direttamente in mare, sulla meccanica delle onde e su modelli in scala ridotta di strutture marittime, operando con le classiche tecniche delle vasche di laboratorio. E' questa una peculiarità del NOEL che rende altamente innovativa, a livello Internazionale, l'attività scientifica svolta presso il laboratorio. Il NOEL dispone della consegna demaniale di uno specchio acqueo di circa 4500 mq antistante la struttura.

La sperimentazione a mare nasce da una serie di attività svolte nel periodo 1989-94 da gruppo di docenti dell'Università di Reggio Calabria coordinato dal prof. Paolo Boccotti, che 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 dal Dipartimento DICEAM (ex Dip. Meccanica e Materiali) dell'Università Mediterranea, ed è stato rinominato Natural Ocean Engineering Laboratory, NOEL. Direttore (e responsabile scientifico) del laboratorio è il prof. Felice Arena, Ordinario di Costruzioni Marittime nell'Università Mediterranea, con il Coordinamento scientifico del prof. Paolo Boccotti, fondatore del laboratorio.

Il NOEL (Natural Ocean Engineering Laboratory) è il primo, ed ancora oggi unico, laboratorio al mondo ad operare in mare con tecniche di laboratorio, per ricerche avanzate di ingegneria marittima, navale e costiera e per lo sfruttamento dell'energia dal mare (energia dalle onde, dalle correnti e wind energy offshore). Questo grazie ad una serie straordinaria di fattori naturali, che rendono il mare di Reggio Calabria un grande laboratorio naturale.

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, una serie di eventi seminariali di carattere internazionale, corsi per studenti di ingegneria o per dottorandi di ricerca, congressi e workshops. Un aggiornamento continuo è riportato sul sito del laboratorio www.noel.unirc.it.

Nell'ambito di questa nuove fase, grande importanza è stata attribuita alla sperimentazione di campo nell'ambito dell'energia dal mare, in particolar modo alle nuove strutture di tipo REWEC3 per la produzione di energia elettrica dal moto ondoso. In tale contesto si inquadra l'attività svolta dal gruppo di ricerca dell'Università Mediterranea con ENEA.

2.2 Le peculiarità del NOEL

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. Inoltre, presso il NOEL è possibile registrare tempeste con altezze significative dell'ordine di 1 m circa. Trovare in mare onde con altezze significative 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 Calabria;
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.



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

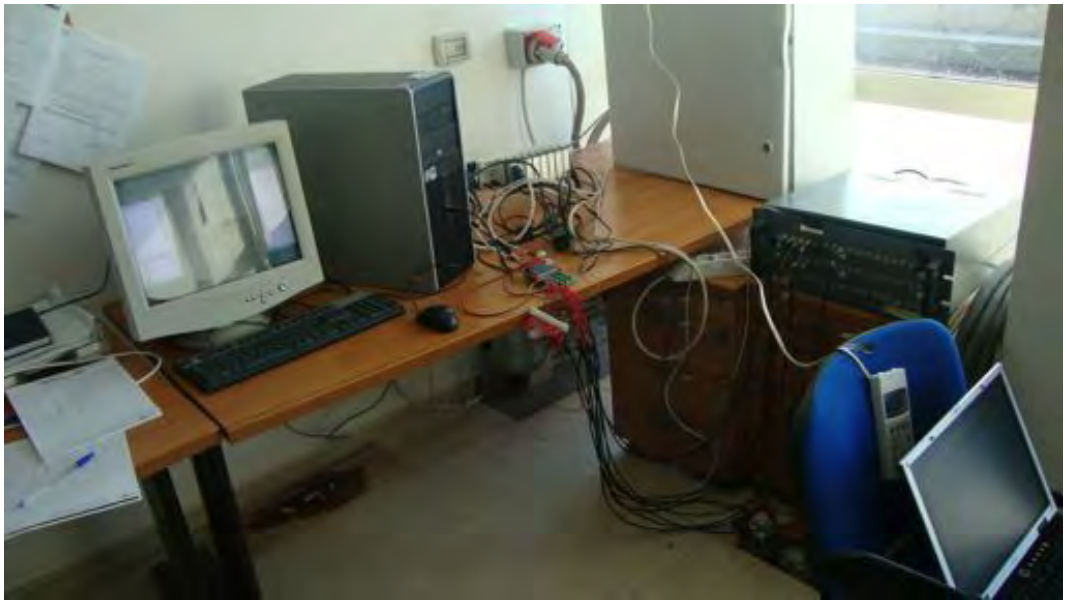


Figura 2. Stazione di acquisizione interna presso il NOEL.

2.3 *Modello in scala ridotta di una diga a cassoni di tipo REWEC3 per sperimentazione di campo*

Un nuovo impianto 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 3. 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

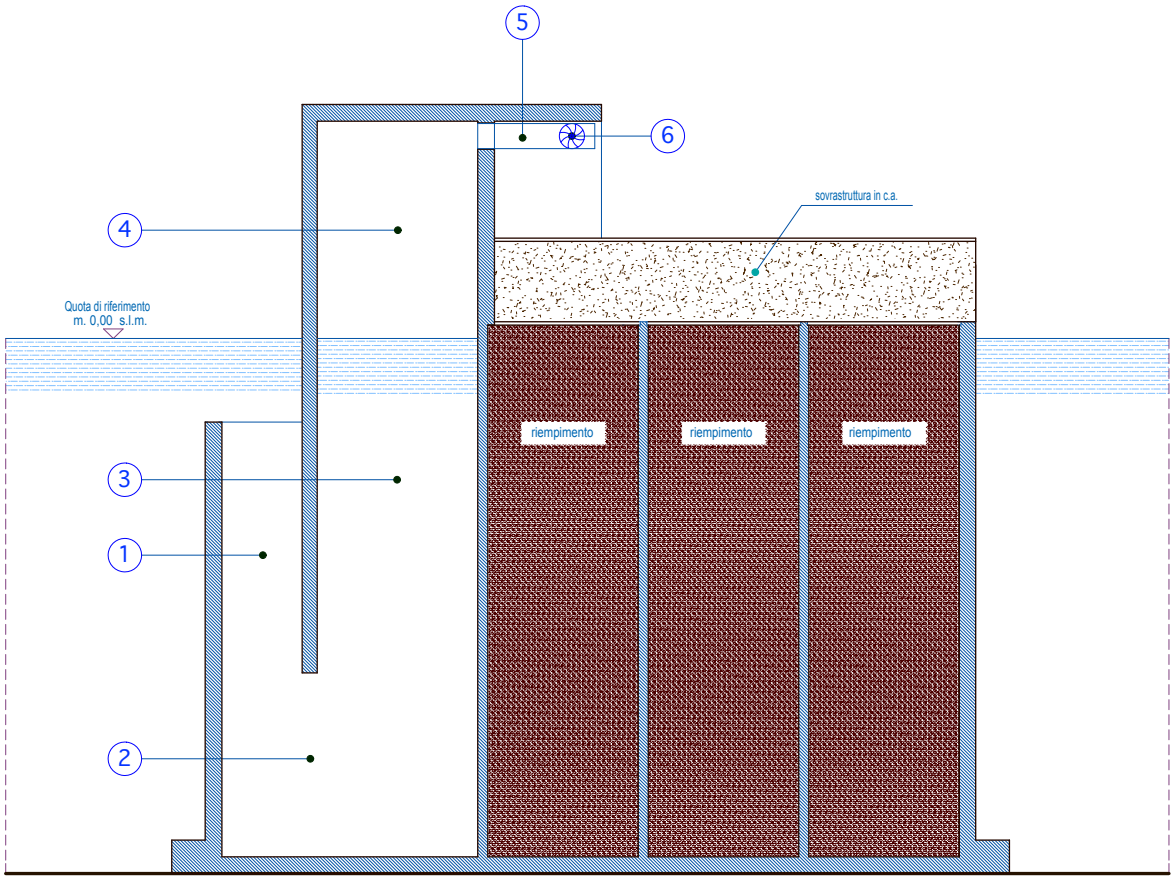


Figura 3 Schema costruttivo di un cassone in c.a. con sistema REWEC3 a celle indipendenti per la conversione di energia ondosa e la produzione di energia elettrica.

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.

Un'intensa attività di ricerca e di sperimentazione è stata svolta dal gruppo di ricerca 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



Figura 4. Diga in cemento armato, presso il NOEL di Reggio Calabria.



Figura 5. Il cassone metallico esistente presso il NOEL.



Figura 6. Il cassone metallico REWEC3 installato sulla diga in cemento armato presso il NOEL.



Figura 7. Turbina di tipo Wells, accoppiata al cassone metallico esistente presso il NOEL, progettata dal gruppo POSEIDONE dell'Università di Roma La Sapienza e realizzata dalla Faggiolati Pumps SpA.

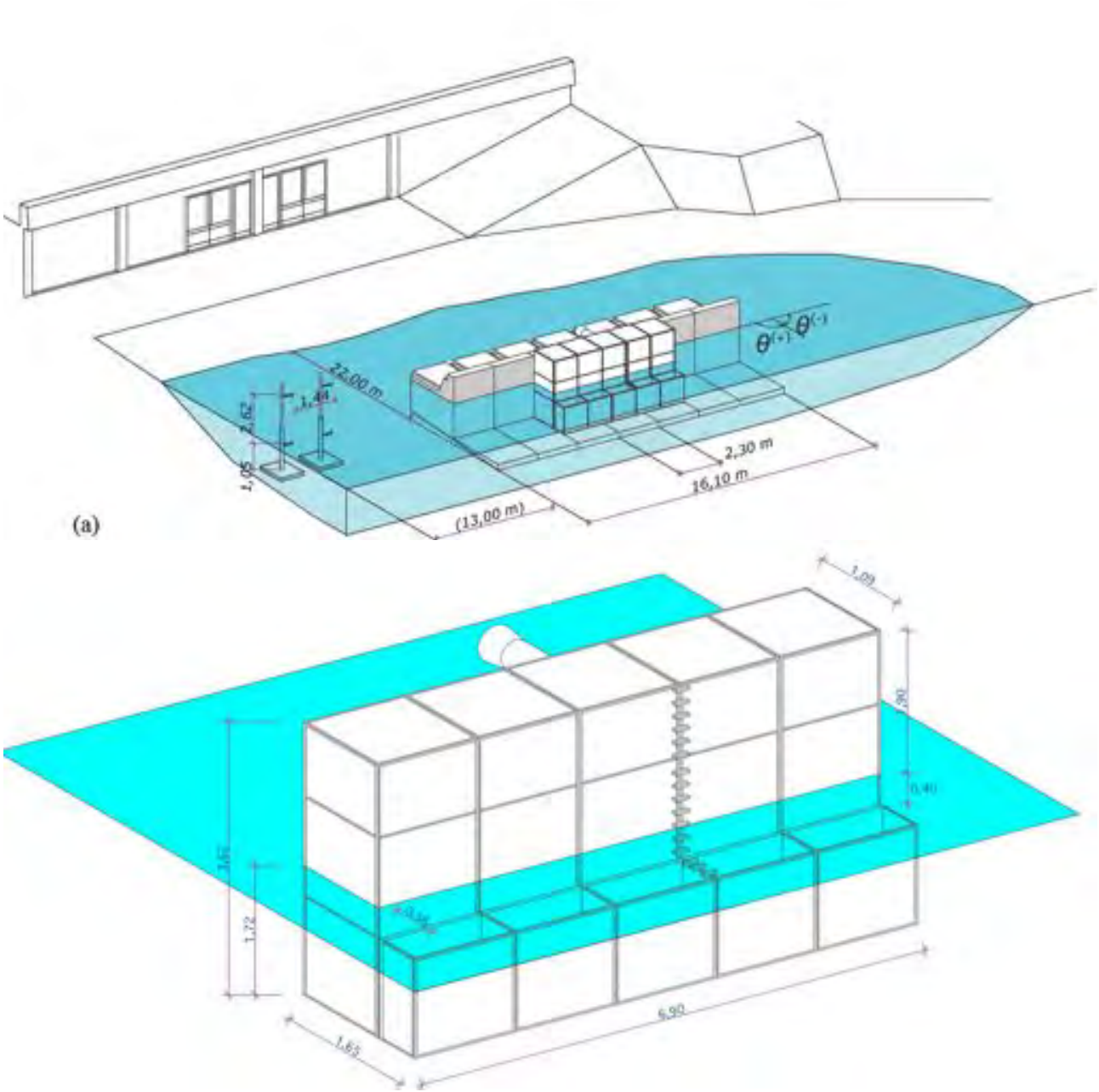


Figura 8. Schema del cassone REWEC3 in acciaio, mostrato nelle Figure 5-7, localizzato presso il laboratorio NOEL (tutte le misure sono in metri).

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 struttura scatolare in acciaio che costituisce la parte 'attiva' dell'impianto REWEC3. La struttura in acciaio è il modello del condotto verticale, attraverso cui si ha l'interazione con il campo di moto incidente, e della camera di assorbimento, nella cui parte superiore è presente aria ed è posta in comunicazione con l'atmosfera. Il prototipo è costituito da una camera di assorbimento unica, per una lunghezza globale di 6.9m, con un'altezza di 1.9m sul livello di medio mare.
L'affondamento dell'imboccatura è di 0.3m. La larghezza del condotto e della camera sono, rispettivamente, di 0.5m e 1m. In cima alla camera di assorbimento è alloggiata una turbina di Wells. Essa è connessa alla camera tramite un foro avente diametro di 0.4m. Tale struttura di 6.9m è posizionata sui tre cassoni centrali. La Figura 5 riporta una foto del cassone in acciaio posizionato sulla spiaggia del NOEL,

prima della posa in mare e in Figura 6, dopo la posa in opera e la solidarizzazione con la struttura in cemento armato. Infine, in Figura 7, è mostrata la turbina di tipo Wells installata sul cassone REWEC3 realizzato presso il NOEL, progettata dal gruppo dell'Università di Roma La Sapienza del progetto POSEIDONE e realizzata dalla Faggiolati SpA.

Il modello in scala ridotta di impianto REWEC3 con turbina di tipo Wells, realizzato con i predetti fondi dei progetti POSEIDONE e NET, è stato oggetto di ulteriori prove ed elaborazioni nell'ambito delle attività previste in collaborazione con ENEA, oggetto del presente rapporto. Una prima parte di tali attività ha riguardato l'analisi dell'idrodinamica dell'impianto in assenza di turbina e in una seconda parte sono state svolte analisi di comportamento dell'impianto in condizioni di turbina funzionante, in una fase successiva alla conclusione del progetto POSEIDONE che è avvenuta in maggio 2014.

L'impianto (cassone metallico REWEC3 e turbina) è stato opportunamente strumentato per consentire l'acquisizione di tutte le grandezze necessarie, sia con riferimento alle caratteristiche degli stati di mare incidenti che all'idrodinamica dell'impianto e alle rese energetiche dello stesso in termini di assorbimento e di potenza prodotta (in condizioni di turbina funzionante).

Le misure del campo di moto indisturbato, ovvero non alterato dall'interazione con l'impianto, sono fornite da 2 sonde ultrasoniche e da 2 trasduttori di pressione posti su pali verticali ad una distanza di 1,44 m (vedi Figura 8*a*). I trasduttori sono posti ad 1,05m dal fondo, mentre le sonde sono poste al di sopra dei trasduttori ad una distanza di 2,62m. Queste registrano, rispettivamente, la storia temporale del carico di pressione e dell'elevazione d'onda con una frequenza di campionamento di 10Hz. Le registrazioni sono effettuate per un intervallo di tempo di 5min, cosicché una registrazione completa risulta composta da 3000 campionamenti per segnale registrato. A partire dalle registrazioni di tali strumentazioni, nella fase di pre-processing sono state determinate le grandezze caratteristiche di ciascuno stato di mare: livello di medio mare; altezza significativa; spettro direzionale; periodi spettrali; direzione media di propagazione del moto ondoso.

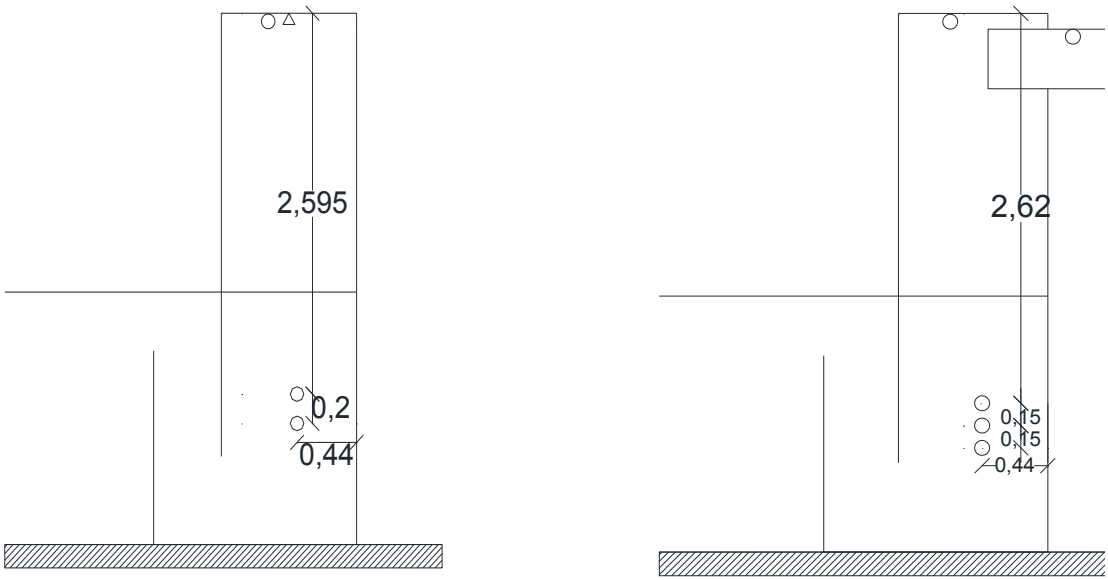


Figura 9. Posizione dei trasduttori di pressione (cerchi) e delle sonde ultrasoniche all'interno del cassone, nella sezione di mezzeria (destra) e al centro della prima e seconda metà del cassone (sinistra). Unità in metri.

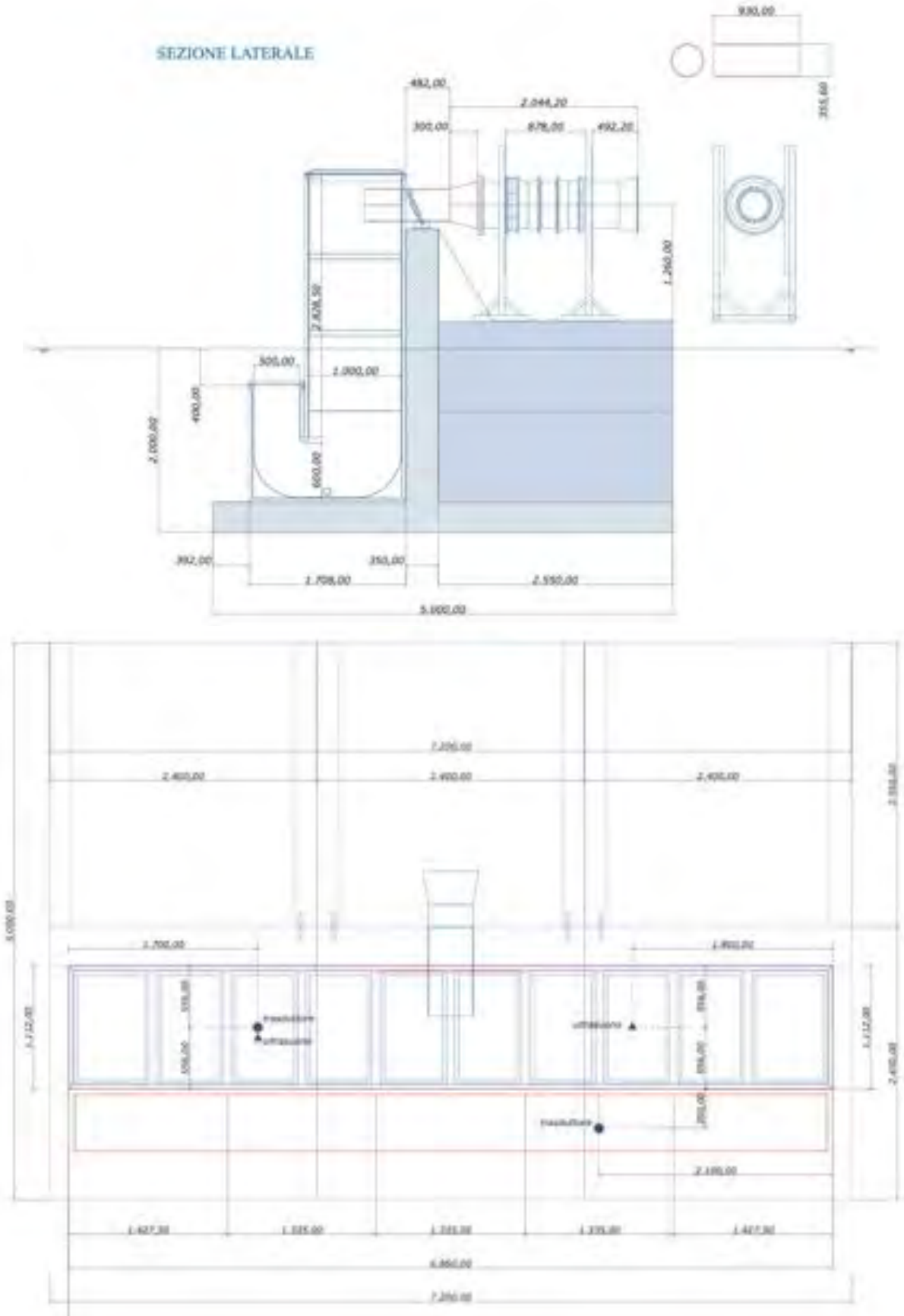


Figura 10. Sezione trasversale (pannello superiore) e pianta (pannello inferiore) del cassone metallico REWEC3. nella pianta si evidenzi la posizione dei trasduttori di pressione (cerchi) e delle sonde ultrasoniche all'interno del cassone. Unità in millimetri.

Per la stima del comportamento dell'impianto, si è fatto riferimento a registrazioni condotte sia all'esterno che all'interno della camera di assorbimento. Nello specifico, un trasduttore di pressione è posto sull'imboccatura, per quantificare la pressione agente (v. pianta di Figura 10 per l'esatta localizzazione). All'interno del cassone metallico sono poste 2 sonde ultrasoniche per la misurazione dei livelli idrici. Sette trasduttori di pressione sono posti nella colonna d'acqua oscillante. Di questi, 3 sono posizionati verticalmente nella sezione di mezzeria, al di sotto della turbina, una coppia di trasduttori è posta al centro della metà lato sud del cassone, mentre la seconda coppia è posta specularmente alla prima rispetto alla mezzeria. Tale disposizione è utile per valutare eventuali spostamenti relativi della superficie libera interna alla camera; inoltre, la loro disposizione verticale permette di calcolare velocità ed accelerazioni, importanti nella fase di studio della dinamica dell'impianto. Per la localizzazione longitudinale degli strumenti fare riferimento alla pianta di Figura 10.

Ulteriore strumentazione è impiegata nella camera d'aria ed all'interno del condotto che ospita la turbina. In particolare, sono presenti trasduttori per misurare la pressione interna della camera, e in prossimità della turbina. Infine, sono misurate le velocità di rotazione della turbina e la potenza istantanea generata/assorbita.

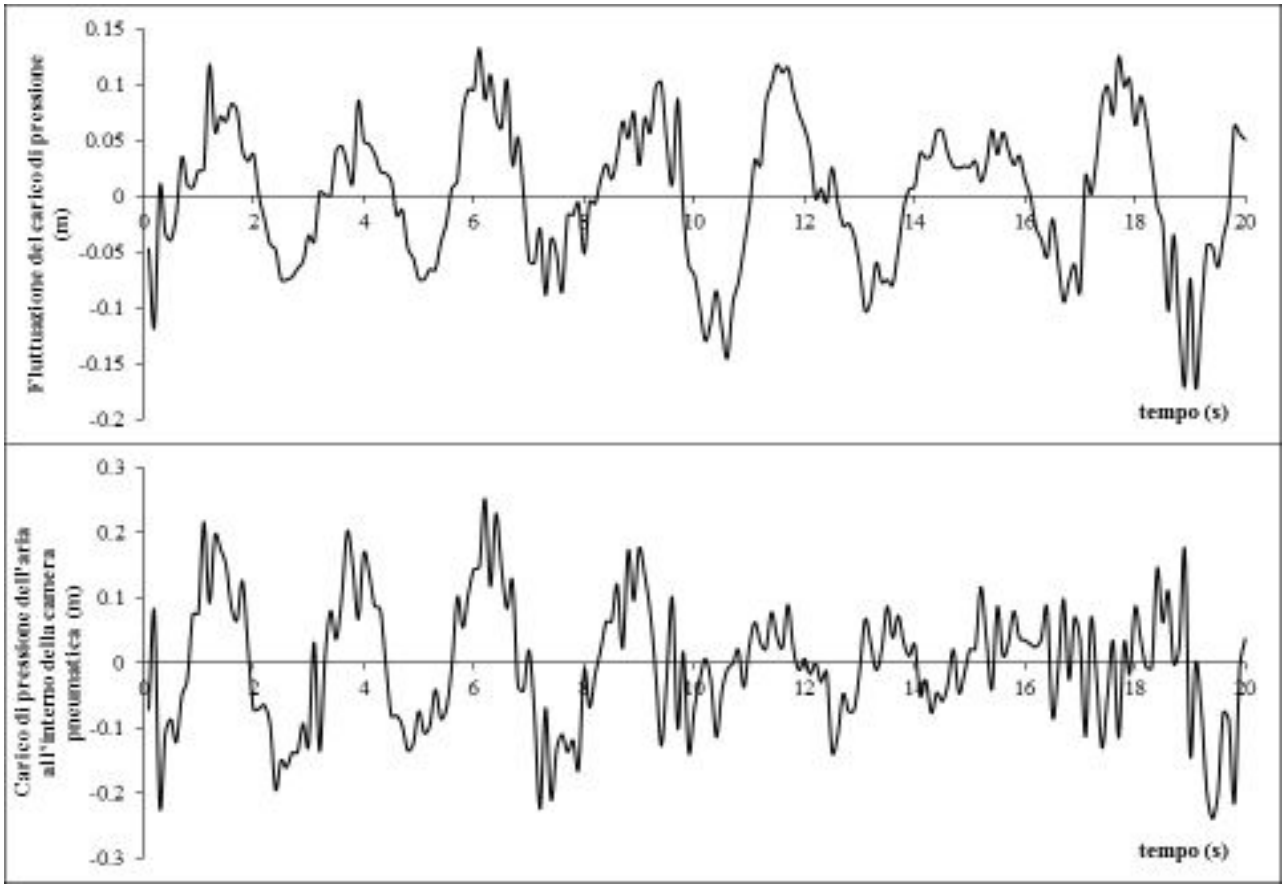


Figura 11. RECORD 1. Andamento temporale delle fluttuazioni di pressione sull'imboccatura del cassone REWEC3 misurate dal trasduttore di pressione (pannello superiore), e storia temporale delle pressioni dell'aria all'interno della camera di assorbimento (pannello inferiore). Il record si riferisce ad una condizione di funzionamento dell'impianto in assenza di turbina.

Prima fase. Una prima fase delle elaborazioni ha riguardato l'analisi del comportamento dell'impianto REWEC3 in assenza di turbina. Ciò al fine di effettuare un'analisi congiunta tra il gruppo dell'Università Mediterranea ed ENEA, sull'idrodinamica dell'impianto. Durante tale fase, infatti, hanno collaborato anche l'ing. Daniele Nicolini e l'ing. Alfredo Fontanella, che sono stati presenti presso il laboratorio NOEL durante la fase di acquisizione dati. Sulla base dei dati acquisiti, sono stati scelti alcuni record che potessero essere

oggetto di successive analisi, caratterizzati da valori dei parametri dello stato di mare tipici di pure onde di vento. Nello specifico, sono stati analizzati i seguenti due record:

i) RECORD1. Caratteristiche dello stato di mare in condizioni di campo indisturbato: altezza significativa $H_s = 0.42$m, periodo di picco $T_p = 2.42$m, parametro di larghezza dello spettro ψ^*=0.69.

i) RECORD2. Caratteristiche dello stato di mare in condizioni di campo indisturbato: altezza significativa $H_s = 0.46$m, periodo di picco $T_p = 2.52$m, parametro di larghezza dello spettro ψ^*=0.71.

I dati e i risultati di tali record sono stati oggetto di analisi da parte del gruppo dell'ENEA che ha testato e validato il proprio modello di calcolo, basato su analisi CFD, mediante i dati di input e di output misurati.

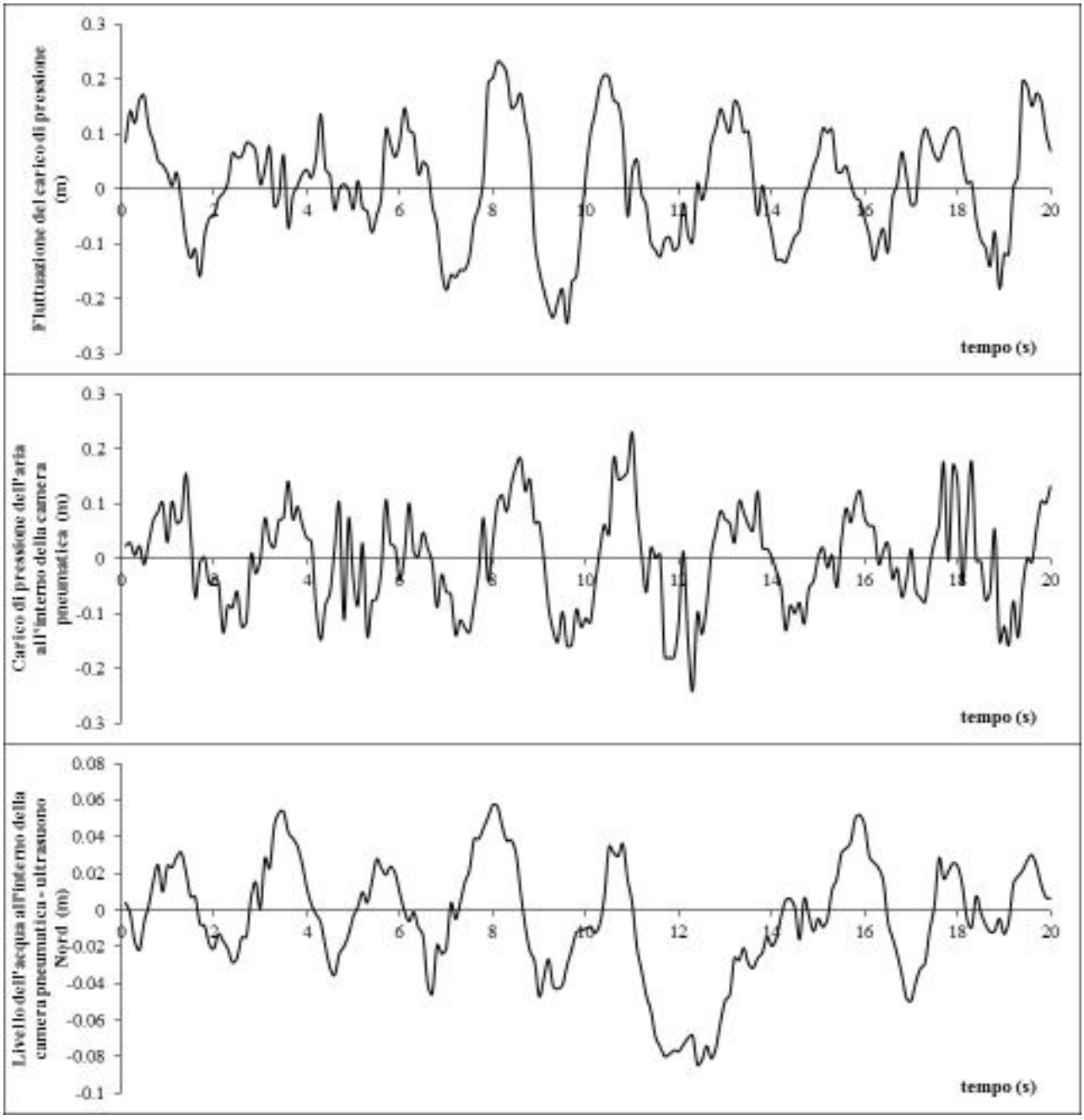


Figura 12. RECORD 2. Andamento temporale delle fluttuazioni di pressione sull'imboccatura del cassone REWEC3 misurate dal trasduttore di pressione (pannello superiore), e storia temporale delle pressioni dell'aria all'interno della camera di assorbimento (pannello centrale). Infine, nel pannello inferiore è raffigurata la storia temporale dei livelli dell'acqua all'interno della camera misurata dall'ultrasuono di nord localizzato all'interno del cassone secondo lo schema di Figura 10. Il record si riferisce ad una condizione di funzionamento dell'impianto in assenza di turbina.

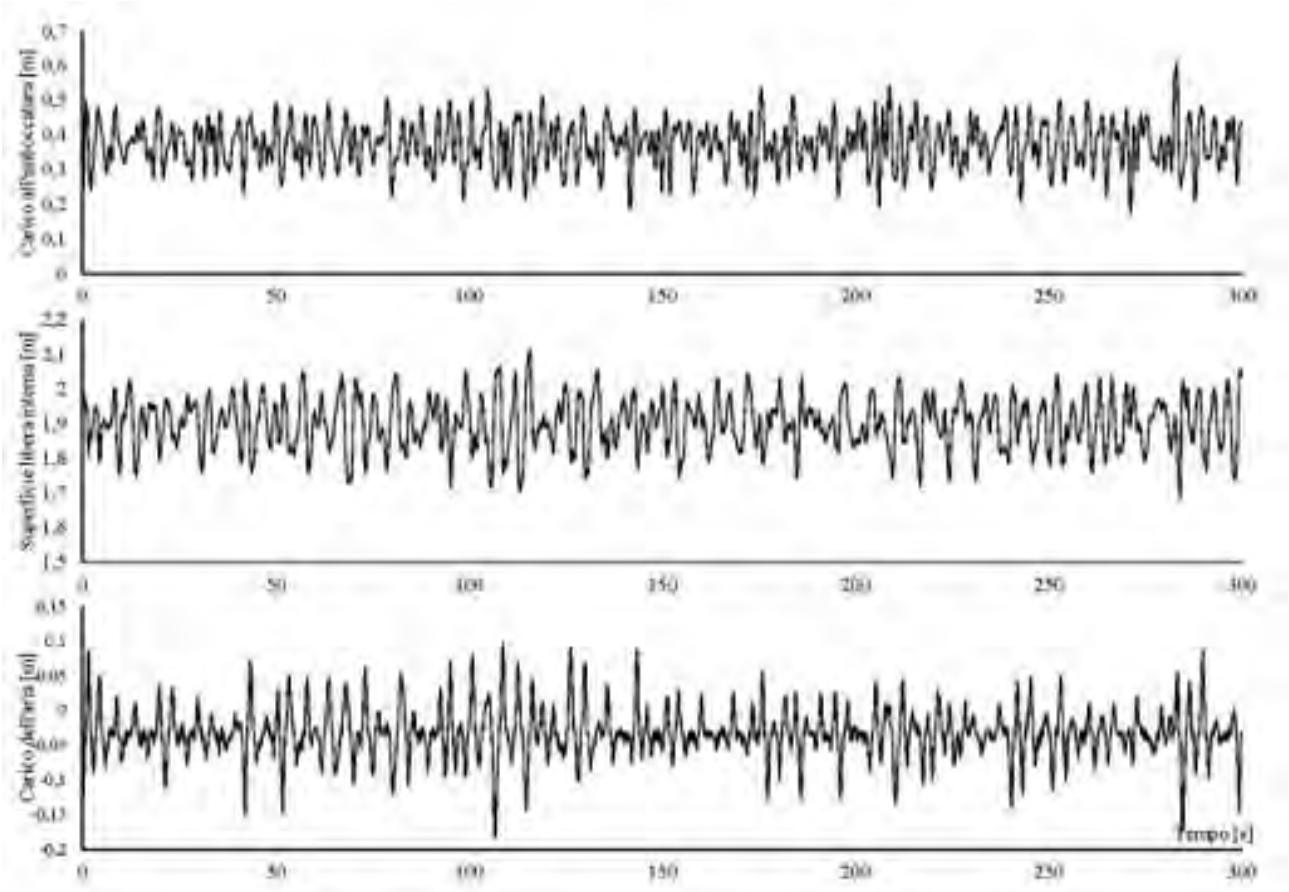


Figura 13a. Carico all'imboccatura, oscillazioni della superficie libera interna misurate dal coperchio della camera verso il basso, carico associato alla pressione nella camera pneumatica.

Tale fase è stata ulteriormente approfondita attraverso l'analisi della dinamica interna ed esterna dell'impianto. In particolare, sono state oggetto di approfondimenti le distribuzioni di pressione all'interno della camera ed all'esterno, in corrispondenza del muro para onde. La strumentazione utilizzata per lo scopo consta di trasduttori di pressione e sonde ultrasoniche poste lungo la verticale, nella sezione di mezzeria del cassone. Le figure 13-17 mostrano gli output ottenuti dalle registrazioni. Come peri precedenti record, queste registrazioni fanno riferimento a stati di mare di 5 minuti, campionati ogni 0.1s, per un totale di 3000 campioni.

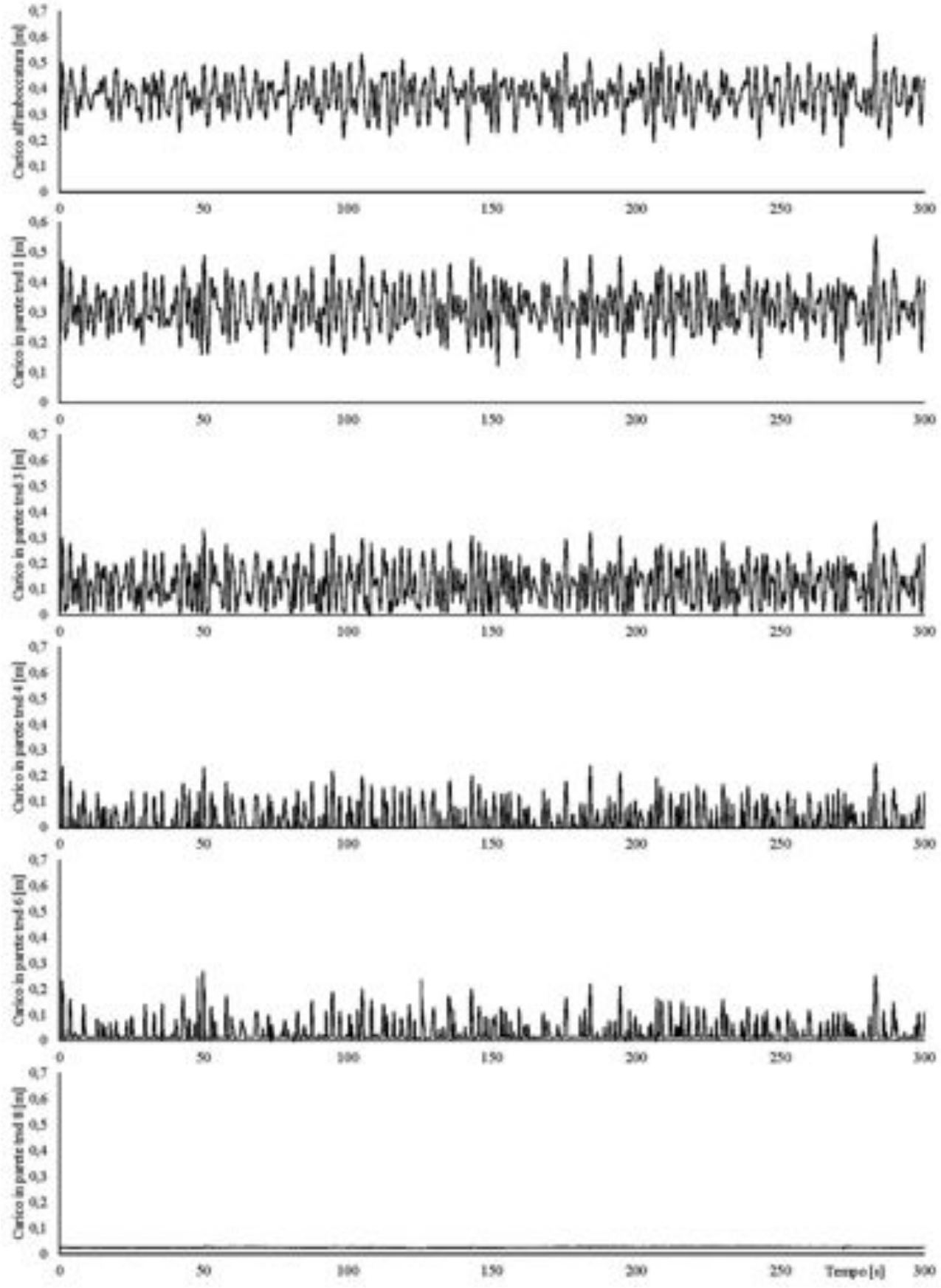


Figura 13b. Carico all'imboccatura, carico in parete a quote crescenti.

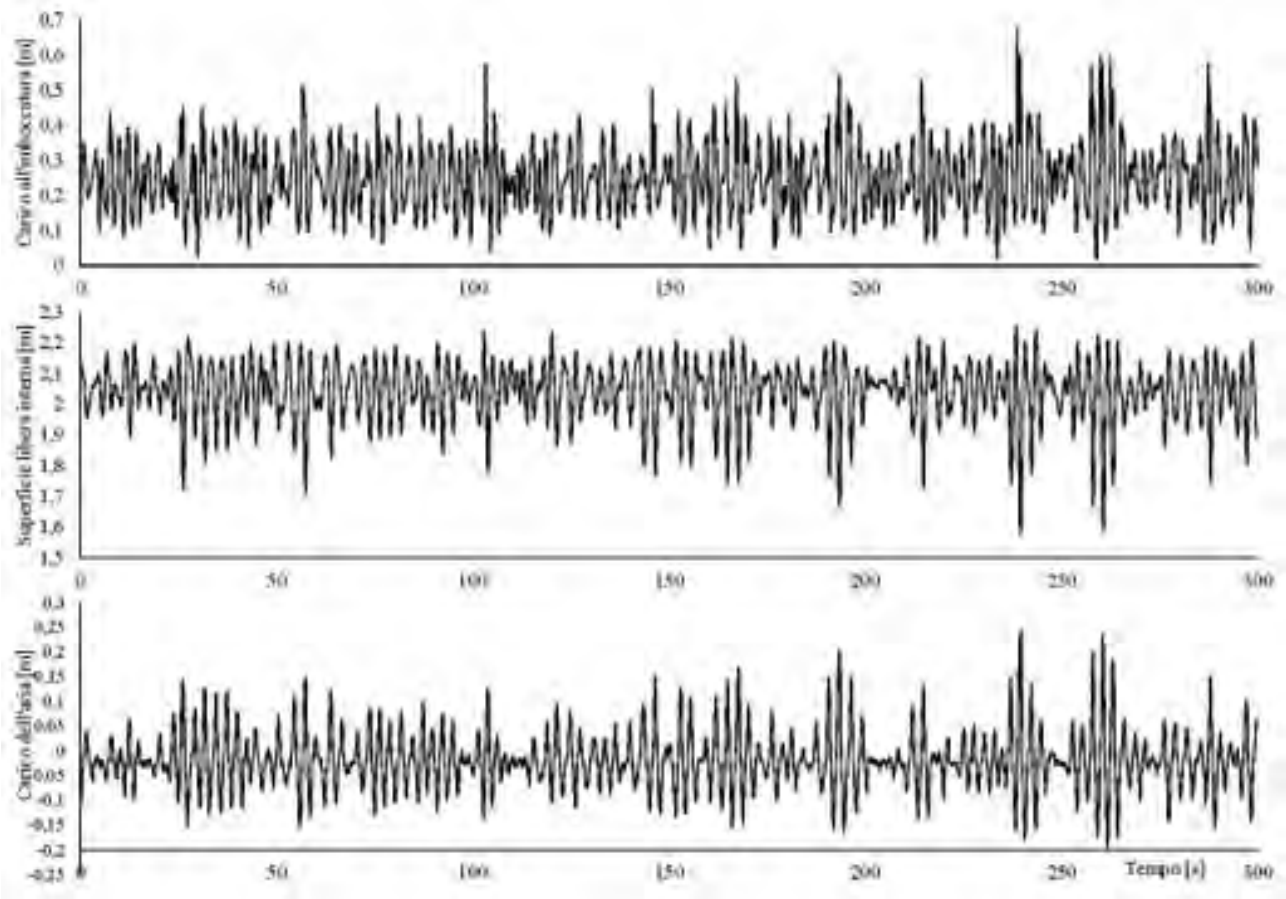


Figura 14a. Carico all'imboccatura, oscillazioni della superficie libera interna misurate dal coperchio della camera verso il basso, carico associato alla pressione nella camera pneumatica.

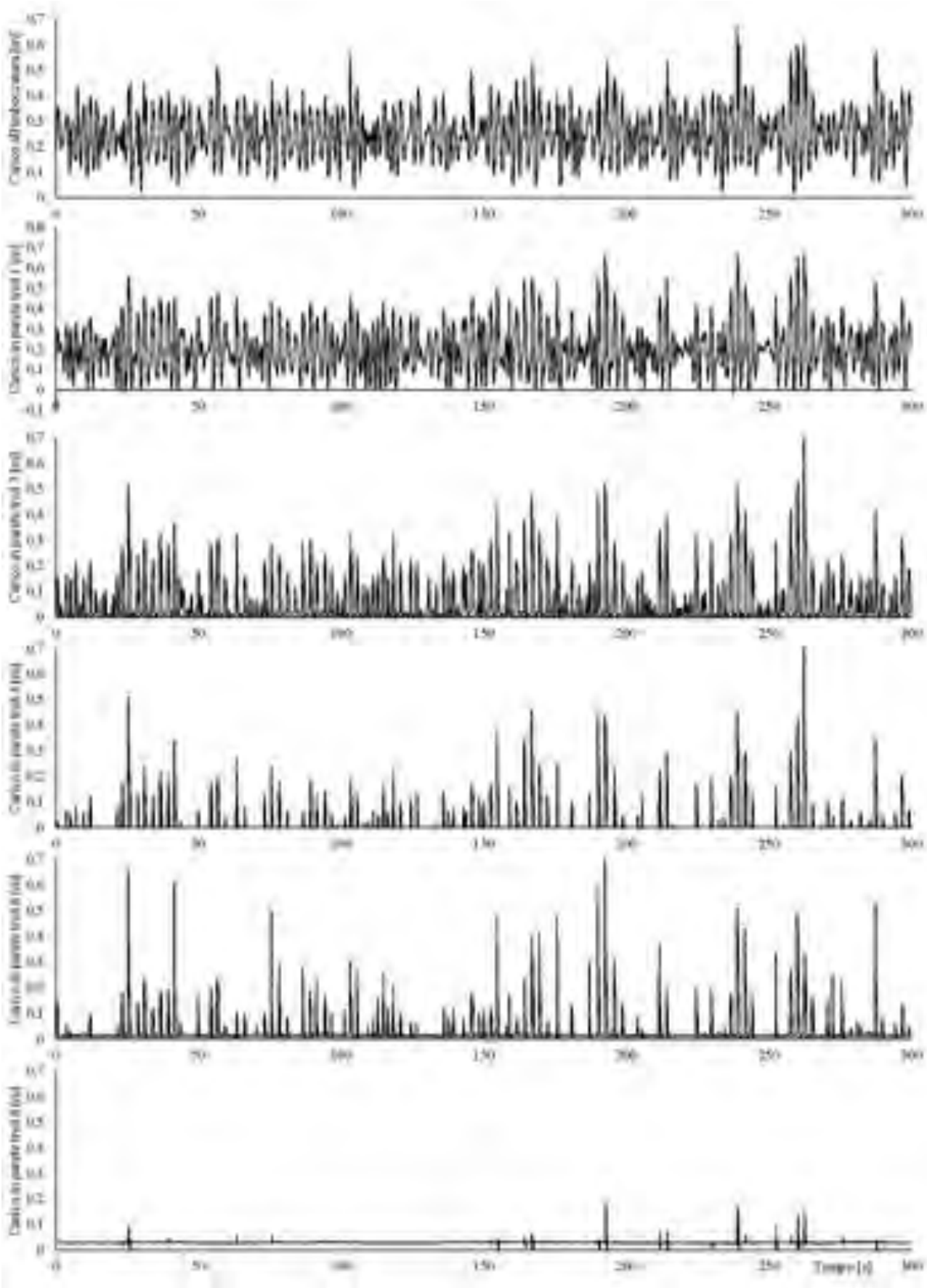


Figura 14b. Carico all'imboccatura, carico in parete a quote crescenti.

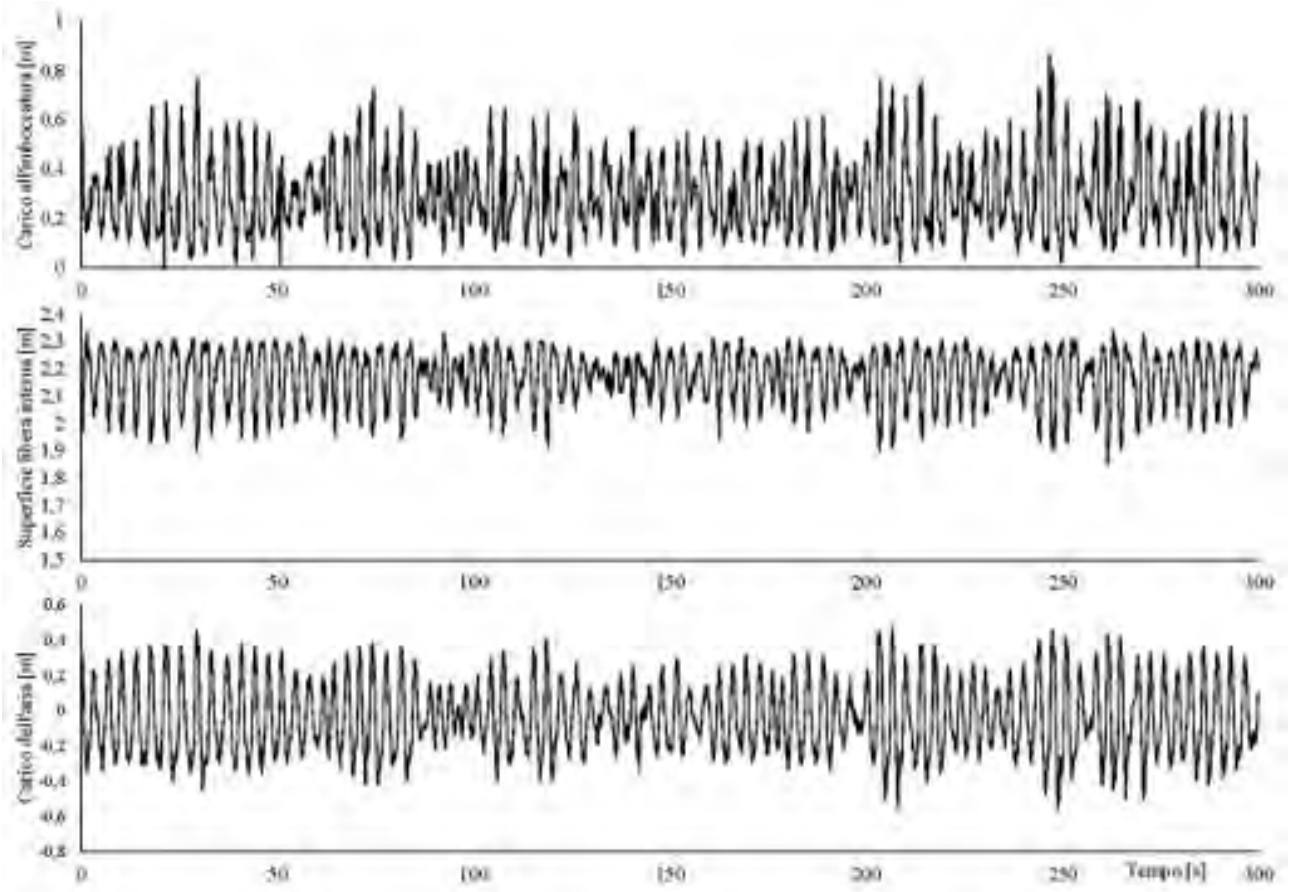


Figura 15a. Carico all'imboccatura, oscillazioni della superficie libera interna misurate dal coperchio della camera verso il basso, carico associato alla pressione nella camera pneumatica.

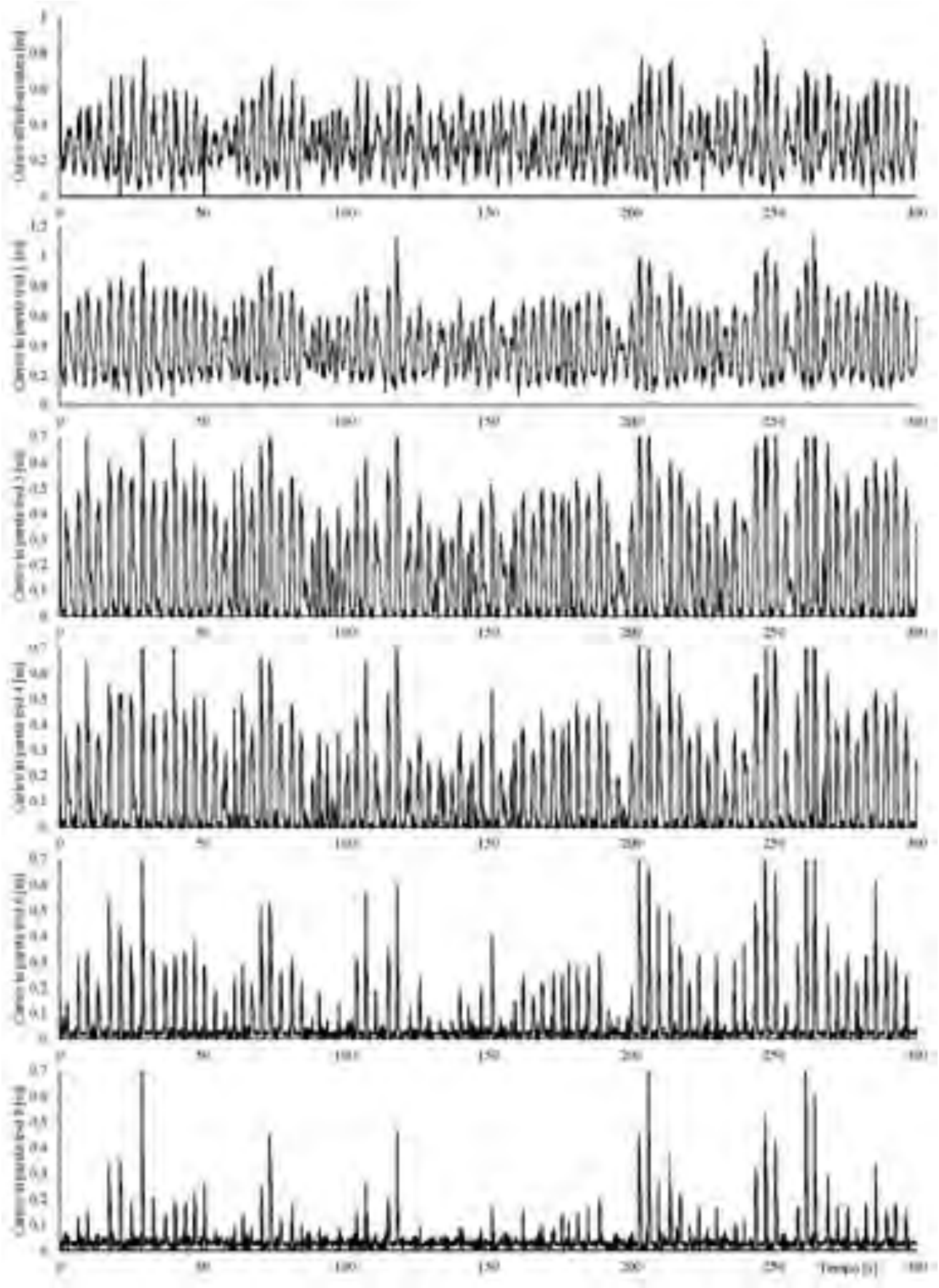


Figura 15b. Carico all'imboccatura, carico in parete a quote crescenti.

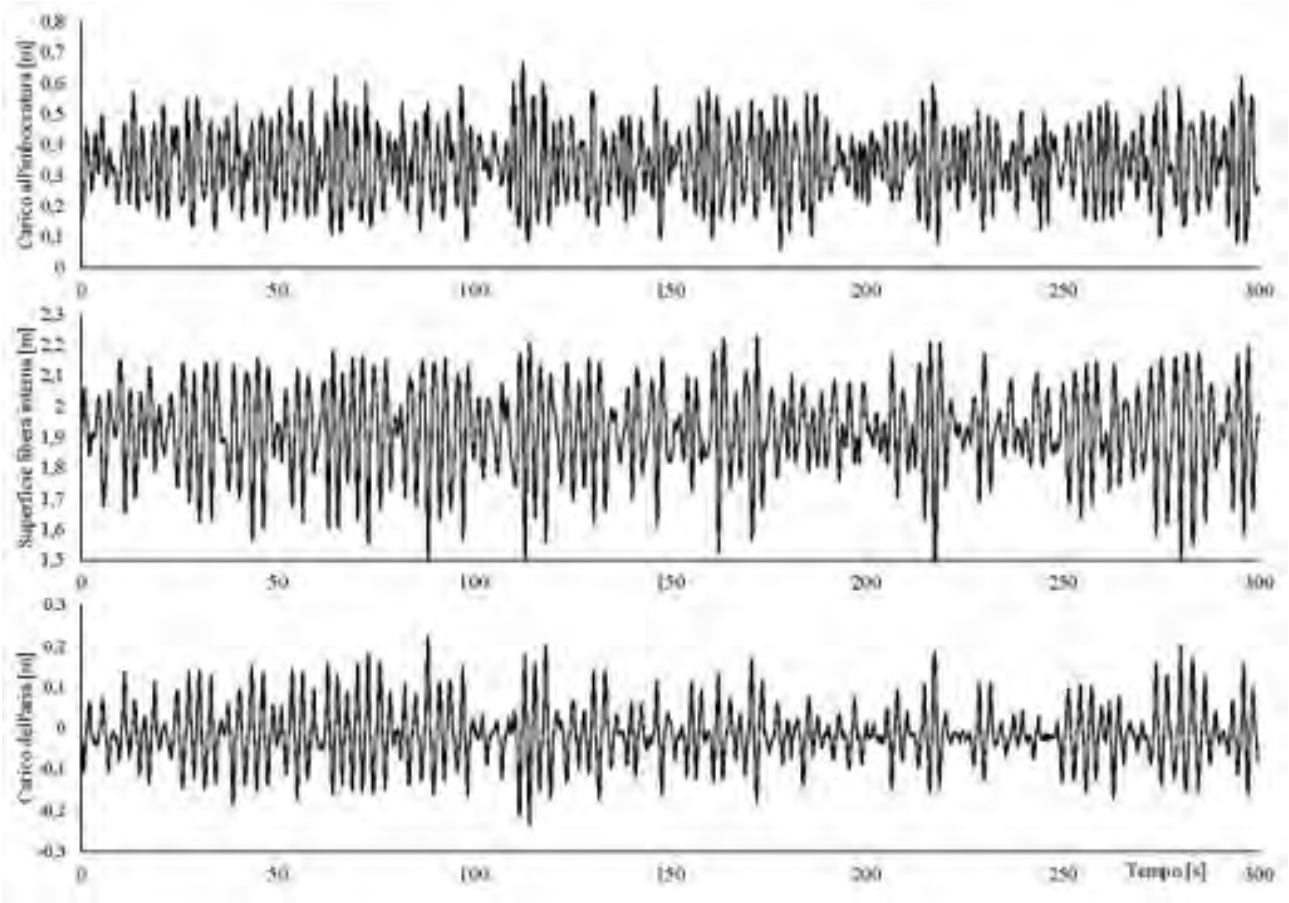


Figura 16a. Carico all'imboccatura, oscillazioni della superficie libera interna misurate dal coperchio della camera verso il basso, carico associato alla pressione nella camera pneumatica.

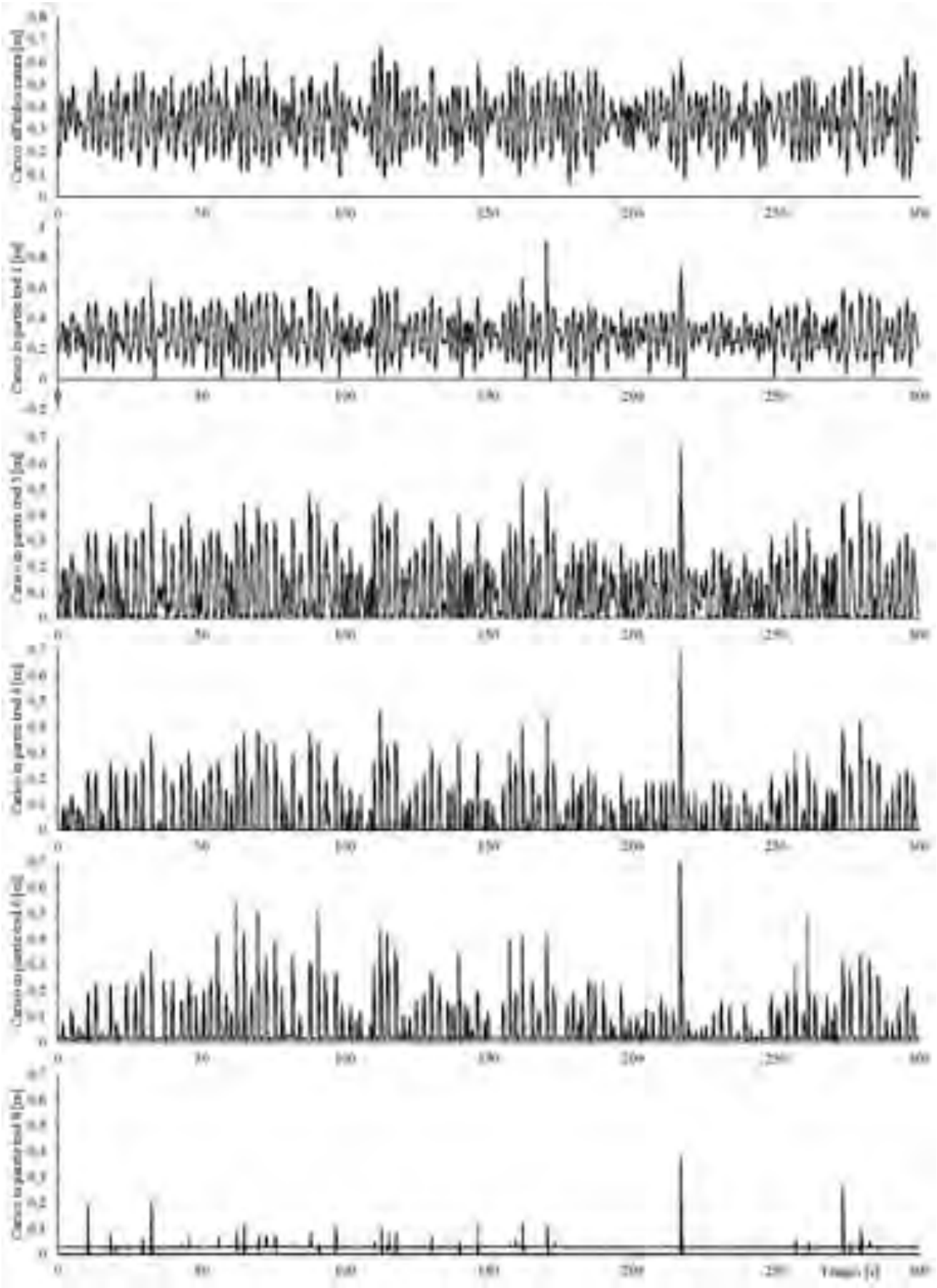


Figura 16b. Carico all'imboccatura, carico in parete a quote crescenti.

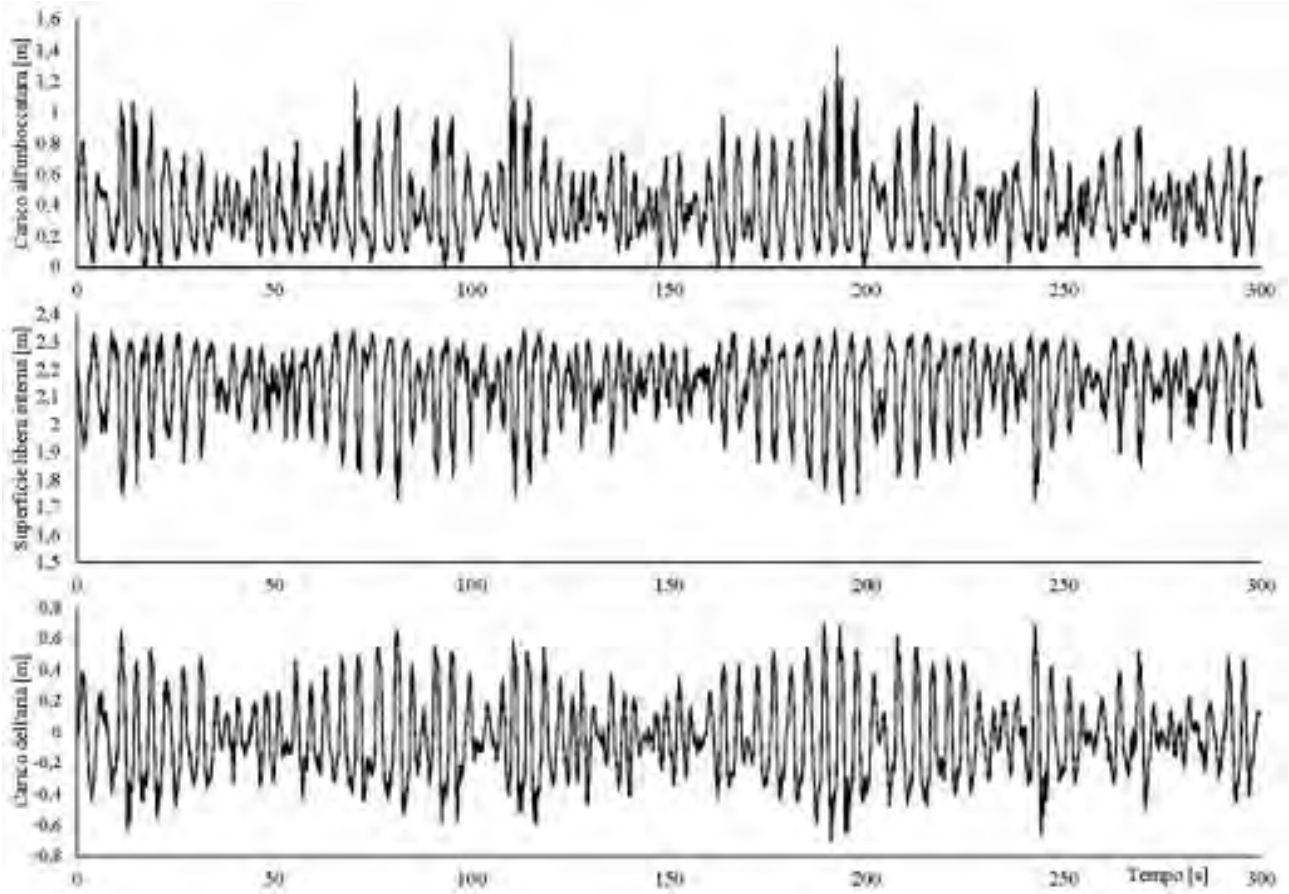


Figura 17a. Carico all'imboccatura, oscillazioni della superficie libera interna misurate dal coperchio della camera verso il basso, carico associato alla pressione nella camera pneumatica.

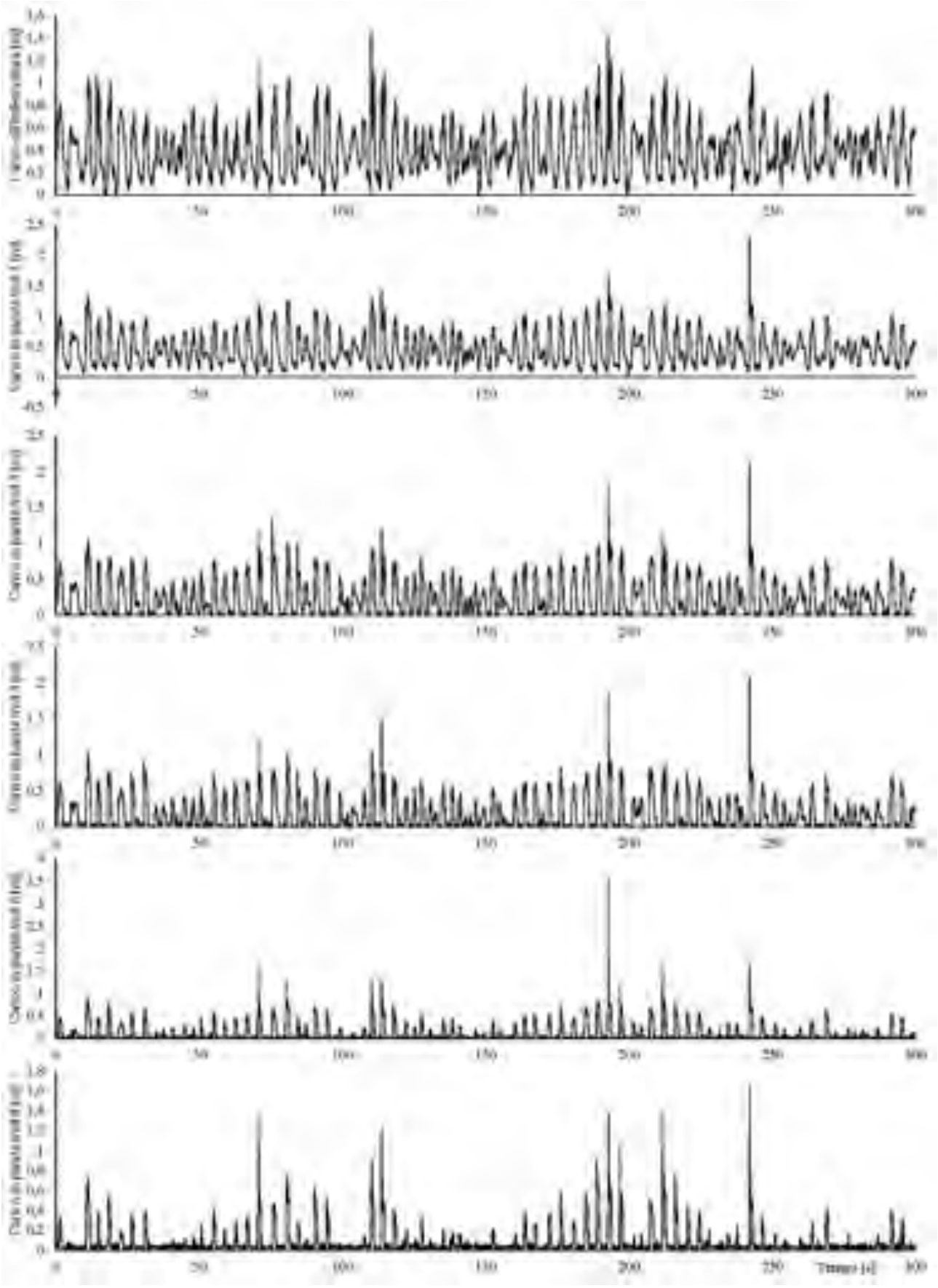


Figura 17b. Carico all'imboccatura, carico in parete a quote crescenti.



Figura 18. Sequenza di immagini relative alla mareggiata del 01.09.2014 presso il NOEL.

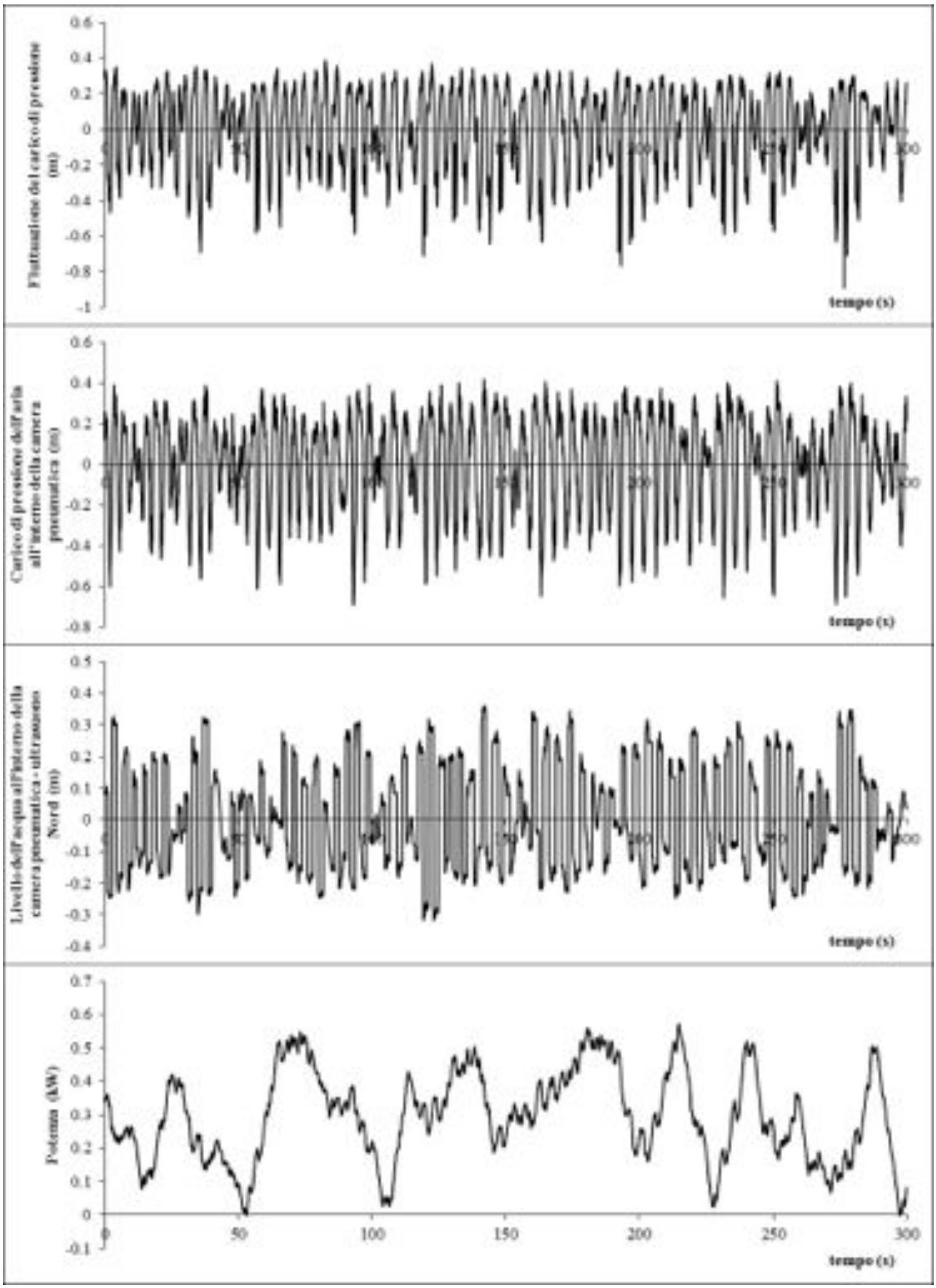


Figura 19. RECORD 3. Il record si riferisce ad una condizione di funzionamento dell'impianto in presenza di turbina funzionante durante la tempesta del 01.09.2014.

Seconda fase. La seconda fase delle elaborazioni ha riguardato l'analisi del comportamento dell'impianto REWEC3 in presenza di turbina di Wells funzionante. In data 01.09.2014, a conclusione avvenuta del progetto POSEIDONE, si è registrata una forte tempesta presso il NOEL durante la quale è stato possibile acquisire registrazioni che hanno rivelato la grande efficienza energetica, sia in termini di assorbimento che energia prodotta, del sistema REWEC3-turbina. Sono stati raggiunti gli obiettivi sperimentali che erano stati prefissati in fase progettuale. Una sequenza di immagini sono riportate in Figura 18, illustrando una fase dell'evoluzione della tempesta del 01.09.2014. Tra gli stati di mare misurati, il picco massimo di potenza prodotta dalla turbina è stato di 1.88 kW e il valore medio di potenza assorbita in uno stato di mare ha raggiunto il valore massimo di 533 W.

In Figura 19, sono riportati i risultati relativi ad uno dei record che hanno caratterizzato la tempesta dell'1 settembre 2014. Partendo dall'alto verso il basso è riportato: l'andamento temporale delle fluttuazioni di pressione sull'imboccatura del cassone REWEC3 misurate dal trasduttore di pressione, la storia temporale delle pressioni dell'aria all'interno della camera di assorbimento, e dei livelli dell'acqua all'interno della camera misurata dall'ultrasuono di nord localizzato all'interno del cassone secondo lo schema di Figura 10. Infine, è riportato l'andamento nel tempo della potenza prodotta dalla turbina. Per lo stato di mare illustrato la potenza massima prodotta è stata di 0.57 kW. Lo stato di mare in condizioni di campo indisturbato è caratterizzato dalle seguenti grandezze: altezza significativa H_s =0.99m, periodo di picco T_p =4.00m, parametro di larghezza dello spettro ψ^*=0.614. La potenza media dello stato di mare incidente è pari a 0.85 kW/m. L'impianto è stato capace di assorbire circa 600 W, e la potenza prodotta dalla turbina è stata, invece, in media pari a circa 300 W durante lo stato di mare.

3 Conclusioni

Obiettivo finale del presente report era eseguite ulteriori prove sperimentali su un cassone REWEC3 con installata turbina di tipo Wells già installata nel laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Le prove avevano lo scopo di integrare quelle già esistenti al fine di determinare le configurazioni ottimizzate per l'impianto per rendimenti di conversione del moto ondoso incidente e di produzione di energia elettrica per diverse condizioni ondose. I risultati ottenuti e le verifiche effettuate, hanno dimostrato l'ottimo livello di efficienza dell'impianto sia in assenza che in presenza di turbina funzionante. Sono stati registrati stati di mare in cui la potenza prodotta dalla turbina ha registrato il picco di 1.5 kW, raggiungendo anche valori maggiori. Le analisi effettuate hanno avuto un duplice scopo. Quello di validare il comportamento del sistema REWEC3 per l'assorbimento dell'energia ondosa e la produzione di energia; e dall'altro quello di fungere da base per la validazione del modello CFD implementato da ENEA nonché di progettare un ulteriore fase sperimentale da effettuarsi su un cassone REWEC3, finanziato da ENEA, a geometria variabile per lo studio di una progettazione ottimizzata degli impianti U-OWC.

4 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,
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. (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

Arena, F., Laface, V., Malara, G., Romolo, A., Viviano, A., Fiamma, V., Sannino, G., Carillo, A. (2014) Wave climate analysis for the design of wave energy harvesters in the Mediterranean Sea, under peer review

5 Acronimi

REWEC3 : REsonant Wave Energy Converter, release n. 3

OWC : Oscillating Water Column