

IL LABORATORIO NATURALE DI REGGIO CALABRIA (ITALIA MERIDIONALE): IL PRIMO AD OPERARE DIRETTAMENTE IN MARE

THE NATURAL LABORATORY OF REGGIO CALABRIA (SOUTHERN ITALY): THE FIRST TO OPERATE DIRECTLY IN THE SEA

GIUSEPPE BARBARO(*)

(*) Università degli Studi "Mediterranea" di Reggio Calabria - Dipartimento di Meccanica e Materiali - giuseppe.barbaro@unirc.it

RIASSUNTO

Nella memoria vengono descritti gli esperimenti sulla teoria del quasi-determinismo o dei gruppi di onde introdotta da Boccotti sia per il campo di onde progressive che stazionarie. Tali esperimenti sono stati realizzati nel mare di Reggio Calabria che rappresenta, grazie ad una combinazione di fattori favorevoli, un laboratorio naturale dove si realizzano delle onde che rappresentano modelli in scala ridotta di forti mareggiate mediterranee e oceaniche.

TERMINI CHIAVE: modelli in scala, esperimenti in campo, laboratorio, onde, strutture marittime, forze, strumenti di misura

INTRODUZIONE

BOCCOTTI (1983, 1984, 1988, 1989, 1997, 2000) introdusse la teoria di quasi determinismo delle onde di mare o teoria dei gruppi di onde.

La verifica di tale teoria richiedeva di operare in mare con tecniche da laboratorio, quindi implicava una notevole innovazione. Si tenga presente che, normalmente, in mare vengono eseguite delle campagne di misura mentre gli esperimenti veri e propri vengono eseguiti nelle vasche di laboratorio. Ad esempio in mare, si misurano sistematicamente le dimensioni delle onde. Oppure in mare si rilevano le forme caratteristiche degli spettri come nel famoso progetto JONSWAP portato a termine negli anni '70 nel mare del Nord (HASSELMANN *et alii*, 1973).

L'esperimento è invece qualcosa di più impegnativo che richiede accuratezze maggiori, molti strumenti contemporaneamente operanti e condizioni idrauliche controllate.

Torniamo alla teoria del quasi determinismo. Essa dice: posto che un'onda d'altezza eccezionalmente grande si realizzi in un punto fissato x_o, y_o in un istante t_0 nel corso di una mareggiata, con quasi certezza è possibile prevedere cosa succederà in un'area con lati dell'ordine di alcune lunghezze d'onda tutto intorno a quel punto, prima e dopo l'istante t_0 . In particolare, la teoria mostra come un'onda eccezionalmente alta si forma per il passaggio di un ben definito gruppo tridimensionale.

Come si vede in Fig. 1, il gruppo di onde è un'unità fisica ben definita, tanto che la teoria ce lo mostra durante la sua evoluzione isolato dal contesto delle altre onde irregolari che formano la mareggiata. Si può infatti vedere, in Fig. 1, come il gruppo avanzi su un bacino tutt' intorno calmo.

ABSTRACT

In the paper the experiments on the quasi-determinism theory of the wave groups, introduced by Boccotti, are described both for the field of progressive and standing waves. These experiments have been carried out in the sea of Reggio Calabria that represents, for a combination of favorable environmental factors, a natural laboratory where some wind-generated waves occur, representing small scale models of strong Mediterranean and oceanic sea storms.

KEY WORDS: scale models, field experiments, laboratory, waves, maritime structures, forces, measure instruments

INTRODUCTION

BOCCOTTI (1983, 1984, 1988, 1989, 1997, 2000) introduced the quasi-determinism theory of sea waves or wave groups theory.

To verify this theory, there was the need to operate in the sea with laboratory methods, therefore implicating a remarkable innovation. It should be noted that, normally, some field measurements are performed in the sea while the experiments are performed in laboratory channels. For instance, in the sea, the wave dimensions and the characteristic forms of the spectra are measured as in the famous project JONSWAP completed in the Seventies in the North Sea (HASSELMANN *et alii*, 1973).

The experiment is instead something more complicated, asking for greater precision, many instruments working simultaneously and hydraulic-checked conditions.

The quasi-determinism theory predicts that when an exceptionally high wave occurs in a fixed point x_o, y_o at an instant t_0 during a sea storm, with quasi-certainty it is possible to foresee what will happen in an area with sides of the order of some wavelengths around that point, before and after the instant t_0 . In particular, the theory shows that an exceptionally high wave is formed due to the passage of a well defined three-dimensional wave group.

As shown in Fig. 1, the wave group is a well defined physical unity and the theory demonstrates that, during its evolution, it is isolated by the context of other irregular waves formed during the sea storm. In fact, Fig.1 shows the group advancing in a basin which is completely calm.

Il gruppo di onde ha una meccanica estremamente interessante: esso ha una fase di sviluppo durante la quale l'altezza dell'onda centrale cresce fino ad un massimo grazie ad una contrazione progressiva del fronte d'onda ed una fase di decadimento con caratteristiche opposte, cioè una fase durante la quale il fronte d'onda si ridistende e, come conseguenza, l'altezza dell'onda centrale diminuisce progressivamente. Le singole onde si muovono lungo l'involuppo; dunque esse nascono in coda al gruppo, crescono fino ad un massimo quando arrivano ad occupare la posizione centrale del gruppo e poi vanno a morire in testa al gruppo. E' vero tutto ciò? Bene, l'esperimento nel mare di Reggio Calabria avrebbe dovuto dare una risposta proprio a tale domanda.

Per "cattare" i gruppi di onde e rilevarne la conformazione furono montati in mare nove tralicci telescopici secondo la configurazione geometrica indicata nella Fig. 2.

Ciascun traliccio sosteneva due strumenti per la misura della quota istantanea dell'acqua e delle fluttuazioni di pressione sott'acqua. La sonda ultrasonica era situata ad una quota di 1.30 m sopra il level-

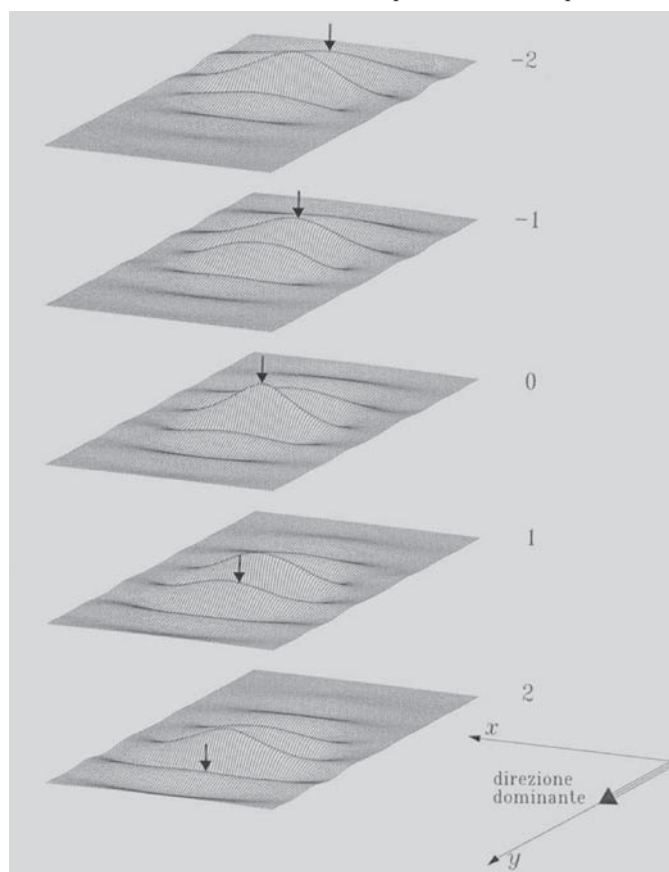


Fig. 1 - Cosa avviene quando un'onda di altezza assegnata H, eccezionalmente grande rispetto alla media del suo stato di mare, si realizza in un punto in mare aperto. Il punto è al centro dell'area inquadrata la quale è sempre la stessa in tutta la sequenza di immagini
 - *What happens when a wave of assigned height H, exceptionally high in comparison to the average height of its sea state, appears at a point in the open sea. The point is in the centre of the framed area which rests always the same in the sequence of the images*

The wave group has extremely interesting mechanics: it has a development stage during which the height of the central wave increases to a maximum, thanks to a progressive contraction of the wave front and a phase of decadence with opposite characteristics, during which the wave reduces itself and, as a result, the height of the central wave progressively decreases. The single waves stir along the envelopment; they are born in the tail of the group, grow to a maximum when they arrive to occupy the central position of the group and then go to die in the head of the group. Is this all true? Well, the experiment in the sea of Reggio Calabria gave an answer to this question.

To "capture" the wave groups and to notice their conformation, nine telescopic piles were built in the sea according to the geometric configuration shown in Fig. 2.

Every pile sustained two gauges for the measure of the instantaneous water level and the pressure fluctuations under the water. The ultrasonic probes were situated at a level of 1.30 m above the mean

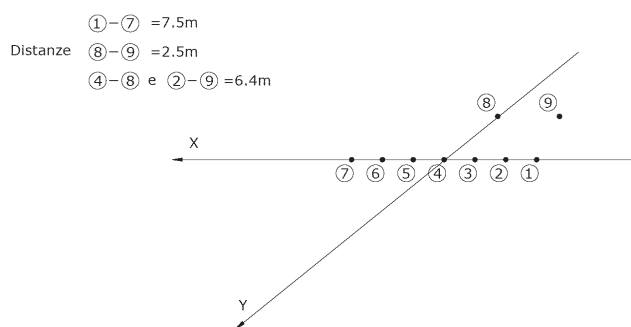


Fig. 2 - Disposizione planimetrica degli strumenti utilizzati durante l'esperimento RC 1990
 - *Plain disposition of the instruments used during the experiment RC 1990*



Fig. 3 - Esperimento RC1990: i tralicci che reggevano gli strumenti per la misura dell'elevazione d'onda (sonde ultrasoniche) e del carico di pressione (trasduttore di pressione)
 - *Experiment RC1990: the piles supporting the gauges for measurement of wave elevation (ultrasonic probes) and pressure fluctuations (pressure transducers)*

lo di medio mare (M.W.L.). Il trasduttore di pressione era posto ad una profondità di 0.50 m sotto il M.W.L. I due strumenti consentivano una doppia misura delle onde in un punto. La batteria dei tralicci doveva rappresentare una sorta di trappola e gli strumenti dovevano rilevare i gruppi che fossero eventualmente caduti nella trappola, e verificare se essi si muovevano e si trasformavano come previsto dalla teoria di quasi determinismo. Questo, in estrema sintesi il senso dell'esperimento Reggio Calabria 1990 (BOCCOTTI *et alii*, 1993a).

La figura 3 mostra i tralicci e gli strumenti di misura durante l'esperimento del 1990.

Gli strumenti erano collegati ad una stazione elettronica di acquisizione alloggiata nelle cabine del Lido Comunale di Reggio Calabria. La stazione era costituita da due calcolatori sui quali erano stati montati i convertitori analogico-digitali. Un programma predisposto per lo scopo gestiva la scansione delle acquisizioni, fissata in 10 campioni al secondo, per un massimo di 16 strumenti di misura collegati.

ESPERIMENTO REGGIO CALABRIA 1991: LA PRIMA STRUTTURA

La teoria di quasi determinismo è valida non solo per le onde progressive, ma anche per le onde soggette a fenomeni di rifrazione, riflessione e diffrazione.

Per confermare le previsioni della teoria relative alle onde soggette a riflessione e diffrazione, nel 1991, fu appositamente realizzata nel mare di Reggio Calabria una piccola diga foranea a parete verticale di 12 m di lunghezza e 2,1 m di altezza, su un fondale di 1,5 m. Davanti alla parete furono montati ben 30 strumenti di misure delle onde, lungo la parete furono montati 12 trasduttori di pressione. Altri 18 trasduttori furono distribuiti su due travi, una perpendicolare e l'altra parallela alla parete (cfr. Fig. 4). I trasduttori erano posti tutti alla medesima profondità di 0,60 m sotto il livello di medio mare. Le travi porta-trasduttori furono realizzate in struttura reticolare tale da compendiare massima rigidità e minima sezione di ingombro, ed erano sostenute dagli stessi tralicci telescopici utilizzati nel corso dell'esperimento 1990. Infine fu montata una sonda ultrasonica nel campo di onde indisturbate.

La configurazione spaziale degli strumenti fu decisa tenendo conto dell'obiettivo, verificare le previsioni sul modo in cui onde eccezionalmente alte si formano sulla parete e davanti alla parete stessa. Gli strumenti furono collegati alla stazione elettronica di acquisizione, mediante cavi sottomarini.

La parete durante l'esperimento 1991 sotto l'azione di una mareggiata di forte intensità è mostrata in Fig. 5. La teoria di quasi determinismo prevede che un'onda eccezionalmente alta sulla parete di una diga si forma perché un ben definito gruppo tridimensionale, come quello di Fig. 1, investe la diga stessa al culmine della fase di sviluppo. L'onda eccezionalmente alta è quella centrale del gruppo la quale si raddoppia a causa della riflessione. La teoria inoltre prevede che un'onda eccezionalmente alta nello specchio acqueo antistante la diga si formi per collisione frontale di due gruppi: uno in fase di avvicinamento e l'altro in fase di allontanamento dalla parete, dopo aver subito riflessione speculare.

water level (M.W.L.). The transducers were set to a depth of 0.50 m under the M.W.L. The two gauges allowed a double measurement of the waves at a single point. The set of columns should have represented a sort of trap and the gauges served to verify the waves stirred and transformed as foreseen by the quasi-determinism theory. This, in extreme synthesis, was the purpose of the experiment of Reggio Calabria in 1990 (BOCCOTTI *et alii*, 1993a).

Figure 3 shows the piles supporting the gauges during the RC1990 experiment.

The gauges were connected to an electronic acquisition station located at the "Lido Comunale" of Reggio Calabria. The station was constituted by two PCs containing the digital acquisition boards.

The data were acquired at 10 samples per second, with a maximum of 16 instruments connected simultaneously.

EXPERIMENT REGGIO CALABRIA 1991: THE FIRST STRUCTURE

The quasi-determinism theory is valid not only for progressive waves but also for waves subjected to phenomena of refraction, reflection and diffraction.

In 1991, in the sea of Reggio Calabria, to confirm the forecasts of the theory related to the waves subjected to reflection and diffraction, a small vertical breakwater was built (12 m long and 2.1 m high on a bottom depth of 1.5 m). In front of the wall, 30 gauges were located; 12 pressure transducers were fixed to the wall. Two beams, the one perpendicular and the other parallel to the wall (see scheme of Fig. 4) supported 18 pressure transducers. The transducers were all placed at the same depth: 0.60 m under the M.W.L.. The beams, which carried the transducers, were realized in a space frame structure to obtain maximum rigidity with the minimum section, and were sustained by the same telescopic piles used during the 1990 experiment. Finally, an ultrasonic probe was located in the progressive wave field.

The spatial configuration of the instruments was defined to predict the groups in which exceptionally high waves are formed, on the wall and in front of it. The instruments were connected to the electronic station by submarine wires.

Figure 5 shows the wall under the action of a severe sea storm, during the 1991 experiment. The quasi-determinism theory foresees that an exceptionally high wave on the wall is formed because a well defined three-dimensional group (see Fig. 1) hit the wall at the apex of its development stage. The exceptionally high wave is the one at the centre of the group, which doubles its height because of the reflection. Besides, the theory foresees that an exceptionally high wave, in the water sheet in front of the breakwater is formed as the result of a frontal collision of two groups: the one approaching the wall and the other leaving the wall, after the reflection. The experiment achieved the objective also this time: it

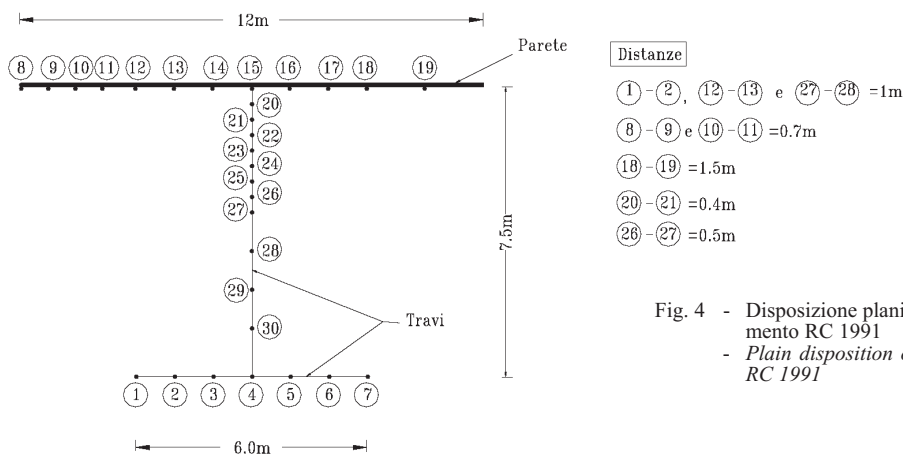


Fig. 4 - Disposizione planimetrica dei trasduttori di pressione utilizzati nell' esperimento RC 1991
 - Plain disposition of the pressure transducers used during the experiment RC 1991

Fig. 5 - Esperimento RC1991: parete in mare soggetta all'azione di una mareggiata di forte intensità
 - Experiment RC1991: wall in the sea subject to the action of a sea storm of strong intensity



Anche questa volta l'esperimento centrò l'obiettivo, nel senso che esso produsse una conferma netta e reiterata dei due modi caratteristici di formazione delle onde eccezionalmente alte: sulla parete e davanti alla parete stessa (BOCCOTTI *et alii*, 1993b). L'esperimento produsse poi la conferma di un'altra previsione teorica strettamente correlata alla teoria di quasi determinismo. Si tratta della previsione sulla drastica differenza tra onde di vento e onde periodiche in fatto di riflessione. Basti pensare che nelle onde di vento ad appena una lunghezza d'onda dalle dighe nodi ed antinodi scompaiono del tutto.

I PRIMI ESPERIMENTI IN MARE DI MODELLI IN SCALA RIDOTTA DI STRUTTURE MARITTIME

Nel 1992 e 1993 furono eseguiti due esperimenti, nel mare di Reggio Calabria, sulle azioni esercitate dalle onde su modelli in scala ridotta di strutture offshore. Si trattava dei primi esperimenti in assoluto su modelli in scala ridotta eseguiti direttamente in mare anziché nelle vasche di laboratorio. Nel 1992 fu montato in mare un modello in scala 1:50 di una grande piattaforma petrolifera del mare del Nord. Il modello, di altezza 3 m e diametro base 2 m, fu realizzato in acciaio con alcu-

produced a net confirmation of the two characteristic ways of formation of the high waves: on the wall and in front of it (BOCCOTTI *et alii*, 1993b). Then, the experiment confirmed another prediction of the quasi-determinism theory: in the wind waves, at just some wavelength from the breakwater, nodes and antinodes tend to disappear completely.

THE FIRST EXPERIMENTS IN THE SEA ON SMALL SCALE MODELS OF MARITIME STRUCTURES

In 1992 and 1993 in the sea of Reggio Calabria, two experiments were performed, regarding the wave forces on small scale models of offshore structures. They were the first experiments on small scale models directly performed in the sea. In 1992, a 1:50 scale model of a gravity platform, typically used in the North Sea for the oil extraction, was placed in the sea. The model (3 m height, 2 m base diameter), was made of steel with some inside

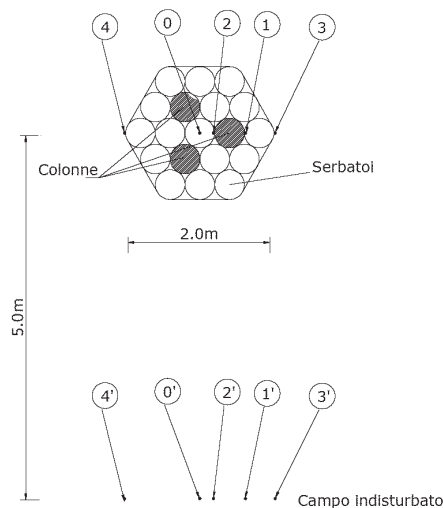


Fig. 6 - Disposizione planimetrica degli strumenti nel corso dell'esperimento RC 1992 : 0 - 0', sonde ultrasoniche per la misura dell'elevazione d'onda; 1 - 4, trasduttori di pressione sulla base della struttura; 1' - 4' trasduttori di pressione con la medesima configurazione di 1 - 4 ubicato in campo indisturbato
 - Plain disposition of the instruments during the experiment RC 1992: 0-0', ultrasonic probes for the measure of the wave elevation; 1-4 pressure transducers on the solid body; 1'-4' pressure transducers with the same configuration as 1-4 placed in the undisturbed field

ne zavorre interne in ghisa e fu appoggiato direttamente sul fondale marino alla profondità di 2.5 m. La base era composta da 16 serbatoi verticali di 0.40 m di diametro e di 1 m di altezza. Dalla base si ergevano 3 colonne tronco-coniche di sostegno del "deck". Le colonne avevano un'altezza di 2 m con diametro variabile gradualmente da 0.40 m a 0.24 m. I serbatoi di base furono riempiti di acqua ed un numero a scelta di serbatoi fu riempito d'aria grazie ad un impianto ad aria compressa comandato dalla spiaggia. In questo modo il peso della struttura era ridotto a piacere e poteva essere stimato il grado di sicurezza.

Gli strumenti di misura utilizzati furono 4 sonde ultrasoniche e 8 trasduttori di pressione. Un primo insieme di trasduttori fu applicato alla base e sulle colonne della piattaforma, un secondo insieme con la stessa configurazione spaziale del primo fu montato a 5 m dalla piattaforma in campo indisturbato (cfr. Fig. 6).

I due insiemi di trasduttori consentivano di stimare i coefficienti di diffrazione per le colonne e per la base della piattaforma. I trasduttori nel campo indisturbato erano sorretti da travi orizzontali fissate a loro volta a tralicci verticali. Anche nell'esperimento 1992 gli strumenti di misura erano collegati mediante cavi alla stazione elettronica di acquisizione alloggiata sempre nella cabina del Lido Comunale di Reggio Calabria.

La struttura in fase di varo è riportata in Fig. 7.

La struttura resse benissimo sotto l'azione degli stati di mare con altezza significativa di 0.50 m. Il collasso avvenne a seguito di una riduzione dell'85% del peso in acqua della struttura, e fu collasso per scorrimento.

Nel maggio 1993, fu eseguito un nuovo esperimento sulla modellistica. Fu montato il modello in scala 1:30 di un tunnel sommerso del tipo previsto per l'attraversamento stabile dello Stretto di Messina. Il modello in acciaio, di lunghezza 4.0 m e diametro 0.9 m, fu fissato a 2 piedritti poggianti direttamente sul fondo marino a 3 m di profondità. Impostazioni ed obiettivi erano analoghi a quelli dell'esperimento precedente. Anche in questo esperimento furono utilizzati due insiemi di trasduttori di pressione. Uno sulla superficie del tubo e l'altro in

ballasts in iron. The water depth was 2.5 m. The base was constructed with 16 vertical reservoirs having diameter of 0.40 m and height 1 m. From the base, 3 trunk-conic columns of support of the deck were created. The columns had height of 2 m and diameter gradually varying from 0.40 m to 0.24 m. The base reservoirs were filled partially with water and partially with some air pumped by means of a compressor running on the beach. In this way the weight of the structure could be varied and the overall stability could be evaluated.

The measure instruments used were 4 ultrasonic probes and 8 pressure transducers. A first group of transducers were applied at the base and at the columns, a second group with the same spatial configuration as the first one, was located at a distance of 5 m from the base in the undisturbed field (see Fig. 6).

The two transducers group allowed us to estimate the diffraction coefficients for the columns and for the platform base. The transducers in the undisturbed field were supported by horizontal beams supported by vertical piles. Also in the 1992 experiment, the measure instruments were connected through cables to an electronic station located in the boxes of the "Lido Comunale" of Reggio Calabria.

The launching of the platform is shown in Fig. 7.

The structure held up very well under the action of the sea states with significant height of 0.50 m. The collapse happened following a reduction of 85% of the immersed weight of the structure, and it collapsed due to sliding.

In May 1993, a new small scale field experiment was carried out. The 1:30 scale model of a submerged tunnel for the crossing of the Messina Strait was made. The steel model had a length of 4.0 m and a diameter of 0.9 m, it was supported by piles placed on a seabed at 3 m depth. Formulations and objectives were analogous to those of the preceding experiment. Also in this experiment two groups of pressure transducers were used. One group, on the surface of the cylinder and the other in the undisturbed field, with the same spatial configuration as the first group (see Fig. 8).



Fig. 7 - Esperimento RC1992: il modello della piattaforma offshore in fase di varo
 - Experiment RC 1992: the launching of the offshore platform model

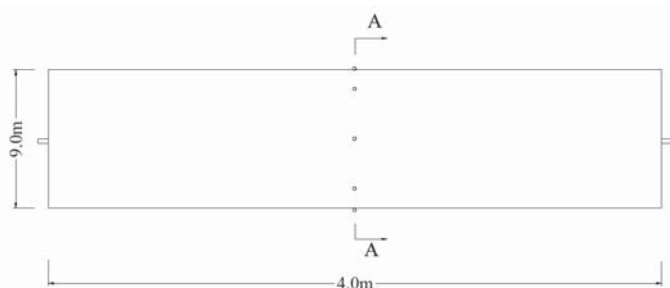


Fig. 8 - Esperimento RC 1993: disposizione dei trasduttori di pressione lungo la superficie del tunnel
 - Experiment RC 1993: disposition of the pressure transducers along the surface of the tunnel

campo indisturbato, con la medesima configurazione spaziale del primo insieme, e su un fondale di uguale profondità (cfr. Fig. 8).

I trasduttori in campo indisturbato furono applicati ad una raggiera fissata ad un traliccio. La batteria degli strumenti fu completata da 3 sonde ultrasoniche. La prima sonda fu posizionata sulla verticale per il centro del cilindro, cioè sulla stessa verticale dei trasduttori 1 e 5. La seconda e la terza sonda furono posizionate in campo indisturbato ed utilizzate per la stima della direzione delle onde. Il modello del tunnel per l'attraversamento stabile della Sicilia e della Calabria è mostrato in Fig. 9.

Nel Maggio del 1994 fu ricostruita la barriera al fine di studiare l'azione del moto ondoso sulla parete e l'evoluzione nel tempo del litorale, a seguito della realizzazione della stessa. Inizialmente, la diga aveva le stesse dimensioni di quella utilizzata durante l'esperimento del 1991 (12 m lunga e 2.2 alta su un fondale di 1.5 m), ma in seguito essa fu ridotta ad una lunghezza di 9.6 m dopo che una mareggiata, particolarmente violenta, distrusse la fondazione della struttura. La diga era costituita da dieci moduli, tra loro connessi tramite bullonatura. Ciascun modulo possedeva un traliccio ed era supportato da due pannelli in alluminio. La figura 10 riporta un modulo della parete utilizzata durante l'esperimento sulla spiaggia.

Centralmente la struttura fu attrezzata con 11 trasduttori di pressione collegati alla stazione a terra tramite dei cavi sottomarini. Inoltre due sonde ultrasoniche posizionate in campo indisturbato misuravano le onde progressive. Per ciascuno strumento, la frequenza di campionamento era di 10 Hz come nell'esperimento precedente.

The transducers in the undisturbed field were applied to a radiant crown fixed to a pier. The battery of the instruments was completed by 3 ultrasonic probes. The first probe measures the surface waves in the centre of the cylinder, that is on the same vertical as the transducers 1 and 5. The second and the third probe were positioned in the undisturbed field and it was used to determine the direction of propagation and the significant wave height of the incident waves. Figure 9 shows the tunnel model for the permanent connection between Sicily and Calabria.

In May 1994 the breakwater was rebuilt with the aim to study the wave forces on the wall and the planform evolution of the shoreline behind the breakwater. The wall had the same dimensions as the one used in the experiment RC 1991 (12 m long and 2.2 high on a water depth of 1.5 m). Subsequently, the length of the breakwater was reduced to 9.6 m after that the rubble mound foundation was seriously damaged by a few unusually severe sea states. The breakwater consisted of 10 modules which were connected by means of bolting. Each module framed the structure and supported two aluminum panels. The stability was ensured by iron ballasts constituting the wall. Figure 10 shows two of the 10 modules forming the breakwater.

In the central vertical section of the wall were placed 11 pressure transducers connected, by means of cables, to the electronic station located on the beach. Moreover, 2 ultrasonic probes, on two piles, measured the undisturbed surface waves. The sampling frequency was 10 Hz for each gauge as in the previous experiment. The purpose of the experiment was to verify the model of Hsu & Silvester (1990)



Fig. 9 - Esperimento RC1993: il modello del tunnel sommerso per l'attraversamento stabile Calabria-Sicilia
 - Experiment RC 1993: the model of the submerged tunnel for the jointing Calabria-Sicily



Fig. 11 - Esperimento 1994: accrescimento della spiaggia a tergo della barriera
 - Experiment RC 1994: beach accretion in the lee side of the barrier

te. Obiettivo dell'esperimento era quello di verificare il modello di HSU & SILVESTER (1990) sulla deformazione della linea di battigia a tergo di barriere parallele alla riva.

Il rapporto lunghezza diga/lunghezza d'onda era di poco superiore all'unità e corrispondeva quindi ad una situazione realistica di barriera soggetta ad una tipica mareggiata mediterranea. La spiaggia del Lido Comunale si deformò vistosamente raggiungendo in circa 4 ore una configurazione stabile. Come si può osservare in Fig. 11 si produsse un notevole avanzamento a tergo della barriera, mentre ai lati si aprirono due ampie zone di erosione pressoché simmetriche tra loro.

La figura 12 riporta il confronto tra il profilo deformato e la previsione di HSU & SILVESTER (BARBARO, 1996). La corrispondenza tra il profilo reale e quello sperimentale appare notevole. In particolare, esiste una corrispondenza perfetta per quanto riguarda il massimo avanzamento della linea di riva: 3.4 m il valore misurato, 3.4 m quello previsto. Inoltre la posizione del punto di massima erosione è lo



Fig. 10 - Un modulo della parete in fase di assemblaggio sulla spiaggia durante l'esperimento Reggio Calabria 1994
 - Experiment RC 1994: the wall in the assembling phase

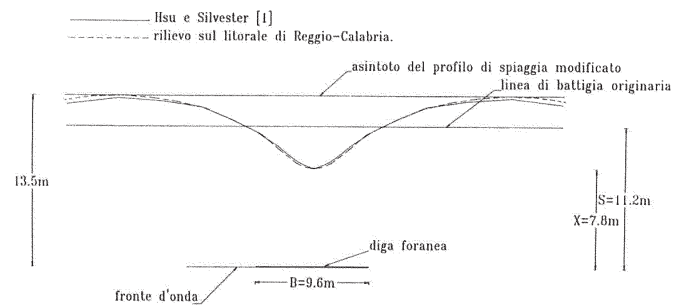


Fig. 12 - Confronto tra il profilo di spiaggia ottenuto con il modello di HSU & SILVESTER (linea continua) e il profilo sperimentale (linea tratteggiata) ricavato sul litorale di Reggio Calabria
 - Comparison between the beach profile predicted by the HSU & SILVESTER model (continuous line) and the actual profile (dashed line) of the shore of Reggio Calabria

on the beach planform evolution caused by a barrier parallel to the shore. The quotient between the length of the wall and the wavelength was nearly 1 and it corresponded therefore to a usual barriers employed in the Mediterranean sea. The beach of the "Lido Comunale" was considerably deformed, reaching, in about 4 hours, a stable configuration. Figure 11 shows the evident accretion produced in the lee of the barrier. Figure 12 shows the comparison between the measured profile and the predicted profile by the model of HSU & SILVESTER (BARBARO, 1996). The correspondence between the prediction and the experimental datum appears to be remarkable. In particular, there is a full agreement for what concerns the maximum accretion: 3.4 m the measured value, 3.4 m the prediction. Also the position of the maximum erosion is the same in the model and in the experimental result. The maximum erosion predicted by the model is on the other hand slightly smaller than the erosion measured on the field: 2.2 m against 2.4 m.

stesso nel modello e nel risultato sperimentale. La massima erosione prevista dal modello è leggermente più piccola di quella misurata in campo: 2.2 m contro 2.4 m.

Il risultato è ancor più significativo in quanto oltre alla verifica del predetto modello, l'esperimento del 1994 ha dimostrato in modo concreto che il laboratorio naturale di Reggio Calabria è idoneo non solo per esperimenti di ingegneria offshore ma anche per esperimenti di ingegneria costiera.

L'IDEA DEL LABORATORIO

Gli esperimenti Reggio Calabria 1990 e 1991 oltre a verificare la teoria di quasi determinismo ebbero anche un'altra importante conseguenza: essi dimostrarono che era possibile operare in mare con tecniche da laboratorio. Questo, grazie al fatto che a Reggio Calabria frequentemente il vento genera onde con dimensioni tipiche da grossa vasca di laboratorio, molto stabili nel tempo. Onde che rappresentano ottimi modelli in scala ridotta e similitudine di Froude di forti mareggiate. Diciamo modelli in scala 1:30 di forti mareggiate mediterranee, ovvero modelli in scala 1:50 di grandi tempeste oceaniche. Questa peculiarità dipende da una combinazione favorevole di condizioni difficilmente ripetibili. Primo, come già detto, la grande stabilità del vento locale il cosiddetto 'vento di canale' che soffia da Messina verso Reggio anche per diversi giorni consecutivi.

Secondo: l'orientamento della costa (cfr. Fig. 13) che risulta naturalmente protetta dalle onde di mare-lungo che provengono dall'imboccatura Sud dello Stretto. Infatti, le onde di mare-lungo sarebbero in grado di falsare la similitudine di Froude. Infine l'escursione di marea è molto contenuta, e l'acqua è limpidissima grazie al passaggio due volte al giorno della corrente dello Stretto. La limpidezza dell'acqua è un altro requisito per l'attività sperimentale in mare. Infatti in mare tutti i montaggi vengono eseguiti per via subacquea.

Nacque così l'idea di un laboratorio di ingegneria marittima, un laboratorio a mare dove non solo si svolgessero esperimenti anziché campagne di misura.

LA NUOVA STRUTTURA DI LABORATORIO

Alla fine del 1994, sulla scorta dei risultati ottenuti, l'Università "Mediterranea" di Reggio Calabria decideva di realizzare una struttura stabile di laboratorio su un'area demaniale. L'iter della pratica si è concluso il giorno 6 maggio 1997 con la consegna da parte della Capitaneria di Porto di Reggio Calabria di un'area di 1.500 m² con relativo specchio acqueo antistante di 4.500 m², sul lungomare cittadino. Una volta terminato l'iter relativo alle autorizzazioni per la costruzione della struttura fissa del laboratorio si è proceduto alla realizzazione. I lavori sono stati ultimati nel 2000.

La figura 14 mostra la struttura definitiva del laboratorio realizzata sul lungomare di Reggio Calabria proprio al centro della via marina.

Grazie a tale struttura potranno essere effettuati nel nuovo laboratorio sia studi di ingegneria offshore sia studi su opere e/o progetti a difesa delle coste. I modelli avranno dimensioni più grandi dell'usuale,

The result is important, besides the verification of the aforementioned model, because the RC 1994 experiment has shown that in the natural laboratory of Reggio Calabria it is possible to carry out not only experiments of offshore engineering, but also experiments of coastal engineering.

THE IDEA OF THE LABORATORY

The experiments of Reggio Calabria in 1990 and 1991 had an important consequence: they showed that it was possible to operate in the sea with the same techniques used in laboratories. In fact, in Reggio Calabria the wind frequently produces waves with dimensions typical of big channels laboratory, which are very stable in time. Waves represent excellent small scale models in the Froude similarity of strong sea storms. We refer to the 1:30 small scale models of strong Mediterranean sea storms or the 1:50 scale models of oceanic storms. This peculiarity depends on a favorable combination of hardly repeatable environmental conditions.

First, as already said, the high stability of the local wind, the so-called "wind of the Strait", blowing from Messina toward Reggio for many consecutive days.

Second: the orientation of the coast (see Fig. 13), which is naturally protected from the swells that propagate from the Southern mouth of the Strait (which are not small scale Froude models of wind waves, of course). Finally, the excursion of tide is very contained, and the water is clean thanks to the passage twice a day of the Strait current. The clearness of the water is another requisite for the experimental activity in the sea. In fact, in the sea, all the assemblages are performed by scuba divers.

The idea of a maritime engineering laboratory was mature, a sea laboratory where to carry out experiments rather than measure campaigns.

THE NEW STRUCTURE OF THE LABORATORY

At the end of 1994, thanks to the obtained experimental results, the "Mediterranean" University of Reggio Calabria decided to create a permanent laboratory on a public area. The administrative procedure was concluded on May 6th 1997 with the consign by the Port authorities of Reggio Calabria of an area of 1,500 m² with a water sheet of 4,500 m², along the city promenade. The realization of the laboratory was completed in 2000.

Figure 14 shows the definitive structure of the laboratory placed in the promenade of Reggio Calabria.

In the new laboratory, studies will be carry out on offshore and coastal engineering. The physical models will have greater dimensions than the usual one and it will be possible practically eliminate the distortions due to small scale effects. For having an idea of this aspect, one should consider that the platform models typi-



Fig. 13 - Sito del laboratorio
- Site of the laboratory

ciò che praticamente annullerà le distorsioni di scala. Per avere un'idea di questo aspetto si pensi che gli studi in vasca delle grandi piattaforme del Mare del Nord furono effettuati in scala 1:125, mentre il modello della piattaforma dell'esperimento Reggio Calabria 1992, come già detto, era in scala 1:50. Soprattutto la qualità del modello sarà notevolmente migliore di quella ottenibile nelle tradizionali vasche di laboratorio. Inoltre è importante sottolineare che nella nuova sede del laboratorio i costi saranno radicalmente ridotti, tenuto conto che abbiamo letteralmente azzerato i grandi oneri connessi alle macchine per la generazione delle onde, impiegate nelle tradizionali vasche di laboratorio.

GLI ESPERIMENTI SULLO SFRUTTAMENTO DELL'ENERGIA DEL MOTO ONDOSO

Una volta realizzato il laboratorio stabile di ingegneria marittima si è deciso di provare in mare un nuovo impianto di sfruttamento dell'energia ondosa brevettato da BOCCOTTI (2004).

L'impianto consisteva nel modello 1:10 di un cassone cubico di 2,1 m di lato, appoggiato sul fondo del mare, nel quale si innestava un condotto verticale con una sezione contratta al centro. L'imboccatura superiore del condotto si trovava poco al di sotto della superficie del mare quella inferiore poco al disopra della base del cassone.

La figura 15 mostra la posa in opera, nel dicembre 2001, del cassone.

La parte superiore del cassone veniva riempita di aria e la sua

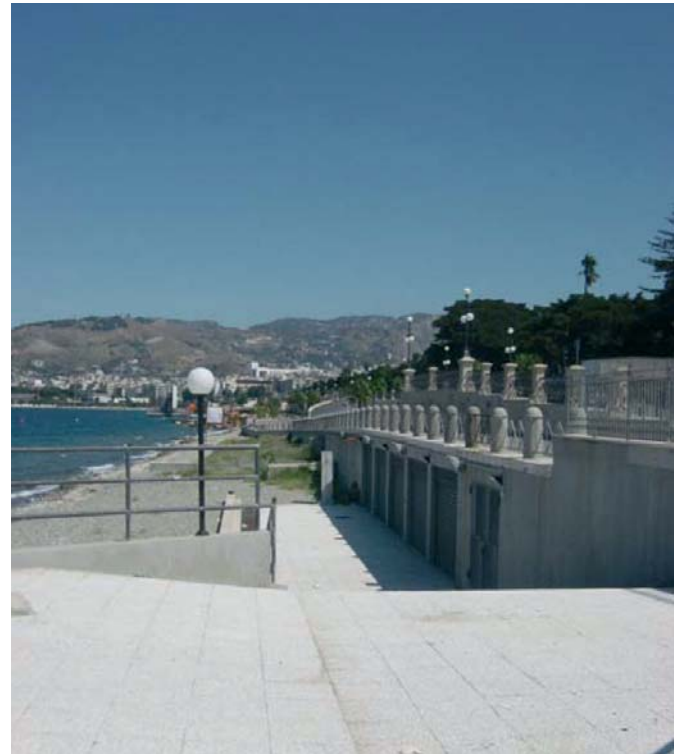


Fig. 14 - La struttura del laboratorio stabile di ingegneria marittima sul lungomare di Reggio Calabria
- The structure of the stable maritime engineering laboratory on the promenade of Reggio Calabria

cally used in the big channels were realized in the 1:125 scale, while the model used in the experiment RC 1992 was in the 1:50 scale. This permits to improve significantly the quality of the model in respect of models used in the traditional laboratories equipped with channels. Moreover, it is important to highlight that in the new laboratory, costs will be radically reduced, because we have literally eliminated the big burdens relevant to wave makers.

THE EXPERIMENTS ON THE WAVE ENERGY ABSORPTION

Once the stable maritime engineering laboratory was realized, it was decided to try a new plant for absorption of the wave energy patented by BOCCOTTI (2004).

The plant consisted of a 1:10 scale model of a cubic caisson of 2.1 m side, placed on the bottom of the sea, in which a vertical duct was inserted. The superior mouth of the duct is beneath the sea surface while the inferior one was above the base of the caisson.

Figure 15 shows the sinking of the caisson, in December 2001.

The upper portion of the room inside in the caisson was filled with air. The amount of air in the caisson was increased through



Fig. 15 - Il cassone utilizzato durante l'esperimento RC2001
 - The caisson utilized during the experiment RC 2001

quantità veniva regolata da terra. L'aria del cassone veniva aumentata mediante pompaggio con un compressore ubicato a terra o diminuita con l'apertura di uno sfiato.

Riguardo gli strumenti di misura utilizzati in tale esperimento sono stati installati tre trasduttori di pressione secondo lo schema di Fig. 16.

Il trasduttore di pressione (1) misurava la fluttuazione di pressione all'interno della sacca d'aria, il (2) le fluttuazioni di pressione all'imboccatura del cassone ed il (3) sull'estradosso del cassone stesso. Contemporaneamente ai trasduttori due sonde ultrasoniche posizionate in campo indisturbato misuravano i livelli istantanei dell'elevazione d'onda. L'altezza della sacca veniva ottenuta dai valori registrati dai trasduttori (1) e (3). Poi sfruttando la legge dei gas perfetti era possibile risalire al volume d'aria. Per ogni stato di mare è stato regolato il volume della sacca d'aria in modo da ottenere che il periodo di oscillazione della sacca d'aria risultava uguale al periodo di picco dello spettro delle onde del carico di pressione, registrato dallo strumento (2). In tal modo si riusciva a mandare in risonanza l'impianto e così si formavano all'interno della struttura delle grandi fluttuazioni di pressione e delle forti velocità dell'acqua all'interno del condotto.

Naturalmente è stato necessario evacuare tutta l'aria presente nella struttura a seguito di mareggiate eccezionali. In particolare, si è rilevato che per il prototipo l'operazione di disattivazione dell'impianto sarebbe stata opportuna per mareggiate con altezza significativa maggiore di 6 m.

Nel marzo del 2005 è stato realizzato nel laboratorio naturale di Reggio Calabria il modello in scala di una diga a cassoni fornita del sistema OWC. L'impianto è un modello in scala 1:10 (con alcune modifiche) di una diga a cassoni per la costa nel nord-est del Pacifico. In alternativa, tale impianto può essere pensato come il modello in scala 1:6 di una diga adottata per il Mar Mediterraneo. Le figure 17 e 18 mostrano la struttura dell'OWC/3 le cui celle sono completamente indipendenti una dall'altra: ogni cassone è formato da tre celle indipendenti. L'obiettivo dell'esperimento è stato quello di testare la capacità di assorbimento dell'impianto. Sono stati posizionati, in campo indistur-

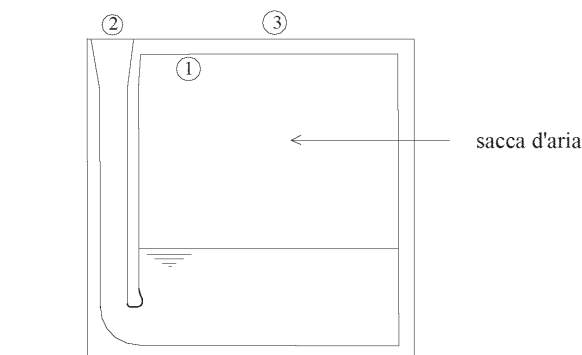


Fig. 16 - Disposizione dei trasduttori di pressione nel condotto verticale (2), nella sacca d'aria (1) e sull'estradosso del cassone (3) di Fig. 15
 - Location of the pressure transducers in the vertical duct (2), in the air pocket (1), and on the roof of the caisson (3) of the Fig. 15

pumping or decreased by an exhaust valve.

The measurement instruments used in this experiment were three pressure transducers installed according to the scheme of Fig. 16.

The pressure transducer (1) measured the pressure fluctuation inside the air pocket. The transducer (2) measured the pressure fluctuations at the upper opening of the vertical duct. The transducer (3) was located on the caisson roof. Contemporarily, two ultrasonic probes, positioned in the undisturbed field, measured the surface waves. The height of the air pocket was obtained by means of the values recorded by the transducers (1) and (3). For each sea state the volume of the air pocket was regulated so that the period of oscillation in the air pocket resulted equal to the peak period of the spectrum of the pressure head waves, recorded by transducers (2). In this way we could exploit a resonance condition between the plant and the wave running over the plant itself. During the resonance we measured strong pressure fluctuations in the air pocket and strong speeds of the water moving inside the duct.

During the most severe sea storm it could be necessary to evacuate the air inside the caisson in order to increase its stability. In particular it should be noted that, for the prototype, the operation of deactivation of the plant would have been opportune for sea storms with a significant height higher than 6 m.

On March 2005 the small-scale model of a breakwater embodying an OWC has been built in the natural laboratory of Reggio Calabria. The plant is the 1:10 scale model (with some modifications) of a hypothesis of breakwater for the North-East Pacific coast. Alternatively, this plant may be thought of as the 1:6 scale model of a breakwater suited for the Mediterranean Sea. Figs. 17 and 18 show the embodiment OWC/3 whose cells are completely independent from one another: each caisson consists of three independent cells. The aim of the experiment was to test the plant absorption capability. In the undisturbed wave field, 2 piles were placed for supporting the gauges for the measurement of the mean energy flux of the incident waves. Results of the experiment

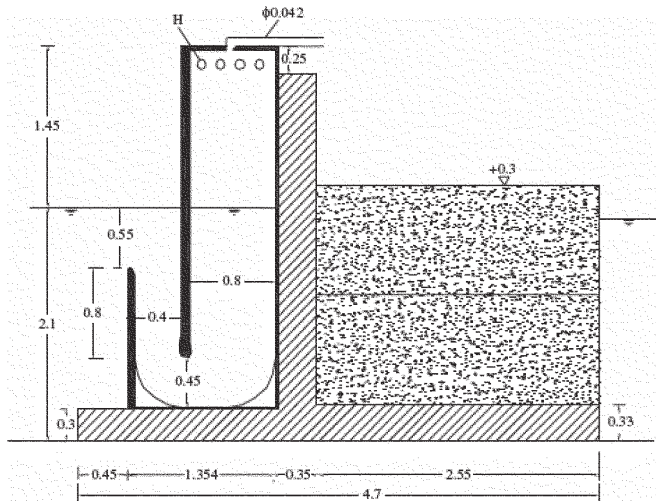


Fig. 17 - Ubicazione dei trasduttori di pressione in un modulo costituente il sistema OWC dell'esperimento RC2005
 - Location of the pressure transducers in the module constituting the absorbing breakwater of the experiment RC2005



Fig. 18 - Uno dei nove moduli costituenti la diga assorbente dell'esperimento RC2005
 - One of the nine modules constituting the absorbing breakwater of the experiment RC 2005

bato, 2 pali, in cui erano posizionati i trasduttori per la misura del flusso medio di energia delle onde incidenti. I risultati dell'esperimento (BOCCOTTI *et alii*, 2007) hanno mostrato che è possibile assorbire una significativa parte dell'energia ondosa. In particolare, l'esperimento ha rivelato come le onde di mare lungo subiscano un'importante amplificazione dello spettro sulla diga, e grazie a tale amplificazione, il coefficiente di assorbimento medio di tutte le onde di mare lungo registrate era circa il 60%, e in qualche registrazione ha raggiunto il 100%.

Le onde di vento, probabilmente a causa della loro maggiore ripidità, non subiscono la stessa amplificazione. Comunque, la percentuale di energia ondosa assorbita nel prototipo sarà maggiore che nel modello. Questo è una conseguenza del fatto che la pressione atmosferica nel modello è uguale a quella nel prototipo, e conseguentemente l'ampiezza delle oscillazioni della colonna d'acqua, nel prototipo, saranno più di 10 volte maggiori dell'ampiezza delle oscillazioni del modello.

OPERE CITATE/REFERENCES

- BARBARO G. (1996) - *Accretion and erosion of a beach behind a detached breakwater*. Excerpta, **10**: 7-17.
- BOCCOTTI P. (1983) - *Some new results on statistical properties of wind waves*. Applied Ocean Research, **5**: 134-140.
- BOCCOTTI P. (1984) - *Sea waves and quasi-determinism of rare events in random processes*. Atti Acc. Naz. Lincei, Rendiconti, **76**: 119-127.
- BOCCOTTI P. (1988) - *Refraction, reflection and diffraction of irregular gravity waves*. Excerpta of the Italian Contribution to the Field of Hydraulic Engng., **3**: 47-89.
- BOCCOTTI P. (1989) - *On mechanics of irregular gravity waves*. Atti Acc. Naz. Lincei, Memorie, **19**: 110-170.
- BOCCOTTI P. (1995) - *A field experiment on the small-scale of a gravity offshore platform*. Ocean Engng., **22**: 615-627.
- BOCCOTTI P. (1996) - *Inertial wave loads on horizontal cylinders: a field experiment*. Ocean Engng., **23**: 629-648.
- BOCCOTTI P. (1997) - *Idraulica Marittima*. UTET, 522 pp.
- BOCCOTTI P. (2000) - *Wave mechanics for ocean engineering*. Elsevier Oceanography Series, 1-496.

(BOCCOTTI *et alii*, 2007) showed that it is possible to absorb a large share of the wave energy. In details, experiment revealed that swells exhibit some huge amplification of the spectrum at the breakwater, and tanks to this amplification, the average absorption coefficient of all recorded swells was of about 60%, and in some records it reached the 100%.

Wind waves, probably because of their greater steepness, have not the same great amplification. However, the percentage of absorbed wave energy at full scale will be greater than in the model. This a consequence of the matter that the atmospheric pressure at full scale is equal to the atmospheric pressure in the model, and consequently the amplitude of the oscillations of the water column, at full scale, will be more than 10 times greater than the amplitude of the oscillations of the water column in the model.

- BOCCOTTI P. (2003) - *On a new wave energy absorber*. Ocean Engineering, **30**: 1191-1200.
- BOCCOTTI P. (2004) - *Gli impianti REWEC: dighe portuali che convertono l'energia ondosa in energia elettrica, e barriere invisibili per la difesa delle coste*. Ed . Bios, **2856**: 1-117.
- BOCCOTTI P., BARBARO G. & MANNINO L. (1993a) - *A field experiment on the mechanics of irregular waves*. J. Fluid Mech., **252**: 173-186.
- BOCCOTTI P., BARBARO G., FIAMMA V., MANNINO L. & ROTTA A. (1993b) - *An experiment at sea on the reflection of the wind waves*. Ocean Eng., **20**: 493-507.
- FORRISTALL G.Z. (1978) - *On the statistical distribution of wave heights in a storm*. J. Geophys. Res., **83**: 2353-2358.
- FORRISTALL G.Z. (1984) - *The distribution of measured and simulated heights as a function of irregular gravity waves*. J. Geophys. Res., **89**: 10547-10552.
- HASSELMANN K., BARNETT T. P., BOUWS E. *et alii*. (1973) - *Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JON-SWAP)*. Deut. Hydrogr. Zeit, **A8**: 1-95.
- HSU J.R.C. & SILVESTER R. (1990) - *Accretion behind single offshore breakwater*. J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engng., **3**: 362-379.
- KROGSTAG H.E. (1985) - *Height and period distribution of extreme waves*. Appl. Ocean Res., **7**: 158-165.
- PHILLIPS O.M. (1958) - *The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves*. J. Fluid Mech., **4**: 426-434.

Received June 2008 - Accepted September 2008