

Prove sperimentali sul comportamento di una scogliera a cresta bassa e sul fenomeno del piling-up a tergo di essa

Piero Ruol¹, Alberto Faedo² e Alessandro Paris²

¹Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica – Università di Padova, Via Ognissanti 39 - 35129 Padova Tel: +39-049-8277905 E-mail: piero.ruol@unipd.it

² Technital S.p.A., Via Cattaneo 20 - 37121 Verona Tel: +39-045-8053617 Fax: +39-045-8011558 E-mail: a.faedo@technital.it, a.paris@technital.it

Riassunto

Nel presente lavoro è descritta l'indagine sperimentale svolta nel canale ad onde dell'università di Padova per determinare il comportamento di una scogliera emersa a cresta bassa posta nella surf zone, con riferimento ai fenomeni di riflessione, trasmissione, tracimazione dell'onda ed incremento del livello idrico (piling-up) che si realizza a tergo dell'opera.

L'interazione onda-struttura è stata studiata riproducendo circa 60 attacchi ondosi irregolari. In una prima fase è stata analizzata una struttura permeabile, che ha permesso di stimare le portate di tracimazione (al netto delle portate di filtrazione dirette verso il largo), per diversi valori di piling-up, mentre nella seconda fase è stato posto un setto impermeabile sulla scarpata lato riva della stessa scogliera per quantificare separatamente le portate di overtopping oltre la sommità dell'opera e di trasmissione attraverso la porzione "emersa" della struttura e quindi per comprendere più nel dettaglio il complesso processo di filtrazione attraverso l'opera, legato anche al piling-up.

Parole chiave: scogliere a cresta bassa, tracimazione, trasmissione, filtrazione, piling-up, set-up.

Abstract

In this paper the experimental results obtained through the physical model investigation performed in the flume of Padova University on a typical low crested structure is presented. Aim of the investigation was the evaluation of the behaviour of such a structure in terms of reflection and transmission of incident waves, as well as the study of the wave overtopping phenomenon and the associated increase in the water levels behind the breakwater (piling-up).

The wave-structure interaction was examined by reproducing about 60 irregular wave attacks. In the first part of the study a rubble mound permeable breakwater was analysed, while in the second part of the research an impermeable plate was placed on the landward slope of the structure, in order to study in more details the complex phenomena of the wave overtopping over the structure and of the seepage through it, also related to the piling-up level at the back of the structure.

Keywords: low crested structures, wave overtopping, wave transmission, seepage, piling-up, set-up.

Premessa

Gli studi sperimentali su modello fisico relativi a scogliere tracimabili parallele alla linea di riva, utilizzate come sistemi di protezione e stabilizzazione dei litorali, sono diventati un tema di crescente interesse nell'Ingegneria Costiera. Infatti, nonostante l'impiego di simili strutture sia sempre più frequente nell'ambito degli interventi di protezione costiera, si sono talora addirittura incrementati i fenomeni erosivi degli arenili che ne avevano suggerito la realizzazione. Il motivo di tali insuccessi

va ricercato nelle modifiche indotte dalle opere alla circolazione idrodinamica nella zona compresa tra le strutture e la linea di battigia. Vista la complessità dei fenomeni in gioco, questa delicata indagine può essere efficacemente affrontata tramite la sperimentazione fisica in laboratorio.

Se da un lato l'effetto positivo delle barriere tracicimabili è infatti quello di attenuare l'energia dell'onda scaricata lungo costa durante le mareggiate, dall'altro si crea un innalzamento del livello medio mare tra le scogliere e la spiaggia, definito come *piling-up* o talora *set-up*¹, che genera un flusso netto pressoché parallelo a riva nelle zone più centrali e diretto verso il largo attraverso i varchi tra le testate dei frangiflutti, causando talora un incremento del trasporto di sedimenti offshore (Fig. 1).

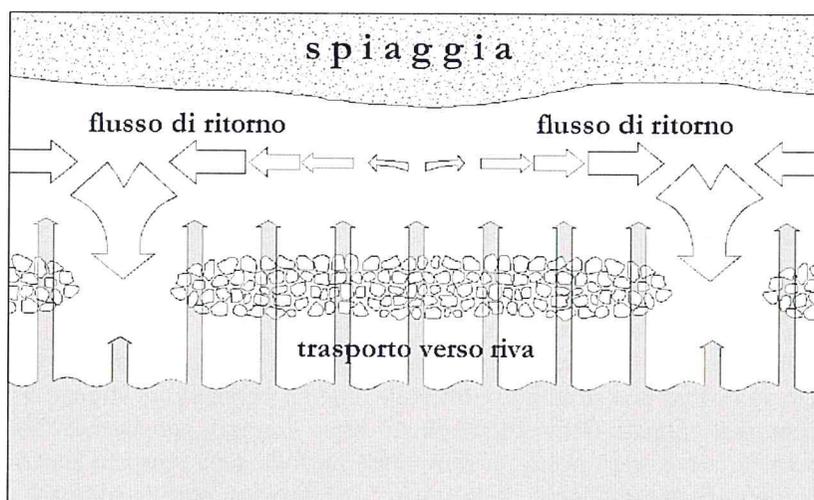


Figura 1 - Schema dell'interazione onde-struttura in corrispondenza di una scogliera a cresta bassa.

La carenza di riferimenti bibliografici riguardanti il fenomeno del *piling-up* (o *set-up* dovuto alla tracimazione) dimostra come il tema dell'innalzamento del livello idrico dietro alle opere tracicimabili non sia stato indagato finora con la necessaria attenzione, nonostante esso chiaramente influenzi il comportamento della struttura e la evoluzione morfologica dei litorali protetti.

Prove sperimentali

Le prove sperimentali descritte nel seguito hanno avuto lo scopo di valutare il comportamento delle "tradizionali" scogliere a cresta bassa con riferimento ai fenomeni di *riflessione e trasmissione* e riservando particolare attenzione al predetto fenomeno del *piling-up*. Il principale obiettivo delle prove sperimentali oggetto della presente indagine è consistito infatti nel tentativo di stabilire una correlazione tra le caratteristiche dell'onda incidente, le portate di tracimazione dell'onda e l'incremento del livello medio a tergo della scogliera.

A tale scopo sono stati condotti circa 60 test nel canale ad onde dell'Università di Padova, simulando attacchi ondosi irregolari caratterizzati da spettri JONSWAP. Il modello fisico bidimensionale è la riproduzione in similitudine di Froude, con una scala geometrica di 1:20, di una tipica sezione trasversale di un frangiflutti parallelo a riva, emergente ma a cresta bassa. L'opera è stata realizzata con il nucleo centrale in pietrame di pezzatura più minuta rispetto alla mantellata del rivestimento esterno; la scogliera può quindi essere ritenuta globalmente molto permeabile, non esistendo un nucleo di materiale a ridotta granulometria.

¹ La terminologia "set-up", frequentemente adottata per definire il fenomeno dell'innalzamento del livello a ridosso delle scogliere, non deve essere confusa con il "wave set-up", ossia con l'innalzamento del livello di propagazione del moto ondoso tipico della surf-zone, indotto dalla variazione di radiation stress dell'onda.

La struttura è stata ubicata nella zona dei frangenti, con un fondale al piede di 20 cm ed una quota in sommità pari a +5 cm rispetto al livello di riposo dell'acqua (valori in scala modello).

A parere degli autori, per comprendere in modo esauriente il concetto del piling-up è importante valutare le portate di tracimazione con buona accuratezza. Tuttavia, sembra che una stima diretta della portata tracimante su frangiflutti altamente permeabili sia stata raramente effettuata (Loveless et Al. 1998; Lamberti et Al. 2003). Per tale motivo è stato allestito un originale apparato sperimentale, con un sistema di pompaggio a ricircolo forzato, in modo da poter misurare le portate di tracimazione, tenendo in considerazione anche il flusso di ritorno attraverso la struttura.

Sono stati imposti diversi livelli dietro al frangiflutti, per simulare diverse condizioni di circolazione tridimensionale, riconducibili a diverse dimensioni dei varchi tra le scogliere.

Descrizione dell'apparato sperimentale

Le prove sperimentali sono state effettuate nella canaletta bidimensionale del laboratorio marittimo del *Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica* (IMAGE) dell'Università di Padova. Il canale ad onde utilizzato è lungo 36 m, largo 1.0 m, alto 1.2 m ed il fondale è stato realizzato con pendenza pari ad 1:50.

Le caratteristiche del moto ondoso sono state acquisite tramite 8 sonde di tipo resistivo con frequenza di campionamento di 20 Hz. La sezione longitudinale del canale utilizzato per le prove di laboratorio è rappresentata in modo schematico in Figura 2, in cui sono indicate anche le posizioni delle sonde adottate per determinare i livelli idrici istantanei e le caratteristiche puntuali delle onde. Il confronto tra i treni d'onda generati e riprodotti è stato affidato alla sonda n. 8, la più vicina al generatore. Il posizionamento delle sonde n. 5, 6 e 7 è stato poi opportunamente prescelto in modo tale da consentire la valutazione delle caratteristiche di riflessione della struttura di volta in volta analizzata. La sonda n. 3 ha permesso di valutare le caratteristiche dell'onda al piede dell'opera, mentre le sonde n. 1 e 2 sono state collocate a valle dell'opera ad una distanza dal piede pari a 6 volte la larghezza della berma, come consigliato in letteratura (Gironalla et Al. 2002, Gomez e Valdez 1990), per misurare correttamente l'altezza d'onda trasmessa.

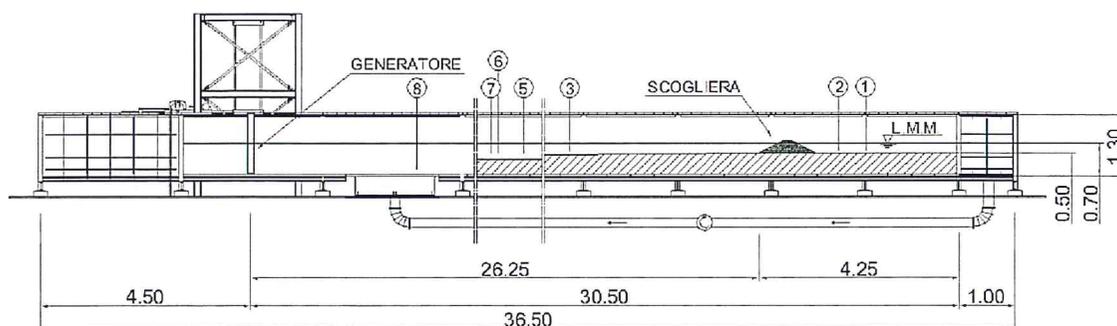


Figura 2 – Sezione longitudinale del canale sperimentale.

La geometria del modello fisico, che riproduce una sezione trasversale dell'opera in pietrame a cresta bassa in scala 1:20, è schematizzata in Figura 3, con le dimensioni riferite alla scala modello. Tale sezione può essere considerata rappresentativa di molte opere di difesa realizzate lungo i litorali italiani.

Nella realizzazione dell'opera in scala ridotta si sono adottate le seguenti categorie di "pietrame":

- elementi da 1.2÷3.4 g (corrispondenti a 10÷30 kg in prototipo) per lo strato di imbasamento;
- elementi da 110÷200 g (corrispondenti a pietrame da 1÷2 t in prototipo) per il nucleo centrale;
- massi da 280÷550 g (corrispondenti a massi di pezzatura compresa tra 2.5÷5 t in prototipo) per la mantellata esterna.

Nel calcolo dei pesi, ossia nella determinazione della scala di riduzione dei pesi, si è tenuto conto anche della differenza tra il peso specifico dell'acqua dolce del modello, e quello dell'acqua salata del prototipo.

Le proprietà dell'opera indagata, riferite sia al modello che al prototipo, sono sintetizzate nella Tabella 1, mentre una fotografia della struttura realizzata nel canale è proposta in Figura 4.

Per simulare il flusso di ritorno verso il largo tra i varchi delle scogliere, fenomeno tipicamente tridimensionale non riproducibile in un modello 2-D, è stato approntato un sistema di pompaggio dedicato, che permette di mantenere costante il livello medio dell'acqua (rispetto al livello "0", di riposo) a terno della barriera durante un attacco ondoso.

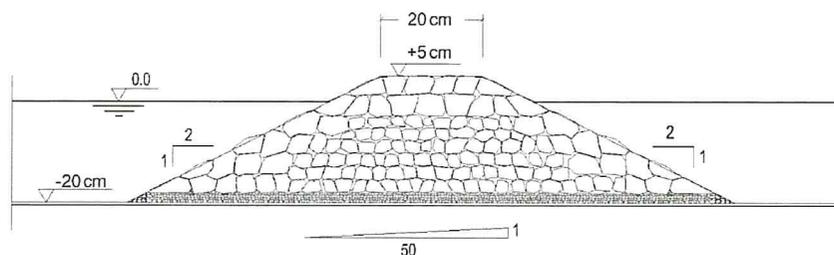


Figura 3 - Caratteristiche geometriche della sezione trasversale del modello analizzato.

Tabella 1 - Caratteristiche geometriche e pesi del frangiflutti indagato.

| Unità modello | | | Unità prototipo (scala 1:20) | | |
|------------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Fondale (cm) | Larghezza sommità (cm) | Quota sommità (cm) | Fondale (m) | Larghezza sommità (m) | Quota sommità (m) |
| -20 | 20 | +5.0 | -4.0 | 4.0 | +1.0 |
| pietrame per imbasamento (g) | massi nucleo (g) | massi mantellata (g) | pietrame per imbasamento (kg) | massi nucleo (t) | massi mantellata (t) |
| 1.2÷3.4 | 110÷200 | 280÷550 | 10÷30 | 1÷2 | 2.5÷5 |

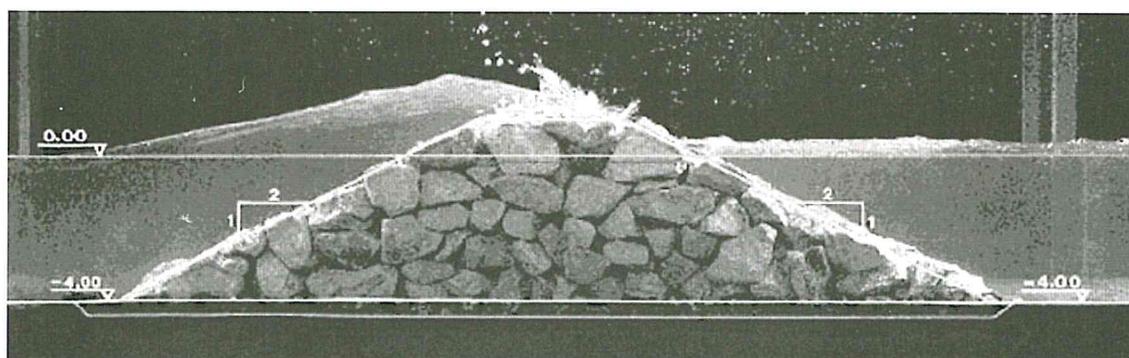


Figura 4 - Fotografia del modello fisico (le dimensioni sono indicate in scala prototipo).

Il volume d'acqua che si accumula dietro all'opera per effetto del piling-up viene recapitato a mezzo di uno stramazzone rettangolare in una vasca di raccolta, sul fondo della quale è collegata una tubazione che riporta l'acqua verso il largo azionando un sistema di pompaggio a portata regolabile. In questo modo si realizza un circuito chiuso forzato che ricrea le condizioni di flusso prodotte dalle

aperture tra i frangiflutti (Fig. 5). Nella tubazione è inserito uno strumento per la misura della portata; pertanto è possibile stimare la portata di riflusso tra i varchi come la portata di ricircolo Q_R necessaria per mantenere costante il livello medio dell'acqua nella vasca di raccolta durante un attacco ondoso. La portata di ricircolo può essere variata dal valore nullo, rappresentativo della condizione di barriera infinitamente lunga, senza varchi, fino al valore massimo che comporta il ripristino del livello di riposo nello specchio acqueo retrostante alla scogliera. Quest'ultima condizione è rappresentativa di una barriera isolata, ossia di una barriera di lunghezza ridotta rispetto ai varchi che separano due opere contigue. Portate di ricircolo intermedie tra questi due estremi comportano diversi valori del piling-up, che sono rappresentativi di diversi rapporti tra lunghezza delle opere e dei varchi.

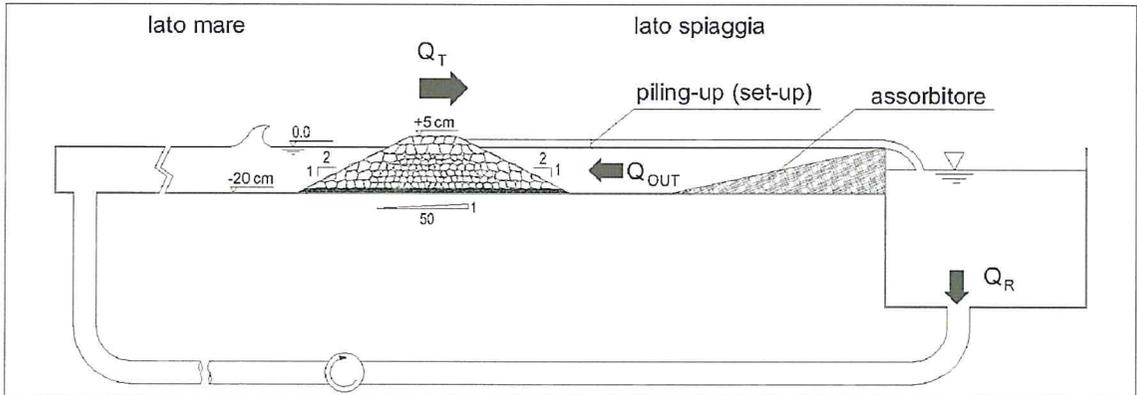


Figura 5 - Schema del sistema di ricircolo.

Tabella 2 - Caratteristiche delle onde riprodotte nel modello.

| ONDE | VALORI IMPOSTATI | | | | VALORI MISURATI (sonda 8) | | | | | |
|------|------------------|-----------|---------------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------|
| | MODELLO | | PROTOTIPO | | MODELLO | | | PROTOTIPO | | |
| | $H_{1/3}$ (cm) | T_m (s) | $H_{1/3}$ (m) | T_m (s) | $H_{1/3}$ (cm) | T_m (s) | T_p (s) | $H_{1/3}$ (m) | T_m (s) | T_p (s) |
| 1 | 2.50 | 0.89 | 0.50 | 4.00 | 2.68 | 0.89 | 0.97 | 0.54 | 3.98 | 4.34 |
| 2 | 5.00 | 1.01 | 1.00 | 4.50 | 5.05 | 1.01 | 1.09 | 1.01 | 4.52 | 4.87 |
| 3 | 10.00 | 1.34 | 2.00 | 6.00 | 10.24 | 1.33 | 1.46 | 2.05 | 5.95 | 6.53 |
| 4 | 15.00 | 1.68 | 3.00 | 7.50 | 14.89 | 1.59 | 1.77 | 2.98 | 7.11 | 7.92 |
| 5 | 20.00 | 2.01 | 4.00 | 9.00 | 18.74 | 2.04 | 2.44 | 3.75 | 9.12 | 10.91 |
| 6 | 15.00 | 1.34 | 3.00 | 6.00 | 14.78 | 1.35 | 1.46 | 2.96 | 6.04 | 6.53 |
| 7 | 15.00 | 1.45 | 3.00 | 6.50 | 14.74 | 1.45 | 1.55 | 2.95 | 6.48 | 6.93 |
| 8 | 15.00 | 1.57 | 3.00 | 7.00 | 15.18 | 1.52 | 1.65 | 3.04 | 6.80 | 7.38 |
| 9 | 15.00 | 1.68 | 3.00 | 7.50 | 14.89 | 1.59 | 1.77 | 2.98 | 7.11 | 7.92 |
| 10 | 15.00 | 1.79 | 3.00 | 8.00 | 14.73 | 1.75 | 1.90 | 2.95 | 7.83 | 8.50 |
| 11 | 15.00 | 1.90 | 3.00 | 8.50 | 14.91 | 1.87 | 2.23 | 2.98 | 8.36 | 9.97 |

Nel corso delle prove sperimentali sono stati generati 11 diversi spettri d'onda di tipo JONSWAP, caratterizzati dal fattore medio di amplificazione del picco $\gamma = 3.3$ e costante di Phillips $\alpha = 0.0081$. Le caratteristiche degli spettri ondosi sono riassunte in Tabella 2 dove sono riportati sia i valori impostati per la ricerca d'onda (altezza significativa $H_{1/3}$ e periodo medio T_m), sia i valori effettivamente misurati dalla sonda più al largo (altezza significativa $H_{1/3}$, periodo medio T_m e periodo di picco T_p). Si può notare che le differenze tra i valori impostati e quelli effettivamente misurati sono contenute,

ad eccezione dell'onda massima realizzata (onda 5), per la quale l'altezza risulta limitata superiormente dal fondale; infatti evidenti fenomeni di frangimento dell'onda si sono manifestati lungo il fondale acclive, anche a notevole distanza dall'opera in esame.

Le prime cinque onde sono caratterizzate da altezze significative e periodi crescenti, mentre le onde dalla 6 alla 11 sono state caratterizzate da altezza costante e periodo variabile, allo scopo di analizzare l'influenza della ripidità dell'onda sui fenomeni allo studio.

I risultati delle prove sperimentali inerenti ai fenomeni di *riflessione*, *trasmissione* e *tracimazione* ed al fenomeno del *piling-up* sono riportati nel seguito.

Fenomeni di riflessione e trasmissione

La prima serie di prove sperimentali è stata effettuata con riferimento all'opera sopra descritta posta su un fondale con pendenza 1:50, analizzando l'interazione onde-struttura in termini di riflessione e trasmissione dell'onda.

Di seguito sono presentati i risultati delle prove di laboratorio e le relative elaborazioni.

Risultati sperimentali relativi ai fenomeni di riflessione e trasmissione

I risultati dell'analisi di riflessione e di trasmissione sono stati elaborati soltanto per il caso di portata di ricircolo nulla, corrispondenti al caso di scogliera priva di varchi, in modo da ottenere una base di confronto omogenea con i risultati delle prove sperimentali condotte dagli scriventi su una simile scogliera posta su fondale con pendenza 1:100 (Ruol e Faedo, 2002), effettuate in condizioni analoghe a quelle qui considerate.

L'analisi di riflessione è stata realizzata con il collaudato metodo delle tre sonde di Goda, per il quale sono state impiegate le sonde n. 4, 5 e 6 opportunamente distanziate per non incorrere in casi di singolarità.

I risultati ottenuti, in termini di riflessione e trasmissione, sono riassunti in Tabella 4, in cui, oltre ai coefficienti di riflessione e trasmissione K_R e K_T , sono riportati anche i valori dell'altezza d'onda significativa incidente $H_{1/3, i}$, misurata (nella posizione del piede esterno dell'opera) in assenza della struttura per escludere la riflessione dovuta all'opera, ed i valori dell'altezza d'onda significativa trasmessa $H_{1/3, t}$ (valutata a una distanza dall'opera pari a $6B$, essendo B la larghezza della berma).

Tabella 3 - Risultati dei test di riflessione e trasmissione.

| Onda | $H_{1/3, i}$ (cm) | $H_{1/3, t}$ (cm) | T_p (s) | $H_{1/3, i}/L_{op}$ | K_R | K_T |
|------|-------------------|-------------------|-----------|---------------------|-------------|-------------|
| 1 | 2.45 | 0.52 | 0.97 | 0.0167 | 0.30 | 0.21 |
| 2 | 4.85 | 0.97 | 1.09 | 0.0261 | 0.26 | 0.20 |
| 3 | 11.08 | 2.88 | 1.46 | 0.0333 | 0.28 | 0.26 |
| 4 | 14.30 | 4.47 | 1.77 | 0.0292 | 0.26 | 0.31 |
| 5 | 14.42 | 5.35 | 2.44 | 0.0155 | 0.27 | 0.37 |
| 6 | 12.91 | 3.70 | 1.46 | 0.0388 | 0.24 | 0.29 |
| 7 | 13.48 | 3.81 | 1.55 | 0.0359 | 0.25 | 0.28 |
| 8 | 14.03 | 4.18 | 1.65 | 0.0330 | 0.26 | 0.30 |
| 9 | 14.30 | 4.47 | 1.77 | 0.0292 | 0.26 | 0.31 |
| 10 | 15.11 | 4.84 | 1.90 | 0.0268 | 0.29 | 0.32 |
| 11 | 15.52 | 5.00 | 2.23 | 0.0200 | 0.31 | 0.32 |

I risultati relativi ai test di riflessione effettuati con l'opera posizionata sul fondale con pendenza di 1:50 evidenziano valori di K_R in buon accordo con quelli ottenuti con la medesima struttura su pen-

denza 1:100 (vedi *configurazione F*, Ruol e Faedo, 2002), mantenendosi comunque più bassi dei K_R relativi a scarpate impermeabili (Allsop e Hettiarachi 1988, Seelig 1980). In particolare è emersa la tendenza di K_R a decrescere in funzione della ripidità dell'onda, come risulta dai risultati delle onde 6-11, evidenziati in neretto in Tabella 3 e graficamente in Figura 6. In conclusione, le onde incidenti con periodo più corto sperimentano una minor riflessione rispetto alle onde più lunghe.

L'andamento decrescente in funzione della ripidità dell'onda si è manifestato anche per quanto concerne il coefficiente di trasmissione, come appare chiaro dal grafico di Figura 6. In tal caso, essendo state prese in considerazione le onde (dalla 6 alla 11) con altezza al largo costante e periodo diverso, la dipendenza di K_T dalla ripidità dell'onda rispecchia pure la dipendenza dal periodo T_p . L'aumento di K_T in funzione di T_p trova giustificazione nell'incremento della portata di tracimazione per onde più lunghe. Tale fenomeno, chiaramente emerso da tutte le prove sperimentali svolte, conferma che la trasmissione dell'onda in strutture a cresta bassa è in primo luogo legata alla tracimazione dell'onda al di sopra del livello di riposo, piuttosto che alla trasmissione attraverso la porzione immersa dell'opera.

In Figura 7 è riportato un confronto tra i risultati sperimentali ottenuti con l'opera posta su un fondale con pendenza 1:50 e quelli ricavati con la stessa opera collocata su una pendenza di 1:100.

Dal grafico si può osservare che la curva teorico-sperimentale ricavata dagli autori nel caso di pendenza 1:100 (Ruol-Faedo, 2002), utilizzando i parametri proposti da Davies e Kriebel (1992), approssima molto bene anche i punti sperimentali qui discussi e relativi alla pendenza 1:50, almeno nel caso di onde tracimabili, ovvero per $(F-R)/H_{si} < 0$ (dove F è la quota della sommità dell'opera e R è il run-up potenziale valutato secondo la formula proposta da Davies e Kriebel, 1992). Nel caso invece di onde non tracimanti ($(F-R)/H_{si} > 0$), la curva proposta appare sottostimare il coefficiente di trasmissione.

Il fenomeno della trasmissione ondosa nel caso delle scogliere a cresta bassa è ampiamente trattato in letteratura (Calabrese, Vicinanza e Buccino, 2002), per cui si è concentrata l'attenzione sui fenomeni di trasmissione e di piling up a tergo dell'opera.

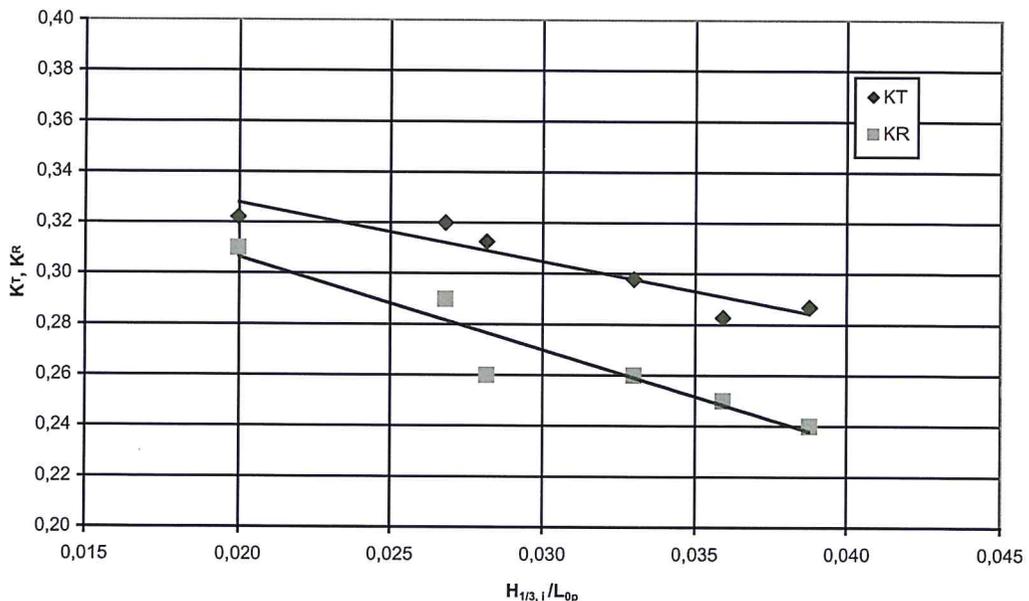


Figura 6 - Coefficienti di trasmissione e di riflessione in funzione della ripidità dell'onda: caso di barriera continua senza varchi (portata di ricircolo nulla).

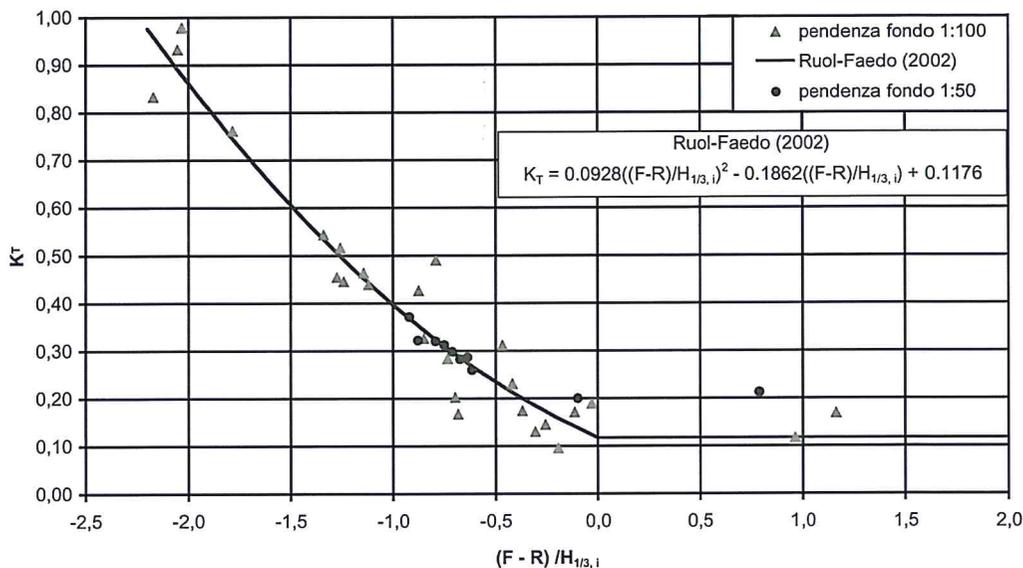


Figura 7 - Confronto tra i coefficienti di trasmissione sperimentali e la curva teorica (Ruol e Faedo, 2002).

Fenomeni di tracimazione dell'onda e di piling-up

Come premesso, l'obiettivo principale dello studio è stato quello di stimare in maniera diretta la portata di tracimazione dell'onda relativa a scogliere emerse a cresta bassa, e il conseguente fenomeno di sovrizzo idrico (o piling-up) che si realizza a tergo di tali strutture.

A tal fine, utilizzando l'apparato sperimentale descritto, si sono indagate tre diverse configurazioni di una scogliera in pietrame avente le caratteristiche geometriche precedentemente illustrate:

- 1) Configurazione I: scogliera permeabile;
- 2) Configurazione II: scogliera con totale impermeabilizzazione;
- 3) Configurazione III: scogliera con parziale impermeabilizzazione.

Configurazione I

La struttura in questione ha le medesime caratteristiche geometriche di quella utilizzata per lo studio dei fenomeni di riflessione e trasmissione (Fig. 8).

Sono stati effettuati complessivamente 58 attacchi ondosi. Per ciascuno spettro d'onda generato, sono stati realizzati diversi livelli di piling-up a tergo della struttura, imponendo diverse portate di ricircolo Q_R .

Per definire in maniera più chiara le portate in gioco, si può far riferimento alla seguente Figura 9. Le portate di ricircolo ricavate rappresentano dunque la portata di tracimazione "netta", ottenibile come somma algebrica dei due contributi:

$$Q_R = Q_T - Q_{OUT}$$

con:

$$Q_T = Q_{OV} + Q_{IN}$$

dove:

Q_R = portata realizzata mediante il sistema di pompaggio a ricircolo forzato;

Q_T = portata di tracimazione, somma della portata (Q_{OV}) che passa al di sopra della cresta della scogliera e della portata (Q_{IN}) che passa attraverso la struttura in direzione del litorale;

Q_{OUT} = portata di ritorno offshore filtrante attraverso l'opera per effetto del piling-up.

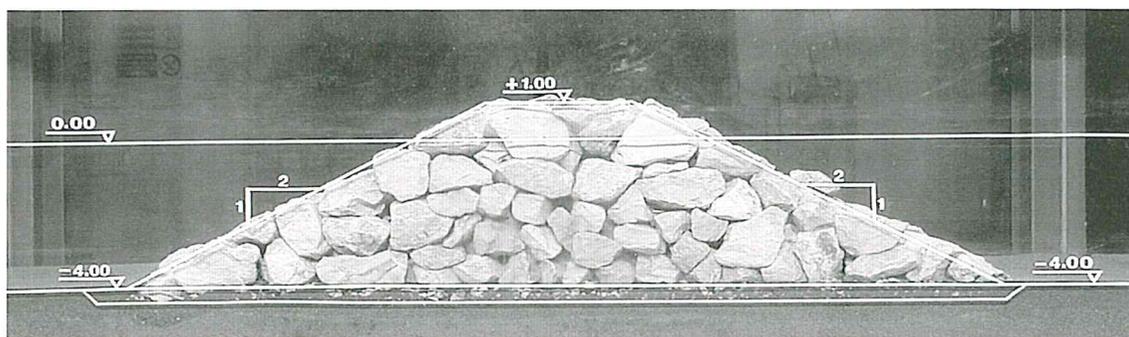


Figura 8 - Configurazione I (le dimensioni sono indicate in scala prototipo).

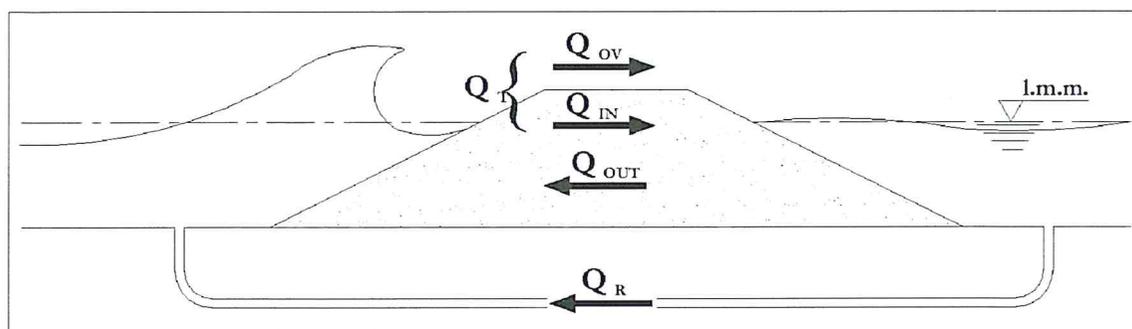


Figura 9 - Simbologia adottata per caratterizzare le portate.

Il massimo livello di piling-up si è logicamente ottenuto con il sistema di pompaggio non attivo ($Q_R = 0$), condizione che simula il caso di barriera infinitamente lunga.

Per contro, il caso di barriera posta tra varchi infinitamente estesi si è ottenuto imponendo la portata di ricircolo per la quale si realizza un sovrizzo idrico nullo. Si osservi a tal proposito che tale condizione è l'unica che consente di stimare con buona approssimazione la portata di tracimazione Q_T per un certo spettro d'onda, essendo verosimile ipotizzare che, in questo caso, non vi sia filtrazione verso il largo (ossia $Q_{OUT} \approx 0$).

Configurazione II

La struttura in questione è stata realizzata mediante l'applicazione di un setto impermeabile sulla scarpata interna di una scogliera a cresta bassa (Fig. 10), avente le medesime caratteristiche geometriche di quella illustrata nella configurazione precedente.

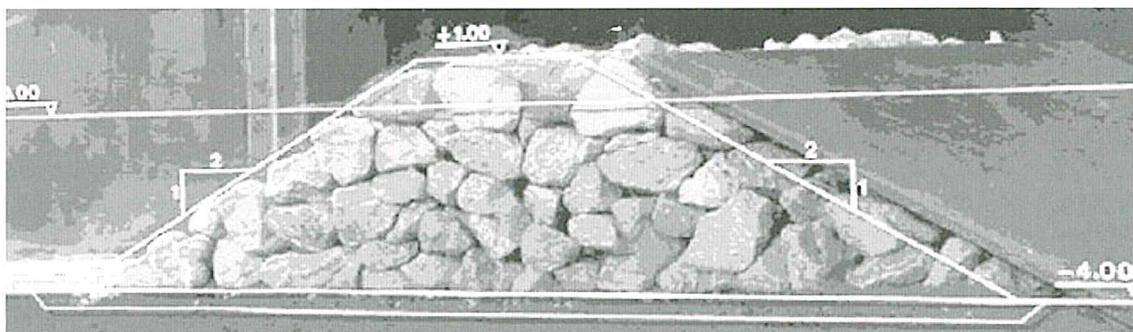


Figura 10 - Configurazione II (le dimensioni sono indicate in scala prototipo).

Tale setto, realizzando la completa impermeabilizzazione dell'opera, e impedendo di conseguenza il moto di filtrazione attraverso il corpo della scogliera ($Q_{IN} = Q_{OUT} = 0$) ha permesso di valutare direttamente la portata (Q_{OV}) che transita al di sopra della cresta della scogliera.

Sono stati generati complessivamente 8 spettri d'onda. Imponendo la portata di ricircolo Q_R tale da consentire il mantenimento di un livello costante a tergo della struttura, si è determinata la portata di overtopping (Q_{OUT}) per ciascun attacco ondoso riprodotto.

Configurazione III

Quest'ultima configurazione è stata ottenuta mediante l'applicazione di un setto impermeabile, posto fino alla quota 0.0 m s.l.m., sulla scarpata interna di una scogliera avente le medesime caratteristiche geometriche di quelle relative alle configurazioni precedentemente illustrate (Fig. 11). Tale setto, lasciando "scoperta" la porzione emersa di scogliera, ha realizzato l'impermeabilizzazione della sola porzione immersa dell'opera.

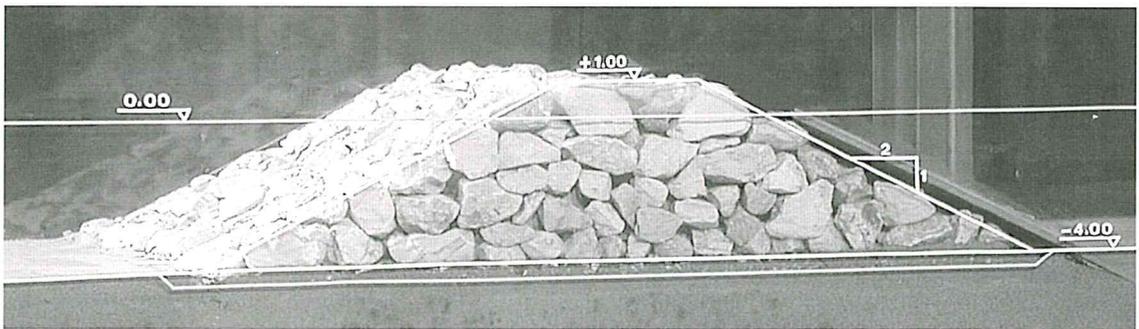


Figura 11 – Configurazione III (le dimensioni sono indicate in scala prototipo).

Complessivamente sono stati generati 5 spettri d'onda. L'impermeabilizzazione parziale della struttura è stata realizzata al fine di valutare quale porzione di struttura interagisca maggiormente con l'onda, relativamente al fenomeno di tracimazione e piling-up.

Risultati sperimentali relativi al fenomeno del piling-up

I risultati ottenuti dalle prove sperimentali eseguite nel canale ad onde, relativi alle 3 configurazioni sopra illustrate, sono di seguito riportati.

Configurazione I: scogliera permeabile

In Tabella 4 sono riassunti i risultati sperimentali relativi alla portata unitaria di ricircolo q_R (per metro lineare di struttura), ossia alla portata di tracimazione netta, ed al piling-up δ_h (i valori sono riportati in scala modello).

I dati dell'onda 9 sono stati omessi in quanto essa presenta le stesse caratteristiche dell'onda 4. Inoltre le onde 1 e 2 presentano portate di ricircolo nulle perché non sormontano l'opera. Per ogni onda sono stati generati diversi valori di piling-up variando il grado di apertura della pompa del sistema di ricircolo, in modo da simulare diverse larghezze dei varchi tra i frangiflutti. I due estremi sono rappresentati da una portata di ricircolo nulla e sovrizzo δ_h massimo, corrispondente alla situazione di scogliera infinitamente lunga, e da un valore nullo del piling-up e portata di ricircolo massima, corrispondente a una scogliera isolata con varchi infinitamente estesi.

I valori delle portate di ricircolo che annullano il sovrizzo a tergo della struttura $Q_{R(\delta_h=0)}$ (evidenziati in neretto nella tabella) rappresentano, come già anticipato, le portate di tracimazione Q_T per l'opera allo studio, essendo in questo caso assumibile $Q_{OUT} = 0$.

Per portate di ricircolo diverse da questa, sottraendo le portate di ricircolo ricavate per ciascun livello di piling-up, dalla predetta portata $Q_{R(\delta_h=0)}$ corrispondente a sovrizzo nullo ($\delta_h = 0$), è stato possibile calcolare il valore delle portate di filtrazione Q_{OUT} . Nell'ultima colonna della Tabella 4 sono dunque riportati anche i valori della portata specifica q_{OUT} ottenuti dalla espressione:

$$Q_{OUT} = Q_{R(\delta_h=0)} - Q_R$$

per diversi valori della portata di ricircolo Q_R .

Si osservi, a tal proposito, che tale operazione è stata possibile assumendo l'ipotesi che, per ciascuno spettro d'onda, la portata di tracimazione Q_T sia unica, ossia sia indipendente dal livello del piling-up che si realizza a tergo dell'opera.

Alcuni ricercatori, nei pochi studi reperibili in letteratura sull'argomento, hanno tentato di definire un legame funzionale tra il piling-up e le caratteristiche dell'onda incidente, nel caso bidimensionale di scogliera infinitamente lunga ($Q_R = 0$). In particolare, Diskin et al. (1970) hanno proposto una formula basata su test condotti con onde monocromatiche, mentre Loveless et al. (1998) hanno ricavato un'espressione da dati sperimentali provenienti anche da prove con onde irregolari.

Dal confronto tra i risultati delle presenti prove di laboratorio e le relazioni proposte in letteratura, emerge che la formula di Diskin tende a sovrastimare del 30% circa i valori del piling-up; ciò è probabilmente imputabile al fatto che nel presente studio si sono generati esclusivamente spettri di onde irregolari, mentre Diskin ha considerato onde regolari. Per contro, la relazione elaborata da Loveless fornisce valori di previsione del piling-up nettamente al di sotto di quelli misurati nel corso delle prove sperimentali qui illustrate.

Nel diagramma di Figura 12 sono riportati i risultati ottenuti dalle prove sperimentali eseguite sulla configurazione I. Per ogni onda che sormonta l'opera, si sono diagrammati in ascissa i valori della portata di ricircolo (ossia della portata di tracimazione netta) ed in ordinata i valori del piling-up (valori in scala modello). Dall'evidenza sperimentale emerge che il piling-up ha un andamento decrescente in funzione della portata di ricircolo, secondo una legge con buona approssimazione lineare. Per completezza, e soprattutto per interesse "applicativo ingegneristico", in Figura 13, è presentato lo stesso diagramma con valori riferiti al prototipo.

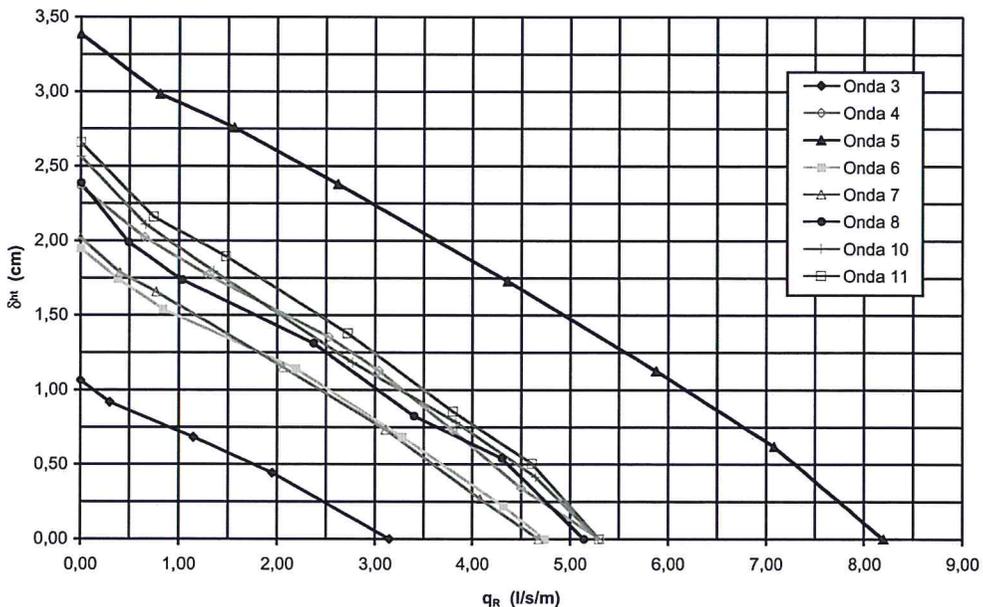


Figura 12 – Risultati sperimentali: piling-up δ_h dietro l'opera in funzione della portata di tracimazione netta q_R (valori in scala modello).

Tabella 4 – Principali risultati ottenuti dai test.

| Onda | $H_{1/3,1}$ (cm) | f_p (Hz) | T_p (s) | η (cm) | q_R (l/s/m) | q_{OUT} (l/s/m) |
|------|------------------|------------|-----------|-------------|---------------|-------------------|
| 1 | 2.45 | 1.031 | 0.97 | -0.01 | - | - |
| 2 | 4.85 | 0.917 | 1.09 | 0.12 | - | - |
| 3 | 11.08 | 0.685 | 1.46 | 1.06 | 0.00 | 3.15 |
| | 11.08 | 0.685 | 1.46 | 0.92 | 0.30 | 2.85 |
| | 11.08 | 0.685 | 1.46 | 0.68 | 1.15 | 2.00 |
| | 11.08 | 0.685 | 1.46 | 0.00 | 3.15 | 0.00 |
| 4 | 14.30 | 0.565 | 1.77 | 2.36 | 0.00 | 5.31 |
| | 14.30 | 0.565 | 1.77 | 2.02 | 0.65 | 4.66 |
| | 14.30 | 0.565 | 1.77 | 1.77 | 1.29 | 4.02 |
| | 14.30 | 0.565 | 1.77 | 1.35 | 2.53 | 2.78 |
| | 14.30 | 0.565 | 1.77 | 1.13 | 3.04 | 2.27 |
| | 14.30 | 0.565 | 1.77 | 0.73 | 3.80 | 1.51 |
| | 14.30 | 0.565 | 1.77 | 0.34 | 4.50 | 0.81 |
| 5 | 14.42 | 0.410 | 2.44 | 0.00 | 5.31 | 0.00 |
| | 14.42 | 0.410 | 2.44 | 3.39 | 0.00 | 8.19 |
| | 14.42 | 0.410 | 2.44 | 2.98 | 0.81 | 7.38 |
| | 14.42 | 0.410 | 2.44 | 2.76 | 1.56 | 6.63 |
| | 14.42 | 0.410 | 2.44 | 2.38 | 2.62 | 5.57 |
| | 14.42 | 0.410 | 2.44 | 1.73 | 4.36 | 3.83 |
| | 14.42 | 0.410 | 2.44 | 1.13 | 5.88 | 2.31 |
| 6 | 14.42 | 0.410 | 2.44 | 0.62 | 7.08 | 1.11 |
| | 14.42 | 0.410 | 2.44 | 0.00 | 8.19 | 0.00 |
| | 12.91 | 0.685 | 1.46 | 1.95 | 0.00 | 4.74 |
| | 12.91 | 0.685 | 1.46 | 1.74 | 0.38 | 4.36 |
| | 12.91 | 0.685 | 1.46 | 1.54 | 0.84 | 3.90 |
| | 12.91 | 0.685 | 1.46 | 1.14 | 2.19 | 2.55 |
| | 12.91 | 0.685 | 1.46 | 0.69 | 3.28 | 1.46 |
| 7 | 12.91 | 0.685 | 1.46 | 0.22 | 4.32 | 0.42 |
| | 12.91 | 0.685 | 1.46 | 0.00 | 4.74 | 0.00 |
| | 13.48 | 0.645 | 1.55 | 2.02 | 0.00 | 4.68 |
| | 13.48 | 0.645 | 1.55 | 1.79 | 0.40 | 4.28 |
| | 13.48 | 0.645 | 1.55 | 1.66 | 0.77 | 3.91 |
| | 13.48 | 0.645 | 1.55 | 1.15 | 2.06 | 2.62 |
| | 13.48 | 0.645 | 1.55 | 0.73 | 3.11 | 1.57 |
| 8 | 13.48 | 0.645 | 1.55 | 0.27 | 4.08 | 0.60 |
| | 13.48 | 0.645 | 1.55 | 0.00 | 4.68 | 0.00 |
| | 14.03 | 0.606 | 1.65 | 2.39 | 0.00 | 5.14 |
| | 14.03 | 0.606 | 1.65 | 1.99 | 0.49 | 4.65 |
| | 14.03 | 0.606 | 1.65 | 1.74 | 1.03 | 4.11 |
| | 14.03 | 0.606 | 1.65 | 1.31 | 2.37 | 2.77 |
| | 14.03 | 0.606 | 1.65 | 0.82 | 3.40 | 1.74 |
| 10 | 14.03 | 0.606 | 1.65 | 0.54 | 4.30 | 0.84 |
| | 14.03 | 0.606 | 1.65 | 0.00 | 5.14 | 0.00 |
| | 15.11 | 0.526 | 1.90 | 2.57 | 0.00 | 5.29 |
| | 15.11 | 0.526 | 1.90 | 2.11 | 0.66 | 4.63 |
| | 15.11 | 0.526 | 1.90 | 1.79 | 1.35 | 3.94 |
| | 15.11 | 0.526 | 1.90 | 1.18 | 2.77 | 2.52 |
| | 15.11 | 0.526 | 1.90 | 0.78 | 3.83 | 1.46 |
| 11 | 15.11 | 0.526 | 1.90 | 0.42 | 4.65 | 0.64 |
| | 15.11 | 0.526 | 1.90 | 0.00 | 5.29 | 0.00 |
| | 15.52 | 0.448 | 2.23 | 2.66 | 0.00 | 5.30 |
| | 15.52 | 0.448 | 2.23 | 2.16 | 0.74 | 4.56 |
| | 15.52 | 0.448 | 2.23 | 1.89 | 1.48 | 3.82 |
| | 15.52 | 0.448 | 2.23 | 1.38 | 2.72 | 2.58 |
| | 15.52 | 0.448 | 2.23 | 0.86 | 3.80 | 1.50 |
| 11 | 15.52 | 0.448 | 2.23 | 0.51 | 4.61 | 0.69 |
| | 15.52 | 0.448 | 2.23 | 0.00 | 5.30 | 0.00 |

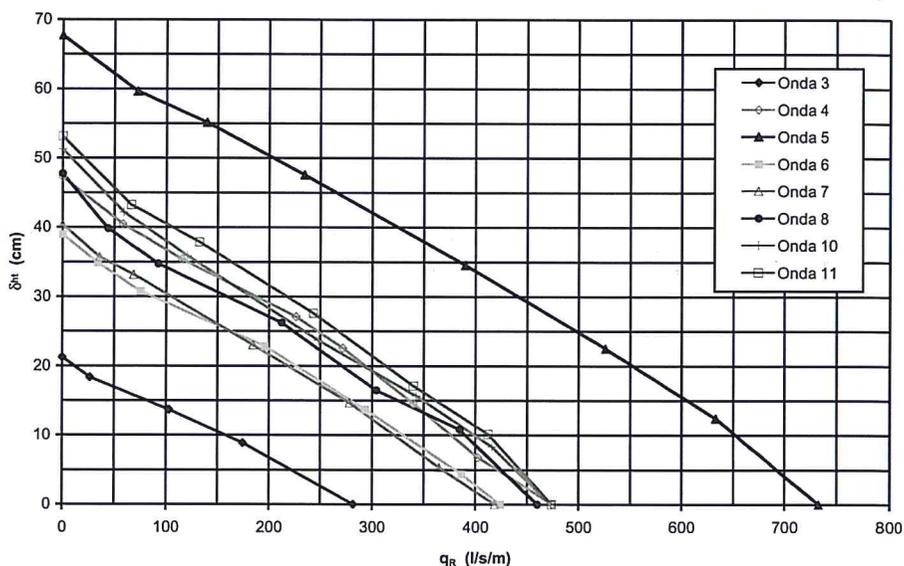


Figura 13 - Risultati sperimentali: piling-up δ_n dietro l'opera in funzione della portata di tracimazione netta q_R (valori in scala prototipo).

L'andamento della portata di tracimazione in funzione del periodo di picco dell'onda incidente è mostrato in Figura 14, dove sono riportati i dati sperimentali relativi alle onde 6-11, caratterizzate da altezza al largo $H_{1/3}$ costante e T_p variabile. Come già anticipato in merito al coefficiente di trasmissione, si può notare che la portata di tracimazione assume valori crescenti all'aumentare del periodo, a parità di altezza significativa. Questa tendenza è evidenziata dalla retta di regressione tratteggiata che approssima i dati sperimentali. Lo stesso andamento si osserva anche in Figura 15 dove i risultati sono presentati con riferimento a parametri adimensionali. Tale risultato è coerente con i dati reperibili in letteratura (Owen 1980, Aminti-Franco 1988, De Waal-Van der Meer 1992, Van der Meer-Janssen 1995).

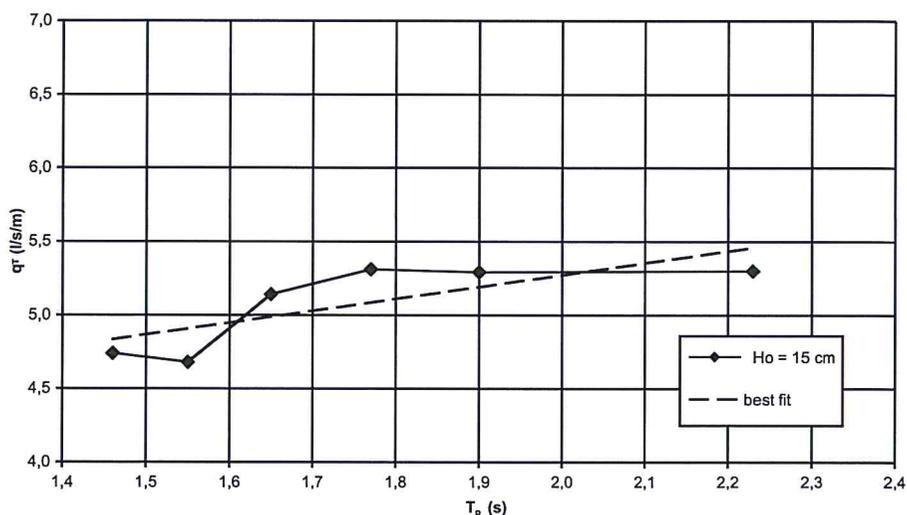


Figura 14 – Portata di tracimazione q_T in funzione del periodo di picco T_p (valori in scala modello).

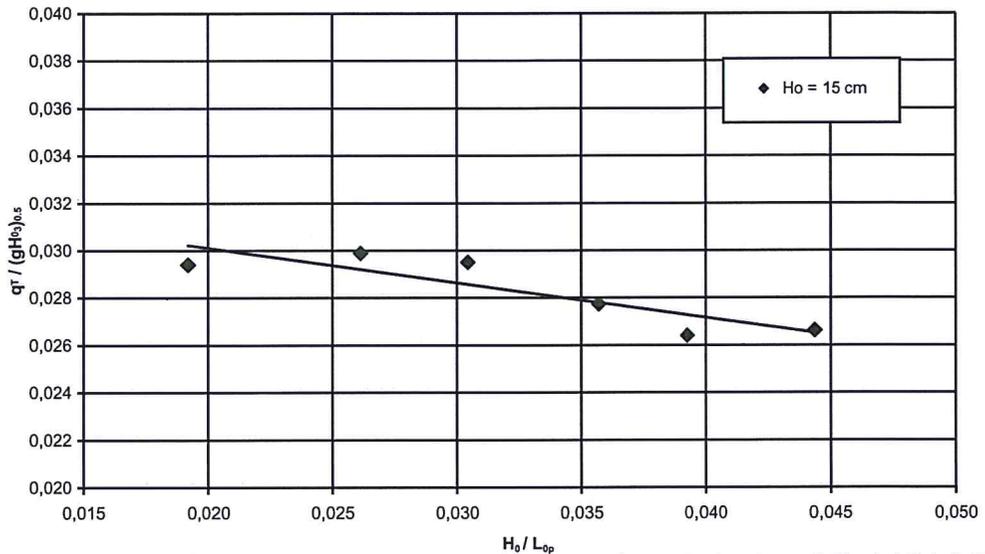


Figura 15 – Andamento della portata di tracimazione adimensionalizzata in funzione della ripidità dell'onda.

Sulla base dei valori di Q_{OUT} riportati in Tabella 4 è stato costruito il diagramma di Figura 16, in cui le grandezze sono riferite al modello. In essa è riportata la relazione che lega queste portate di filtrazione verso il largo con il livello di piling-up che si realizza nello specchio acqueo a tergo della barriera.

Nonostante la bibliografia specifica attribuisca a tale relazione (in realtà gli studi effettuati si sono basati sulla misura delle velocità puntuali nel corpo della scogliera e non sulla portata) un andamento di tipo parabolico (Loveless et Al. 1998, Lamberti et Al. 2003), l'evidenza sperimentale ha sottolineato, per il caso analizzato, una sensibile "affinità" dei due parametri (portate e livelli).

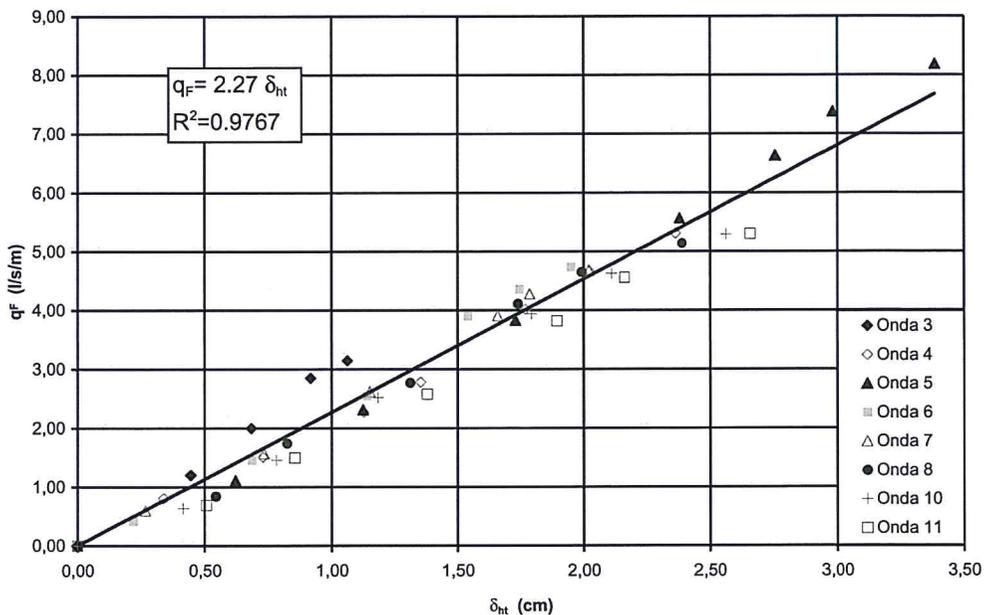


Figura 16 - Relazione tra portate di filtrazione verso il largo (q_{OUT}) e livelli di piling-up (δ_{ht}).

Per avvalorare tale affinità sono state effettuate alcune prove di filtrazione in regime stazionario; tali test sono stati effettuati mantenendo costante il dislivello tra monte e valle dell'opera permeabile. I risultati ottenuti da queste prove hanno evidenziato che, per dislivelli (riferiti al modello) superiori ad 1 cm, la dipendenza con le portate di filtrazione sembra essere pressoché lineare.

Dal confronto dei risultati ottenuti in presenza di onde (Fig. 16) ed in moto stazionario (Fig. 17) emerge che, a parità di dislivello, le portate di filtrazione in presenza di moto ondoso sono inferiori a quelle in assenza di onde, e ciò è da ricondurre all'evidente differenza tra il campo di moto oscillante (dovuto alle onde) ed il moto stazionario.

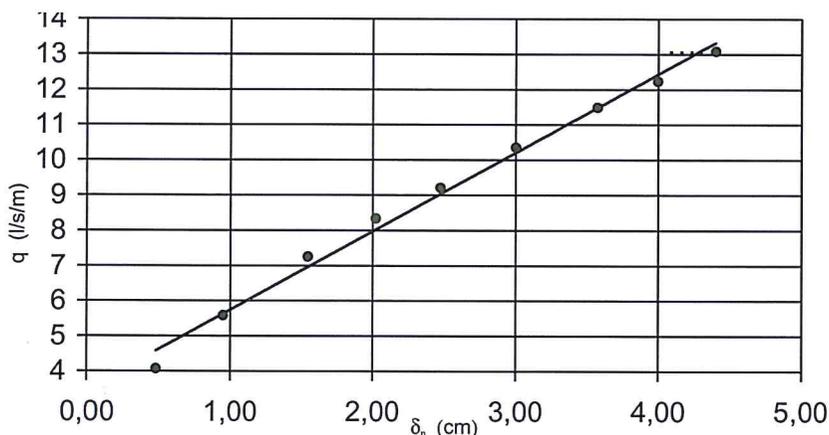


Figura 17 – Risultati dei test di filtrazione attraverso l'opera, in regime stazionario.

Configurazione II: scogliera con totale impermeabilizzazione

Nella Tabella 5 sono riportati gli attacchi ondosi realizzati con la *configurazione II* (Fig. 10) e le portate di ricircolo unitarie q_R imposte al fine di mantenere un livello costante a terno della barriera frangiflutti.

Tabella 5 – Portate di ricircolo relative alla configurazione II.

| Onda | $H_{1/3,i}$ (cm) | q_R (l/s/m) |
|------|------------------|---------------|
| 3 | 11.08 | 0.14 |
| 4 | 14.30 | 1.64 |
| 5 | 14.42 | 3.55 |
| 6 | 12.91 | 0.68 |
| 7 | 13.48 | 0.75 |
| 8 | 14.03 | 1.30 |
| 10 | 15.11 | 1.97 |
| 11 | 15.52 | 2.36 |

L'impermeabilizzazione della struttura rende indiscutibilmente nulli i contributi della portata Q_{IN} attraverso il corpo dell'opera e del flusso di ritorno offshore Q_{OUT} .

Per ciascuno spettro d'onda generato, è possibile pertanto considerare tali portate di ricircolo come rappresentative del solo contributo della portata di tracimazione Q_T , dovuto alla sola portata che oltrepassa la cresta dell'opera Q_{OV} .

I valori di tali portate di ricircolo risultano essere sensibilmente inferiori a quelli $Q_{R(\delta h=0)}$ ottenuti con la configurazione I, corrispondenti alla condizione di sovrizzo nullo. Ciò significa che la portata Q_{IN} che passa attraverso il corpo della scogliera rappresenta un contributo importante nell'espressione della portata di tracimazione Q_T .

Tali considerazioni hanno suggerito la opportunità di valutare quanto le caratteristiche del corpo della struttura influiscano sul fenomeno di tracimazione, inteso come somma del contributo di portata Q_{OV} che passa al di sopra della cresta della struttura, e della portata Q_{IN} che passa attraverso la scogliera. A tal fine si è realizzata la *configurazione III* di seguito illustrata.

Configurazione III: scogliera con parziale impermeabilizzazione

Come detto, il fatto che le portate che transitano al di sopra della struttura Q_{OV} (determinate mediante la precedente configurazione II) siano di gran lunga inferiori alle portate di tracimazione $Q_T = Q_{OV} + Q_{IN}$, determinate con la configurazione I, ha imposto di cercare di stimare il contributo alla portata di tracimazione Q_T , dato dal flusso idrico inshore Q_{IN} che si realizza attraverso la porzione "emersa" della scogliera. A tal fine è stata realizzata un'opera parzialmente impermeabile, mediante l'applicazione sulla scarpata interna del frangiflutti, di un setto impermeabile fino alla quota 0.0 m (livello di riposo) (Fig. 11).

A tale scopo sono stati effettuati 4 attacchi ondosi (Tab. 6), imponendo delle portate di ricircolo Q_R tali da mantenere livelli idrici costanti a tergo della struttura, leggermente al di sotto del livello di riposo. Tale artificio ha consentito di annullare il flusso di ritorno offshore Q_{OUT} , e valutare allo stesso tempo le portate di tracimazione Q_T . A differenza della configurazione I, analizzata in precedenza, tali portate sono somma di un contributo che oltrepassa la struttura Q_{OV} e di un contributo Q_{IN}^* che, passando attraverso la porzione di frangiflutti lasciata "scoperta" dal setto impermeabile, risulta essere una frazione dell'intera portata Q_{IN} che attraversa il corpo della scogliera in assenza di impermeabilizzazioni.

Tabella 6 - Portate di ricircolo relative alla configurazione III.

| Onda | $H_{1/3, i}$ (cm) | q_R (l/s/m) |
|------|-------------------|---------------|
| 3 | 11.08 | 2.17 |
| 4 | 14.30 | 4.96 |
| 5 | 14.42 | 8.13 |
| 7 | 13.48 | 4.03 |

Nel diagramma riportato in Figura 18 sono riportate le portate di ricircolo ricavate per le tre diverse configurazioni descritte, in funzione delle altezze d'onda incidenti misurate al piede dell'opera.

Si ricorda che, per un determinato spettro d'onda, le portate di ricircolo riportate nel diagramma hanno un diverso significato a seconda della configurazione cui si riferiscono.

In particolare, riassumendo il significato delle portate di ricircolo ricavate per ciascuna configurazione, si ha che:

- per la configurazione I, essendo riportate le portate di ricircolo $Q_{R(\delta h=0)}$ ricavate nel caso di livello di piling-up nullo ($Q_{OUT} = 0$), si ha: $Q_R = Q_T = Q_{OV} + Q_{IN}$;
- per la configurazione II, essendo nulli i flussi in/off-shore ($Q_{IN} = Q_{OUT} = 0$) attraverso il corpo della scogliera, si ha: $Q_R = Q_{OV}$;
- per la configurazione III, essendo nullo il flusso di ritorno off-shore ($Q_{OUT} = 0$) attraverso il corpo del frangiflutti, si ha: $Q_R = Q_T = Q_{OV} + Q_{IN}^*$, dove il termine con l'asterisco rappresenta la portata inshore che passa attraverso il corpo della struttura, nella porzione "emersa" dell'opera.

Il diagramma riportato in Figura 18 evidenzia come le curve relative alle configurazioni I e III presentino valori di portate di ricircolo simili, soprattutto per i valori più elevati dell'altezza d'onda incidente al piede dell'opera. La curva relativa alla configurazione II ha un andamento simile a quello delle due curve precedenti, ma con valori di portate di ricircolo decisamente inferiori. Ricordando il significato delle portate di ricircolo ricavate per le tre diverse configurazioni, si può concludere che il contributo maggiore all'intera portata di tracimazione Q_T è dovuto al flusso idrico inshore Q_{IN} che si realizza attraverso il corpo della struttura. In particolare, la porzione di struttura che maggiormente interagisce con l'onda, in termini di portate di tracimazione Q_T , è quella che si trova al di sopra del livello di riposo; in tale zona si verifica il flusso inshore Q_{IN}^* che, sommato alla portata Q_{OV} che passa al di sopra della cresta della scogliera, restituisce approssimativamente i valori delle portate di tracimazione Q_T ricavate con la configurazione I nel caso di sovrizzo nullo ($Q_{R(\delta h=0)} = Q_T$). La differenza che si riscontra tra i valori di portata determinati con la configurazione I e quelli determinati con la configurazione III, sembra poter essere attribuita alla frazione del flusso inshore Q_{IN} dovuta al moto di filtrazione che si realizza nella porzione di scogliera situata al di sotto del medio mare.

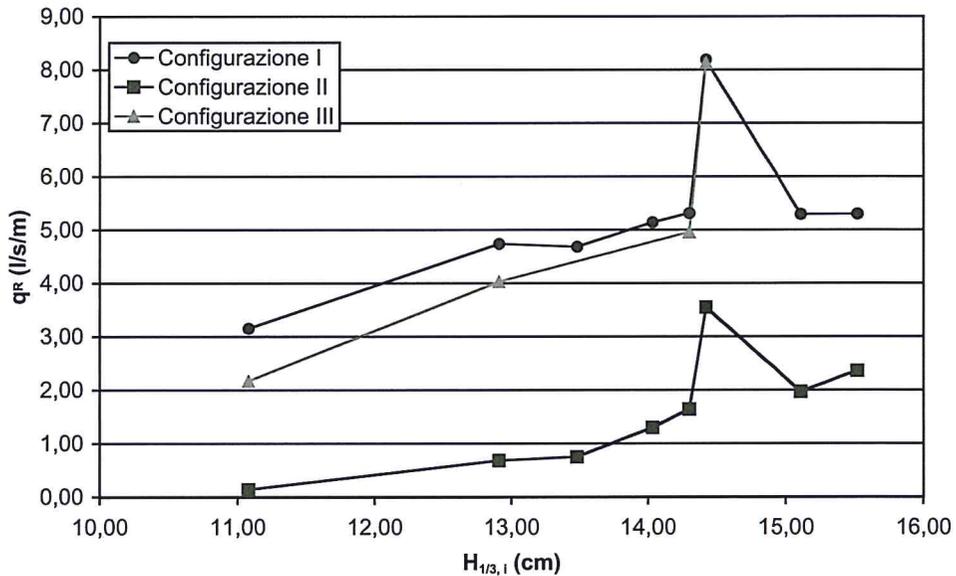


Figura 18 – Portate di tracimazione netta in funzione dell'altezza d'onda incidente al piede dell'opera.

Tutti e tre i grafici mostrano poi un comportamento singolare per l'onda 5 ($H_{1/3,1} = 14.42$ cm), manifestando un "picco anomalo" nelle portate di tracimazione rispetto agli altri dati. In effetti tale onda, come anticipato nel paragrafo della "descrizione dell'apparato sperimentale" (vedi Tab. 2), è la più alta in assoluto, in fase di generazione, ed è pure quella caratterizzata dal massimo periodo d'onda ($T_p = 2.44$ s), ma, proprio per queste caratteristiche, si riduce notevolmente in fase di propagazione verso la struttura fino a presentarsi, al piede dell'opera con altezza significativa inferiore ad onde più corte e basse in generazione. Sembra perciò logico pensare che, proprio l'elevato periodo e la condizione di evidente frangimento possano essere responsabili della descritta "anomalia" sperimentale.

Conclusioni

Nel presente lavoro è stato indagato il comportamento di una scogliera emersa a cresta bassa, posta nella *surf zone*, con riferimento ai fenomeni di riflessione, trasmissione, tracimazione dell'onda e piling-up che si realizza a tergo dell'opera. L'interazione onda-struttura è stata studiata riproducendo

circa 60 attacchi ondosi irregolari.

In una prima fase è stata analizzata una struttura permeabile, che ha permesso di stimare le portate di tracimazione (al netto delle portate di filtrazione dirette verso il largo), per diversi valori di piling-up, mentre nella seconda fase è stato posto un setto impermeabile sulla scarpata lato riva della stessa scogliera (dapprima fino alla quota sommitale della scogliera, poi solo fino alla quota 0.0) per quantificare separatamente le portate di overtopping Q_{OV} e di trasmissione attraverso la porzione “emersa” della struttura Q_{IN} e quindi per comprendere più nel dettaglio il complesso processo di filtrazione attraverso l’opera, legato anche all’incremento del livello idrico (piling-up) dietro al frangiflutti.

I test relativi ai fenomeni di *riflessione* e *trasmissione* hanno messo in luce i seguenti risultati:

- il coefficiente di riflessione K_R assume valori compresi tra 0.24 e 0.31 e presenta un andamento decrescente con la ripidità dell’onda;
- il coefficiente di trasmissione ha lo stesso andamento di K_R in funzione della ripidità ed è stimato con buona precisione dall’equazione di natura teorico-sperimentale ricavata da Ruol-Faedo (2002), nel caso di onde tracimanti.

Le prove sperimentali relative al fenomeno di *tracimazione e piling-up* per l’opera indagata hanno evidenziato i seguenti risultati:

- la portata di tracimazione Q_T risulta poco influenzata, ma comunque crescente col periodo dell’onda, a parità di altezza significativa;
- la relazione tra la portata di ricircolo Q_R (ossia la portata di tracimazione netta) e il piling-up δ_h è descritta con ottima approssimazione da una legge lineare;
- vi è una elevata “affinità” tra la portata di ritorno offshore Q_{OUT} e il livello di piling-up δ_h a tergo della barriera;
- il contributo maggiore alla portata di tracimazione Q_T è dato dal flusso inshore Q_{IN} che passa attraverso la porzione emersa (e più permeabile) della scogliera.

Bibliografia

- Allsop N. e Hettiarachi S. (1988) – *Reflection from coastal structures*. Proc. of the 21st ICCE, ASCE. Malaga, pp. 782-794.
- Aminti P. e Franco L. (1988) - *Wave overtopping on rubble mound breakwaters*. Proc. of the 21st ICCE, ASCE. Malaga, pp.770-781.
- Calabrese M., Vicinanza D. e Buccino M. (2002) - *Trasmissione ondosa a tergo di scogliere a cresta bassa*. Studi costieri, 5: 83-96.
- Davies B. L., Kriebel D. L. (1992) - *Model testing on Wave Transmission past Low Crested Breakwaters*. Proc. of the 23rd ICCE, ASCE. Venice, pp. 1115-1128.
- De Waal, J.P. e Van der Meer, J.W. (1992) - *Wave runup and overtopping on coastal structures*. Proc. of the 23rd ICCE, ASCE. Venice, pp. 1758-1771.
- Diskin, M.H. et al. (1970) - *Piling-up behind low and submerged permeable breakwaters*. Journal of Waterways and Harbours Division, ASCE, pp. 359-371.
- Gironella X., et Al. (2002) - *Submerged detached breakwaters: towards a functional design*. Proc. of the 28th ICCE, ASCE. Cardiff, pp. 1768-1777.
- Gomez Pina, G. e Valdes, J.M. (1990) - *Experiments on coastal protection submerged breakwaters: a way to look at the results*. Proc. of the 22nd ICCE, ASCE. Delft, pp. 1592-1605.
- Loveless J.H., Debski D., MacLeod A.B. (1998) - *Sea level set-up behind detached breakwaters*. Proc. of the 26th ICCE, ASCE. Copenhagen, pp. 1665-1678.
- Lamberti A., Zanuttigh B., Tirindelli M. (2003) – *Evaluation of overtopping processes over low-crested structures*. Int. Conf. on the Mediterranean Coastal Environment – MEDCOAST 03. Ravenna, pp. 1929-1940.
- Owen, M.W. (1980) - *Design of seawalls allowing for wave overtopping*. Report EX 924, Hydraulics Research Station, Wallingford, UK.

- Ruol, P., Faedo, A. (2002) - *Physical Model Study on Low-Crested Structures under Breaking Wave Conditions*. Proc. of the Intern. MEDCOAST Workshop on Beaches of the Mediterranean & the Black Sea, Kusadasi, Turkey, pp. 83-96.
- Seelig W.N. (1980) – *Two dimensional tests of wave transmission and reflection characteristics of laboratory breakwaters*. Technical Report n. 80-1, U.S. Army Corps of Eng., CERC.
- Van der Meer, J.W., Janssen, W. (1995) - *Wave Run-up and Wave Overtopping at dikes*. Wave Forces on Inclined and Vertical Structures, ASCE, pp. 1-27.

Manoscritto ricevuto il 30/10/2003, accettato il 27/11/2003.