

Trasmissione ondosa a tergo di scogliere a cresta bassa

Mario Calabrese ¹, Diego Vicinanza ², Mariano Buccino ¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale "Girolamo Ippolito",
Università degli Studi di Napoli Federico II, Via Claudio 21, 80125 Napoli. calabres@unina.it.

² DIC-SUN, Dipartimento di Ingegneria Civile,
Seconda Università di Napoli, via Roma, 29 - 81031 Aversa (CE).

Riassunto

Nella progettazione funzionale delle scogliere a cresta bassa, particolare attenzione deve essere rivolta alla determinazione della energia ondosa residua a tergo delle opere. Questo obiettivo è generalmente perseguito attraverso l'applicazione di formule empiriche che esprimono il coefficiente di trasmissione, che rappresenta, approssimativamente, l'aliquota dell'energia ondosa incidente trasferita nell'area protetta, come funzione della geometria delle strutture.

Il lavoro è dedicato alla validazione di una formula che gli Autori hanno recentemente proposto sulla base di un'indagine sperimentale in grande scala svolta presso il Grosser WellenKanal (GWK) di Hannover, Germania. L'analisi è stata condotta attraverso il confronto con un ampio insieme di dati sperimentali raccolti in diversi laboratori europei ed americani. La formula sembrerebbe in ragionevole accordo con i dati, in particolar modo per strutture sommerse con ampia larghezza del coronamento

Parole chiave: scogliere a cresta bassa, coefficiente di trasmissione.

Abstract

Low crested and submerged breakwaters are widely used measures for the protection of coastal areas. The functional design of these structures requires the prediction of the wave transmission behind them, as it will influence both beach response and the quality of water shoreward of it. This goal is typically achieved by using empirical formulae, which return the transmission coefficient (ratio between transmitted and incident wave height) as a function of breakwater cross section characteristics.

This study aims at analysing the reliability of a formula, which the Authors developed on the basis of the results of large scale model tests conducted at Grosser WellenKanal of Hannover, Germany. The survey has been performed through the comparison with a large data series, made up on results of experiments conducted at different laboratories. The formula should reasonably agree with the data, especially for wide crested submerged breakwaters.

Key-words: low crested breakwaters, transmission coefficient.

Introduzione

Le barriere distaccate, sommerse o debolmente emergenti, sono utilizzate, spesso in combinazione con interventi di ripascimento artificiale, per la protezione delle coste in erosione. La loro funzione principale è quella di ridurre l'energia del moto ondoso incidente, in modo da garantire valori dell'agitazione residua compatibili con la stabilità del litorale e, nel contempo, con le esigenze di un adeguato ricambio idrico nell'area protetta.

Nella progettazione dell'opera, particolare attenzione è, quindi, rivolta alla stima del coefficiente di trasmissione, K_t , che rappresenta approssimativamente l'aliquota dell'energia ondosa incidente trasferita al di sopra ed attraverso la struttura. Inoltre, poiché esso è funzione della geometria della sezione trasversale dell'opera, è necessario renderne la stima quanto più accurata possibile, anche al fine di evitare inutili diseconomie nella realizzazione dell'intervento.

Le formule attualmente a disposizione, di carattere essenzialmente empirico, muovono in pratica dalla medesima relazione funzionale che lega l'altezza d'onda trasmessa, H_t , alle caratteristiche geometriche dell'opera nonché a quelle del moto ondoso incidente:

$$H_t = f(\rho, \mu, g, H_i, T_i, d, R_c, B, D_{50}, \alpha) \quad (1)$$

in cui (Fig. 1):

- ρ e μ sono rispettivamente la densità e la viscosità dinamica dell'acqua;
- g è l'accelerazione di gravità;
- H_i e T_i sono rispettivamente altezza d'onda e periodo del moto ondoso incidente;
- d è la profondità al piede dell'opera;
- R_c è la quota di cresta (positiva per strutture emergenti);
- B è la larghezza del coronamento;
- D_{50} è il diametro della mantellata;
- α è l'angolo che il paramento esterno dell'opera forma con il piano orizzontale.

Le diverse espressioni si differenziano nella scelta delle grandezze ritenute prevalenti nel processo di trasmissione, nonché dei raggruppamenti adimensionali adoperati.

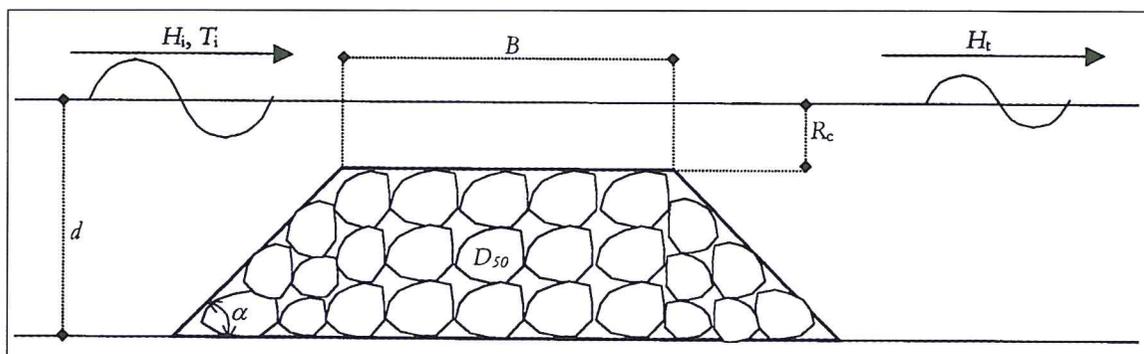


Figura 1 - Parametri geometrici e caratteristiche ondose.

Nella formula di van der Meer (1990), il coefficiente di trasmissione, rapporto tra le altezze d'onda significative trasmessa ed incidente, $K_t = H_{st}/H_{si}$, è funzione unicamente della quota di cresta e dell'altezza d'onda incidente, mentre in quella di Daemen (1991) vengono tenuti in conto gli effetti della estensione strutturale, del periodo ondoso incidente e della permeabilità della mantellata espressa dal diametro medio D_{50} . Quest'ultimo non è incluso nella formula di d'Angremond et al. (1996) dove l'effetto della permeabilità dell'opera è semplicemente espresso da un fattore di scala, differente per strutture "permeabili" ed "impermeabili".

L'espressione proposta da Seabrook e Hall (1998), calibrata su circa 800 test effettuati con onde irregolari, tiene conto, attraverso specifici parametri adimensionali, dei contributi del frangimento, della tracimazione, dell'attrito e della filtrazione.

Partendo dall'analisi dei risultati di un'indagine sperimentale in grande scala condotta presso il Coastal Research Centre – ForschungsZentrum Kuste di Hannover (Germania) Calabrese et al. (2000a e 2000b) hanno suggerito un'ulteriore formula per la stima di K_t , d'ora in poi indicata con l'acronimo CVB. Peculiarità della espressione è quella di essere stata calibrata su test condotti con il modello di

struttura esposto all'azione di onde già frante; tali condizioni sono assai frequenti negli interventi di difesa dei litorali e relativamente poco studiate. Si aggiunga a questo che la scala del modello, prossima all'unità, ha consentito di minimizzare gli effetti scala derivanti dalla riproduzione imperfetta sia del frangimento delle onde (Dally et al., 1985) sia della permeabilità dell'opera.

Nel presente lavoro, le previsioni della CVB sono state verificate utilizzando un insieme piuttosto ampio di dati sperimentali ottenuto da indagini svolte in diversi laboratori europei ed americani. La formula è stata quindi confrontata con le stime di van der Meer (1990), Daemen (1991), d'Angremond et al. (1996) e Seabrook ed Hall (1998).

Formule per il calcolo del coefficiente di trasmissione

Le formule di van der Meer (1990), Daemen (1991) e d'Angremond et al. (1996)

Una prima formula per il calcolo dell'intensità di agitazione ondosa a tergo di strutture a gettata, è stata proposta nel 1990 da van der Meer a partire dall'analisi dei risultati delle esperienze svolte da Seelig (1980), Allsop (1983), Powell ed Allsop (1985), Daemrich e Kahle (1985), Ahrens (1987) e van der Meer (1988). In essa il coefficiente di trasmissione, K_t , decresce linearmente con il rapporto tra la quota di cresta, R_c , e l'altezza d'onda significativa incidente H_{si} :

$$K_t = 0.46 - 0.3 \cdot \left(\frac{R_c}{H_{si}} \right) \quad (2)$$

La (2) restituisce valori del coefficiente di trasmissione superiori all'unità o minori di zero, per valori di R_c/H_{si} rispettivamente molto grandi o molto piccoli. Per ovviare a tale inconveniente la formula è stata "tagliata orizzontalmente" imponendo che essa attinga il massimo valore per $K_t = 0.8$ ed il minimo per $K_t = 0.1$ (Fig. 2).

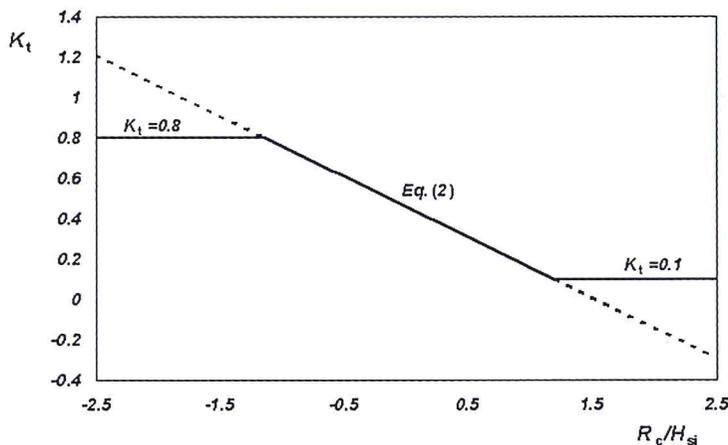


Figura 2 - La formula di van der Meer.

Con l'intento di ridurre lo scarto tra i valori misurati del coefficiente di trasmissione e quelli previsti dall'eq. (2), Daemen (1991) ha rielaborato i dati sperimentali utilizzati da van der Meer, rimuovendo quelli relativi ai "reef breakwater" ¹ ed integrandoli con quelli delle esperienze da lui stesso condotte

¹ Dati di Ahrens, 1987. Si tratta di strutture dinamicamente stabili, il cui comportamento nei riguardi della trasmissione apparve tanto diverso da richiedere una formula ad hoc. Nel seguito verrà discussa unicamente la formula valida per strutture "convenzionali".

presso lo “Schelde flume” di Delft Hydraulics. Rispetto alla formula di van der Meer, gli effetti dell'altezza d'onda incidente e della quota di cresta sono stati separati adimensionalizzando entrambe le grandezze con il diametro medio della mantellata; inoltre sono stati tenuti in conto gli effetti del periodo ondoso incidente e della larghezza del coronamento.

La formula porge:

$$K_t = a \cdot \frac{R_c}{B} + b \quad (3)$$

con a dipendente dall'altezza d'onda relativa H_{si}/D_{50} :

$$a = 0.031 \cdot \left(\frac{H_{si}}{D_{50}} \right) - 0.24 \quad (4)$$

e b funzione, oltre che della stessa altezza d'onda relativa, della estensione della berma di cresta, B , e della ripidità di picco, s_{op} :

$$b = -5.42 \cdot s_{op} + 0.0323 \cdot \frac{H_{si}}{D_{50}} - 0.0017 \cdot \left(\frac{B}{D_{50}} \right)^{1.84} + 0.51 \quad (5)$$

dove la ripidità è così definita:

$$s_{op} = \frac{2 \cdot \pi \cdot H_{si}}{g \cdot T_{pi}^2} \quad (6)$$

Così come l'eq. (2), la (3) è limitata “orizzontalmente” tra i valori 0.075 e 0.75. I campi di applicabilità della formula sono: $1 < H_{si}/D_{50} < 6$ e $0.01 < s_{op} < 0.05$.

Un'ulteriore analisi dello stesso set di dati sperimentali è stata infine condotta da d'Angremond et al. (1996). Il data base, integrato da ulteriori tests condotti a Delft Hydraulics, è stato filtrato, eliminando i test caratterizzati da onde molto ripide, $s_{op} = 0.6$, o frangenti, $H_{si}/d = 0.54$, e quelli relativi a strutture notevolmente sommerse, $R_c/H_{si} < -2.5$, o emerse, $R_c/H_{si} > 2.5$, perché ritenuti poco significativi. La formula, valida per strutture convenzionali, porge:

$$K_t = -0.4 \cdot \left(\frac{R_c}{H_{si}} \right) + \left(\frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.31} \cdot (1 - e^{-0.5 \cdot \xi}) \quad (7)$$

dove $\xi = \tan \alpha (2pH_{si}/gT_{pi}^2)^{0.5}$ è il parametro di Iribarren, e c è un coefficiente pari a 0.8 per strutture impermeabili e a 0.64 per strutture permeabili. Il coefficiente K_t , infine, è limitato tra i valori di 0.075 e 0.8.

La formula di Seabrook ed Hall (1998)

Un'ampia indagine sperimentale svolta presso il QUCERL (Canada), ha consentito la calibrazione della formula di Seabrook ed Hall (1998). Complessivamente il data base comprendeva 800 test bidimensionali condotti utilizzando 13 differenti geometrie strutturali di barriere sommerse ed affioranti ($R_c = 0$) con 5 diversi livelli idrici di quiete.

La formula porge:

$$K_t = 1 - \left[e^{\left(-0.65 \cdot \left| \frac{R_c}{H_{si}} \right| - 1.09 \left(\frac{H_{si}}{B} \right) \right)} + 0.047 \cdot \left| \frac{B \cdot R_c}{L \cdot D_{50}} \right| - 0.067 \cdot \left| \frac{R_c \cdot H_{si}}{B \cdot D_{50}} \right| \right] \quad (8)$$

in cui:

- R_c/H_{si} è il “wave breaking parameter”, corrispondente alla quota di cresta relativa della formula di van der Meer (1990).
- B/H_{si} , è il “wave overtopping parameter”, corrispondente alla larghezza relativa di cresta della formula di d’Angremond et al. (1996). La tracimazione non influenza in modo significativo la trasmissione ondosa a tergo di strutture sommerse, per cui il parametro diviene importante solo per sommergenze molto contenute.
- $R_c H_{si} / (B D_{50})$, è il “frictional loss parameter”, ottenuto da una similitudine con la formula di Darcy-Weisbach, che rappresenta l’aliquota di energia dissipata per attrito.
- $R_c B / (L D_{50})$, è l’“internal loss parameter”, rappresentativo delle perdite di carico associate al flusso idrico all’interno dell’opera.

Gli Autori consigliano prudenza nell’applicare la formula all’esterno dei range:

$$0 \leq \left| \frac{B \cdot R_c}{L \cdot D_{50}} \right| \leq 7.08 \quad (9)$$

$$0 \leq \left| \frac{R_c \cdot H_{si}}{B \cdot D_{50}} \right| \leq 2.14 \quad (10)$$

La CVB (2002)

Gli Autori hanno recentemente proposto una formula per il calcolo del coefficiente di trasmissione, sulla base dei risultati di prove sperimentali in grande scala condotte presso il Grosser Wellen Kanal (GWK) di Hannover, Germania (Fig. 3). Particolarità dell’indagine è quella di aver disposto il modello di diga su fondali limitati, esponendolo all’attacco di onde frangenti e/o frante. I test sono stati condotti su due differenti configurazioni strutturali caratterizzate da diverse larghezze della berma di coronamento ($B = 1$ m e $B = 4$ m). I livelli idrici sono stati variati tra 1.0 m ed 1.7 m, conseguendo così cinque diverse quote della cresta ($R_c = -0.4$ m, -0.2 m, 0 m, $+0.2$ m, $+0.3$ m). L’espressione finale della formula è:

$$K_t = a \cdot \frac{R_c}{B} + b \quad (11)$$

in cui:

$$a = \left(0.6957 \cdot \frac{H_{si}}{d} - 0.7021 \right) \cdot \exp \left(0.2568 \cdot \frac{B}{H_{si}} \right) \quad (12)$$

e

$$b = [1 - 0.562 \cdot \exp(-0.0507 \cdot \xi)] \cdot \exp \left(-0.0845 \cdot \frac{B}{H_{si}} \right) \quad (13)$$

essa può essere applicata se:

$$\frac{B}{H_{moi}} \leq \frac{1}{0.2568} + 0.96 \left| \frac{R_c}{H_{moi}} \right|^{-0.8979} \quad \text{per } R_c < 0 \quad (14)$$

$$\frac{B}{H_{moi}} \geq \frac{1}{0.2568} + 0.7129 \cdot \ln \left(\frac{R_c}{H_{moi}} \right) - 0.7967 \quad \text{per } R_c > 0 \quad (15)$$

ed è limitata tra i valori 0.08 e 0.8 del coefficiente di trasmissione.

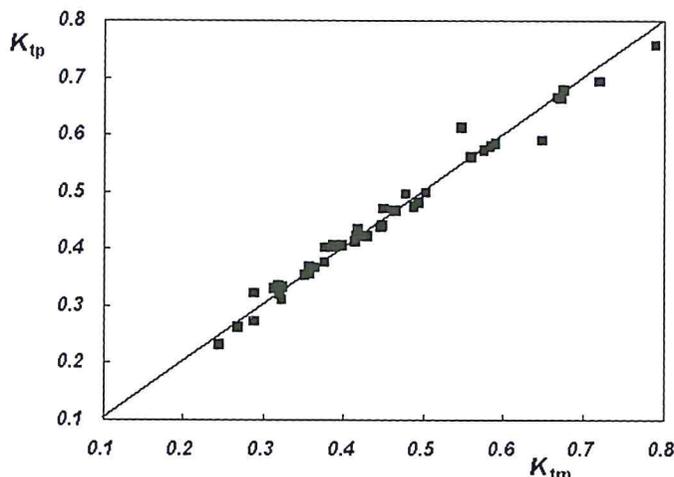


Figura 3 - Confronto tra la CVB e dati sperimentali raccolti al GWK (Calabrese et al., 2002a e 2002b).

La CVB conserva la struttura lineare delle equazioni (2)-(3)-(7) e, come nella formula di Daemen (1991), “separa” la quota di cresta dall’altezza d’onda incidente. Adoperando per l’adimensionalizzazione di queste due grandezze la larghezza di coronamento, B , si ottengono due parametri, R_c/B e B/H_{si} , di chiaro significato fisico: il primo regola il decadimento di un frangente che si propaga su di una “shelf beach”² (Horikawa e Kuo, 1966; Dally et al., 1985), strutturalmente abbastanza simile ad una barriera sommersa, ed il secondo è il parametro di tracimazione già incontrato nelle formule di d’Angremond et al. e di Seabrook ed Hall.

Viene, inoltre, tenuta in conto l’influenza della profondità di sedime dell’opera attraverso l’indice di frangimento H_{si}/d . L’eq. (12) suggerisce che un incremento di tale parametro comporta una riduzione della trasmissione per strutture sommerse e un incremento per quelle emergenti. Nel primo caso si può immaginare che un’onda frangente già al piede dell’opera continui a dissipare la propria energia lungo il paramento della diga, riducendo quindi la propria altezza più di quanto farebbe un’onda, di pari altezza, che inizi a frangere sulla cresta. D’altro canto, per strutture emergenti, i risultati di una recente indagine sperimentale condotta da van Gent (1999) mostrano un incremento del run up (relativo all’altezza d’onda incidente) al ridursi del fondale; tale fenomeno potrebbe giustificare un incremento del coefficiente di trasmissione per strutture emergenti su fondali limitati.

La formula può essere applicata anche a strutture impermeabili, che non possiedono un D_{50} ben definito, anche se i legami funzionali tra i parametri potrebbero essere differenti.

Confronto tra CVB e dati sperimentali

Le previsioni della CVB sono state confrontate con i risultati di test condotti in differenti laboratori europei ed americani su strutture a gettata di massi naturali disposti alla rinfusa. Il confronto è preceduto da una breve sintesi delle caratteristiche salienti di ciascuna delle indagini sperimentali analizzate.

Gli studi sperimentali

I dati fanno riferimento ai seguenti lavori:

Seelig (1980)

Gli esperimenti sono stati condotti presso il canale ad onde del CERC, USA. La sezione trasversale dei modelli comprendeva una mantellata ed un nucleo con rapporto tra i diametri mediani di circa 3.8. La berma di sommità aveva larghezza costante, pari a 0.40m ed il paramento lato mare aveva pendenza 1:1.5. I test sono caratterizzati da valori piuttosto elevati della ripidità, s_{op} .

² Ci si riferisce ad una spiaggia sommersa, costituita da un tratto a pendenza costante seguito da un fondale orizzontale teoricamente indefinito.

Powell ed Allsop (1985)

I test sono stati condotti presso HR Wallingford, UK, su modelli di diga realizzati con materiale omogeneo del diametro medio di 0.076 m. Le strutture avevano larghezza di coronamento variabile tra 0.045 m e 0.318 m. Entrambi i paramenti dei modelli avevano pendenza 1:1.5, eccezion fatta per una struttura con paramento esterno di pendenza 1:3. Così come nei test condotti al GWK, le strutture erano imbasate su fondali limitati ed esposte all'azione dei frangenti; pertanto il confronto con questi dati appare di particolare rilievo.

van der Meer (1990)

L'indagine sperimentale è stata svolta presso DELFT HYDRAULICS, Olanda. Sono stati adoperati 3 distinti modelli, rappresentativi rispettivamente di una struttura emergente, $R_c = 0.125$ m, di una affiorante, $R_c = 0$ e di una sommersa, $R_c = -0.09$. Apparentemente la sezione trasversale della struttura emergente era costituita da materiale omogeneo con $D_{50} = 0.034$ m, mentre negli altri due modelli era presente un nucleo. La larghezza di coronamento è stata mantenuta costante, 0.30 m; entrambi i paramenti avevano pendenza 1:2.

Daemen (1991)

I test sono stati svolti presso lo Schelde flume di DELFT HYDRAULICS. Il canale è lungo 50 m, largo 1.0 m e profondo 1.2 m. Il modello utilizzato era costituito da un nucleo di diametro medio 0.028 m e da una mantellata del diametro medio di 0.040 m. In alcuni test è stato adoperato un diametro di mantellata di 0.061 m. La struttura aveva larghezza costante, $B = 0.34$ m, con entrambi i paramenti di pendenza 2:3.

UCA (2001)

Gli esperimenti sono stati condotti nel canale ad onde del laboratorio di Ingegneria Costiera dell'Università di Cantabria, Santander, Spagna (Sassi et al., 2002). Sono stati installati due modelli di diga con larghezza di cresta rispettivamente di 0.25 m e 1.0 m; la pendenza dei paramenti era di 1:2. La sezione trasversale era composta da un nucleo con diametro medio di 0.018 m protetto da una mantellata del diametro di 0.0387 m. Sebbene il canale sia di dimensioni ridotte (larghezza 0.60 m, profondità 0.8 m e lunghezza 24 m) le strutture presentavano notevole estensione. Di conseguenza i rapporti B/H attingono valori assai elevati (fino a 43). I valori delle ripidità appaiono alquanto contenuti.

UPC (2002)

I test sono stati condotti in grande scala (1/4-1/6) presso il CIEM wave flume del Laboratorio d'Ingegneria Marittima (LIM/UPC) di Barcellona, Spagna (Gironella et al., 2002). La struttura era costituita da un nucleo protetto da un doppio strato di mantellata del diametro nominale di 0.106 m. Sono state impiegate due differenti larghezze di coronamento (rispettivamente 1.2 m e 2.3 m); la pendenza del paramento esterno dell'opera era di 1:2.

Le principali caratteristiche del data base sono riassunte in Tabella 1.

Tabella 1 - Il data base adoperato per il confronto.

Serie	N° test	R_c/B	B/H_{si}	s_{op}	ξ	H_{si}/d
Seelig (1980)	45	-1.05/0.52	2.25/5.00	0.01/0.064	1.59/6.53	0.13/0.36
Powell ed Allsop (1985)	42	-2.1/1.16	0.37/3.51	0.025/0.031	1.99/4.20	0.21/0.54
van der Meer (1990)	30	-0.32/0.44	1.50/3.99	0.008/0.034	2.71/5.77	0.19/0.50
Daemen (1991)	53	-0.17/0.58	2.30/10.62	0.01/0.042	3.26/6.62	0.07/0.38
UCA (2001)	53	-0.20/0.20	3.78/43.35	0.001/0.016	3.97/12.98	0.07/0.26
UPC (2002)	24	-0.09/0.24	2.66/8.38	0.02/0.03	2.69/3.55	0.17/0.31
Data set complessivo	247	-2.1/1.16	0.37/43.35	0.001/0.064	1.59/12.98	0.07/0.54

Il confronto con i dati

Il confronto tra previsioni della *CVB* e valori misurati del coefficiente di trasmissione è mostrato in Figura 4.

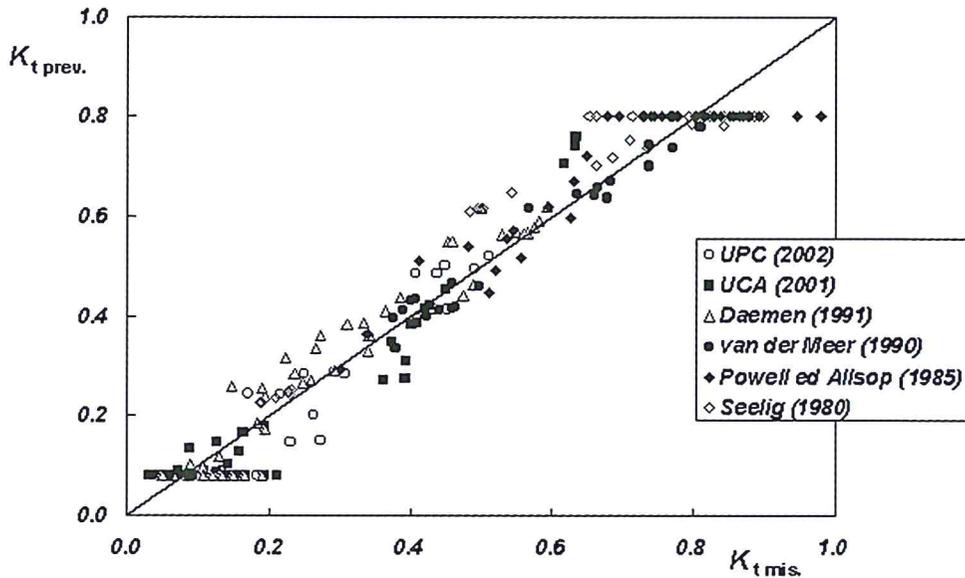


Figura 4 - Confronto tra *CVB* e dati sperimentali.

Nell'intervallo 0.08-0.8, l'accordo appare ragionevole, sebbene gli scarti siano alquanto maggiori di quelli relativi ai test di calibrazione (vedi Figura 3). Al contrario i dati sono più dispersi intorno ai valori estremi, dove la formula (11), così come le (2)-(3)-(7), rinuncia a descrivere in maniera dettagliata l'andamento del coefficiente di trasmissione. Una maniera per ovviare a tale inconveniente potrebbe essere quella di introdurre espressioni differenti all'esterno dell'intervallo 0.08-0.8. Nell'ambito del presente data set si dimostrano efficaci le seguenti formule:

$$\text{per } K_t < 0.08 \quad K_t = 0.4074 \cdot \exp \left[-8.7515 \cdot \left(\frac{H_{si}}{d} \cdot \frac{B}{L_{po}} \right)^{0.5} \right] \quad (16)$$

$$\text{per } K_t > 0.8 \quad K_t = 0.9252 \cdot \exp \left[-0.9404 \cdot \left| \frac{H_{si}}{d} \cdot \frac{D_{50}}{R_c} \right| \right] \quad (17)$$

Le eqq. (16) e (17) introducono delle discontinuità nel calcolo del coefficiente di trasmissione, ma conferiscono una maggiore affidabilità complessiva alla *CVB* (Fig. 5).

In ogni caso si consiglia cautela nell'applicazione delle (16) e (17) in quanto calibrate su pochi dati sperimentali e, più in generale, della *CVB* all'esterno dell'intervallo 0.08-0.8.

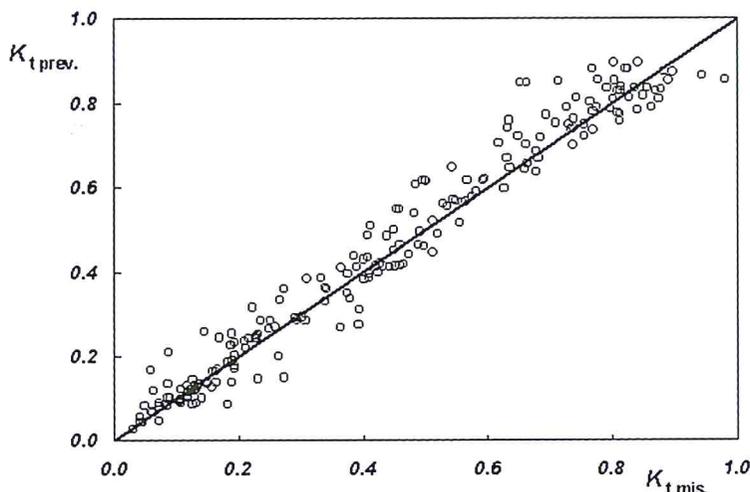


Figura 5 - CVB modificata dalle eqq. (16) e (17).

Confronto con le formule esistenti

Le previsioni della CVB sono state confrontate con quelle delle formule di van der Meer (1990), Daemen (1991), d'Angremond et al. (1996) e Seabrook ed Hall (1998). Al fine di rendere quantitativo il confronto è stato introdotto, quale indicatore di affidabilità, l'errore relativo quadratico medio, *RMSE*, definito come:

$$RMSE = \left[\sum_N \left(\frac{K_{tp} - K_{tm}}{N} \right) \right] \quad (18)$$

dove *N* rappresenta il numero di dati e K_{tp} e K_{tm} sono i valori rispettivamente previsti e misurati del coefficiente di trasmissione. La Figura 6 mostra i risultati del confronto ³.

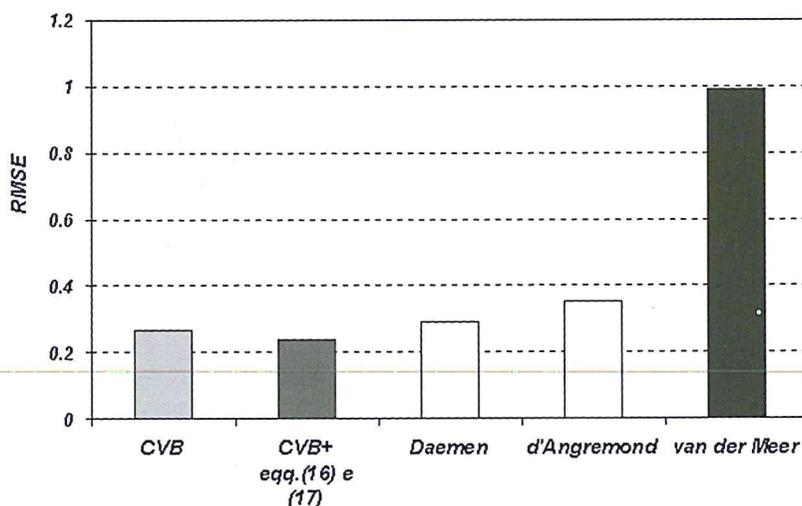


Figura 6 - Confronto tra la CVB e le formule di van der Meer, Daemen e d'Angremond.

³ Ciascuna formula è stata applicata alla porzione di data base interno al proprio campo di validità.

La *CVB* presenta il minimo errore quadratico medio, $RMSE = 0.27$, lievemente inferiore rispetto a quello della formula di Daemen, $RMSE = 0.29$, e di d'Angremond et al., $RMSE = 0.35$. L'introduzione delle eqq. (16) e (17) consente di ridurre un po' lo scarto ($RMSE = 0.24$), ma non in maniera significativa. La formula di van der Meer (1990) rivela un $RMSE$ prossimo all'unità; questo risultato potrebbe apparire sorprendente anche in considerazione del fatto che la (2) è diffusamente utilizzata nella pratica; tuttavia può essere utile sottolineare che essa è stata proposta come semplice interpolazione di dati, in funzione di un unico parametro, R_c/H_{st} , chiaramente insufficiente a descrivere, da solo, il processo di trasmissione.

La Figura 7 limita il confronto alle sole strutture non emergenti, al fine di consentire l'applicazione della formula di Seabrook ed Hall.

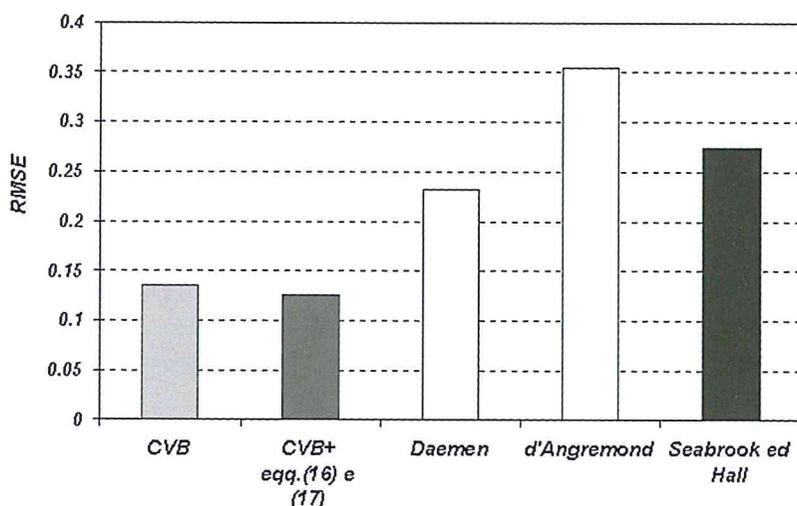


Figura 7 - Confronto tra *CVB* e formule esistenti: strutture non emergenti.

In questo caso la *CVB* mostra errori relativi significativamente più bassi rispetto a quelli delle altre formule: circa la metà di quello di Daemen e quasi un terzo di quello di d'Angremond et al. L'espressione di Seabrook ed Hall mostra un errore relativamente alto, $RMSE = 0.27$, nonostante l'ampiezza del data base utilizzato per la calibrazione della formula.

Un'ulteriore analisi è stata condotta nei campi di validità comune della *CVB* e delle altre formule, ovvero restringendo il confronto ai soli dati per i quali le espressioni fossero contemporaneamente applicabili. È sembrato, poi, conveniente escludere i dati esterni ai "campi di linearità" delle (3)-(7)-(11), dove le previsioni sono "strutturalmente" meno accurate.

La Figura 8 mostra i risultati del confronto relativo alle sole strutture emergenti. Il grafico suggerisce un sostanziale equilibrio tra le previsioni, con la formula di Daemen che fornisce il minimo errore quadratico medio, 0.19.

Per quanto riguarda le strutture sommerse, un interessante approfondimento dell'analisi può essere condotto dividendo le strutture in classi con diversa larghezza di coronamento. A partire dai dati a disposizione, le strutture sono state classificate, convenzionalmente, come strette, medie o larghe secondo che il rapporto B/D_{50} fosse minore di 5, compreso tra 5 ed 8 o superiore ad 8. I risultati del confronto sono riportati nelle Figure 9-11.

La *CVB* sembra decisamente più accurata per le strutture "larghe", dove l'errore quadratico medio è circa la metà di quello di Daemen e Seabrook ed Hall ed addirittura 1/4 di quello relativo alla formula di d'Angremond et al. Rispetto a Seabrook ed Hall, l'eq. (11) sembra più conveniente anche per strutture di media larghezza.

Riguardo l'effetto della profondità di imbasamento, purtroppo l'esiguità dei dati a disposizione rende l'analisi piuttosto incerta. In Figura 12 è mostrato il confronto per i dati caratterizzati da valori dell'indice di frangimento superiori a 0.35.

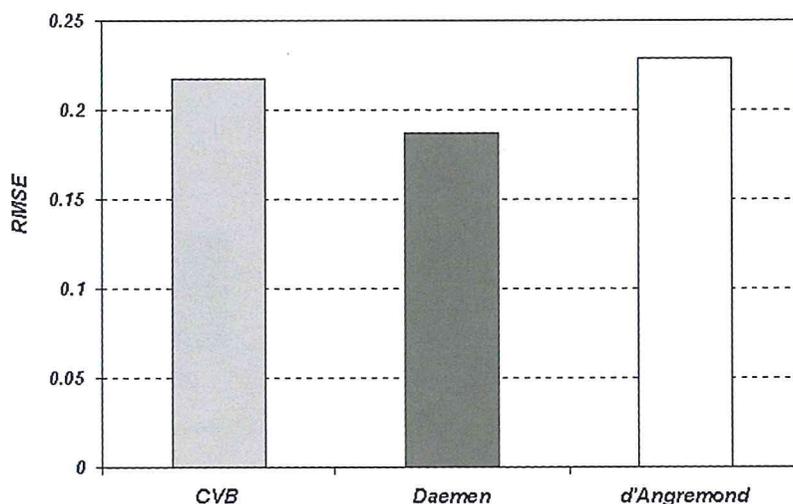


Figura 8 - Confronto tra CVB e formule esistenti: strutture sommerse.

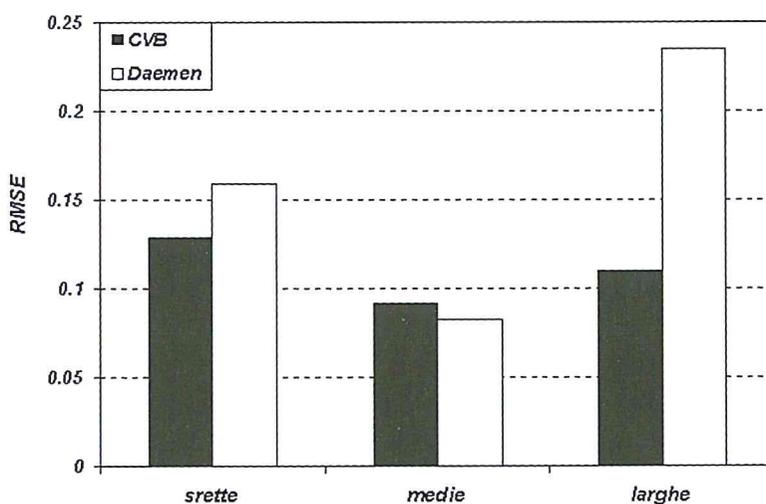


Figura 9 - Valori dell'RMSE per strutture sommerse con diversa larghezza del coronamento: confronto tra CVB e formula di Daemen (1991).

I dati si riferiscono a strutture la cui larghezza di coronamento non costituisca fonte di differenze sistematiche tra le formule. La CVB fornisce il minimo errore quadratico medio, anche se il miglioramento rispetto alle altre espressioni non appare troppo pronunciato.

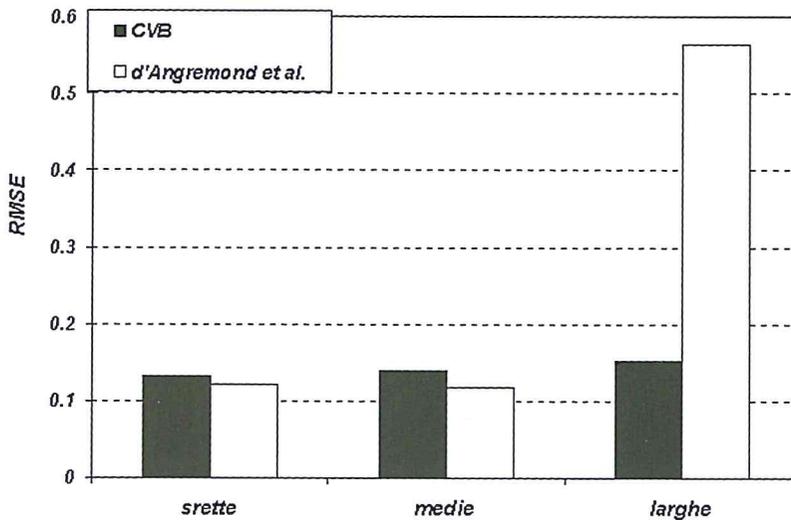


Figura 10 - Valori dell' $RMSE$ per strutture sommerse con diversa larghezza del coronamento: confronto tra CVB e formula di d'Angremond et al. (1996).

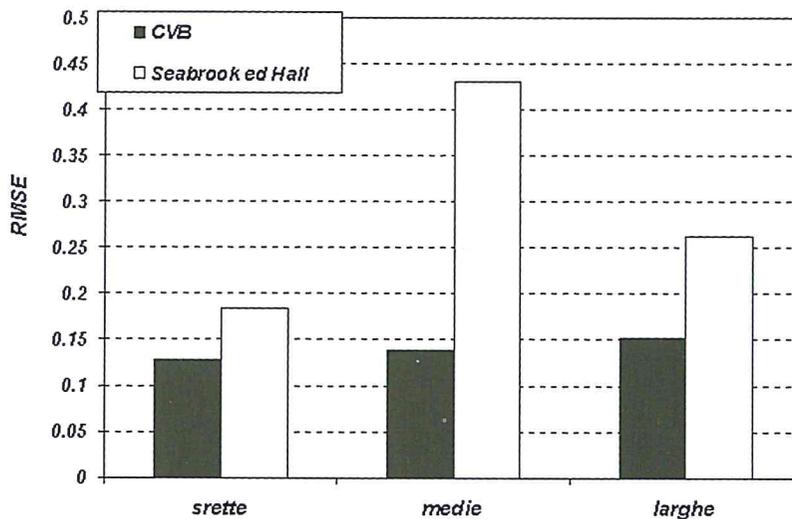


Figura 11 - Valori dell' $RMSE$ per strutture sommerse con diversa larghezza del coronamento: confronto tra CVB e formula di Seabrook ed Hall. (1998).

Discussione dei risultati e considerazioni conclusive

Nel lavoro è stata studiata l'affidabilità di una formula per la stima del coefficiente di trasmissione ondosa, CVB , proposta dagli Autori sulla base di un'indagine sperimentale in grande scala svolta presso il Coastal Research Centre – Forschungszentrum Kuste di Hannover, Germania. La formula propone quali parametri principali i rapporti R_c/B e B/H_{si} ed include, per la prima volta, l'effetto della profondità di imbasamento dell'opera. Lo studio è stato svolto confrontandone le previsioni con i dati relativi a prove sperimentali condotte su modelli di strutture a gettata di massi naturali disposti alla rinfusa. La formula è sembrata in ragionevole accordo con i dati (Figg. 4 e 5). Più in generale, l'analisi ha confermato l'efficacia dei parametri di base della CVB : il rapporto R_c/B , infatti, sembrerebbe "spiegare" quasi completamente la variazione del coefficiente di trasmissione per strutture sommerse,

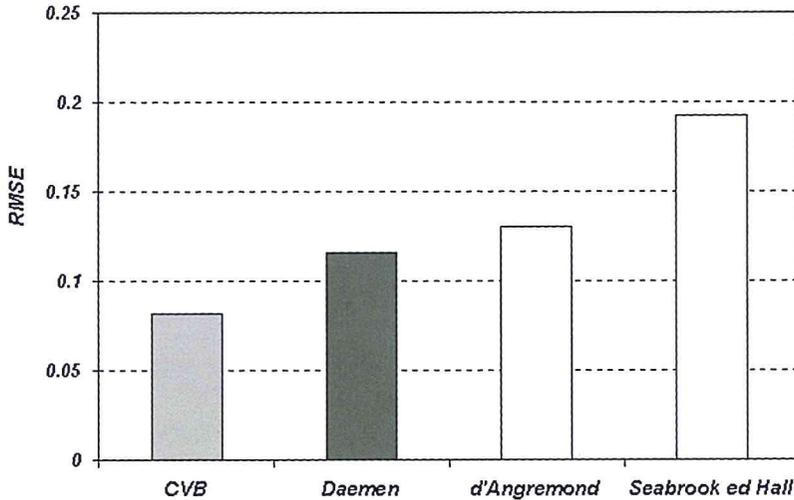


Figura 12 - Confronto tra le formule per strutture ubicate in acque basse ($H/d = 0.35$).

mentre il parametro di tracimazione, B/H_{si} , si è dimostrato assai efficace, nell'ambito dei dati a disposizione, per strutture affioranti o debolmente emergenti.

Una seconda parte dello studio è stata dedicata al confronto con le altre formule sin qui proposte dalla letteratura specializzata. La *CVB* sembrerebbe particolarmente conveniente per barriere non emergenti ($R_c = 0$) (Fig. 7). Il risultato potrebbe essere spiegato dal fatto che i dati utilizzati per la calibrazione della formula comprendevano solo poche configurazioni emergenti e che pertanto la struttura della *CVB* sia meno adatta a descriverne il comportamento nei riguardi della trasmissione.

Una successiva analisi condotta nei campi di maggior efficienza delle formule di Daemen (1991), di d'Angremond (1998) e della *CVB*, sembrerebbe indicare una particolare efficienza di quest'ultima per strutture con cresta ampia (Figg. 9 e 10). Sebbene il risultato sembri alquanto interessante per le pratiche applicazioni, è necessario però sottolineare che l'ampiezza del campione di dati a disposizione non è tale da consentire conclusioni definitive e/o generalizzazioni.

La *CVB* restituisce, inoltre, un errore relativo più basso rispetto alle altre formule per strutture imbasate su fondali limitati ed in particolare per valori dell'indice di frangimento superiori a 0.35 (Fig. 12). Tuttavia l'interpretazione di questo risultato appare alquanto incerta a causa dell'esiguità dei dati a disposizione e, più in generale, è sembrato che la profondità di imbasamento influenzi solo limitatamente il processo di trasmissione. Peraltro non è chiaro se l'indice di frangimento sia il parametro più efficace per descriverne gli effetti. Anche se i risultati relativi ai tests condotti al GWK erano piuttosto incoraggianti, è opportuno notare che in acque molto basse tale parametro tende a saturarsi ed a far perdere ogni informazione sull'influenza di d . Inoltre la funzione lineare di H/d proposta dalla formula, eq. (12), perde di significato nel caso di fondali rapidamente decrescenti dove l'elevato valore dell'indice di frangimento potrebbe condurre a risultati assurdi quali ad esempio valori positivi del coefficiente angolare della (11).

In generale, è opportuno sottolineare che le formule attualmente a disposizione, *CVB* compresa, forniscono errori ancora troppo elevati in valore assoluto e che la deduzione di espressioni più affidabili per il calcolo del coefficiente di trasmissione, costituisce un importante compito per i futuri lavori di ricerca. L'analisi dei dati qui discussi sembrerebbe indicare che una possibile via per perseguire tale obiettivo, potrebbe essere quella di rinunciare ad un'unica formula valida contemporaneamente per strutture sommerse ed emergenti, stante il differente peso dei diversi parametri in gioco nei due casi. È, inoltre, necessario condurre ulteriori studi sperimentali quanto più possibile dettagliati e rappresentativi delle condizioni reali di progetto che ne consentano una efficace calibrazione e/o validazione.

Bibliografia

- Allsop N.W.H. (1983) - *Low-crested breakwaters, studies in random waves*. Coastal Structures '83, Arlington.
- Ahrens J.P. (1987) - *Characteristics of reef breakwaters*. Technical Report CERC-87-17, CERC, Vicksburg.
- Calabrese M., Vicinanza D. e Buccino M. (2002a) - *Trasmissione ondosa a tergo di scogliere a cresta bassa: indagine sperimentale su modello in grande scala*. XVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza.
- Calabrese M., Vicinanza D. e Buccino M. (2002b) - *Large-scale experiments on the behaviour of low crested and submerged breakwaters in presence of broken waves*. Proc. International Conference on Coastal Engineering, Cardiff.
- Daemen I.F.R. (1991) - *Wave transmission at low-crested structures*. MSc thesis Delft University of Technology, Delft Hydraulics Report H462, Delft.
- Daemrich K. e Kahle W. (1985) - *Schutzwirkung von Unterwasser Wellen brechern unter dem Einfluss unregelmässiger seegangswellen*. Technical Report, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Report Heft 61, Hannover (in German).
- Dally W.R., Dean R.G. e Dalrymple R.A. (1985) - *Wave height variation across beaches of arbitrary profiles*. Journal of Geophysical Research, Volume 90.
- d'Angremond K., van der Meer J.W. e De Jong R.J. (1996) - *Wave transmission at low-crested structures*. International Conference on Coastal Engineering, Los Angeles.
- Gironella X., Sánchez-Arcilla A., Briganti R., Sierra J.P. e Moreno L. (2002) - *Submerged detached breakwaters: towards a functional design*. International Conference on Coastal Engineering, Cardiff.
- Horikawa K. e Kuo C.T. (1966) - *A study of wave transformation inside surf zone*. International Conference on Coastal Engineering.
- Powell K.A. e Allsop N.W.H. (1985) - *Low-crested breakwaters, hydraulic performance and stability*. Technical report SR57, HR Wallingford, Wallingford.
- Sassi G., Briganti R. e Franco L. (2002) - *Studio sperimentale della trasmissione del moto ondoso a tergo di una barriera a cresta bassa*. XVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza.
- Seabrook S.R. e Hall K.R. (1998) - *Wave transmission at submerged rubble mound breakwaters*. International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen.
- Seelig W.N. (1980) - *Two dimensional tests of wave transmission and reflection characteristics of laboratory breakwaters*. Technical Report n.80-1, CERC, Fort Belvoir.
- van der Meer J.W. (1988) - *Rock slopes and gravel beaches under wave attack*. PhD thesis Delft University of Technology, Delft Hydraulics Report 396, Delft.
- van der Meer J.W. (1990) - *Low crested and reef breakwaters*. Technical Report n.H986 II, Delft Hydraulic, Delft.
- van Gent M.R.A. (1999) - *Physical model investigation on coastal structures with shallow foreshores*. Technical Report n.H3608, Delft Hydraulics, Delft.

Manoscritto ricevuto il 20/11/2002, accettato il 6/12/2002.