

# LE INTERAZIONI ONDA – STRUTTURA: LA RIFLESSIONE ONDOSA

*S.M. Formentin<sup>(1)</sup>, B. Zanuttigh<sup>(2)</sup>,*

- (1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Italia, e-mail: saramizar.formentin2@unibo.it  
(2) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Italia, e-mail: barbara.zanuttigh@unibo.it

## 1 Introduzione

L'inserimento di una qualsiasi struttura preposta alla protezione costiera (o portuale) incide notevolmente sull'idrodinamica e la morfologia della zona circostante. Conoscere gli effetti che un'opera determinerà sul territorio è il primo elemento che consente di definire il tipo stesso di opera da progettare e governa alle fasi di progettazione stessa. Da ciò nasce l'esigenza di studiare l'interazione delle strutture artificiali con le onde marittime, le correnti e il trasporto solido.

Tuttavia, l'analisi dell'interazione tra le onde e le strutture costiere non è uno strumento fondamentale soltanto per la progettazione delle opere, ma anche per la messa in sicurezza delle zone di battigia o portuali protette dalle opere stesse. Valutare l'affidabilità di tali opere di difesa, ai fini della rappresentazione dei meccanismi del processo di inondazione delle zone costiere in occasione di mareggiate, necessita della conoscenza e della stima accurata dei fenomeni principali che nascono dall'interazione delle opere con il moto ondoso: la risalita delle onde sul paramento lato mare, la tracimazione e trasmissione di acqua a tergo delle strutture, la riflessione delle onde che, dopo essersi frante sull'opera, ritornano verso il largo.

A differenza della tracimazione e trasmissione, la ricerca dedicata esclusivamente alla riflessione dalle strutture costiere è molto povera e, di fatto, non esistono ancora modelli sufficientemente accurati - e al tempo stesso relativamente semplici - da poter essere utilizzati all'interno di sistemi di supporto alle decisioni progettuali senza incorrere in ipotesi estremamente riduttive. I modelli numerici per il calcolo della trasmissione ondosa richiedono, peraltro, una buona stima del coefficiente di riflessione per tutti i tipi di opere.

Inoltre, la vulnerabilità e la resilienza degli argini lato mare rivestono un ruolo chiave nella determinazione delle reali condizioni di rischio. L'onda riflessa è la causa principale dell'erosione dei sedimenti ai piedi del paramento a mare di una struttura, fenomeno molto grave che può compromettere la stabilità dell'intera opera o comunque comportare una degenerazione delle sue funzionalità.

Nondimeno, la riflessione ondosa induce pericolosi stati del mare in prossimità delle entrate dei porti, influenza le condizioni di navigazione delle imbarcazioni in entrata ai canali e intensifica l'erosione dei sedimenti del fondale.

Pertanto, con il presente lavoro si intende proporre un'introduzione allo studio dei fenomeni connessi all'interazione onde – strutture, con particolare attenzione posta ai problemi legati alla riflessione ondosa, alla sua influenza sull'idrodinamica e sulla morfologia della zona di battigia e agli effetti negativi connessi all'induzione di instabilità sulle opere marittime.

In una prima parte (Sezione 2) verranno illustrati quelli che sono ritenuti essere le grandezze e i parametri fisici che giocano un ruolo fondamentale nella caratterizzazione dei fenomeni di interazione ondosa, mentre in un secondo momento (Sezione 3) ci si soffermerà sugli effetti morfologici provocati dall'interazione stessa delle strutture costiere con il contesto idrodinamico circostante di correnti e onde.

## 2 Le interazioni onda – struttura: parametri chiave

In generale, l'onda incidente su una struttura può o meno avere l'energia necessaria a risalire e tracimare parzialmente l'opera; quando l'energia è sufficiente, il volume tracimato agita a sua volta l'acqua a tergo della struttura, determinando quel moto ondoso che viene definito "onda trasmessa". Non tutta l'acqua tracima, perché una parte si riflette sul lato *offshore* della struttura e ritorna verso il largo. A causa delle dissipazioni energetiche, non è mai rispettata esattamente l'uguaglianza (in termini energetici o di volume d'acqua)

$$\text{onda incidente} = \text{onda riflessa} + \text{onda trasmessa}.$$

Tipicamente, le opere che interagiscono con il moto ondoso sono le barriere, sommerse ed emerse, e i moli portuali. Nel primo caso, si ha sempre una quota parte di trasmissione, sia essa dovuta prevalentemente alla tracimazione sopra la cresta dell'opera, sia all'infiltrazione dell'acqua tra i pori (se la struttura è impermeabile); diversamente, le opere portuali sono appositamente progettate per impedire la tracimazione e presentano esclusivamente riflessione ondosa.

A prescindere dal tipo di struttura, i fenomeni generati dall'interazione con le onde sono i seguenti:

- riflessione;
- risalita;
- tracimazione;
- infiltrazione.

Sono tutti processi statistici, così come lo sono le grandezze caratteristiche delle onde incidenti, e di conseguenza quelle delle onde riflesse.

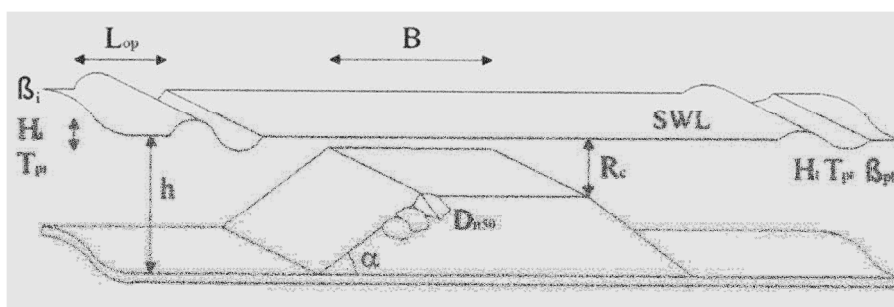


Figura 2.1-1 - Parametri per lo studio dell'interazione onda-struttura

I parametri significativi per la valutazione dei fenomeni di interazione e/o la verifica del funzionamento di un'opera marittima in esercizio dipenderanno tanto dalle caratteristiche dell'attacco ondoso e del fondale marino (parametri meteo-marini) quanto dalle dimensioni stesse dell'opera costruita o che si vuole progettare:

- caratteristiche dell'onda incidente:  $H_i$ ,  $T_i$ ,  $\beta_i$ , rispettivamente altezza, periodo e direzione dell'onda; il pedice "i" indica che ci si riferisce all'onda incidente, mentre eventuali altri pedici associati a i, come "p" (in figura), oppure "m" sono riferiti al tipo di onda che si sta considerando (p denota le caratteristiche delle onde di picco, m quelle delle onde medie, in riferimento alla distribuzione spettrale dell'energia ondosa);
- lunghezza d'onda incidente:  $L_{op}$ , separata dalle altre grandezze perché solitamente derivata e non direttamente misurata. Il pedice "O" indica che la grandezza si riferisce a un'onda dalle caratteristiche "offshore", al largo, in condizioni di "acque alte";
- altezza del fondale  $h$  rispetto alla superficie del livello di medio mare ("SWL", "Sea Water Level");

- pendenze “*offshore*” e “*inshore*” (lato mare e lato riva) della struttura: angoli  $\alpha_o, \alpha_i$ , solitamente si ha  $\alpha_o < \alpha_i$ ; nel caso di strutture dotate di una o più berme, viene specificata la pendenza di ciascuna di esse;
- sporgenza della cresta della struttura rispetto al livello di medio mare SWL:  $R_c$ , parametro i cui valori possono essere positivi, per opere emerse, negativi, per opere sommerse, oppure pari a 0 per le opere appena affiorati con il pelo libero del SWL. A seconda dei valori di  $R_c$ , allora, si classificano le strutture in base alla loro emergenza;
- larghezza in cresta della struttura:  $B$ ; come per l’angolo di pendenza, nel caso di opere con una o più berme, si hanno più larghezze in cresta e ognuna è caratterizzata con il suo pedice;
- caratteristiche dell’onda trasmessa:  $H_t, T_t, \beta_t$ , altezza, periodo e direzione dell’onda a tergo della struttura (lato riva);
- diametro nominale “medio” del masso (o dell’elemento artificiale) costituente la barriera:  $D_{n,50}$ , in cui il valore a pedice “50” si riferisce al fatto che è il diametro del setaccio per il quale si ha un passante in peso pari al 50% del totale (in tal senso, quindi,  $D_{n,50}$  rappresenta il “masso medio” dell’intera curva granulometrica del materiale impiegato);
- permeabilità dell’opera, grandezza strettamente correlata a  $D_{n,50}$ , alla porosità stessa del materiale impiegato, all’interconnettività dei massi, alla presenza o meno o più strati di materiale diverso sovrapposto o addirittura di nuclei impermeabili.

Tutte le grandezze elencate finora possono essere “racchiuse” in alcuni parametri chiave che possono descrivere sinteticamente tutti i processi di interazione. Nelle prossime sotto-sezioni verranno elencati tali parametri.

## 2.1 Parametri operativi: indice di frangimento

L’indice di frangimento (o parametro di Iribarren – Battjes) è così definito:

$$\xi_0 \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_{0m}}{gT_{m-1,0}^2}}} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{2\pi \frac{H_{0m}}{L_{0m}}}}$$

rapporto adimensionale tra pendenza della struttura (o, più in generale, della spiaggia, del fondale su cui frange l’onda) e ripidità dell’onda off-shore.  $\xi_0$  rappresenta e caratterizza il frangimento dell’onda, che si verifica quando l’onda raggiunge una ripidità massima rispetto alla profondità del fondale. La presenza di una struttura determina una brusca variazione della profondità e della ripidità del fondale, e quindi solitamente il frangimento delle onde (anche per le opere sommerse, il cui funzionamento è basato proprio su questo principio).

Poiché il frangimento è un fenomeno fortemente dissipativo, per valutare l’entità di trasmissione e di riflessione è fondamentale conoscere quanta energia viene persa dall’onda nel suo frangere contro la struttura.  $\xi_0$ , dipendendo sia dalle caratteristiche dell’onda che da quelle della struttura, è pertanto un indice essenziale da considerare.

## 2.2 Parametri operativi: run – up

La risalita ondosa è strettamente legata all’altezza della cresta  $\pm R_c$  rispetto al medio mare, e all’altezza dell’onda significativa incidente della zona  $H_{m0}$ . Si può quindi definire il parametro fondamentale:

$$R_u \stackrel{\text{def}}{=} \frac{R_c}{H_{m0}}.$$

L’entità della risalita ondosa (o “run – up”) dipende a sua volta, e in modo essenziale, anche da  $\xi_0$ ; la formula proposta da Van der Meer per la risalita ondosa è

$$\frac{R_{u,2\%}}{H_{m0}} = 1,75 \cdot \xi_0 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_v \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta, \quad \text{dove:}$$

$R_{u,2\%}$  = run - up del 2% delle onde più alte, scalato nella formula rispetto ad  $H_{m0}$ ; dimensionalmente,  $R_{u,2\%}$  è una lunghezza, e quindi il rapporto  $\frac{R_{u,2\%}}{H_{m0}}$  è adimensionale.

- $\gamma_b$  = coefficiente adimensionale che tiene conto degli effetti riducenti sulla risalita per la presenza di un'eventuale berma (se l'opera è sprovvista di berma,  $\gamma_b = 1$ ); i valori di  $\gamma_b$  sono tabellati in funzione della forma e del tipo di berma.
- $\gamma_v$  = coefficiente adimensionale funzione dell'obliquità del muro paraonde; non compare nella formula quanto la struttura è sprovvista di tale muro.
- $\gamma_f$  = coefficiente adimensionale che tiene conto della scabrezza e della permeabilità dell'opera (per opere perfettamente lisce,  $\gamma_f = 1$ ): le asperità, quindi, riducono la risalita ondosa, perché contribuiscono a ridurre l'energia. Nella seguente tabella sono riportati alcuni valori di  $\gamma_f$  in funzione del materiale e del tipo di struttura:

Reference type	$\gamma_f$
Concrete	1.0
Asphalt	1.0
Closed concrete block	1.0
Grass	1.0
Vilvoorden stone	0.85
Basalt	0.90
Haringman	0.90
Fixtone - open stone asphalt	0.90
Armorflex	0.90
Small blocks over 1/25 of surface	0.85
Small blocks over 1/9 of surface	0.80
1/4 of block revetment 10 cm higher	0.90
Ribs (optimum dimensions)	0.75
Armour rock - two layers thick	0.55
Armour rock - single layer	0.70

Figura 2.2-1 - Valori di  $\gamma_f$  in funzione del materiale e del tipo di struttura

- $\gamma_\beta$  = coefficiente adimensionale che tiene conto dell'eventuale obliquità dell'onda, caratteristica che riduce il run - up. ( $\gamma_\beta = 1$  per onda perpendicolare alla struttura).

Tale formula non è superiormente limitata, ossia il valore di  $R_{u,2\%}$  cresce indefinitamente all'aumentare di  $\xi_0$ , implicazione non accettabile sulla base dei riscontri empirici. Mediante un'operazione di fitting di dati sperimentali, è stata allora introdotta una forzatura sul  $R_{u,2\%}$  massimo per elevati valori del parametro di frangimento:

$$\text{per } \xi_0 \gg: \frac{R_{u,2\%}}{H_{m0}} = \gamma_f \cdot \gamma_\beta \left( 4,36 - \frac{1,60}{\sqrt{\xi_0}} \right)$$

La necessità di imporre esternamente un limite superiore alle formule empiriche impiegate in Idraulica Marittima è un aspetto ricorrente: quasi tutte le espressioni sono infatti associate a dei campi di validità e sono accoppiate a forzature esterne per i valori estremi.

Per quanto riguarda l'attendibilità delle formule, essenzialmente derivanti da dati sperimentali, non è tanto fondamentale che queste propongano un buon fitting dei dati, quanto che siano cautelative rispetto ad essi, ossia che forniscano un involuppo superiore, a favore di sicurezza.

Il principale fattore che determina la dissipazione energetica - e di conseguenza caratterizza la risalita ondosa e la tracimazione - è la scabrezza del materiale, seguita dalla presenza di una berma. L'involuppo superiore dei valori sperimentali del run - up delle strutture lisce e impermeabili è molto più alto, ad esempio, rispetto a quello delle strutture in massi con nucleo impermeabile, che infatti sono molto più dissipative. Ciò equi-

vale a dire che la risalita ondosa, a parità di parametro  $\xi_0$ , è molto maggiore per le strutture lisce che per quelle a massi.

### 2.3 Parametri operativi: portata di tracimazione

Lo studio della risalita ondosa è fondamentale ai fini della stima della tracimazione, e tutto quanto concerne sia la sicurezza nei confronti di quest'ultima di tutti gli elementi vulnerabili posti a tergo della struttura, sia la capacità di ricircolo delle acque a tergo.

Essendo anche la tracimazione un processo statistico, la portata sarà espressa in termini di probabilità di tracimazione (rapporto tra numero di onde trasmesse rispetto al numero di onde riconoscibili), moltiplicata per il rapporto tra valore atteso del volume di tracimazione e valore atteso del periodo d'onda:

$$q_t = \frac{\sum_{nr\ onde} Volumi\ tracimati}{\sum_{nr\ onde} Periodi\ d'onda} = \frac{N_t \cdot E(V_t)}{N_o \cdot E(T)} = P_t \cdot \frac{V_{t,m}}{T_m},$$

$$P_t = \frac{N_t}{N_o} = \text{probabilità di tracimazione}$$

Dal momento che ogni onda che tracima supera la cresta della struttura,  $P_t$  allo spigolo lato mare coincide con la probabilità che l'onda provochi una risalita superiore alla cresta stessa  $R_c$ , ossia che risulti:  $R_u > R_c$ .

Il legame tra la risalita (o la tracimazione) e la sporgenza di cresta  $R_c$  segue una distribuzione statistica di tipo Weibull, una funzione esponenziale negativa:

$$P_t = \exp \left[ - \left( \frac{R_c}{k_1} \right)^{k_2} \right], \quad \text{dove}$$

$k_1$  e  $k_2$  sono parametri dipendenti dalle caratteristiche dell'onda incidente.

Ai fini della progettazione, tuttavia, interessa essenzialmente la portata di tracimazione media ( $q_t$ ): dalla distribuzione Weibull, si sa che il legame tra  $q_t$  ed  $R_c$  è esponenziale negativo, ossia la portata decresce esponenzialmente all'aumentare dell'altezza di cresta, quindi si può scrivere genericamente:

$$q_t = a \cdot \exp(b \cdot R_c)$$

Esistono molte formule che stimano i coefficienti  $a$  e  $b$ , ma tutte sono riconducibili a legami con il periodo d'onda  $T$ , l'altezza d'onda significativa  $H_{m0}$ , a parametri di scabrezza, di ripidità e a  $\xi_0$ .

Allsop (1995) ha in seguito dimostrato che la trasmissione dipende fortemente anche dalla forma dell'onda rispetto alla profondità del fondale  $h$ : piccole ampiezze d'onda rispetto ad  $h$  determinano soprattutto riflessione contro le pareti della struttura, mentre elevate ampiezze portano l'onda al frangimento contro la struttura, incidendo sensibilmente sul processo di tracimazione.

Di tale aspetto è stato tenuto conto mediante l'introduzione del parametro di frangimento:

$$h^* = \frac{h}{H_{m0}} \cdot \frac{2\pi h}{gT_m^2}$$

$h^*$  consente di differenziare le onde incidenti in pulsanti ( $h^* > 0,3$ ) o impulsive ( $h^* \leq 0,3$ ): sono queste ultime le onde che maggiormente generano tracimazione, denotando una altezza d'onda significativa  $H_{m0}$  piuttosto importante rispetto ad  $h$ .

In funzione di  $h^*$ , e delle due tipologie di onde, sono state proposte due formule distinte per la stima della portata di tracimazione, espressa in termini di unità di larghezza di struttura e adimensionalizzata rispetto al termine  $\sqrt{gH_{m0}^3}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{q_t}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0,05 \exp\left(-\frac{2,78R_c}{H_{m0}}\right), \quad \text{per } h^* > 0,3 \\ \frac{q_t}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 1,37 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{R_c}{H_{m0}} \cdot h^*\right)^{-3,24} \cdot h^{*2}, \quad \text{per } h^* \leq 0,3 \end{array} \right.$$

Più recentemente (2002), Van der Meer ha riformulato tali stime in funzione del nuovo parametro di frangimento  $\xi_0$  e distinguendo le onde tra frangenti e non frangenti. La portata di tracimazione nelle sue equazioni è ancora espressa per unità di larghezza di struttura e adimensionalizzata rispetto a  $\sqrt{gH_{m0}^3}$ :

$$\begin{array}{l} \text{onda frangente:} \\ \text{onda non frangente:} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \frac{q_t}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\tan \alpha} \cdot \gamma_b \cdot \exp\left(-\frac{4,30R_c}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\xi_0 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v}\right) \\ \text{con } q_{t,max}: \frac{q_{t,max}}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0,2 \cdot \exp\left(-\frac{2,30R_c}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta}\right) \\ \frac{q_t}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\tan \alpha} \cdot \gamma_b \cdot \exp\left(-\frac{4,75R_c}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\xi_0 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v}\right) \\ \text{con } q_{t,max}: \frac{q_{t,max}}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0,2 \cdot \exp\left(-\frac{2,60R_c}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta}\right) \end{array} \right.$$

Nelle equazioni, tutti i fattori sono adimensionali.

Come si può notare, la portata di tracimazione è sempre una funzione esponenziale negativa di  $R_c/H_{m0}$ . Le formule forniscono stime cautelative soltanto per opere a cresta alta, perché per opere a cresta bassa è stato rilevato sperimentalmente che la portata di tracimazione effettiva risulta superiore a quella che si desumerebbe dalle relazioni.

Tutte le formule sono di natura empirica e vengono continuamente aggiornate con l'aumentare del numero di dati sperimentali.

Dalle equazioni presentate, si evince come i parametri fondamentali per la caratterizzazione di *run-up* e tracimazione, nota l'onda tipica del luogo ( $H_{m0}$ ) siano due:

- la pendenza  $\alpha$  della struttura lato mare, che determina  $\xi_0$ ;
- la sporgenza della cresta dell'opera  $R_c$ .

Per le opere sommerse il principio di funzionamento è basato sulla dissipazione energetica delle onde sulla parte superiore dell'opera; si aggiunge perciò un'altra grandezza, la larghezza in cresta  $B$  (quanto più l'opera è larga, quanto più elevata è la dissipazione, poiché l'onda incontra una superficie maggiore di attrito).

## 2.4 Parametri operativi: coefficiente di trasmissione

La trasmissione differisce dalla tracimazione per la quota-parte aggiuntiva di volume d'acqua che perviene a riva per filtrazione attraverso le porosità dell'opera. A seconda della permeabilità della barriera e della sporgenza della sua cresta, prevale una o l'altra componente, ma in generale la minima entità dei volumi d'infiltrazione e la lentezza di tale processo rispetto alla tracimazione fanno sì che spesso i due fenomeni possano essere confusi l'uno nell'altro. Solitamente, si parla di trasmissione, per comprendere entrambi gli apporti d'acqua.

Conoscere l'entità della trasmissione ha immediata applicazione pratica, dal momento che consente una stima diretta del materiale solido trasportato verso riva e dell'energia residua delle onde che riescono ad oltrepassare le barriere, oltre naturalmente alla conoscenza dei volumi d'acqua che si propagano verso la costa. La valutazione quantitativa del fenomeno è racchiusa nel coefficiente di trasmissione:

$$K_t \stackrel{\text{def}}{=} \frac{H_{tr}}{H_{si}}$$

rapporto tra altezza d'onda trasmessa a tergo della barriera e altezza dell'onda significa-

tiva incidente su di essa. Il termine  $H_{si}$  è l'altezza dell'onda significativa incidente, che, soprattutto ai fini pratici, può essere eguagliato ad  $H_{m0}$  (come espresso precedentemente).

Anche per  $K_t$ , tutte le formule proposte dalla letteratura sono di natura empirica, in continua evoluzione e con limitazioni ai valori estremi imposte "forzatamente", perché le equazioni consistono in genere in regressioni lineari di dati sperimentali, e quindi sono funzioni non limitate. I parametri chiave sono, ancora una volta:

- $R_c$ , altezza della cresta rapportata ad  $H_{si}$  o al diametro nominale del masso,  $D_{n,50}$ ;
- $B$ , larghezza in cresta;
- $\xi_0$ , parametro di frangimento.

I risultati più recenti (Van der Meer et al., 2005), ottenuti sulla base di studi effettuati su un numero molto elevato di dati rilevati nel corso di esperimenti su strutture a cresta bassa (parzialmente sommerse,  $R_c \leq 1 \div 2 m$ ) o completamente sommerse, hanno dimostrato che:

- per le strutture impermeabili (tipicamente costituite da elementi artificiali),  $K_t$  dipende anche dall'obliquità dell'onda incidente (espressa in termini dell'angolo  $\beta$ ), mentre ciò è vero solo marginalmente per le strutture permeabili in massi naturali, per le quali è preponderante l'effetto di scabrezza e del relativo coefficiente  $\gamma_f$ ;
- la variazione dello spettro d'onda non dipende invece dall'obliquità;
- la direzione dell'onda trasmessa è diversa da quella dell'onda incidente.

Alla luce di tali risultati, differenziando tra strutture permeabili e impermeabili lisce, è stata possibile la messa a punto di nuove espressioni empiriche per la stima di  $K_t$ .

Per le strutture permeabili, parzialmente o completamente sommerse a cresta larga, valgono le seguenti relazioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{per } \frac{B}{H_{si}} < 10: K_t = -0,4 \frac{R_c}{H_{si}} + [1 - e^{-0,5\xi_p}] \cdot c \cdot \left(\frac{B}{H_{si}}\right)^{-0,31} \\ \qquad \qquad \qquad \text{con } K_{t,min} = 0,075 \text{ e } K_{t,max} = 0,8 \\ \text{per } \frac{B}{H_{si}} > 10: K_t = -0,35 \frac{R_c}{H_{si}} + 0,51 \cdot [1 - e^{-0,41\xi_p}] \cdot \left(\frac{B}{H_{si}}\right)^{-0,65} \\ \qquad \qquad \qquad \text{con } K_{t,min} = 0,05 \text{ e } K_{t,max} = -0,006 \frac{B}{H_{si}} + 0,93 \end{array} \right. ,$$

La prima equazione coincide con la relazione già precedentemente formulata da D'Angremond (1996), in cui il coefficiente  $c$  – funzione della permeabilità e della scabrezza – vale 0,64 per le strutture permeabili in massi. Essa non ha validità per onde troppo ripide o frangenti, né per strutture notevolmente sommerse ( $R_c/H_{si} < -2,5$ ) o emerse ( $R_c/H_{si} > -2,5$ ). Si noti che, in tal caso, il parametro di frangimento  $\xi_p$  è relativo all'onda di picco.

Per entrambe le equazioni, compare poi una forte dipendenza da un nuovo parametro,  $B/H_{si}$ , risultato nuovo e importante.

Per le strutture impermeabili lisce, a cresta bassa, vale:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_t = -0,30 \frac{R_c}{H_{si}} + 0,75 \cdot (1 - e^{-0,5\xi}), \quad \text{per } \xi < 3,0 \\ K_t = -0,30 \frac{R_c}{H_{si}} + \left[\frac{B}{H_{si}}\right]^{-0,31} \cdot 0,75 \cdot (1 - e^{-0,5\xi}), \quad \text{per } \xi > 3,0 \\ \qquad \qquad \qquad \text{con } K_{t,min} = 0,075 \text{ e } K_{t,max} = 0,8 \end{array} \right.$$

Per le strutture impermeabili lisce, a cresta bassa, vale:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_t = \left[ -0,30 \frac{R_c}{H_{si}} + 0,75 \cdot (1 - e^{-0,5\xi}) \right] \cdot (\cos \beta)^{\frac{2}{3}} \\ \text{con: } 1,0 < \xi < 3,0, \quad 0^\circ < \beta < 70^\circ, \quad 1,0 < \frac{B}{H_{si}} < 4,0 \\ \text{e con } K_{t,min} = 0,075 \text{ e } K_{t,max} = 0,8 \end{array} \right.$$

Tale relazione differisce dalla precedente per la sola presenza del fattore  $(\cos \beta)^{\frac{2}{3}}$ , che moltiplica tutti i termini: per  $\beta = 0^\circ$ , quindi per il caso di onda incidente perpendicolarmente alla struttura, il coseno diventa unitario e il fattore scompare.

## 2.5 Parametri operativi: coefficiente di riflessione

A meno delle perdite energetiche, il fenomeno complementare alla trasmissione è la riflessione ondosa. Stimare l'entità e le modalità con cui avviene la riflessione delle onde è fondamentale per valutare il grado di esposizione dell'opera all'erosione (paramento lato mare), fenomeno provocato univocamente dall'onda riflessa. Infatti essa determina un notevole trasporto solido dei sedimenti del fondale marino, trascinandoli con sé verso il largo e inducendo la formazione di buche erosive al piede.

Gli effetti delle buche erosive talvolta sono molto gravi: i massi della barriera possono lentamente scivolare all'interno della buca, determinando un abbassamento disomogeneo dell'opera stessa, o, addirittura, la struttura può scalzarsi e destabilizzarsi completamente.

La riflessione è un processo molto studiato anche nei porti, poiché essa determina la formazione di onde lunghe che possono entrare in risonanza con la fase propria del bacino chiuso del porto, creando notevoli problemi alle imbarcazioni in entrata e ormeggiate.

In analogia con il processo di trasmissione, si definisce il coefficiente di riflessione:

$$K_r \stackrel{\text{def}}{=} \frac{H_r}{H_{si}}$$

rapporto tra altezza d'onda riflessa e altezza d'onda significativa incidente.  $K_r$  e  $K_t$  insieme forniscono una stima della performance idraulica di una barriera, ossia di quanto essa sia efficace nella protezione della costa e al tempo stesso resistente all'attacco ondosso (resilienza).

Le formule che tentano di fornire una stima per  $K_r$  sono molteplici, e ancora una volta tutte di derivazione empirica. Un elemento comune a tutte le relazioni è la chiara dipendenza di  $K_r$  dal parametro di frangimento  $\xi_0$ :

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_{m0t}}{g T_{m-1,0}^2}}}$$

Per il calcolo di  $\xi_0$ , viene utilizzato come periodo d'onda il periodo spettrale  $T_{m-1,0} = m_{-1}/m_0$  alla base della struttura, e come altezza d'onda  $H_{m0t}$ , l'altezza significativa al piede della struttura. Tali assunzioni derivano dai risultati sulla predizione della tracimazione ondosa del progetto europeo CLASH1 e dall'ipotesi comprovata che tracimazione e riflessione ondosa siano fenomeni strettamente correlati.

Studi preliminari sull'opportunità dell'utilizzo di  $\xi_0$  nell'analisi della riflessione sono stati condotti da Van der Meer nel 2005 e più di recente da Dekker.

Dal lavoro di Postma (1989), si sa che il periodo d'onda influisce maggiormente sulla riflessione rispetto all'altezza d'onda: usare  $\xi_0$ , che racchiude entrambi i parametri, introduce maggiore "scatter", ma consente anche di tenere conto di più pendenze diverse in modo molto semplice.

Comprensibilmente, a parità di  $\xi_0$ , le strutture con nucleo fortemente permeabile

<sup>1</sup> www.clash-eu.org



mostrano scarsa riflessione, ma questa aumenta per le strutture dotate di nucleo impermeabile, seppure esternamente permeabili.

Tutti i dati relativi a opere con paramento liscio e impermeabile sono bene approssimati dalle formule di Seelig & Ahrens (1981)

$$K_r = \frac{a_1 \cdot \xi_0^2}{\xi_0^2 + b_1}, \quad \text{con } a_1 = 1,0 \text{ e } b_1 = 5,0$$

e da quella di Battjes (1974), in un range più ristretto (sole onde “plunging” e pendenze dei paramenti delle opere dolci)

$$K_r = 0,12 \cdot \xi_0^2.$$

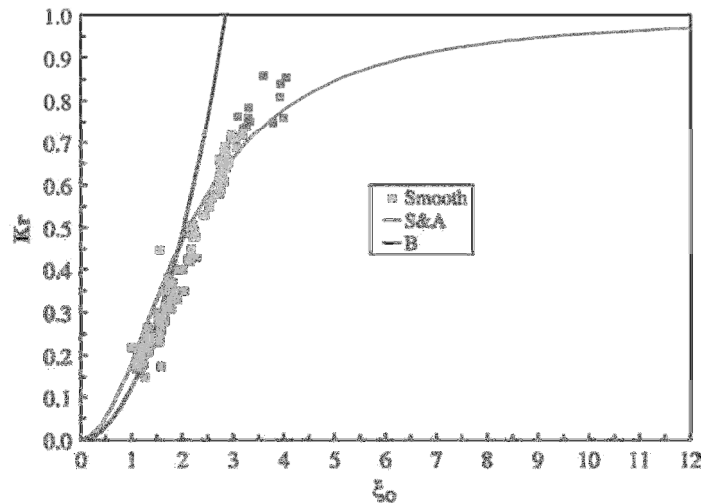


Figura 2.5-1 - Confronto tra i dati sperimentali di  $K_r$  per strutture lisce e impermeabili (“smooth”) e curve di Battjes (linea nera) e di Seelig & Ahrens (linea grigia)

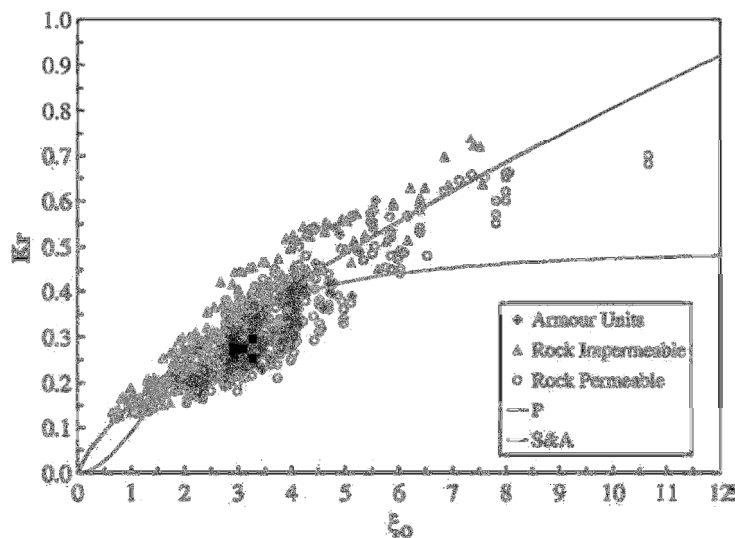


Figura 2.5-2 - Confronto tra i dati sperimentali per paramenti in roccia a forte pendenza, con nucleo permeabile e impermeabile, e armour units, con le curve di Postma (linea grigia) e di Seelig & Ahrens (linea nera)

Come mostra la figura 1.3-4, i dati di opere impermeabili in roccia sono ben rappresentati dalla curva di Postma (1989)

$$K_r = 0,15 \cdot \xi_0^{0,73},$$

mentre le opere permeabili in roccia possono essere rappresentate dalla stessa formula di Seelig & Ahrens, con  $a_1 = 0,49$  e  $b_1 = 5,456$ , per  $\xi_0 = 2 \div 4$  (cfr. fig. 1.3-3).

Va sottolineato che nessuna di queste formule contempla nello specifico le cosiddette

te “armour units” (i blocchi artificiali in conglomerato cementizio impiegati come corazzamento esterno in barriere molto sollecitate o in moli portuali), ad eccezione del lavoro di Allsop e Hiettrarchi (1989), che hanno ricalibrato i coefficienti  $a_1$  e  $b_1$  dell’equazione di Seeling & Ahrens.

Sulla base di circa 4000 dati (database del progetto CLASH e del progetto LOS2), Zanuttigh e Van der Meer (2006) hanno messo a punto una nuova relazione la cui forma è adattabile a diverse tipologie di strutture: pareti smooth, pareti a massi con nucleo permeabile ed impermeabile, svariati tipi di armour units.

$$K_r = \tanh(a \cdot \xi_0^b).$$

A differenza delle precedenti relazioni, quest’ultima ha anche il vantaggio di essere intrinsecamente limitata grazie alla funzione di tangente iperbolica. I coefficienti  $a$  e  $b$  sono i parametri del modello, e variano in funzione della scabrezza e della permeabilità della struttura: in tal modo, l’equazione consente anche di stabilire un legame con il coefficiente di scabrezza  $\gamma_f$ , come per il fenomeno della tracimazione ondos.

Complessivamente, dunque, dalla formula risulta che  $K_r$  sia funzione esclusiva del parametro di frangimento e del tipo di opera.

Sempre Zanuttigh e Van der Meer (2006) hanno cercato un’espressione generale per  $a$  e  $b$  in funzione di  $\gamma_f$ , sia perché esso è un dato caratteristico del materiale, riportato dai costruttori, sia perché fornisce direttamente un’indicazione della dissipazione energetica:

$$\begin{cases} a = 0,167 \cdot [1 - \exp(-3,2 \cdot \gamma_f)] \\ b = 1,49 \cdot (\gamma_f - 0,38)^2 + 0,86 \end{cases}$$

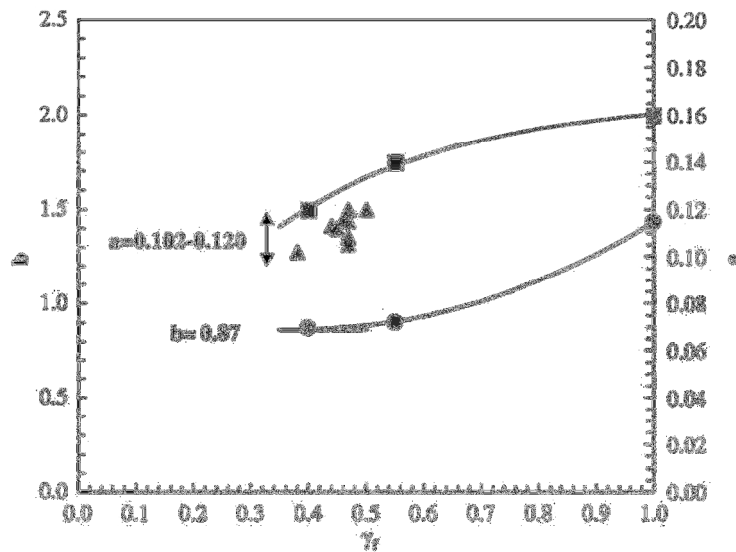


Figura 2.5-3 - Parametri  $a$  e  $b$  in funzione di  $\gamma_f$

È proprio la dipendenza da  $\gamma_f$  che consente di estendere la formula di riflessione a una vasta gamma di parametri e a materiali diversi.

La formula e le espressioni di  $a$  e  $b$  sono stati ottenuti analizzando i valori medi di  $K_r$  in funzione di  $\xi_0$ , suddividendo i dati per gruppi secondo le tipologie di massa.

<sup>2</sup> www.delos.unibo.it

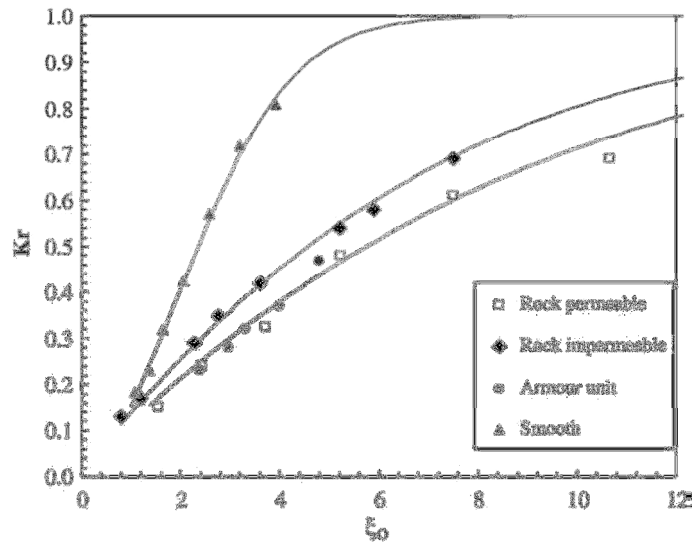


Figura 2.5-4 - Valori medi di  $K_r$  e derivazione dell'equazione di Zanuttigh & Van der Meer per molti materiali

L'accordo tra i dati misurati di  $K_r$  e la relazione di Zanuttigh & Van der Meer, al variare dei coefficienti  $a$  e  $b$  è mostrato nella seguente figura:

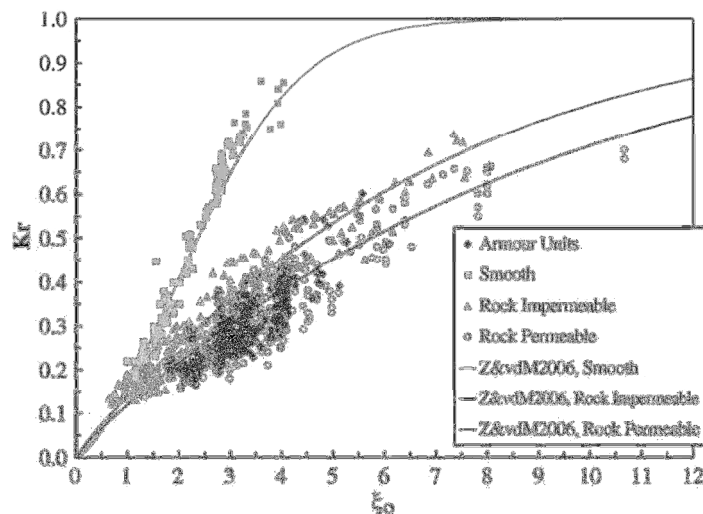


Figura 2.5-5 - Confronto tra la formula di Zanuttigh & Van der Meer e dati per paramenti a pendenza semplice

$K_r$  è particolarmente ben stimato per le opere *smooth* e per le opere a massi con nucleo impermeabile, mentre è lievemente sovrastimato per le *armour units* e le opere a massi con nucleo permeabile per  $\xi_0 < 4$ .

Sulla base dell'analisi eseguita per stimare il parametro di Iribarren-Battjes da inserire nella formula di  $K_r$ , è risultato che, al di sotto del livello del mare (SWL), si verifica riflessione ondosa sull'intera superficie della parete *off-shore* di una struttura, e il fenomeno è strettamente correlato ai processi di *run-up* e di frangimento.

La formula di Zanuttigh & Van der Meer fornisce una predizione ragionevole di  $K_r$  per le strutture permeabili in massi a cresta bassa, se corretta introducendo un'appropriata dipendenza lineare dall'altezza relativa di cresta  $R_c/H_{m0,t}$ .

Tuttavia, essa è valida solamente all'interno delle condizioni di progetto, definite con precisione dagli stessi Zanuttigh e Van der Meer:

- modesta trasmissione ondosa:  $R_c/H_{m0,t} \geq 0,5$ ;
- onde incidenti non troppo basse:  $H_{m0,t}/D_{n,50} \geq 1,0$ ;

- onde incidenti non troppo lunghe:  $s_0 \geq 0,01$  (dove  $s_0$  è la ripidità dell'onda relativa al periodo  $T_{m-1,0}$ ).

## 2.6 La filtrazione

Il processo di filtrazione viene studiato a partire dall'equazione di Forchheimer; i parametri chiave sono la pendenza motrice (perdita di carico per unità di lunghezza), la velocità di filtrazione attraverso il mezzo permeabile, la larghezza e l'altezza della parte sommersa della struttura, la porosità del materiale, la forma e disposizione dei massi.

La portata media di filtrazione può essere espressa stimata mediante la formula:

$$q_f = \bar{u} \cdot B \cdot h_s, \quad \text{dove}$$

$\bar{u}$  = velocità media di filtrazione [m/s];

$B$  = larghezza media della parte sommersa della barriera, [m];

$h_s$  = altezza della parte sommersa della barriera, [m].

Tuttavia, il fenomeno viene quasi sempre trascurato ai fini di progettazione di un'opera, perché la portata di filtrazione è di almeno un ordine di grandezza inferiore a quella di tracimazione.

## 3 Effetti morfologici dovuti all'interazione onde – struttura

Come anticipato, un qualsiasi tipo di opera artificiale genera nella propria zona di influenza una perturbazione del sistema di onde e correnti preesistenti alla sua introduzione. Ad interagire prevalentemente con l'idrodinamica delle onde sono le barriere e i moli portuali, strutture il cui scopo principale è la protezione della costa (o del porto) in senso lato, quindi non soltanto dalle mareggiate più intense, ma anche dal semplice attacco ondoso costante, ad esempio per ridurre eventuali eccessi di erosione dei sedimenti con conseguente arretramento della linea di riva per impoverimento di sedimenti da trasporto solido.

Lo studio degli effetti morfologici deve necessariamente prendere atto del frangimento delle onde operato dalle barriere e dei processi innescati da tale fenomeno. Solo in un secondo momento, si può procedere all'identificazione e quantificazione dei fenomeni di alterazione morfologica veri e propri: l'alterazione del regime di ricircolo delle acque a tergo delle barriere, le modalità con cui le onde diffrangono in seguito all'ostacolo alla loro naturale propagazione presentato dalle barriere, i processi erosivi "vicini" e "lontani" dalle opere.

In seguito verranno approfonditi tali aspetti, tralasciando tuttavia il fenomeno di erosione "lontana", poiché causato dall'interazione delle strutture artificiali con il regime delle correnti, e non con quello ondoso, e quindi non oggetto di interesse in tal sede.

### 3.1 Frangimento e "wave setup"

Il primo e fondamentale effetto generato sul moto ondoso da una barriera, anche se completamente sommersa, è il frangimento dell'onda sulla sua cresta o immediatamente a tergo di essa. La causa è la brusca variazione del fondale indotta dalla presenza della struttura stessa.

Il fenomeno di innalzamento del livello del mare ("wave setup"), dovuto al bilanciamento del termine di *radiation stress* dell'equazione di bilancio della quantità di moto delle onde, che si riduce per gli effetti di dissipazione di energia ondosa nella *surf zone*, continua a verificarsi anche in presenza di barriere, ed è anzi accentuato dall'innalzamento dell'altezza d'onda conseguente alla risalita della stessa sulla struttura. Pertanto, sarebbe fortemente non conservativo trascurare il *wave setup* a tergo di una barriera.

Identificata l'entità del *wave setup*, è possibile procedere agli ulteriori studi di analisi morfologica.

### 3.2 Ricircolo dell'acqua

Gli effetti prodotti da una struttura emersa risultano sensibilmente differenti da quelli prodotti da una struttura parzialmente o interamente sommersa. Il ricircolo dell'acqua a tergo di una struttura emersa è sicuramente molto più scarso, dal momento che in tali condizioni l'acqua non può che rifluire da riva verso il largo attraverso i varchi fra le barriere, e non anche al di sopra della cresta sommersa dell'opera.

Da uno povero ricircolo dell'acqua discendono svariate problematiche di natura sia ambientale – associate alle esigenze di ossigenazione dell'acqua e di salvaguardia dell'ecosistema marino – che economica, per la possibilità di usufruire della porzione di mare protetta dalle barriere a scopi turistici.

Inoltre, ai varchi tra le barriere emerse si generano correnti di ritorno dirette verso il largo, talvolta molto intense ("*rip current*"), che non sono soltanto pericolose per i bagnanti, ma possono causare fosse erosive molto pronunciate.

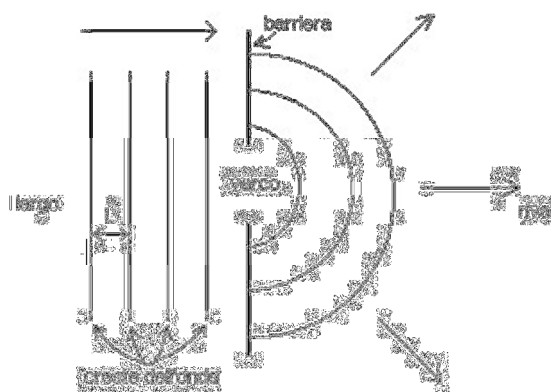
Conoscere una stima della portata ai varchi è perciò molto importante ai fini:

- della sicurezza della balneazione;
- della valutazione dell'entità del trasporto solido di sedimenti verso il largo;
- dell'analisi dell'erosione localizzata ai varchi tra le barriere.

Tuttavia, tutti questi aspetti sono principalmente correlati agli effetti determinati dalle correnti, e pertanto non verranno approfonditi ulteriormente.

### 3.3 Diffrazione ondosa

I varchi tra le barriere emerse generano anche un forte effetto di diffrazione, ossia di redistribuzione della direzione delle onde. Se dal largo le onde giungono in prossimità delle barriere con direzione approssimativamente perpendicolare rispetto ad esse, nell'oltrepassarle, i fronti d'onda diventano semicircolari e la direzione di propagazione radiale.



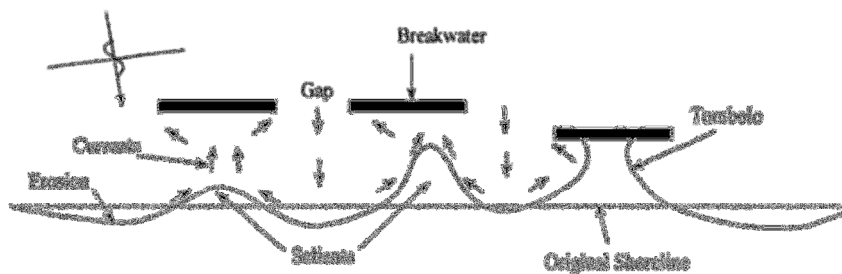
**Figura 3.3-1 - Schematizzazione dell'effetto di diffrazione indotto dai varchi**

L'energia ondosa trasmessa a riva si concentra tra i varchi, mentre si riduce a tergo delle barriere: il susseguirsi di varchi e barriere determina sulla linea di riva un effetto alternato di lieve erosione – accumulo di sedimenti.

La distanza delle barriere da riva ( $Y$ ), la lunghezza delle barriere ( $B$ ) e la lunghezza dei varchi ( $L$ ) incidono notevolmente sulle modalità con cui il fronte d'onda diffrae: varchi troppo stretti o distanze troppo piccole tra le barriere e la riva non consentono la completa diffrazione delle onde, provocando un ristagno dell'acqua a tergo delle barriere e insabbiamento a riva.

Si distinguono due tipi di formazioni per insabbiamento:

- salienti: accumuli sabbiosi sulla riva che non arrivano a lambire la struttura (lato riva);
- tomboli: accumuli che toccano la struttura, formando un “ponte” sabbioso tra riva e barriera.



**Figura 3.3-2 - Tomboli e salienti**

Per prevedere quale tipo di formazione si creerà a riva in seguito alla costruzione di un'opera a barriere, esistono tabelle e grafici che, mettendo in relazione tra loro i vari parametri geometrici, sono in grado di stimare tipo e forma dell'accumulo sabbioso.

In genere, per rapporti  $\frac{Y}{L} \left( \frac{B}{L} \right)$  grandi, si ha formazione di salienti, per rapporti  $\frac{Y}{L} \left( \frac{B}{L} \right)$  piccoli, si formano tomboli. In ogni caso, la previsione del tipo di formazione sabbiosa è un'operazione di verifica di una struttura, e non di progetto.

### 3.4 Erosione localizzata (“scour”)

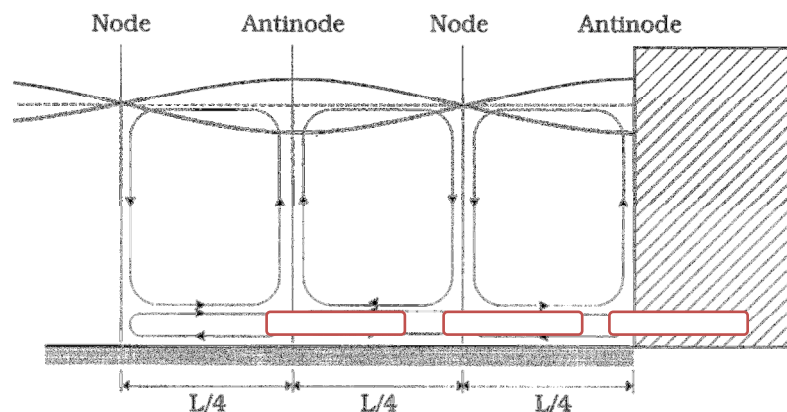
L'erosione causata dal moto ondoso e dalle correnti è il principale effetto morfologico associato alla costruzione di barriere.

Si possono distinguere due tipi di erosione:

- l'erosione locale (o “scour”), che si verifica ai piedi dell'opera, o a una distanza al più uguale ad  $L/4$ , dove  $L$  è la lunghezza d'onda; è determinata dalle onde, da quelle riflesse sul paramento lato mare, e da quelle trasmesse sul lato riva.
- l'erosione lontana (a distanza maggiore di  $L/4$ ), che si genera in corrispondenza dei varchi e delle testate, e che è, come detto, strettamente correlata alle correnti; in particolare, si ricordano le *rip current*, responsabili dell'erosione ai varchi.

Nei fatti, l'attacco delle onde, riflesse e trasmesse, è l'unico agente responsabile dei problemi di instabilità geotecnica causati dall'erosione indotta sul fondale su cui poggia l'opera.

Lo studio dell'erosione lato mare è stato affrontato (Sumer et al., 2005) assumendo che il continuo urtare dell'onda contro la struttura marittima e il suo successivo riflettersi generi un moto di ricircolo stazionario – costituito da cosiddette “celle di ricircolo” – davanti all'opera stessa.



**Figura 3.4-1 - Campo di ricircolo stazionario formato di fronte a una barriera; in rosso sono evidenziate le celle**

La previsione della posizione delle celle di ricircolo gioca un ruolo cruciale per la stabilità della barriera: c'è una forte interdipendenza fra erosione locale e flusso stazionario che si determina davanti all'opera stessa.

Unendo il modello di moto stazionario a uno di analisi del trasporto solido dei sedimenti del fondale sabbioso, è possibile prevedere in parte le modifiche morfologiche apportate dalla riflessione ondosa al fondo marino in prossimità dell'opera.

Qualitativamente, si può affermare che i sedimenti sabbiosi più fini tendono ad essere trasportati in sospensione, e quindi nella cella superiore, provocando erosione a una distanza pari ad  $L/4$  dall'opera; i sedimenti più grossolani sono invece trasportati al fondo, tendendo invece a depositarsi alla distanza  $L/4$ . In ogni caso, l'effetto è quello di un'alternanza deposito-erosione del fondale marino antistante una barriera, con fasi alternate a seconda della granulometria del sedimento. Le fasi corrispondono alle celle del moto stazionario.

In figura 3.4-1, che rappresenta una sezione trasversale di barriera a parete verticale (rettangolo campito con tratteggi) e il fondale antistante (lato mare), le sinusoidi illustrano l'alternanza di deposito ed erosione, mentre la linea punteggiata indica l'originaria superficie del fondale marino prima dell'alterazione apportata.

L'erosione al piede di un'opera è anche dipendente dalla permeabilità o impermeabilità della struttura, e al suo essere emersa o sommersa.

Le dimensioni della buca erosiva variano infine a seconda della parte della struttura:

- in genere, il tronco di una barriera è molto meno esposto delle testate, e il calcolo di larghezza e profondità della buca erosiva attorno ad esso può essere effettuato a partire dai valori corrispondenti valutati per le testate, dimezzandoli;
- l'erosione locale alle testate è sempre presente sulla parete a mare, perché una porzione di onda incidente si riflette sempre sulla barriera, mentre sul lato riva è consistente solo per opere frequentemente tracimate, dunque parzialmente sommerse.

È semplice intuire come l'erosione dipenda fondamentalmente dalle caratteristiche dell'onda incidente, dalla profondità del fondale, dall'emergenza della cresta dell'opera e dalla sua larghezza al fondo,  $B$ .

Per stimare i valori di  $L_y$  e di  $S$  – rispettivamente, di larghezza e profondità della fossa erosiva alle testate –, esistono appositi grafici, distinti fra erosione lato mare e lato riva, funzioni di tre valori:

- $KC \stackrel{\text{def}}{=} \frac{U_m T_m}{B}$ , numero di Keulegan & Carpenter, per l'erosione lato mare:  $U_m$  è la velocità orbitale delle particelle d'acqua al fondo, che si calcola a partire dai dati delle onde incidenti;  $T_m$  è il periodo medio dell'onda;  $B$  è la larghezza dell'opera al fondo;
- $\frac{T\sqrt{gH}}{h}$ , per l'erosione lato riva: parametro che racchiude le caratteristiche dell'onda incidente e del fondale ( $h$ );
- $\frac{R_c}{H}$ , per entrambe le erosioni: parametro fondamentale che caratterizza l'opera e la sua sommergezza/emergenza.

I seguenti diagrammi<sup>3</sup> rappresentano, rispettivamente, la stima di profondità  $S$  e larghezza  $L_y$  della fossa erosiva lato mare, in testata, e profondità e larghezza della buca erosiva lato riva, sempre in testata.

<sup>3</sup> Nel diagramma compare in ordinata il parametro  $\frac{F}{H}$ , che corrisponde ad  $\frac{R_c}{H}$ , c'è solo una differenza di simbologia adottata.

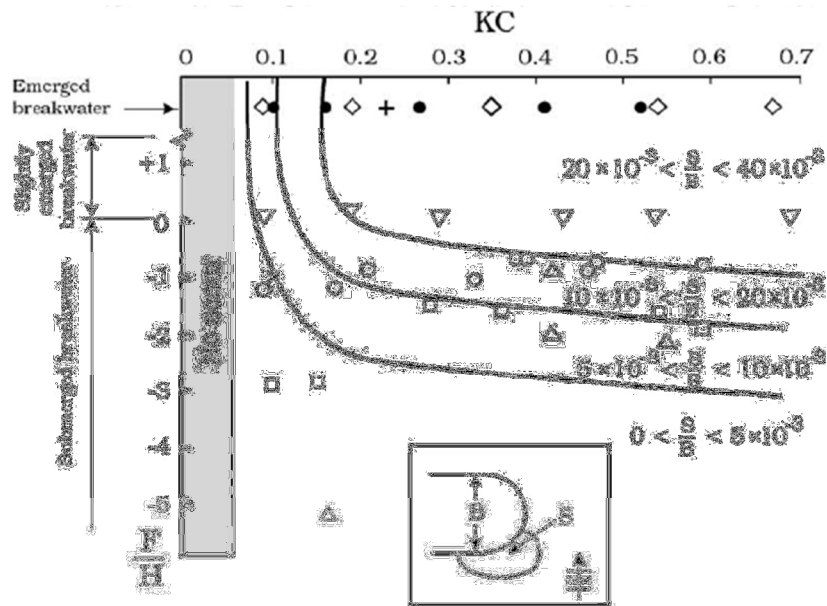


Figura 3.4-2 – Diagramma per il calcolo di  $S$ , lato mare, testata

Fig. 3.4-2: per valori fortemente negativi del rapporto  $R_c/H$ , non si ha erosione. Un'opera completamente sommersa, infatti, non presenta riflessione, perché tutta l'acqua semplicemente passa sopra alla cresta. Viceversa, all'aumentare di  $R_c$ , aumenta la profondità  $S$ , perché diventa sempre più rilevante il fenomeno di riflessione e secondario quello di tracimazione. L'influenza di  $KC$  è altrettanto importante, soprattutto per valori modesti: valori di  $KC \ll 0,1$  sono tali da non generare *scour*, a prescindere dall'altezza della cresta della barriera; inizialmente la profondità della fossa erosiva cresce molto più con  $KC$  che con l'aumentare di  $R_c/H$ ; per  $KC > 0,2$ , invece, la profondità dello *scour* diventa pressoché costante, a parità di  $R_c/H$ .

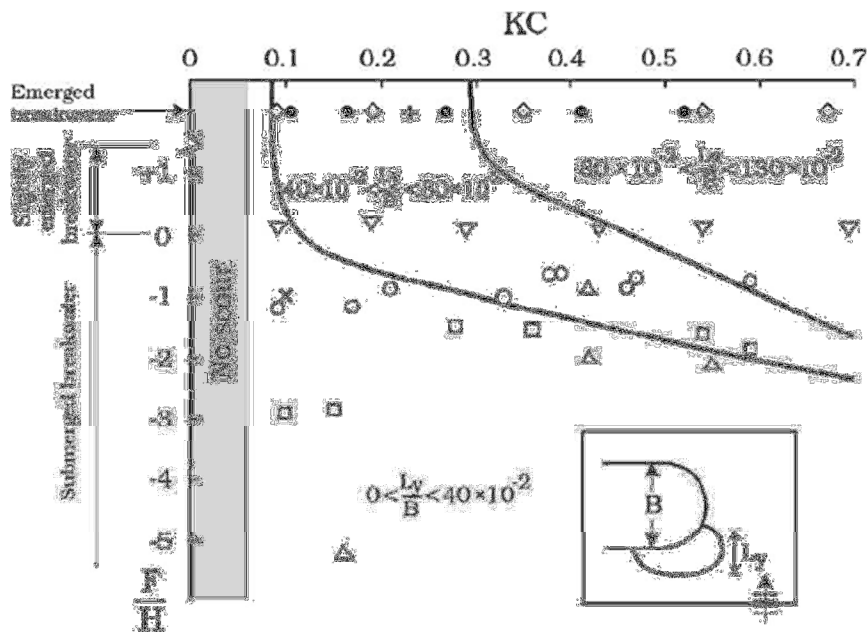


Figura 3.4-3 - Diagramma per il calcolo di  $L_y$ , lato mare, testata

Fig. 3.4-3: l'influenza di  $KC$  è più incisiva anche per valori più elevati, mentre per  $R_c/H < -2$  la lunghezza della buca erosiva rimane costante (e abbastanza limitata) con il decrescere dei valori del rapporto.



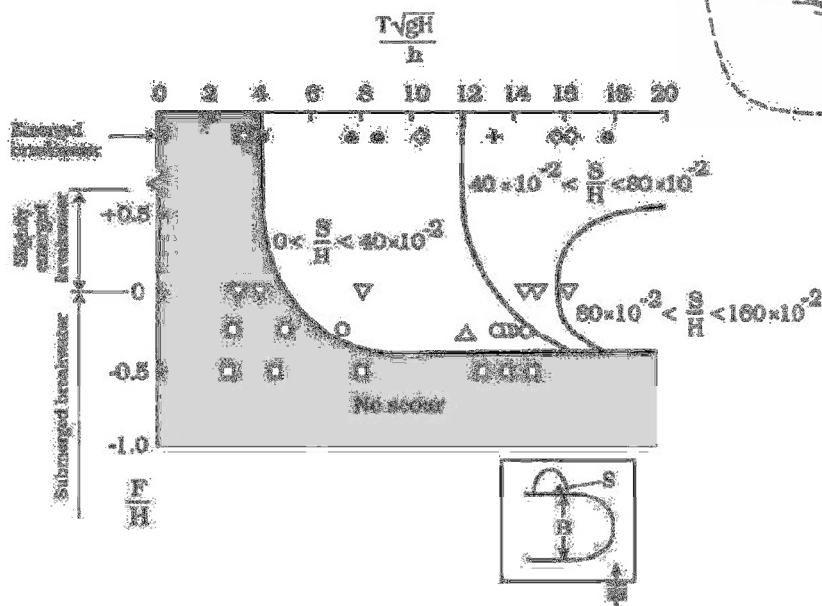


Figura 3.4-4 - Diagramma per il calcolo di  $S$ , lato riva, testata

Fig. 3.4-4: è molto più limitato il range di influenza dei valori di  $R_c/H$ : già per  $R_c/H < -0,5$ , non si ha più nessuna buca erosiva lato riva, infatti per opere molto sommerse l'interazione dell'onda con la struttura è meno rilevante, e non si può parlare di vera e propria tracimazione (l'onda oltrepassa la barriera sommersa senza impattarvi contro, ma dissipando solamente energia sulla sua cresta).

Per  $R_c/H > -0,5$  è preponderante l'effetto di  $T\sqrt{gH}/h$ , dunque delle caratteristiche di onda e fondale: più elevato è il valore assunto dal parametro (quindi, sostanzialmente, più energetico è l'attacco ondosso, a parità di fondale), più pronunciato è lo *scour*, quasi indipendentemente da  $R_c/H$ . Infine, se  $T\sqrt{gH}/h < 4$ , non si ha erosione.

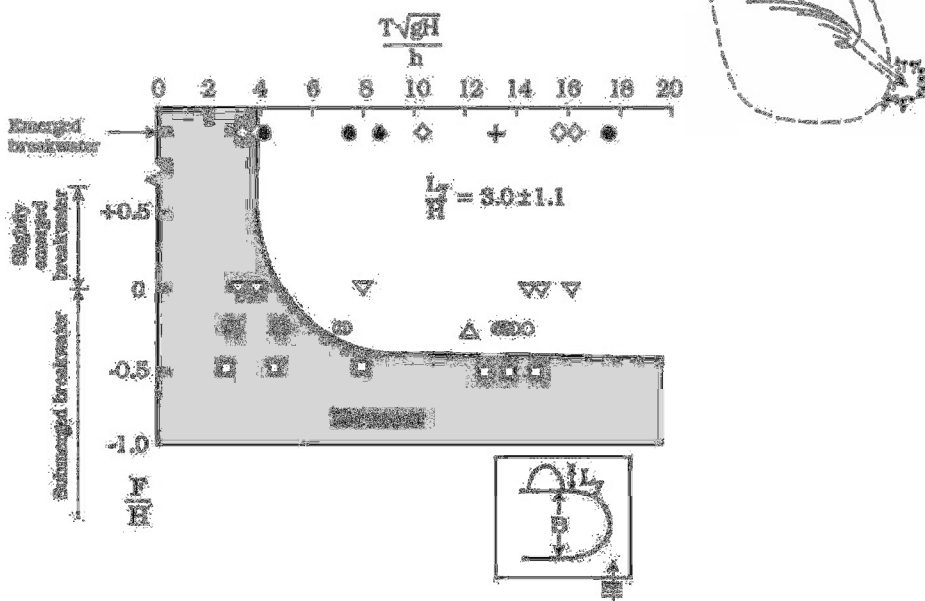


Figura 3.4-5 - Diagramma per il calcolo di  $L_y$ , lato mare, testata

Fig. 3.4-5: la lunghezza della fossa erosiva è determinata da valori di  $T\sqrt{gH}/h$  ed  $R_c/H$  sostanzialmente analoghi a quelli che ne caratterizzano la profondità.

## 4 Conclusioni

Sono state avanzate le motivazioni che inducono alla necessità di studiare e tentare di riprodurre i processi generati dall'interazione tra le onde e le strutture marittime.

La messa a punto di relazioni matematiche o modelli predittivi per la quantificazione di fenomeni quali la trasmissione e la riflessione ondosa non possono prescindere da un'accurata indagine preventiva di quelli che sono i principali fattori che influenzano il processo. La rilevanza reciproca di tali fattori può variare a seconda della geografia del luogo e delle particolari condizioni meteo-marine ad esso associate, tuttavia in qualsiasi circostanza è necessario tener conto tanto dei parametri idraulici (descrizione dell'onda tipica, dell'altezza del fondale), quanto di quelli strutturali (tipologia e dimensioni dell'opera da realizzare, caratteristiche geometriche – pendenza del paramento, presenza di una o più berme, larghezza della sezione trasversale – funzionamento di struttura sommersa e/o emersa, scabrezza e permeabilità della struttura).

Per quanto riguarda le grandezze idrauliche, se ne intende sottolineare la natura intrinsecamente probabilistica: altezza, periodo, lunghezza dell'onda sono valori soggetti a distribuzioni statistiche, da cui si estrapolano i valori significativi ai fini progettuali, quali ad esempio i valori medi, i valori di picco, ecc., a seconda delle esigenze.

Identificati tali grandezze, è consigliabile circoscrivere il problema mediante un set di parametri opportunamente definiti che possano racchiudere sinteticamente tutte le informazioni racchiuse nelle diverse grandezze. Ad esempio, particolare rilevanza viene di norma attribuita al cosiddetto “indice di frangimento” (o “parametro di Iribarren – Battjes”),

$$\xi_0 \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_{0m}}{gT_{m-1,0}^2}}} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{2\pi \frac{H_{0m}}{L_{0m}}}}$$

per la versatilità con cui allo stesso tempo individua le condizioni di frangimento dell'onda e descrive le caratteristiche dell'attacco ondoso e la pendenza del paramento della struttura.

È in funzione di parametri chiave come  $\xi_0$  che viene formulata la maggior parte delle relazioni finalizzate alla stima predittiva delle tre grandezze principali caratterizzati l'interazione onda – struttura: la portata di tracimazione, il coefficiente di trasmissione, il coefficiente di riflessione.

Tutte le espressioni ivi presentate derivano da interpolazione di dati sperimentali, quindi sono essenzialmente di natura empirica, perlopiù non limitate superiormente e perciò necessitanti di “forzature” esterne che impongano limiti ai valori estremi che le grandezze possono assumere.

Una volta in possesso di metodi predittivi che consentano di effettuare una stima quantitativa dei fenomeni di interazione, è possibile passare all'analisi degli effetti morfologici conseguenti all'inserimento di una struttura artificiale nell'idrodinamica costiera. I principali processi di alterazione idro-morfologica dell'ambiente circostante sono il frangimento delle onde, la diffrazione della loro direzione di propagazione, l'alterazione del naturale ricircolo dell'acqua. Tuttavia, l'interazione delle onde con le strutture opera effetti negativi anche su queste ultime, di cui il principale e più pericoloso è indubbiamente quello dell'erosione locale (*scour*) dei sedimenti ai piedi delle opere. Responsabile dell'erosione lato riva è l'onda trasmessa, dell'erosione lato mare è l'onda riflessa. Di fondamentale importanza divengono allora diagrammi e modelli in grado di stimare le dimensioni delle fosse erosive, in testata e al tronco delle opere, sul paramento lato riva e su quello lato mare.

Generalmente, le fosse erosive dovute all'onda riflessa sono più pronunciate e più estese, e pertanto più incresciose, in quanto causa di problemi di instabilità geotecnica, che possono indurre al collasso parziale o globale di una struttura. Per questo motivo, e per la sostanziale assenza in letteratura di ricerca puramente finalizzata alla modellazione del coefficiente di riflessione, particolare attenzione è stata posta, nell'ambito di tale studio, sia alle formule predittive relative al fenomeno della riflessione ondosa.

## BIBLIOGRAFIA

Burcharth H. F., Hawkins S. H., Zanuttigh B., Lamberti A., 2007, “*Environmental design guidelines for low crested coastal structures*”, Elsevier, 448 pp.

Coastal Engineering Manual:

<http://users.coastal.ufl.edu/~mcdougal/CEM/CoastalEngineeringManual.htm>

Dean R. G., Dalrymple R. A., 1991, “*Water wave mechanics for engineers and scientists*”, Adv. Series on Ocean Engineering – vol. 2, World Scientific.

Kamphuis J. W. 2000, “*Introduction to Coastal Engineering and Management*”, Adv. Series on Ocean Engineering – vol. 16, World Scientific.

Tommasicchio U., 2001, “*Manuale di Ingegneria portuale e costiera*”, Bios

Zanuttigh B., van der Meer J. W. , “*Wave reflection from coastal structures in design conditions*”, Coastal Eng. (2008), doi:10.1016/j.coastaleng.2008.02.009