

## La riabilitazione delle infrastrutture marittime: il caso delle dighe a gettata

Edoardo Benassai <sup>1</sup> e Giuseppe Paoletta <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Ambientale "Girolamo Ippolito",  
Università degli studi di Napoli "Federico II".

<sup>2</sup> Ingegnere, libero professionista

### Riassunto

La manutenzione delle opere civili costituisce un aspetto tanto caratterizzante della gestione territoriale, da costituirne vera e propria peculiarità culturale. La letteratura specializzata da tempo indica la riqualificazione del patrimonio esistente quale condizione necessaria per uno sviluppo equilibrato ed insieme efficiente sotto il profilo economico. La metodologia discussa nel presente lavoro riguarda le dighe marittime a gettata di massi naturali: la maniera più adeguata di affrontarne la riabilitazione, i tempi, i costi e la convenienza economica dei possibili interventi.

**Parole chiave:** dighe a gettata, danneggiamento.

### Abstract

*The problem of maintenance is mainly to be considered a cultural problem: specialized literature emphasizes in attempting to develop a maintenance culture as an index of modernity and of economical development. Its up-to-dateness shows that it's impossible to operate a consistent territorial development work unless the decay of what has already built is stopped in advance. A good civil entrepreneur must bear in mind that the recovery of the existing property has to be the real priority of our times. The methodology worked out in the present study concerns rubble mound breakwaters built with natural rocks, and the proper way to face their rehabilitation in case of damage on the armor layer caused by project wave height overcoming. This work also deals with the problems related to time, costs and the economical convenience of a choice rather than another as well as the various aspects of this topic.*

**Key-words:** rubble-mound breakwaters, damage.

### Generalità

Per una corretta gestione delle opere civili oltre al giusto dimensionamento strutturale occorre tenere in debito conto la durabilità delle stesse. L'aspetto quindi della manutenzione durante l'intera vita dell'opera deve risultare di pari importanza rispetto a quello della progettazione.

Questo concetto, di chiara origine industriale, getta le basi per l'affermazione di una cultura della manutenzione non più intesa come sinonimo di emergenza ma legata alla conservazione della integrità dell'opera in relazione alle funzioni previste in progetto. La manutenzione, quindi, diventa di diritto un problema culturale e come tale risulta essere al contempo indice di modernità e di sviluppo.

A sostegno della suddetta conservazione, occorre porre in essere tutti i provvedimenti volti a determinare:

- un allungamento della vita utile dell'opera;
- un mantenimento del suo livello prestazionale;
- la diminuzione del costo totale (somma dei costi di costruzione, gestione e manutenzione ordinaria e straordinaria).

In un tale contesto assume notevole importanza il valore economico della riabilitazione, sia perché, se si conserva efficienza al manufatto, si rende immutato nel tempo il valore del capitale investito, sia perché in tal modo viene a crearsi spazio ai tecnici ed alle imprese per nuovi tipi di professionalità. Ciò sarà possibile superando le complessità insite nel coniugare la realizzazione con la gestione durante l'intera vita dell'opera.

Caratteristica principale della manutenzione ordinaria è di realizzare interventi che spesso assumono carattere ripetitivo. Di qui l'esigenza di una pianificazione ragionata che dia alla manutenzione la giusta valenza, anche di tipo normativo.

Attualmente la manutenzione è disciplinata secondo il principio che deve essere effettuata nella misura in cui essa è ritenuta indispensabile ad evitare pericoli o danni a terzi. A questo tipo di principio giuridico, che non è purtroppo sufficiente ad evitare problemi legati al degrado ambientale, vanno associati tutti quei principi di fruibilità e di sviluppo sostenibile in armonia con la conservazione dell'ambiente originario.

### Il danneggiamento conseguente ad azioni con forti caratteri di aleatorietà

Con tali premesse si è voluto prendere in considerazione un particolare tipo di opera, le dighe marittime a scogliera soggette al moto ondoso, molto suscettibile al danneggiamento da parte di agenti esterni con forte carattere di aleatorietà.

Le caratteristiche di aleatorietà correlate col moto ondoso sono l'altezza ed il periodo d'onda. È noto che le onde irregolari o random sono caratterizzate da una superficie di ondulazione che è sensibilmente irregolare e diversa da istante ad istante e da punto a punto dello spazio:

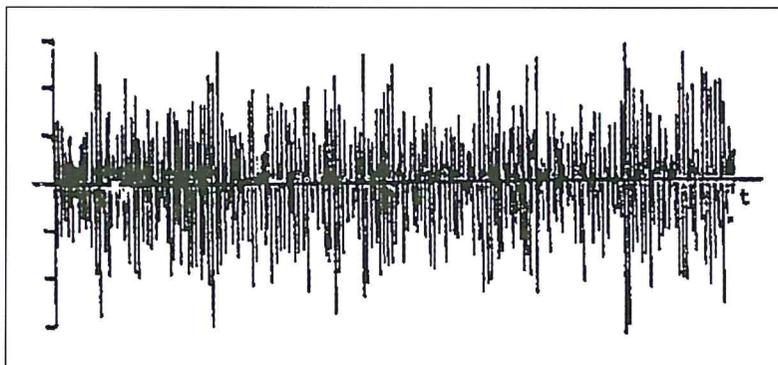


Figura 1 - Onde random nel dominio del tempo.

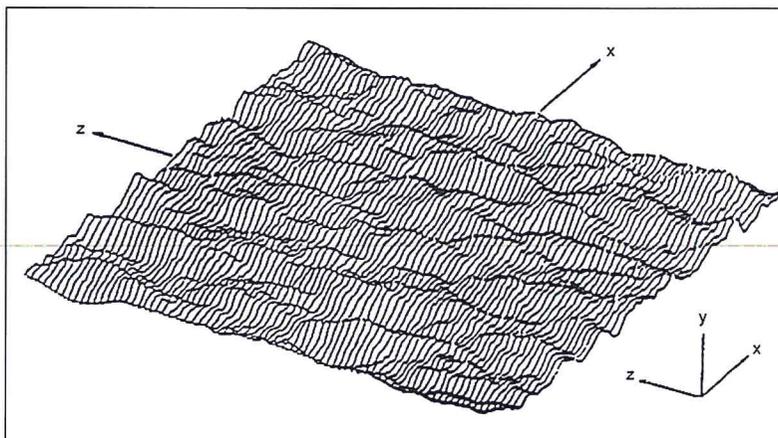


Figura 2 - Onde random nel dominio dello spazio.

Essa dipende da un numero notevole di variabili, e pertanto non è conveniente studiare le proprietà delle onde attraverso un'analisi locale, ma conviene adottare un approccio probabilistico.

Per caratterizzare lo stato del mare in un paragone nel lungo periodo si determinano le caratteristiche di un'onda significativa estrema, definita come la massima altezza d'onda prevista in un prefissato periodo di ritorno, denominata anche onda di progetto.

La procedura per la previsione dell'onda di progetto sulla base di dati rilevati o stimati passa attraverso i seguenti passi successivi:

- selezione dei dati di altezza d'onda relativi ad un periodo di osservazione;
- scelta di una funzione di distribuzione nota di valori estremi;
- adattamento dei dati di altezza d'onda a tale distribuzione;
- estrapolazione dei dati attraverso la funzione di distribuzione scelta per individuare l'altezza d'onda significativa estrema in un prefissato periodo di ritorno.

Nelle condizioni di spettro (distribuzione della varianza della densità di energia) infinitamente stretto, cioè sostanzialmente concentrato intorno alla frequenza di picco, Longuet-Higgins ha proposto per la distribuzione delle altezze  $H$  delle onde random una distribuzione rayleiana. In presenza degli usuali spettri delle onde di mare di larghezza non infinitamente stretta, la distribuzione delle altezze delle onde random può discostarsi dalla distribuzione anzidetta e seguirà quella di Forristal o di Boccotti:

$$p(H) = \frac{H}{4\sigma_\eta^2} \exp\left(-\frac{H^2}{8\sigma_\eta^2}\right) \quad (\text{Longuet-Higgins}) \quad (1)$$

in cui  $\sigma_\eta = \sqrt{m_0}$ ; ed  $m_0$  è il momento spettrale di ordine 0;

$$p(\tilde{H}) = \alpha \frac{\tilde{H}^{(\alpha-1)}}{\beta} \exp\left(-\frac{\tilde{H}^\alpha}{\beta}\right) \quad (\text{Forristal}) \quad (2)$$

con  $\tilde{H} = \frac{H}{\sigma_\eta}$ ;  $\alpha = 2.126$  e  $\beta = 8.420$ ;

$$p(\tilde{H}) = \frac{\tilde{H}}{2(1-\psi^*)} \exp\left[-\frac{\tilde{H}}{4(1-\psi^*)}\right] \quad (\text{Boccotti}) \quad (3)$$

avendo indicato  $\psi^*$  con la funzione di autocorrelazione normalizzata.

Il modello proposto per la distribuzione dei periodi  $T$  delle onde random su profondità infinita è, invece, dovuto a Bretschneider. Il periodo si ottiene dalla relazione:

$$p(T) = 2.7 \left(\frac{T^3}{T_m^4}\right) \exp\left[-0.675 \left(\frac{T}{T_m}\right)^4\right] \quad (4)$$

in cui  $T_m$ : il periodo medio.

Le dighe marittime a scogliera presentano problemi di manutenzione legati oltre che alle caratteristiche ondose di progetto anche alle implicazioni che si riferiscono alla funzione di difesa dello specchio d'acqua protetto. Tali problemi non possono considerarsi del tutto generalizzabili.

Per semplificare si è fatto riferimento alla sola funzionalità di una diga frangiflutti realizzata con massi naturali, e si è affrontato il problema della riabilitazione a seguito di un danneggiamento. In effetti in questo caso i primi danni si riscontrano sulla mantellata per superamento dell'altezza d'onda di progetto.

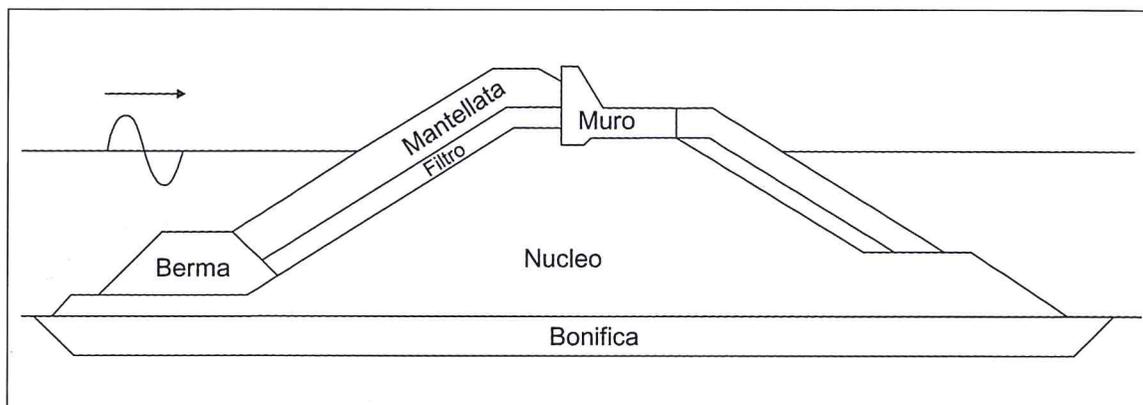


Figura 3 - Elementi costitutivi di un'opera a gettata.

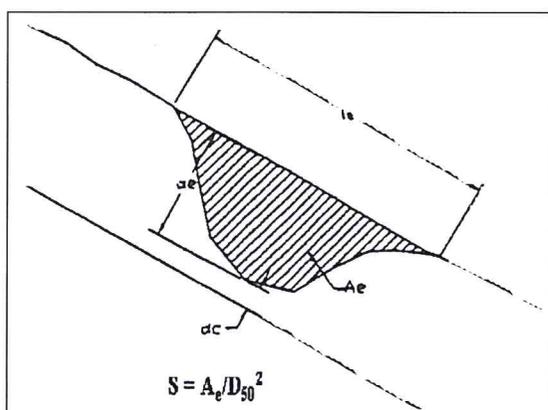
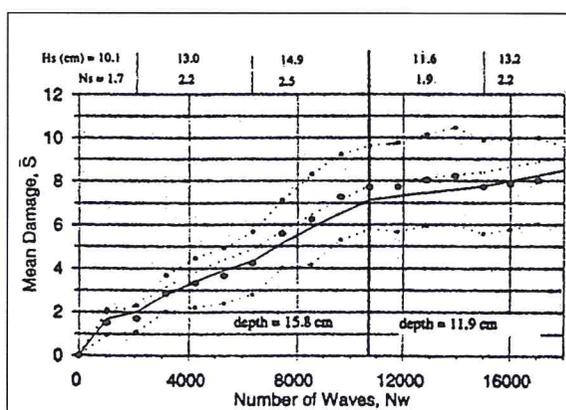


Figura 4 - Definizione dei parametri che caratterizzano il danneggiamento.

Figura 5 - Variazione del danneggiamento medio in funzione della durata della mareggiata - (numero di onde  $N_w$ ) riscontrata durante uno dei test effettuati da Melby e Kobayashi.

L'obiettivo dello studio della riabilitazione riguarda la convenienza economica di una scelta di intervento e le molteplici sfaccettature, non solo economiche, che la questione assume soprattutto sui tempi più opportuni per intervenire.

Con riferimento ad uno studio condotto da Melby e Kobayashi alla fine degli anni '90 su di un modello di scogliera in un canale di laboratorio, è stato possibile simulare l'evoluzione del danneggiamento da mareggiata sulla mantellata dell'opera per effetto di diverse successioni di onde random durante un assegnato stato di mare ovvero durante stati di mare di diversa intensità.

La misura del danneggiamento è stata eseguita attraverso alcuni parametri importanti ai fini della caratterizzazione della forma e dimensione dell'area erosa (Figg. 4 e 5).

Un risultato che lo studio su modello ha evidenziato è stato quello riguardante l'aumento del grado di danneggiamento con il numero d'onde, e quindi con il tempo, anche in presenza di una successione decrescente di stati di mare ossia in presenza di una diminuzione progressiva di altezza d'onda.

Sulla mantellata danneggiata, infatti, l'effetto di un'onda incidente di minore altezza rispetto a quella che la precede può indurre sempre danni rilevanti in quanto esso si esplica su un'opera già parzialmente danneggiata.

È stata condotta quindi l'analisi della riabilitazione del frangiflutti principale di un tipico porto turistico a partire dalla scelta progettuale più ovvia, quella in ipotesi di danneggiamento nullo, per finire a tre diverse condizioni di esercizio, nelle quali l'opera potrebbe trovarsi nel corso della sua vita.

Non essendo possibile fornire una guida alla pianificazione della manutenzione in quanto, come già accennato, ogni caso è differente dall'altro, è stato necessario studiare questo problema nella condizione più semplice possibile, di assenza di natanti a tergo del sopraflutto e quindi nessuna implicazione legata all'agitazione dello specchio acqueo.

### **L'iter metodologico seguito e la valutazione della convenienza della riabilitazione**

Come in tutte le opere civili, anche nel caso delle dighe a scogliera è necessario stabilire i carichi agenti sulla struttura per procedere ad un dimensionamento a danneggiamento nullo (step 1). Contestualmente al progetto, è stata quantificata l'entità della spesa che un tale investimento comporta (step 2), non prima di aver identificato le fasi di esecuzione dell'opera e quindi l'impiego delle materie prime e delle risorse umane necessarie. Si è poi passati all'esame delle condizioni di esercizio della diga foranea. In merito sono state ipotizzate tre situazioni meteomarine che simulano la successione delle mareggiate incidenti sull'opera (step 3), per le quali sono state studiate anche le funzioni densità di probabilità delle altezze d'onda, e che conducevano a tre livelli di danneggiamento diversi, *incipiente*, *intermedio* e *critico*, al fine di avere una visione più o meno completa del dissesto che ne poteva conseguire ed alla sua evoluzione nel tempo. È stata pertanto calcolata l'area erosa sulla mantellata, in termini di profondità e di lunghezza medie, nonché l'altezza di ricoprimento atta a garantire la riserva di stabilità.

Tabella 1 - Step dell'iter metodologico.

- 1 - Progettazione della diga.
- 2 - Valutazione del costo di realizzazione.
- 3 - Ipotesi sulle condizioni di esercizio.
- 4 - Valutazione del danneggiamento conseguente ad assegnati stati di mare.
- 5 - Valutazione dei costi connessi al danneggiamento.
- 6 - Stima dei costi dell'intervento di manutenzione in ipotesi di tempi diversi di inizio lavori.
- 7 - Verifica della convenienza economica della manutenzione.

Fatto ciò, per ciascuna successione di mareggiate, sono stati estrapolati cinque stati di mare (step 4), ai quali corrispondevano altrettanti gradi di danneggiamento, e per ciascuno di essi sono stati valutati i costi di riabilitazione della mantellata, nonché quelli propri della mobilitazione del cantiere (step 5), mettendoli anche in relazione con diversi tempi di inizio della riabilitazione stessa (step 6), valutati sempre partendo dalla costruzione dell'opera.

Si è infine considerata la convenienza di un intervento riabilitativo (step 7): partendo dal presupposto che essa è frutto di un compromesso tra l'esperienza e le considerazioni di carattere economico (vale a dire che ciascuna valutazione ha senso solo se riferita ad un particolare porto).

Indicando con  $M$  il costo delle operazioni di manutenzione si ha:

$$P_m C_m Q_m + S = M \quad (5)$$

Indicando con  $Q$  la quantità totale di ciascun materiale messo in opera per la costruzione del frangiflutto:  $Q_1$  il numero dei massi artificiali di protezione,  $Q_2$  le tonnellate di scogli,  $Q_3$  i  $m^3$  di tout-venant,  $Q_4$  i  $m^3$  di calcestruzzo della sovrastruttura ecc. e con  $C_1, C_2, C_3, C_4$ , ecc. i costi storici attualizzati di ciascuno di essi, la sommatoria:

$$C_m Q_m = C_t \quad (6)$$

è il costo storico attualizzato dell'opera completa all'epoca del suo esame ovvero il suo valore.

Se  $p$  rappresenta la percentuale di ciascuna delle  $Q$  coinvolte nel danno, e quindi oggetto della riparazione, la sommatoria:

$$p_m C_m Q_m \quad (7)$$

è il costo della manutenzione/riparazione. A questo costo va aggiunta una ulteriore spesa  $S$  relativa alle predisposizioni necessarie per eseguire le operazioni manutentive (strade di accesso, installazioni di gru, utilizzo di soli mezzi marittimi ecc.) qualora tali predisposizioni non siano state previste in fase progettuale ed inoltre gli oneri relativi ad una eventuale sospensione dell'esercizio portuale.

Sulla base di considerazioni precedentemente illustrate, e soprattutto di quelle economiche, è stata valutata la convenienza di un tale tipo di intervento, mediante il confronto tra  $M$  stesso ed il valore residuo  $C_r$  dell'opera. Indicando con  $C_t$  il costo totale attualizzato dell'opera (il suo valore),  $V$  la vita utile prevista in progetto e  $v$  gli anni di vita residua, il valore residuo attualizzato risulta:

$$\frac{C_t v}{V} = C_r \quad (8)$$

Se  $M$  è inferiore a  $C_r$  è conveniente eseguire la manutenzione, in caso contrario può non essere conveniente. Occorre tuttavia tener conto di altri fattori variabili da caso a caso, quali i mancati ricavi dell'esercizio portuale nel periodo in cui la struttura è inagibile (perché in fase di ricostruzione), e l'eventuale disagio arrecato ai natanti ed ai loro fruitori conseguente all'agitazione ondososa dovuta alla tracimazione della diga danneggiata.

### Considerazioni conclusive

Tutto il lavoro svolto, oltre ad avere confermato la difficoltà oggettiva in cui ci si troverebbe volendo prevedere una manutenzione preventiva, legata ad una previsione di azioni ondose random, ha, ancor di più, posto in evidenza l'impossibilità di parlare genericamente di approccio allo studio della manutenzione senza fare riferimento ad un caso specifico. Si possono certamente fornire delle indicazioni per chi si accinge ad affrontare una problematica di questo tipo, suggerendo i vari aspetti da tenere presenti e la corretta valutazione dei costi che entrano in gioco nel computo metrico estimativo.

Comunque, l'opportunità di eseguire la riabilitazione non può e non deve esclusivamente basarsi sui calcoli delle spese da sostenere, perché l'importanza del porto e del suo funzionamento condiziona l'entità dei danni che possono insorgere in seguito all'aver trascurato l'erosione della mantellata della diga.

Dunque, per quanto concerne il danneggiamento di una diga a scogliera che insorge per superamento dell'altezza d'onda di progetto ed ha come effetto lo scalzamento dei massi dalla sua mantellata, le considerazioni di carattere economico devono essere di supporto ma non determinanti nella scelta finale della tempistica più idonea per eseguirne il rifiorimento.

### Ringraziamenti

Si coglie l'occasione per ringraziare l'ingegnere Adele Manzella, che ha svolto la propria tesi di laurea sull'argomento presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli "Federico II", con diligenza ed entusiasmo.

### Bibliografia

- AA.VV. (1991) - *Manutenzione e recupero: un mercato per le piccole imprese edili*. IX Incontro nazionale dei delegati provinciali delle piccole imprese edili. ANCE (Associazione Nazionale Costruttori Edili), Firenze 1-2.
- AA.VV. (1999) - *The Cycle Management of Port Structures: General Principles*. Report of Working group n.71 of Permanent Technical Committee II-International Navigation Association, 1999.
- Benassai E. *Elementi di Costruzioni Marittime*. Vol. I, Università di Napoli "Federico II".
- Melby J.A. and Kobayashi N. (1998) - *Progression and variability of damage on rubble mound breakwaters*. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, November/December 1998.
- Rossetto S. (1999) - *Manuale di economia e organizzazione d'impresa, teorie e tecniche*. UTET, Torino.

Manoscritto ricevuto il 13/6/2002, accettato il 20/11/2002.