

## Il periodo di ritorno di assegnate soglie di run-up sui litorali italiani

Felice Arena

Università degli Studi di Reggio Calabria - Dipartimento di Meccanica e Materiali  
Località Feo di Vito - 89100 Reggio Calabria

### Riassunto

La quota più alta alla quale si spinge l'acqua nel corso di una mareggiata è chiamata run-up. La previsione del run-up per stati di mare di assegnata altezza significativa al frangimento e per assegnata pendenza del fondo, può essere eseguita in modo affidabile utilizzando alcune relazioni empiriche, tra cui quella di Van der Meer (1992).

Nella memoria si propone una procedura completa per il calcolo del periodo di ritorno di una mareggiata nella quale il run-up supera un'assegnata soglia, a partire da dati ondametrici direzionali (negli esempi vengono utilizzati i dati della Rete Ondametrica Nazionale). Viene infine proposta un'analisi delle conseguenze dei vari livelli di incertezza che si incontrano nelle operazioni di calcolo.

### Introduzione

La progettazione di strutture prossime alla battigia (ad es. strade litoranee, passeggiate a mare, stabilimenti balneari) richiede di prevedere la quota massima (run-up) raggiunta dall'acqua sulla spiaggia nel corso delle mareggiate. Chiaramente, conoscere tale quota vuol dire poter decidere in modo razionale sulla necessità di eventuali opere di difesa.

Il run-up può essere stimato utilizzando delle relazioni empiriche inquadrare alla luce del problema dell'equilibrio del volume di controllo compreso fra la linea di frangimento e la spiaggia. Ad esempio Van der Meer (1992) ha proposto un'espressione che consente di calcolare il run-up su un fondale piano in funzione dell'altezza significativa  $H_{sb}$  delle onde al frangimento, e del numero di Irribarren

$$I = \frac{\tan \lambda}{\sqrt{H_{sb} / L_{p0}}}, \quad [1]$$

dove  $\tan \lambda$  è la pendenza del fondale e  $L_{p0}$  è la lunghezza d'onda dominante su profondità infinita.

Il run-up è un fenomeno aleatorio, in quanto è legato alle altezze significative che si realizzano nella località in esame, nel corso delle varie mareggiate. Il problema va quindi affrontato in chiave probabilistica, con l'obiettivo di calcolare il periodo di ritorno di una mareggiata nella quale il run-up supera un'assegnata soglia.

Nella Memoria è proposta una procedura completa per il calcolo del predetto periodo di ritorno. Tale procedura utilizza come input i dati delle boe ondametriche direzionali (gestite in Italia dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale).

Allo scopo si introduce la soluzione analitica generale per il periodo di ritorno  $R(H_{t,0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  di una mareggiata in cui l'altezza significativa supera una soglia assegnata  $b$  con direzione di propagazione compresa in un assegnato intervallo  $(\theta_1, \theta_2)$ .

Infine, a scopo esemplificativo, viene proposto un calcolo di previsione del run-up per un tratto di spiaggia in prossimità di Capo Colonne, sulla costa ionica della Calabria.

### La teoria degli stati di mare

La teoria degli stati di mare (Longuet-Higgins, 1963; Phillips, 1967; Borgman, 1969) prevede la schematizzazione di uno stato di mare come somma di un numero  $N$  molto grande di onde periodiche con ampiezze  $a_i$  infinitesime, frequenze  $\omega_i$  e direzioni di propagazione  $\beta_i$  generalmente diverse fra loro e angoli di fase  $\varepsilon_i$  distribuiti in modo puramente casuale in  $(0, 2\pi)$ . L'elevazione d'onda, al primo ordine nella logica di Stokes, risulta:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(k_i x \sin \beta_i + k_i y \cos \beta_i - \omega_i t + \varepsilon_i), \quad [2]$$

dove il numero d'onda  $k_i$  è legato alla frequenza angolare  $\omega_i$  dalla relazione di dispersione lineare:

$$k_i \tanh(k_i d) = \omega_i^2 / g, \quad [3]$$

essendo  $d$  la profondità nel punto  $(x, y)$ . L'angolo che la direzione di propagazione della componente  $i$ -esima forma con l'asse  $y$  è indicato con  $\beta_i$ .

Si definisce poi lo spettro direzionale dell'elevazione d'onda:

$$S(\omega, \beta) \delta\omega \delta\beta \equiv \sum_i \frac{1}{2} a_i^2 \quad \text{per } i \text{ tale che } \begin{cases} \omega < \omega_i < \omega + \delta\omega; \\ \beta < \beta_i < \beta + \delta\beta. \end{cases} \quad [4]$$

Per le applicazioni si può utilizzare il classico spettro JONSWAP-Mitsuyasu (Hasselmann e al., 1973; Mitsuyasu e al., 1975):

$$S(\omega, \beta) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right] \exp\left\{\ln \chi_1 \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\chi_2^2 \omega_p^2}\right]\right\} K(n) \cos^{2n}\left(\frac{\beta - \bar{\beta}}{2}\right), [5]$$

dove:

$\omega_p$  e  $\bar{\beta}$  sono rispettivamente la frequenza dominante e la direzione dominante dello spettro;

$\alpha$  è il parametro di Phillips, compreso normalmente tra 0.008 e 0.02;

$\chi_1$  e  $\chi_2$  sono i parametri di forma dello spettro di frequenza, che risultano:

$$\chi_1 = 3.3, \quad \chi_2 \begin{cases} = 0.07 & \text{se } \omega \leq \omega_p, \\ = 0.09 & \text{se } \omega > \omega_p; \end{cases} \quad [6]$$

$K(n)$  è il fattore normalizzante,

$$K(n) \equiv \left[ \int_0^{2\pi} \cos^{2n}\left(\frac{\beta}{2}\right) d\beta \right]^{-1}. \quad [7]$$

Il parametro della dispersione direzionale  $n$  è legato alla frequenza dalla relazione:

$$\begin{cases} n = n_0(\omega / \omega_p)^5 & \text{se } \omega \leq \omega_p; \\ n = n_0(\omega / \omega_p)^{-2.5} & \text{se } \omega > \omega_p; \end{cases} \quad [8]$$

con:

$$n_0 = 11.5u\omega_p / g, \quad [9]$$

dove  $u$  è la velocità del vento.

***I livelli di run-up in uno stato di mare***

Il run-up è definito come la quota più alta raggiunta dall'acqua su una spiaggia nel corso di una mareggiata (Fig. 1). In generale, a parità di altezza d'onda al frangimento, il run-up è tanto maggiore quanto maggiore è la lunghezza dell'onda e quanto maggiore è la pendenza del fondo. Il run-up su un fondale piano può essere calcolato utilizzando la relazione empirica proposta da Van der Meer (1992):

$$\begin{cases} \frac{R_U}{H_{s0}} = 1.5\gamma \frac{H_{sb}}{H_{s0}} I & \text{per } I < 2, & (a) \\ \frac{R_U}{H_{s0}} = 1.5\gamma \frac{H_{sb}}{H_{s0}} & \text{per } I \geq 2, & (b) \end{cases} \quad [10]$$

dove  $H_{s0}$  è l'altezza significativa dell'onda su profondità infinita,  $H_{sb}$  è l'altezza significativa al frangimento e  $\gamma$  è un fattore di riduzione che tiene conto della presenza delle berme, della scabrezza del fondale, dell'incidenza della profondità finita sulle distribuzioni delle altezze in uno stato di mare, della direzione dominante delle onde al frangimento (Van der Meer, 1992). Convenzionalmente si intende run-up ( $R_U$ ) di uno stato di mare la quota di spiaggia che viene superata in media da due onde su cento.

Il numero di Irribarren  $I$  - v. eq. (1) - può essere poi riscritto nella forma:

$$I = \frac{\tan \lambda}{\sqrt{\frac{H_{sb}}{H_{s0}} \frac{H_{s0}}{L_{p0}}}}, \quad [11]$$

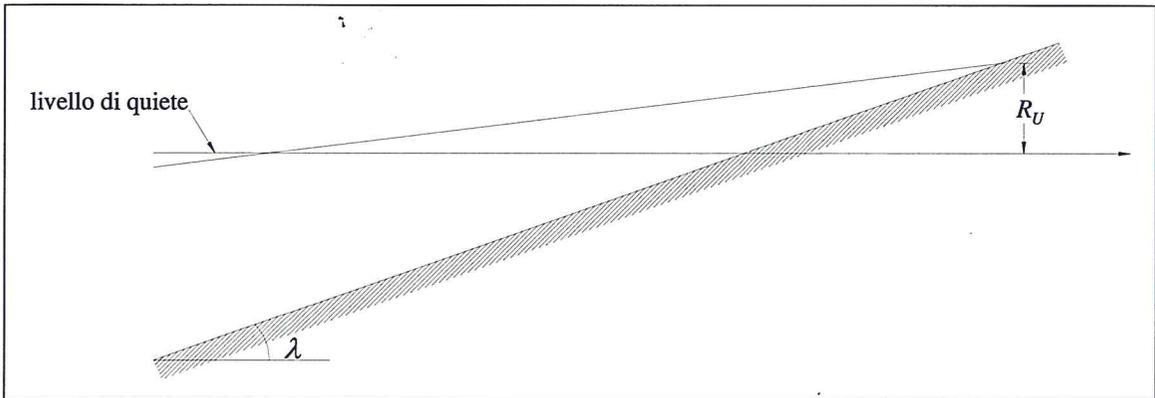


Figura 1 - Schema di riferimento: run-up ( $R_U$ ) su una spiaggia con pendenza del fondale  $\tan \lambda$ .

semplicemente moltiplicando e dividendo per  $\sqrt{H_{s,0}}$ . Quanto alla ripidità di largo  $H_{s,0}/L_{p0}$ , che compare a denominatore, essa può essere espressa in funzione dello spettro di frequenza. Per spettro JONSWAP risulta

$$\frac{H_{s,0}}{L_{p0}} = 0.352\sqrt{\alpha}, \quad [12]$$

dove  $\alpha$  è il parametro di Phillips.

***I livelli di altezza significativa in una località***

Le boe ondametriche direzionali, collocate in diverse località italiane, effettuano rilievi sistematici di stati di mare: registrazioni di 30 minuti ogni 3 ore. In Italia le boe vengono gestite dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale. Per ogni registrazione vengono fra l'altro forniti i valori, su profondità infinita, dell'altezza significativa  $H_{s,0}$  e della direzione di propagazione dominante  $\theta$ . Nella memoria è stata utilizzata la convenzione del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, che indica con  $\theta$  l'angolo che la direzione dominante di propagazione delle onde forma con il NORD.

Analizzando un insieme di registrazioni è possibile stimare:

i) la probabilità di superamento omnidirezionale  $P(H_{s,0} > b)$ , definita come la frazione di tempo durante cui l'altezza significativa, nella località in esame, è più alta della soglia assegnata  $b$ . Tale probabilità si ricava direttamente dalle registrazioni delle boe ondametriche. Indicando con  $N$  il numero totale di registrazioni (in un intervallo temporale assegnato), fissata la soglia  $b_1$  si ha:

$$P(H_{s,0} > b_1) = \frac{\text{numero di registrazioni in cui l'altezza significativa supera la soglia } b_1}{N}. \quad [13]$$

Il comportamento asintotico della probabilità di superamento omnidirezionale può essere efficacemente rappresentato da un'espressione di tipo Weibull (Battjes, 1970) :

$$P(H_{s,0} > b) = \exp\left[-\left(\frac{b}{w}\right)^\mu\right], \quad [14]$$

dove  $\mu$  (adimensionale) e  $w$  (avente le dimensioni di una lunghezza) sono i parametri caratteristici della località. La tabella 1 riporta i parametri  $\mu$  e  $w$  per diverse località italiane;

ii) la probabilità di superamento direzionale  $P(H_{s,0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2)$ , definita come la frazione di tempo durante cui l'altezza significativa nella località in esame è più alta della soglia assegnata  $b$ , con direzioni dominanti di propagazione comprese nell'intervallo  $(\theta_1, \theta_2)$ . Il procedimento per ricavare dai dati tale probabilità è lo stesso: fissata la soglia  $b_1$ , la  $P(H_{s,0} > b_1; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  si ottiene dal rapporto tra il numero di registrazioni in cui l'altezza significativa supera la soglia  $b_1$  con direzioni dominanti di propagazione comprese nell'intervallo  $(\theta_1, \theta_2)$  e il numero totale di registrazioni  $N$ .

La forma analitica della probabilità di superamento direzionale, proposta da Boccotti (1997), è data dalla differenza di due Weibull:

$$P(H_{s,0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2) = \exp\left[-\left(\frac{b}{w_\alpha}\right)^\mu\right] - \exp\left[-\left(\frac{b}{w_\beta}\right)^\mu\right], \quad [15]$$

dove  $w_\alpha$  e  $w_\beta$  sono i parametri caratteristici del settore di traversia  $(\theta_1, \theta_2)$  nella località in esame ( $w_\beta < w_\alpha \leq w$ );

iii) la  $p(H_{s,0} = b; \theta_1 < \theta < \theta_2)db$ , frazione di tempo durante cui l'altezza significativa nella località in

esame è compresa fra  $b$  e  $b+db$ , con direzioni dominanti di propagazione comprese nell'intervallo  $(\theta_1, \theta_2)$ . In particolare la densità di probabilità è legata alla probabilità di superamento dall'espressione:

$$p(H_{s,0} = b; \theta_1 < \theta < \theta_2) = - \frac{dP(H_{s,0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2)}{db} \quad [16]$$

Tabella 1 - Rete ondametria italiana. Parametri  $\mu$  e  $w$  della probabilità  $P(H_{s,0} > b)$ . Parametri  $a_{10}$  e  $b_{10}$  della regressione basi-altezze  $\bar{b}(a)$  (Boccotti, 1997).

Località	$\mu$	$w$ [m]	$a_{10}$ [m]	$b_{10}$ [ore]
La Spezia	1.023	0.731	3.6	74
Alghero	1.137	1.280	5.2	88
Ponza	1.200	0.874	3.4	69
Mazara del Vallo	1.275	1.021	3.6	73
Crotone	0.958	0.637	3.2	74
Monopoli	1.143	0.645	2.9	70
Pescara	1.018	0.625	3.3	65

**Le 'mareggiate triangolari equivalenti'**

Definiamo mareggiata una successione di stati di mare in cui l'altezza significativa cresce portandosi da livelli di quiete fino a superare la soglia critica di 1.5m, senza poi scendere al disotto di tale soglia per intervalli temporali continuativi superiori a 12 ore.

I dati delle boe ondametria consentono di conoscere l'andamento dell'altezza significativa in funzione del tempo e quindi di individuare le singole mareggiate. Nella Figura 2 è riportato un esempio di mareggiata registrata dalla boa ondametria di Alghero il 13/05/1995, con altezza significativa massima di 7.4 m.

La probabilità di superamento dell'altezza d'onda massima in una mareggiata di assegnata storia risulta (Borgman, 1970 e 1973):

$$P(H_{max} > H) = 1 - \exp \left\{ \int_0^D \frac{1}{\bar{T}[b(t)]} \ln [1 - P(H; H_{s,0} = b(t))] dt \right\}, \quad [17]$$

dove:

D è la durata della mareggiata;

$\bar{T}(b)$  è il periodo medio delle onde in uno stato di mare con altezza significativa  $H_{s,0} = b$ :

$$\bar{T}(b) = 22 \sqrt{b/(4g)} ; \quad [18]$$

$P(H; H_{s,0} = b)$  è la probabilità che un'onda presa a caso in uno stato di mare con altezza significativa  $H_{s,0} = b$  sia più alta della soglia fissata H; tale probabilità risulta (Boccotti, 1984):

$$P(H; H_{s,0} = b) = \exp \left[ - \frac{4}{1 + \psi^*} \left( \frac{H}{b} \right)^2 \right], \quad [19]$$

con  $\psi^*$  parametro di strettezza dello spettro, definito come modulo del rapporto tra il minimo assoluto e il massimo assoluto dell'autocovarianza. In particolare  $\psi^* = 1$  per spettro infinitamente

stretto e  $\psi^* = 0.73$  per spettro JONSWAP.

L'altezza d'onda massima attesa nel corso della mareggiata  $\overline{H_{\max}}$ , ovvero il valore medio della  $H_{\max}$  (variabile definita positiva), risulta:

$$\overline{H_{\max}} = \int_0^{\infty} P(H_{\max} > H) dH. \quad [20]$$

Introduciamo poi il concetto di mareggiata triangolare equivalente, proposto da Boccotti (1986a-b). Associamo quindi ad ogni mareggiata vera una mareggiata triangolare equivalente (m.t.e.), o triangolo. L'altezza del triangolo è pari all'altezza significativa massima registrata nel corso della mareggiata vera. La base del triangolo è tale che l'altezza  $\overline{H_{\max}}$  dell'onda massima attesa nel corso della mareggiata vera coincida con l'altezza dell'onda massima attesa nel corso della mareggiata triangolare equivalente.

In particolare, l'altezza  $\overline{H'_{\max}}$  dell'onda massima attesa in un triangolo di altezza  $a$  e base  $b$  si ricava dall'integrale in  $(0, \infty)$  della  $P(H'_{\max} > H)$ , probabilità di superamento della variabile  $H'_{\max}$ . Tale probabilità risulta:

$$P(H'_{\max} > H) = 1 - \exp \left\{ \frac{b}{a} \int_0^a \frac{1}{\overline{T}(b)} \ln[1 - P(H; H_{j,0} = b)] db \right\}. \quad [21]$$

La base della m.t.e. si calcola per tentativi. La logica di calcolo è la seguente:

- i) data una mareggiata di assegnata storia, ricaviamo l'altezza d'onda massima attesa  $\overline{H_{\max}}$ ;
- ii) nota l'altezza  $a$  della m.t.e. (per la mareggiata di fig. 2  $a=7.4\text{m}$ ), si fissa per la base un valore di tentativo  $b'$  e si ricava la  $\overline{H'_{\max}}$  di tentativo della m.t.e.;
- iii) si calcola iterativamente la base  $b$  del triangolo, osservando che se  $\overline{H'_{\max}} < \overline{H_{\max}}$  la base  $b$  del triangolo sarà più grande del valore di tentativo  $b'$ ; viceversa se  $\overline{H'_{\max}} > \overline{H_{\max}}$  risulterà  $b < b'$ .

Ad esempio, nella Figura 2 è riportata la m.t.e. corrispondente alla mareggiata vera riportata nella stessa figura. La m.t.e. ha altezza  $a = 7.4\text{ m}$  e base  $b = 66.7\text{ ore}$ .

Il concetto di m.t.e. gioca un ruolo fondamentale: esso consente di fare riferimento ad un 'mare equivalente' sostituendo ad ogni mareggiata la corrispondente m.t.e.. L'equivalenza tra mareggiata vera e m.t.e. è ancora più forte di quello che a priori ci si poteva aspettare. Infatti la probabilità che l'altezza della singola onda più alta nel corso della mareggiata superi una qualsiasi soglia  $H$  risulta uguale nella mareggiata vera e nella m.t.e. (Fig. 3).

Come si vedrà, fare riferimento a mareggiate triangolari equivalenti (e quindi a triangoli di altezza  $a$  e base  $b$ ) anziché a mareggiate vere comporta una notevole semplificazione.

***Le basi delle mareggiate triangolari equivalenti***

Per calcolare le basi delle mareggiate triangolari equivalenti si può utilizzare la regressione basi-altezze proposta da Boccotti (1997):

$$\overline{b}(a) = b_{10} \left( 1.11 - 0.11 \frac{a}{a_{10}} \right), \quad [22]$$

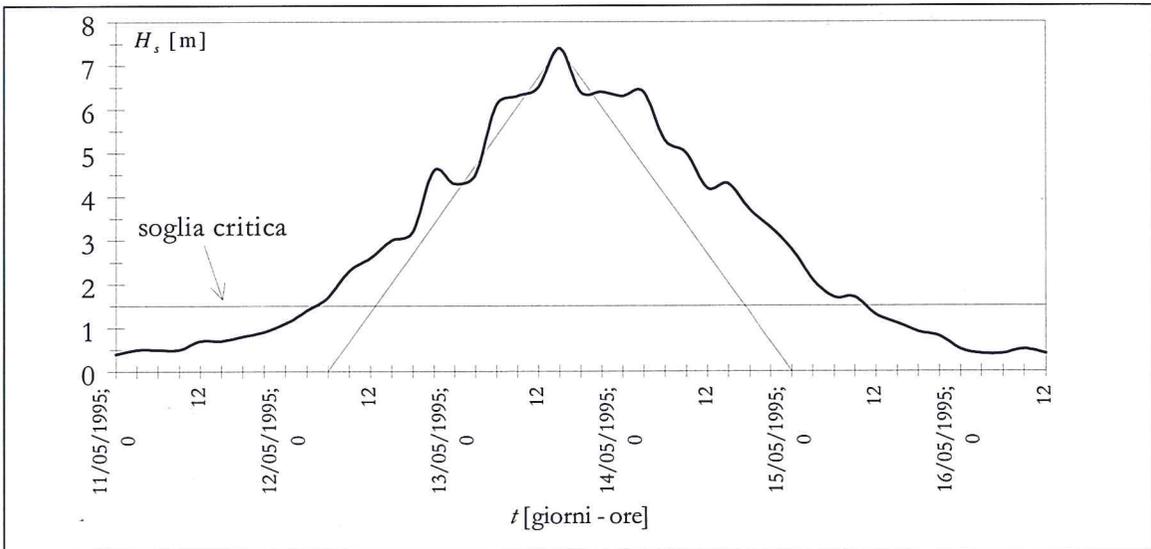


Figura 2 - Mareggiata registrata ad Alghero il 13/05/1995 e mareggiata triangolare equivalente.

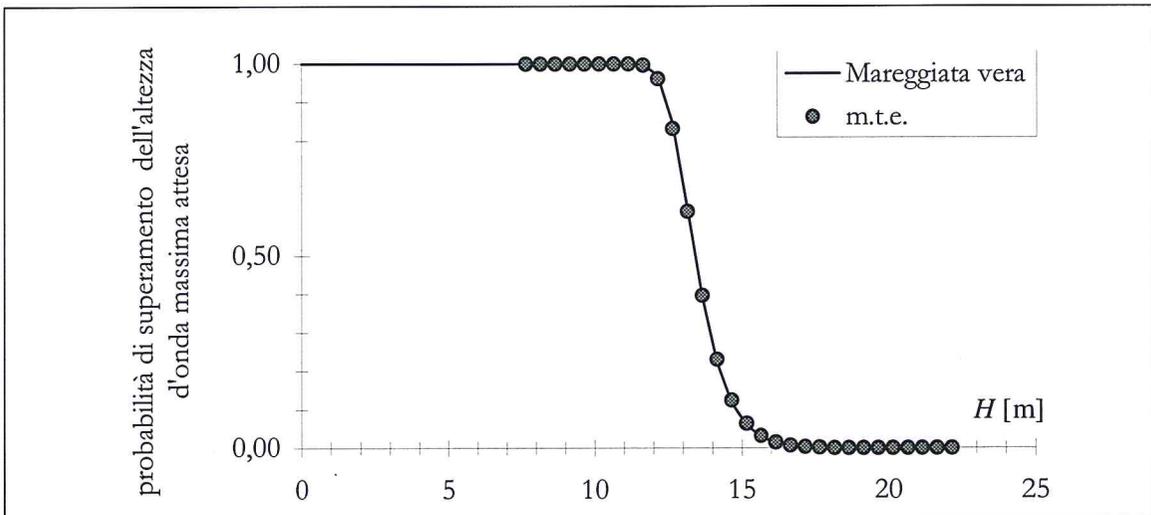


Figura 3 - Confronto fra la  $P(H_{\max} > H)$ , probabilità che l'altezza dell'onda massima attesa nel corso della mareggiata della Figura 2 sia più alta della soglia  $H$  e la  $P(H'_{\max} > H)$  della corrispondente m.t.e.

dove  $a_{10}$  e  $b_{10}$  sono rispettivamente il valore medio delle altezze  $a$  e il valore medio delle basi  $b$  dell'insieme di  $N$  m.t.e. più forti registrate nella località in esame in  $n$  anni. In particolare si fissa  $N = 10n$ . Disponendo ad esempio di 5 anni di registrazioni, si farà riferimento alle 50 mareggiate più forti. La Tabella 1 riporta i parametri  $a_{10}$  e  $b_{10}$  della regressione (22) per i mari italiani.

**L'altezza significativa delle onde al frangimento**

**La teoria della rifrazione degli stati di mare (Boccotti, 1988)**

La teoria degli stati di mare prevede la schematizzazione di uno stato di mare come somma di un numero molto grande di componenti elementari. Fissato un punto su profondità finita ( $d < 0.5L_{p0}$ ), l'elevazione d'onda risulta:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N a_i' \cos(k_i x \sin \beta_i' + k_i y \cos \beta_i' - \omega_i t + \varepsilon_i), \quad [23]$$

dove  $a_i'$  e  $\beta_i'$  sono rispettivamente ampiezza e direzione di propagazione della componente  $i$ -esima, su profondità  $d$ . Il numero d'onda  $k_i$  soddisfa la relazione di dispersione lineare (eq. 3).

Si ipotizzano linee batimetriche rettilinee e parallele e si assume il sistema di riferimento con l'asse  $y$  normale alla linea di battigia.

La singola componente avente in acque profonde (cioè su profondità maggiori di  $0.5L_{p0}$ ) ampiezza  $a_i$  e direzione di propagazione  $\beta_i$ , avrà su profondità  $d$ , per effetto di shoaling-rifrazione ampiezza  $a_i'$  e direzione di propagazione  $\beta_i'$  tali che:

$$a_i' = a_i \sqrt{\frac{\sinh(2k_i d)}{\tanh(k_i d) [\sinh(2k_i d) + 2k_i d]} \frac{\cos \beta_i}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta_i \tanh^2(k_i d)}}}; \quad [24]$$

$$\sin \beta_i' = \sin \beta_i \tanh(k_i d); \quad [25]$$

$$\cos \beta_i' \cos \beta_i > 0. \quad [26]$$

Pertanto l'elevazione d'onda in un punto generico su profondità  $d$  risulta:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N a_i \sqrt{\frac{\sinh(2k_i d)}{\tanh(k_i d) [\sinh(2k_i d) + 2k_i d]} \frac{\cos \beta_i}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta_i \tanh^2(k_i d)}}} \cdot \cos \left[ k_i \sin \beta_i \tanh(k_i d) x + k_i \sqrt{1 - \sin^2 \beta_i \tanh^2(k_i d)} (\cos \beta_i / |\cos \beta_i|) y - \omega_i t + \varepsilon_i \right]; \quad [27]$$

e la sua varianza:

$$\langle \eta^2(x, y, t) \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} a_i^2 \frac{\sinh(2k_i d)}{\tanh(k_i d) [\sinh(2k_i d) + 2k_i d]} \frac{\cos \beta_i}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta_i \tanh^2(k_i d)}}. \quad [28]$$

Il contributo alla sommatoria delle componenti  $a_i'$ , tali che  $\omega < \omega_i < \omega + \delta\omega$  e  $\beta < \beta_i < \beta + \delta\beta$ , risulta

$$\begin{aligned} & \frac{\sinh(2kd)}{\tanh(kd) [\sinh(2kd) + 2kd]} \frac{\cos \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \tanh^2(kd)}} \sum_{i=1} \frac{1}{2} a_i^2 = \\ & = \frac{\sinh(2kd)}{\tanh(kd) [\sinh(2kd) + 2kd]} \frac{\cos \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \tanh^2(kd)}} S(\omega, \beta) \delta\omega \delta\beta, \end{aligned} \quad [29]$$

da cui integrando si ricava

$$\langle \eta^2(x, y, t) \rangle = \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi S(\omega, \beta) \frac{\sinh(2kd)}{\tanh(kd) [\sinh(2kd) + 2kd]} \frac{\cos \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \tanh^2(kd)}} d\beta d\omega. \quad [30]$$

Il rapporto fra l'altezza significativa su profondità finita  $d$  e l'altezza significativa di largo risulta:

$$\frac{H_s}{H_{s,0}} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi S(\omega, \beta) \frac{\sinh(2kd)}{\tanh(kd)[\sinh(2kd) + 2kd]} \frac{\cos \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \tanh^2(kd)}} d\beta d\omega}{\int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi S(\omega, \beta) d\beta d\omega}}; \quad [31]$$

dove  $S(\omega, \beta)$  è lo spettro direzionale su alti fondali.

Rappresentando l'eq. (31) in un diagramma avente in ascissa  $d/L_{p0}$  si ricava la caratteristica curva di shoaling-rifrazione per onde di mare, per l'assegnata direzione dominante di largo  $\bar{\beta}$ . La Figura 4 riporta la predetta curva per spettro JONSWAP-Mitsuyasu (eq. 5), nell'ipotesi di direzione dominante  $\bar{\beta}$  pari a  $20^\circ$ .

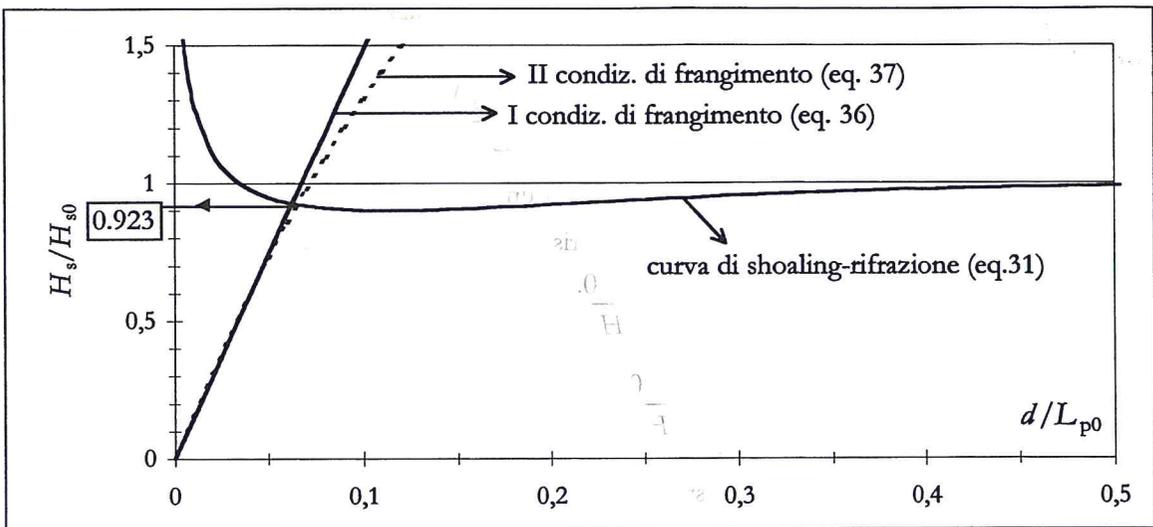


Figura 4 - Altezza significativa d'onda  $H_{sb}$  al frangimento per onde di mare con direzione dominante al largo  $\bar{\beta} = 20^\circ$ .

### La condizione di frangimento

Utilizzando l'eq.(31) è possibile calcolare in che modo varia l'altezza significativa spostandoci da largo verso riva. Come noto l'altezza significativa tende a diminuire al diminuire della profondità, finché interviene il frangimento. Il problema consiste nello scegliere la condizione di frangimento per onde irregolari, ovvero per onde che per definizione sono diverse le une dalle altre. Va cioè determinata un'altezza d'onda caratteristica che sia rappresentativa del frangimento in uno stato di mare.

Il criterio scelto è semplicemente mutuato dalla condizione di frangimento delle onde periodiche (v. in particolare Battjes, 1974a,b e Mei, 1989). Si ricordi che, per onde periodiche aventi, su profondità  $d$ , altezza  $H$  e lunghezza  $L$ , le due condizioni di frangimento sono:

- per eccesso di altezza rispetto alla profondità: l'onda frange se  $H/d$  risulta compreso tra 0.7 e 1.2 (in accordo con lo Shore Protection Manual (1984) si assume  $H/d = 0.8$ );
- per eccesso di ripidità; l'onda frange se  $H/L = 0.14 \tanh(2\pi d/L)$  (Miche, 1951).

Quindi si assume che l'onda non frange finché la sua altezza  $H$  è tale che:

$$H < 0.8d \quad \text{e} \quad H < 0.14L \tanh(2\pi d/L). \quad [32]$$

Considerando onde irregolari, l'obiettivo è calcolare l'altezza significativa al frangimento  $H_{sb}$ . Sarà utilizzata la condizione di frangimento con la  $H_{20}$ , definita come l'altezza media della ventesima parte di onde più alte in uno stato di mare. Per spettro infinitamente stretto risulta  $H_{20} = 1.4H_s$ . Si ha:

- dalla prima condizione di frangimento, per eccesso di altezza rispetto alla profondità:

$$H_{sb} = H_s \quad \text{per } d \text{ tale che } \frac{H_{20}}{d} = \frac{1.4H_s}{d} = 0.8; \quad [33]$$

- dalla seconda condizione di frangimento, per eccesso di ripidità

$$H_{sb} = H_s \quad \text{per } d \text{ tale che } \frac{H_{20}}{L_p} = \frac{1.4H_s}{L_p} = 0.14 \tanh\left(\frac{2\pi d}{L_p}\right); \quad [34]$$

dove la lunghezza dominante  $L_p$ , su profondità  $d$ , si ricava dalla relazione di dispersione lineare (eq. 3):

$$\frac{d}{L_{p0}} = \frac{d}{L_p} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L_p}\right). \quad [35]$$

Le equazioni (33) e (34) possono essere riportate in un diagramma avente in ascissa  $d/L_{p0}$  e in ordinata  $H_s/H_{s0}$ . A tal fine esse possono essere riscritte rispettivamente nella forma:

$$\frac{H_s}{H_{s0}} = \frac{0.57}{H_{s0}/L_{p0}} \frac{d}{L_{p0}}; \quad [36]$$

$$\frac{H_s}{H_{s0}} = \frac{0.10}{H_{s0}/L_{p0}} \tanh^2\left(\frac{2\pi d}{L_p}\right); \quad [37]$$

dove la ripidità al largo  $H_{s0}/L_{p0}$ , per spettro JONSWAP, è data dall'eq.(12).

Nella Figura 4 insieme alla curva di shoaling-rifrazione per  $\theta_0 = 20^\circ$  sono riportate le due condizioni di frangimento (equazioni 36 e 37). Si ha frangimento per la seconda condizione (eq.37).

In generale non si ha frangimento finché:

$$\frac{H_s}{H_{s0}} < \frac{0.57}{H_{s0}/L_{p0}} \frac{d}{L_{p0}}; \quad \text{e} \quad \frac{H_s}{H_{s0}} < \frac{0.10}{H_{s0}/L_{p0}} \tanh^2\left(\frac{2\pi d}{L_p}\right). \quad [38]$$

Si osservi che questo criterio ha un'incertezza nella scelta dell'altezza 'critica' nella condizione di frangimento (più avanti sarà posta particolare attenzione alle conseguenze di tale incertezza sui risultati). Del resto a tutt'oggi il problema del frangimento di onde irregolari non ha trovato una soluzione completa (v. ad es. Massel, 1998): le proposte avanzate da diversi autori non hanno ancora trovato una piena validazione sperimentale.

**Il periodo di ritorno di una mareggiata in cui l'altezza significativa  $H_{s0}$  supera la soglia assegnata  $b$  e la direzione è compresa nell'intervallo  $(\theta_1, \theta_2)$**

Il concetto di mareggiata triangolare equivalente (vedi Introduzione) consente di schematizzare ogni mareggiata con un triangolo. In particolare, in un triangolo avente altezza  $a$  e base  $b$  risulta:

$$\text{tempo durante cui } b < H_{s,0} < b + db = \begin{cases} b db/a & \text{se } a > b; \\ 0 & \text{se } a \leq b. \end{cases} \quad [39]$$

Il numero di triangoli, durante un intervallo molto grande  $T$ , aventi altezza compresa nell'intervallo  $(a, a + da)$ , base compresa nell'intervallo  $(b, b + db)$  e direzione compresa nel settore di ampiezza  $\Delta\theta$  (si intendono le direzioni comprese tra  $\theta_1$  e  $\theta_2$ ), risulta:

$$p_A(a; \Delta\theta) p_B(b | a; \Delta\theta) da db N(T), \quad [40]$$

avendo definito:  $p_A(a; \Delta\theta)$  densità di probabilità delle altezze dei triangoli con direzione compresa nel settore  $\Delta\theta$ ;  $p_B(b | a; \Delta\theta)$  densità di probabilità delle basi dei triangoli con altezza  $a$  e con direzione compresa nel settore  $\Delta\theta$ ;  $N(T)$  numero di mareggiate presenti nell'intervallo  $T$ .

Il tempo durante  $T$  in cui l'altezza significativa è compresa nell'intervallo  $(b, b + db)$ , nei triangoli di direzione compresa nel settore  $\Delta\theta$ , risulta:

$$\delta t = db \int_b^\infty \int_0^\infty \frac{b}{a} p_A(a; \Delta\theta) N(T) p_B(b | a; \Delta\theta) db da. \quad [41]$$

Il tempo  $\delta t$  può anche essere espresso nella forma:

$$\delta t = p(H_{s,0} = b; \Delta\theta) db T, \quad [42]$$

da cui segue l'uguaglianza

$$p(H_{s,0} = b; \Delta\theta) T = \int_b^\infty \frac{\bar{b}(a; \Delta\theta)}{a} p_A(a; \Delta\theta) N(T) da, \quad [43]$$

avendo definito

$$\bar{b}(a; \Delta\theta) = \int_0^\infty p_B(b | a; \Delta\theta) b db, \quad [44]$$

il valor medio delle basi dei triangoli di altezza  $a$  e direzione compresa in  $\Delta\theta$ .

Derivando l'eq. (43) si ottiene l'espressione della densità di probabilità dei triangoli aventi altezza  $a$  e direzione contenuta nel settore  $\Delta\theta$ :

$$p_A(a; \Delta\theta) = - \frac{T}{N(T)} \frac{a}{\bar{b}(a; \Delta\theta)} \frac{d\bar{b}(a; \Delta\theta)}{da}. \quad [45]$$

Il periodo di ritorno di un triangolo avente altezza maggiore della soglia assegnata  $b$  e direzione compresa nell'intervallo  $\Delta\theta$ , risulta dal rapporto tra il tempo  $T$  e il numero di triangoli con altezza maggiore di  $b$  e direzione compresa in  $\Delta\theta$  durante  $T$ ,

$$R(H_{s,0} > b; \Delta\theta) = \frac{T}{N(T) \int_b^\infty p_A(a; \Delta\theta) da} \quad [46]$$

e sostituendo a  $p_A(a; \Delta\theta)$  l'espressione (45) si ricava:

$$R(H_{s0} > b; \Delta\theta) = \frac{1}{-\int_b^\infty \frac{a}{\bar{b}(a; \Delta\theta)} \frac{d\bar{p}(H_{s0} = a; \Delta\theta)}{da}} da \quad [47]$$

Assumendo  $\bar{b}(a; \Delta\theta) = \bar{b}(b; \Delta\theta)$  [in quanto  $\bar{b}(a; \Delta\theta)$  è una funzione variabile molto gradualmente] e risolvendo l'integrale, si ricava l'espressione generale del periodo di ritorno di una mareggiata in cui l'altezza significativa supera la soglia assegnata  $b$  e la direzione di propagazione è compresa nell'intervallo  $(\theta_1, \theta_2)$ :

$$R(H_{s0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2) = \frac{\bar{b}(b; \theta_1 < \theta < \theta_2)}{-b \frac{dP(H_{s0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2)}{db} + P(H_{s0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2)}, \quad [48]$$

dove  $\bar{b}(b; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  è il valor medio delle basi dei triangoli di altezza pari ad  $b$  e di direzione compresa nell'intervallo  $(\theta_1, \theta_2)$ .

Questa espressione generale può essere particolarizzata sostituendo alla  $P(H_{s0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  l'espressione (15):

$$R(H_{s0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2) = \frac{\bar{b}(b; \theta_1 < \theta < \theta_2)}{\exp\left[-\left(\frac{b}{w_\alpha}\right)^\mu\right] \left[1 + \mu \left(\frac{b}{w_\alpha}\right)^\mu\right] - \exp\left[-\left(\frac{b}{w_\beta}\right)^\mu\right] \left[1 + \mu \left(\frac{b}{w_\beta}\right)^\mu\right]}. \quad [49]$$

**Nota** Per ricavare il periodo di ritorno  $R(H_{s0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  si è fatto riferimento a mareggiate aventi direzione compresa in un intervallo assegnato. L'aver associato ad ogni mareggiata una direzione è condizione sufficiente ma non necessaria per la dimostrazione. Condizione necessaria e sufficiente affinché sia valida l'espressione generale di  $R(H_{s0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  (eq. 48) è che la mareggiata, al culmine della sua fase di sviluppo, abbia una direzione costante. In altri termini, occorre che nella fase in cui l'altezza significativa risulta maggiore della soglia  $b$ , gli stati di mare abbiano delle direzioni dominanti comprese nell'intervallo fissato. Questa condizione è ovviamente tanto più attendibile quanto più grande risulta la soglia  $b$ .

**Il periodo di ritorno di una mareggiata in cui il run-up supera una soglia assegnata X**

Si consideri un tratto di spiaggia sensibilmente rettilineo. Si assuma un sistema di riferimento con l'asse  $y$  coincidente con la normale  $n$  alla linea di battigia e sia  $\theta_n$  l'angolo che la normale  $n$  forma con il NORD. Si scelgano dei settori  $(\theta_1, \theta_2)$  e si associ ad ogni settore di traversia la direzione dominante di largo  $\bar{\beta}$  (Fig. 5):

$$\bar{\beta} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - \theta_n. \quad [50]$$

A questo punto, utilizzando il procedimento descritto in precedenza, fissata l'altezza significativa al largo  $H_{s0}$  e fissata la direzione dominante di largo  $\bar{\beta}$ , si ricava per ogni settore l'altezza significativa dell'onda al frangimento  $H_{sb}$ .

L'eq.(10) di Van der Meer, per il settore  $i$  generico, diventa:

$$R_U = C_i H_{s0}, \quad [51]$$

dove  $C_i$  si ricava esplicitando il secondo membro dell'eq.(10) (si ricordi che  $C_i$  caratterizza il

settore  $i$ -esimo).

Inoltre, per ogni settore  $(\theta_1, \theta_2)$ , si può calcolare il periodo di ritorno  $R(H_{s,0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  di una mareggiata in cui l'altezza significativa supera la soglia assegnata  $b$  e la direzione risulta compresa nell'intervallo  $(\theta_1, \theta_2)$ .

Riepilogando, si può calcolare:

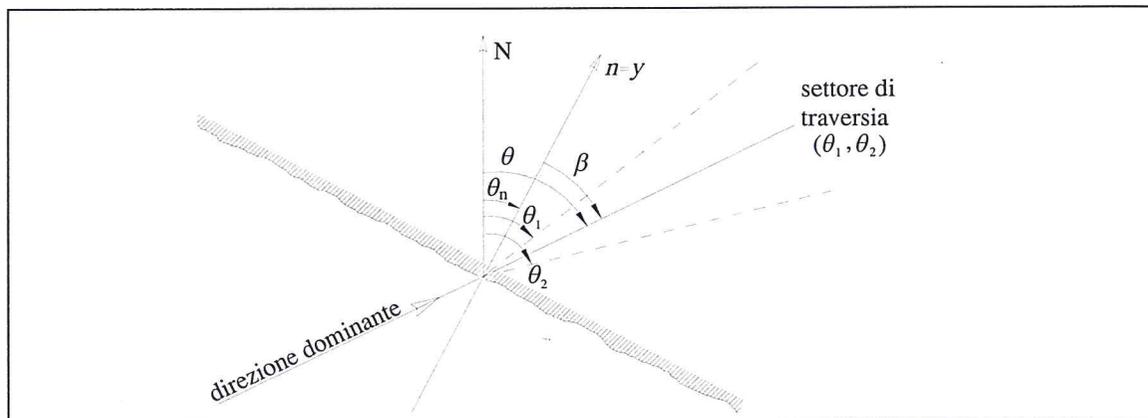


Figura 5 - Convenzione adottata. Indichiamo con  $\theta$  l'angolo che la generica direzione di propagazione forma con il NORD; indichiamo con  $\beta$  l'angolo che la generica direzione di propagazione forma con l'asse  $y$ . Si associa al generico settore  $(\theta_1, \theta_2)$  la direzione dominante di largo  $\bar{\beta}$ .

(i) il run-up, data l'altezza significativa di largo e la direzione dominante di propagazione al largo;  
 (ii) il periodo di ritorno della predetta altezza significativa e direzione di propagazione al largo.  
 Il calcolo che dobbiamo effettuare sarà di tipo inverso: fissata una soglia di run-up, si ricava il valore della  $H_{s,0}$  (altezza significativa di largo) capace di produrre tale run-up. La  $H_{s,0}$  chiaramente varia da un settore direzionale all'altro. Troveremo che per avere un run-up più alto di una soglia  $X$  fissata occorre uno stato di mare con  $H_{s,0}$  maggiore di  $b_1$  dal primo settore direzionale, con  $H_{s,0}$  maggiore di  $b_2$  dal secondo settore direzionale e così via.

A questo punto, il periodo di ritorno di un run-up maggiore dell'assegnata soglia  $X$  si ottiene ragionando nel seguente modo.

Consideriamo un tempo  $T$  molto grande. Il numero di mareggiate durante  $T$  in cui l'altezza significativa al largo supera la soglia  $b_i$  con direzione contenuta entro l' $i$ -esimo settore risulta:

$$\frac{T}{R(H_{s,0} > b_i; i\text{-esimo settore})}; \quad [52]$$

si osservi che questo è anche il numero di mareggiate durante  $T$  in cui il run-up supera la soglia assegnata  $X (= C_i b_i)$ , con direzione compresa entro l' $i$ -esimo settore.

Di conseguenza il numero di mareggiate durante  $T$  in cui il run-up supera la soglia  $X$  risulta:

$$\sum_{i=1}^N \frac{T}{R(H_{s,0} > b_i; i\text{-esimo settore})}, \quad [53]$$

dove  $N$  è il numero di settori direzionali e  $b_i = X / C_i$ . Ed allora il periodo di ritorno di una mareggiata capace di produrre un run-up maggiore dell'assegnata soglia  $X$  risulta:

$$R(R_U > X) = \frac{T}{\frac{T}{R(H_{s,0} > b_1; \text{settore 1})} + \frac{T}{R(H_{s,0} > b_2; \text{settore 2})} + K + \frac{T}{R(H_{s,0} > b_N; \text{settore N})}} \cdot [54]$$

Ed in generale:

$$R(R_U > X) = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{1}{R(H_{s,0} > b_i; i - \text{esimo settore})} \right]^{-1}, [55]$$

dove  $b_i = X / C_i$  e  $N$  è il numero di settori considerati.

**Il run-up  $X(R)$  di un assegnato periodo di ritorno e la persistenza  $\bar{D}(X)$**

Il run-up  $X(R)$  di un assegnato periodo di ritorno può essere ricavato per via indiretta dall'eq. (55). Si costruisce un diagramma che riporta in ascisse il run-up e in ordinate il periodo di ritorno  $R(R_U > X)$ . A quel punto, assegnato il periodo di ritorno  $R$  occorre leggere in ascissa la soglia di run-up  $X(R)$  corrispondente. Più avanti è riportato un esempio di calcolo.

Si può poi calcolare la persistenza  $\bar{D}(X)$ , durata di tempo media in cui il run-up si mantiene al disopra della soglia  $X$ . Fissato un intervallo temporale  $T$  molto grande, la porzione  $\Delta t$  di tale intervallo, in cui il run-up  $R_U$  si mantiene al disopra della soglia assegnata  $X$  risulta:

$$\Delta t = T \sum_{i=1}^N P(H_{s,0} > b_i; i - \text{esimo settore}), [56]$$

dove  $N$  è il numero di settori e dove  $b_i = X / C_i$ .

Inoltre il numero di mareggiate durante  $T$  in cui il run-up  $R_U$  supera la soglia  $X$  è

$$N = T \sum_{i=1}^N \frac{1}{R(H_{s,0} > b_i; i - \text{esimo settore})}. [57]$$

La persistenza  $\bar{D}(X)$  si ricava dal rapporto fra  $\Delta t$  e  $N$  :

$$\bar{D}(X) = \frac{\sum_{i=1}^N P(H_{s,0} > b_i; i - \text{esimo settore})}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{R(H_{s,0} > b_i; i - \text{esimo settore})}}; [58]$$

dove  $\bar{D}(X)$  è la durata di tempo media in cui il run-up si mantiene al di sopra della soglia  $X$ , nelle mareggiate in cui tale soglia viene superata.

**Esempio di calcolo**

Si calcoli il periodo di ritorno  $R(R_U > X)$  di una mareggiata in cui il run-up  $R_U$  supera la soglia  $X$  sul tratto di spiaggia evidenziato nella fig. 6 ('tratto 1'), in prossimità di Capo Colonne. A Capo Colonne (sulla costa ionica della Calabria, a SUD di Crotona) è collocata una boa ondometrica direzionale. L'ampiezza dei settori è fissata in  $20^\circ$  ed essi saranno orientati come indicato nella

stessa figura, con un settore centrato sulla normale  $n$  alla battigia. La normale alla battigia forma con il NORD l'angolo  $\theta_n = 208^\circ$ .

Si schematizza il fondale sensibilmente piano con pendenza  $\tan \lambda = 1.5\%$ .

Per ogni settore di traversia  $(\theta_1, \theta_2)$  sarà necessario:

-a) calcolare il periodo di ritorno  $R(H_{s0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  di una mareggiata in cui l'altezza significativa al largo  $H_{s0}$  supera la soglia assegnata  $b$  con direzione compresa nell'intervallo  $(\theta_1, \theta_2)$  (eq. 49);

-b) determinare l'altezza significativa al frangimento  $H_{sb}$ , ovvero il rapporto  $H_{sb} / H_{s0}$ , seguendo il procedimento mostrato in precedenza; a tal fine si consideri la condizione di frangimento con la  $H_{20}$  (equazioni 36 e 37);

a questo punto il periodo di ritorno  $R(R_U > X)$  di una mareggiata in cui il run-up supera la soglia  $X$  sul tratto di spiaggia in esame si ricava con il procedimento descritto nel paragrafo precedente.

Segue il run-up  $X(R)$  di un assegnato periodo di ritorno e infine la sua persistenza  $\bar{D}(X)$ .

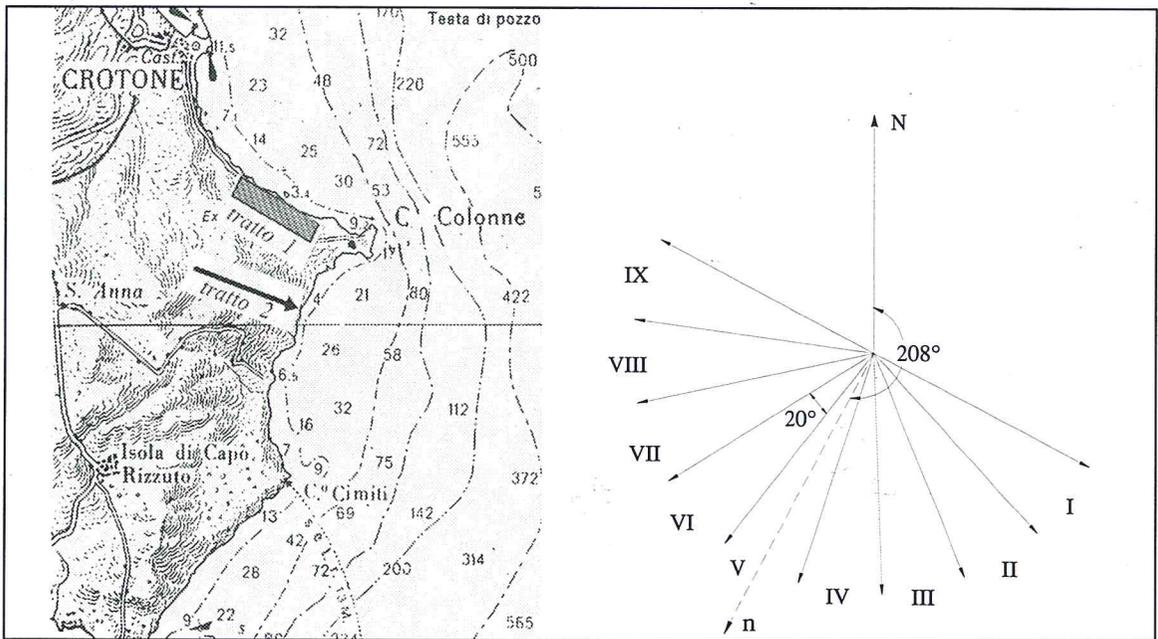


Figura 6 - Capo Colonne. Scelta dei settori di traversia per il calcolo del periodo di ritorno di una mareggiata in cui il run-up, sul tratto di spiaggia evidenziato (tratto  $n$ ), supera la soglia  $X$ . L'ampiezza dei settori è di  $20^\circ$ .

-a) Calcolo  $R(H_{s0} > b; \text{settore } i\text{-esimo})$

Il primo passo è il calcolo della  $P(H_{s0} > b; \theta_1 < \theta < \theta_2)$ , frazione di tempo durante cui l'altezza significativa risulta maggiore di  $b$ , con direzioni dominanti comprese nel settore  $i$ -esimo, definito dall'intervallo  $(\theta_1, \theta_2)$ . Per il calcolo, che andrà ovviamente ripetuto per i 9 settori di traversia, si utilizzeranno i dati della boa ondometrica direzionale di Crotona. I dati disponibili arrivavano al dicembre 1995.

Si consideri, ad esempio, il settore VI, con direzioni dominanti comprese fra  $218^\circ$  e  $238^\circ$ . Calcolando dai dati la  $P(H_{s0} > b; 218^\circ < \theta < 238^\circ)$  per diversi livelli di soglia  $b$  si ricavano i punti riportati nella Figura 7. Nella stessa figura è riportata la curva che interpola i dati, ricavata utilizzando l'espressione (15). Risultando a Crotona  $\mu = 0.958$  (Tab. 1), si ricava  $w_\alpha = 0.389$  m e

$w_\beta = 0.373\text{ m}$ . Ripetendo il procedimento per tutti i settori si ottengono i coefficienti  $w_\alpha$  e  $w_\beta$  riportati nella Tabella 2.

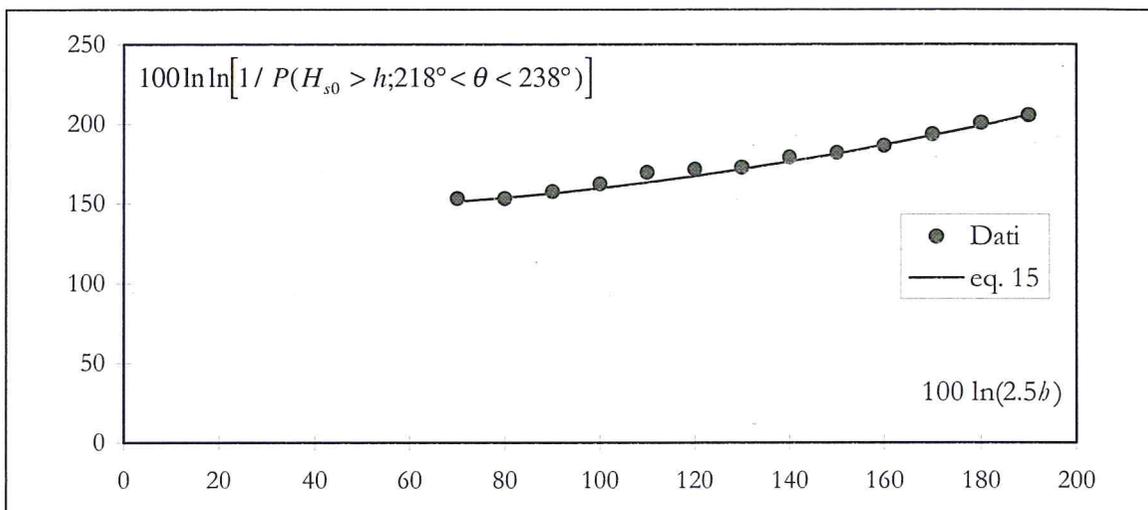


Figura 7 - La probabilità  $P(H_{s0} > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  per il settore direzionale  $(218^\circ; 238^\circ)$ .

Tabella 2 - Parametri  $w_\alpha$  e  $w_\beta$  della probabilità di superamento direzionale  $P(H_{s0} > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$  per diversi settori di traversia (cfr. Fig. 6) a Crotone

	SETTORE DI TRAVERSIA	$w_\alpha$ [m]	$w_\beta$ [m]
I	$(118^\circ < \theta \leq 138^\circ)$		
II	$(138^\circ < \theta \leq 158^\circ)$		
III	$(158^\circ < \theta \leq 178^\circ)$	0.372	0.338
IV	$(178^\circ < \theta \leq 198^\circ)$	0.461	0.316
V	$(198^\circ < \theta \leq 218^\circ)$	0.319	0.279
VI	$(218^\circ < \theta \leq 238^\circ)$	0.389	0.373
VII	$(238^\circ < \theta \leq 258^\circ)$	0.378	0.367
VIII	$(258^\circ < \theta \leq 278^\circ)$	0.517	0.505
IX	$(278^\circ < \theta \leq 298^\circ)$	0.612	0.593

Utilizzando in prima approssimazione la regressione basi-altezze (eq. 22, con  $a_{10} = 3.2\text{ m}$  e  $b_{10} = 74\text{ ore}$ ), si ricava l'espressione del periodo di ritorno di una mareggiata in cui l'altezza significativa al largo supera la soglia  $b$ , con direzione appartenente al settore  $i$ -esimo (settore caratterizzato dai parametri  $w_{\alpha_i}$  e  $w_{\beta_i}$ ) a Crotone:

$$R(H_{s0} > b; \text{settore } i) = \frac{b_{10}(1.11 - 0.11b/a_{10})}{\exp\left[-\left(\frac{b}{w_{\alpha_i}}\right)^{0.958}\right] \left[1 + 0.958\left(\frac{b}{w_{\alpha_i}}\right)^{0.958}\right] - \exp\left[-\left(\frac{b}{w_{\beta_i}}\right)^{0.958}\right] \left[1 + 0.958\left(\frac{b}{w_{\beta_i}}\right)^{0.958}\right]}$$

-b) Calcolo di  $H_{sb} / H_{s0}$

Nella fig. 6 sono riportati i settori di traversia scelti. Per lo studio del fenomeno di shoaling-

rifrazione è necessario conoscere l'inclinazione di ogni settore  $(\theta_1, \theta_2)$  rispetto alla normale alla battigia. Associamo al settore  $(\theta_1, \theta_2)$  l'angolo  $\bar{\beta} = (\theta_1 + \theta_2) / 2 - \theta_n$  e calcoliamo l'altezza significativa al frangimento. Allo scopo si può utilizzare il procedimento descritto in precedenza.

Ad esempio per il settore VI, caratterizzato da direzioni dominanti comprese fra  $218^\circ$  e  $238^\circ$ , risulta  $\bar{\beta} = 20^\circ$ . L'altezza significativa al frangimento risulta  $(H_{sb} / H_{s0})_{\bar{\beta}=20^\circ} = 0.923$  (Fig. 4).

Ripetendo il procedimento per gli altri settori si ricavano i dati riportati nella tabella 3.

Ponendo il parametro di Phillips pari a 0.012 ( $\alpha = 0.012$ ), la ripidità al largo risulta (eq. 12)  $H_{s0} / L_{p0} = 0.039$ . Per ogni settore si può allora ricavare il numero di Irribarren (eq. 11). Poiché

$I < 2$  per tutti i settori (v. Tab. 3), si utilizza l'eq. 10.a di Van der Meer. Si perviene per il generico settore  $i$ -esimo ad una espressione del tipo  $R_U = C_i H_{s0}$  (eq. 51), dove, assumendo prudenzialmente  $\gamma = 1$ , risulta

$$C_i = 1.5(H_{sb} / H_{s0})_{\text{settore } i} I_{\text{settore } i} \quad [59]$$

I coefficienti  $C_i$ , per i diversi settori, sono riportati nella tabella 3.

Tabella 3 - Il rapporto  $H_{sb} / H_{s0}$ , il numero di Irribarren  $I$  e il coefficiente  $C_i = R_U / H_{s0}$  per diversi settori a Crotona.

SETTORE DI TRAVERSIA	DIREZIONE DOMINANTE $ \bar{\beta} $	$H_{sb} / H_{s0}$	$I$	$C_i$
V	0	0.941	0.079	0.111
IV - VI	$20^\circ$	0.923	0.080	0.110
III - VII	$40^\circ$	0.861	0.082	0.106
II - VIII	$60^\circ$	0.750	0.088	0.099
I - IX	$80^\circ$	0.632	0.096	0.091

In definitiva, fissato il tratto di spiaggia della Figura 6, possiamo ricavare:

- i) il periodo di ritorno  $R(R_U > X)$  di una mareggiata in cui il run-up supera la soglia assegnata  $X$  (eq. 55), riportato nella fig. 8a;
- ii) il run-up corrispondente ad un assegnato periodo di ritorno  $R$  (dalla stessa Fig. 8a);
- iii) la persistenza  $\bar{D}(X)$  (eq. 58), riportata nella Figura 8b.

Ad esempio, mediamente ogni 100 anni si realizza una mareggiata in cui il run-up supera la soglia di 0.73 m, e la durata di tempo media in cui il run-up si mantiene al disopra della soglia di 0.73 m è di 5.1 ore.

### **L'incidenza della pendenza del fondale e dell'orientamento della costa**

Nel calcolo del periodo di ritorno di una mareggiata in cui il run-up supera una soglia assegnata  $X$  assumono un ruolo fondamentale:

- i) la pendenza del fondale (a parità di altezza significativa di largo il run-up aumenta se aumenta la pendenza del fondale);
- ii) l'orientamento del tratto di spiaggia in esame.

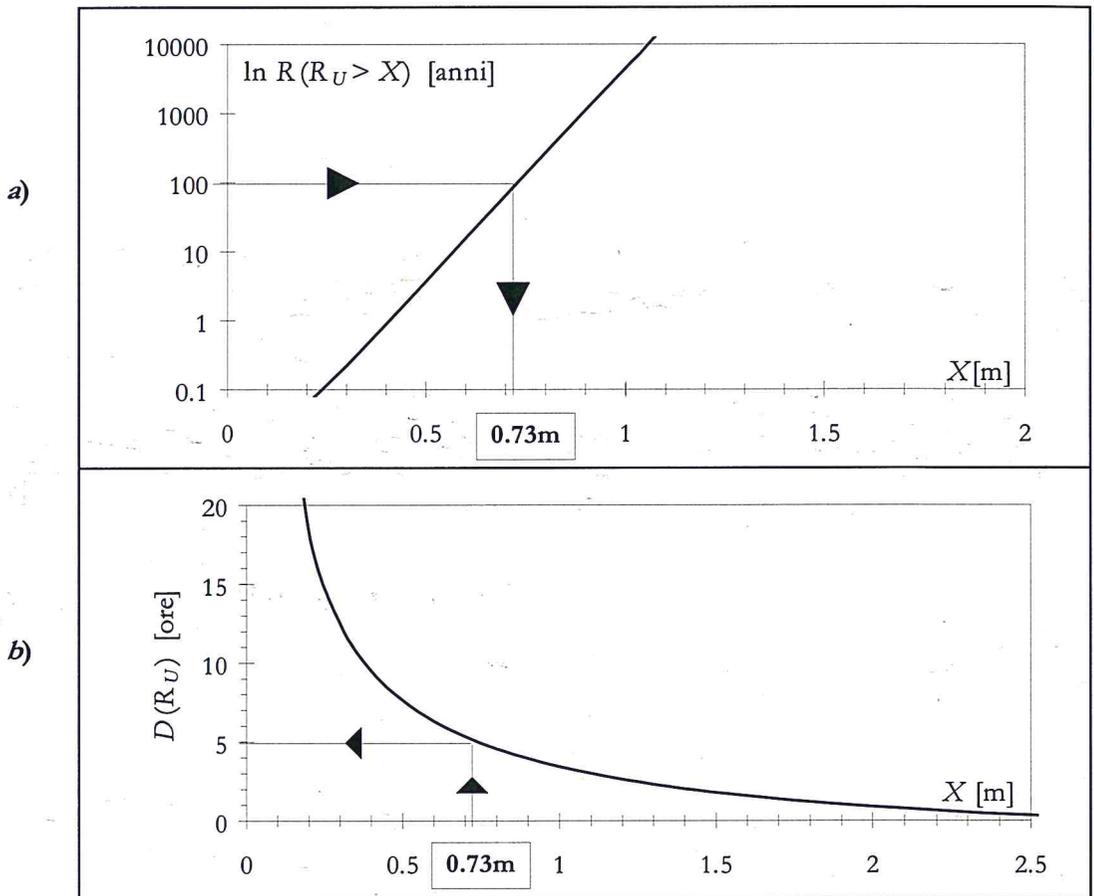


Figura 8 - Tratto di spiaggia in prossimità di Capo Colonne (v. Fig. 6): (a) periodo di ritorno di una mareggiata in cui il run-up  $R_U$  supera la soglia assegnata  $X$ ; (b) persistenza  $\bar{D}(X)$ : durata di tempo media in cui il run-up si mantiene al disopra della soglia  $X$ .

In altri termini, considerando due tratti di spiaggia limitrofi (e quindi analizzando i dati della stessa boa ondometrica) si potranno ottenere risultati del tutto diversi. Ad esempio in precedenza si è fatto riferimento ad un tratto di spiaggia in prossimità di Capo Colonne, che indicheremo adesso come *tratto 1*; si è ricavato che mediamente ogni 100 anni si realizza una mareggiata in cui il run-up supera la soglia di 0.73 m. Se ripetiamo il procedimento per il tratto di spiaggia a SUD di Capo Colonne, che indicheremo con *tratto 2* (indicato dalla freccia nella Fig. 6), risulta che mediamente ogni 100 anni si realizza una mareggiata in cui il run-up supera la soglia di 2.39 m. Cioè, fissato un intervallo di 100 anni, il run-up sul *tratto 2* risulta mediamente 3.3 volte più grande del run-up nel *tratto 1*! I motivi di questa differenza così grande sono due: la pendenza del fondale (che nel *tratto 2* è più grande che nel *tratto 1*) e l'orientamento della spiaggia. A Crotona l'azimuth della direzione di propagazione del mare più forte è di circa  $290^\circ$  (v. Tab. 3). Il *tratto 1* è quindi naturalmente protetto dai mari più forti. Il *tratto 2* risulta invece investito quasi ortogonalmente dai mari più forti, con effetti di rifrazione molto contenuti.

**L'incertezza sulla condizione di frangimento**

La condizione di frangimento utilizzata nella memoria (equazioni 36 e 37) presenta un'incertezza nella scelta dell'altezza d'onda caratteristica. Nella memoria si è assunta l'altezza  $H_{20}$ . Peraltro, allo scopo di saggiare il peso di tale ipotesi, si è ripetuto il calcolo del periodo di ritorno  $R(R_U > X)$

assumendo come altezza d'onda sia la  $H$ , sia la  $H_{100}$ . Quest'ultima è definita come l'altezza media della centesima parte di onde più alte dello stato di mare. Le differenze in termini di run-up  $X(R)$  (soglia di run-up corrispondente ad un periodo di ritorno fissato  $R$ ) ed in termini di persistenza  $\overline{D}(X)$  sono contenute entro il 2%. L'incertezza sulla condizione di frangimento ha pertanto ripercussioni minime sui risultati.

### Bibliografia

- Battjes J. A. (1970) - *Long term wave height distribution at seven stations around the British isles*. Report A 44 National Oceanographic Institute, Wormley U. K.
- Battjes J. A. (1974a) - *Computation of set-up long shore currents, run-up and overtopping due to wind generated waves*. Communications on Hydraulics, Dept. of Civil Engineering, Delft University of Technology, Report 74-2.
- Battjes J. A. (1974b) - *Surf similarity*. Proc. 14<sup>th</sup> Conf. Coastal Eng. ASCE 466-480
- Boccotti P. (1984) - *Sea waves and quasi-determinism of rare events in random processes*. Atti Acc. Naz. Lincei, Rendiconti, 76, 2.
- Boccotti P. (1986a) - *Previsione delle onde per i mari italiani*. Atti XX Conv. di Idraulica, Libreria Progetto Padova, 79-91.
- Boccotti P. (1986b) - *On coastal and offshore structure risk analysis*. Excerpta of the Italian Contribution to the Field of Hydraulic Engng., 1, 19-36.
- Boccotti P. (1988) - *Refraction reflection and diffraction of irregular gravity waves*. Excerpta of the Italian Contribution to the Field of Hydraulic Res., 3, 47-88.
- Boccotti P. (1997) - *Idraulica marittima*. UTET.
- Borgman L. E. (1969) - *Ocean wave simulation for engineering design*. J. Waterways and Harbors Div., ASCE, 557-583.
- Borgman L. E. (1970) - *Maximum wave height probabilities for random number of random intensity storms*. Proc. 12<sup>th</sup> Conf. Coastal Engng.
- Borgman L. E. (1973) - *Probabilities for the highest wave in a hurricane*. J. Port Coastal and Ocean Engng.
- Hasselmann K., Barnett T. P., Bouws E. e al. (1973) - *Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Deut. Hydrogr. Zeit., A8, 1-95.
- Longuet-Higgins M. S. (1963) - *The effects of non-linearities on statistical distributions in the theory of sea waves*. J. Fluid Mech., 17, 459-480.
- Massel S. R. (1998) - *The limiting wave heights in wind-induced wave trains*. Ocean Engng., 25, 735-752.
- Mei C. C. (1989) - *The applied dynamics of ocean surface waves*. World scientific.
- Miche R. (1951) - *Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritime exposés à l'action de la houle*. Ann. Ponts Chaussées, 121 : 285-319
- Mitsuyasu H., Tasai F., Suhara T. e al. (1975) - *Observation of directional spectrum of ocean waves using a clover-leaf buoy*. J. Phys. Oceanogr., 5, 750-760.
- Phillips O. M. (1967) - *The theory of wind-generated waves*. Advances in Hydroscience, 4, 119-149.
- U. S. Army Corps of Engineers (1984) - *Shore Protection Manual*. I.
- Van der Meer J. W. (1992) - *Conceptual design of rubble-mound breakwaters*. Proc. Short Course attached to the 23<sup>rd</sup> Int. Conf. Coastal Engng., 447-510.