

Per caratterizzare lo stato del mare in un paraggio nel lungo periodo (ordine di grandezza dell'anno) si determinano le caratteristiche di un'onda significativa estrema, definita come la massima altezza d'onda prevista con un prefissato periodo di ritorno, chiamata, 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 di tale distribuzione* ai dati di altezza d'onda;
- *estrapolazione dei dati* attraverso la funzione di distribuzione scelta per individuare l'altezza d'onda significativa estrema in un prefissato *periodo di ritorno*.

Dati da utilizzare per la previsione a lungo termine:

I dati sulla base dei quali effettuare la previsione del moto ondoso a lungo termine si possono dividere in tre categorie:

- dati strumentali* rilevati in sito o telerilevati a distanza;
- dati ottenuti dalla previsione a breve termine*;
- dati rilevati a vista*.

I *dati strumentali* rilevati in sito da ondometri o telerilevati da radar montati su satelliti sono i più affidabili. Tuttavia il loro utilizzo è ristretto dalla limitata disponibilità (pochi anni consecutivi di osservazione) e dall'elevato costo di acquisizione.

I *dati ottenuti dalla previsione a breve termine* vengono usati in assenza di rilievi diretti. Numerosi modelli per la previsione del moto ondoso a partire dal campo di vento sono stati utilizzati per generare lunghi archivi di dati, eventualmente tarati con dati strumentali.

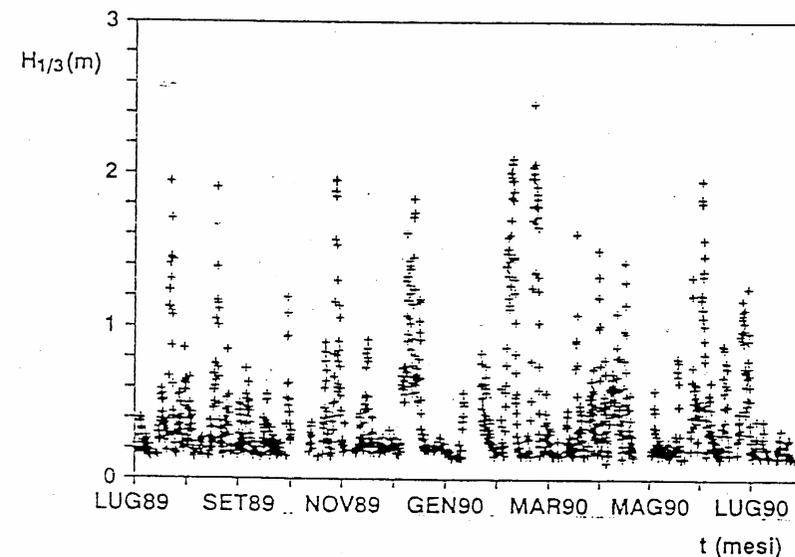
I *dati rilevati a vista*, riportati dalle navi durante il loro normale servizio, sono meno affidabili dei dati ottenuti dalla previsione a breve termine.

Selezione dei dati

Il primo passo per individuare l'*altezza d'onda di progetto* consiste nella selezione dei valori di altezza e periodo nel sito di interesse. Nel caso di dati rilevati, la lunghezza del campione può essere di qualche anno, nel caso di dati ottenuti dalla previsione a breve termine la lunghezza può essere molto maggiore (dai 20 ai 50 anni).

La selezione dei valori di altezza d'onda può essere effettuata in vari modi, ad esempio si può considerare l'altezza significativa in un intervallo di registrazione, la massima altezza significativa che si verifica durante una mareggiata, oppure la massima altezza significativa annuale (se la lunghezza del campione di dati è di alcune decine di anni).

In figura viene riportata l'altezza significativa rilevata per un anno in corrispondenza del litorale di Marina di Massa. E' possibile individuare alcune mareggiate nel periodo di osservazione, pertanto in questo caso i dati da utilizzare per la previsione a lungo termine possono essere le massime altezze significative durante le singole mareggiate.



PREVISIONE DELLO STATO DI MARE A LUNGO TERMINE (4/16)

Previsione del moto ondoso

Scelta di una distribuzione nota di valori estremi

Il secondo passo consiste nella scelta di una funzione di distribuzione di valori estremi tra le diverse distribuzioni proposte (log-normale, Gumbel, Frechèt, Weibull). Tutte le distribuzioni hanno una base teorica, ma esse sono utilizzate come funzioni interpolatrici empiriche dei dati. Nel descrivere le diverse distribuzioni è utile introdurre i seguenti parametri: α è un parametro di forma che determina la forma di base della distribuzione, θ è un parametro di scala che controlla il grado di dispersione della distribuzione lungo l'ascissa, ϵ è un parametro di posizione che determina la posizione della funzione densità di probabilità lungo l'ascissa.

Distribution	Range	Cumulative Probability P(H)	Mean	Variance
Lognormal	$0 < H < \infty$ $-\infty < \theta < \infty$ $0 < \alpha < \infty$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^H \frac{1}{\alpha h} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(h) - \theta}{\alpha}\right)^2\right] dh$	$\exp\left(\theta + \frac{\alpha^2}{2}\right)$	$\exp(2\theta + \alpha^2) [\exp(\alpha^2) - 1]$
Type I	$-\infty < H < \infty$ $-\infty < \epsilon < \infty$ $0 < \theta < \infty$	$\exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{H - \epsilon}{\theta}\right)\right]\right\}$	$\epsilon + \gamma\theta$ ($\approx \epsilon + 0.58\theta$)	$\frac{\pi^2}{6} \theta^2$ ($\approx 1.64\theta^2$)
Type II	$0 < H < \infty$ $0 < \theta < \infty$ $0 < \alpha < \infty$	$\exp\left[-\left(\frac{H}{\theta}\right)^{-\alpha}\right]$	$\theta \Gamma\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)$	$\theta^2 \left[\Gamma\left(1 - \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)\right]$
Type III _L (Lower Bound)	$\epsilon < H < \infty$ $0 < \theta < \infty$ $0 < \alpha < \infty$	$1 - \exp\left[-\left(\frac{H - \epsilon}{\theta}\right)^{\alpha}\right]$	$\epsilon + \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$	$\theta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right]$
Type III _U (Upper Bound)	$-\infty < H < \epsilon$ $0 < \theta < \infty$ $0 < \alpha < \infty$	$\exp\left[-\left(\frac{\epsilon - H}{\theta}\right)^{\alpha}\right]$	$\epsilon - \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$	$\theta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right]$

Adattamento dei dati alla distribuzione scelta

Una volta scelta la funzione di distribuzione, le altezze d'onda selezionate vengono ridotte ad un set di punti da plottare su carta probabilistica. A tal fine i dati sono ordinati in senso decrescente con riferimento ad un indice m tale che $m=1$ corrisponde all'onda più alta, $m=N$ all'onda più bassa. Una semplice **stima** della probabilità di superamento $P_s(H_m)$ e della probabilità totale $P(H_m)$ è fornita rispettivamente dalle equazioni

$$P_s(H_m) = \frac{m}{N+1} \qquad P(H_m) = 1 - P_s(H_m)$$

A questo punto è possibile individuare una retta interpolatrice che costituisca il miglior adattamento dei dati alla distribuzione scelta. In genere a tale scopo viene utilizzato il metodo dei momenti, che consiste nell'eguagliare i primi due o tre momenti della distribuzione alla stima dei momenti ottenuti dal set di dati.

Scelta del periodo di ritorno

Una volta effettuato l'adattamento dei dati alla distribuzione di probabilità, quest'ultima deve essere estrapolata allo scopo di individuare l'altezza d'onda di progetto corrispondente ad un prefissato periodo di ritorno. Quest'ultimo viene definito come l'intervallo di tempo che mediamente intercorre tra due superamenti successivi dell'altezza d'onda di progetto, ed è correlato alla probabilità di quest'ultima dalla relazione:

$$\frac{T_R}{r} = \frac{1}{1 - P(H_{T_R})} = \frac{1}{P_S(H_{T_R})}$$

in cui r è il rapporto tra il periodo di osservazione e il numero di di eventi che superano la soglia fissata. Utilizzando quest'espressione il valore della probabilità cumulata associata all'altezza d'onda di progetto (e quindi in definitiva il valore di quest'ultima) viene individuato dal valore prefissato del periodo di ritorno.

Nel contesto progettuale si considera a volte anche la probabilità E che l'altezza d'onda di progetto sia superata una volta nel corso della vita L dell'opera. La relazione tra tale probabilità E ed il periodo di ritorno T_R è data da:

$$E = \left(1 - \frac{r}{T_R}\right)^{\frac{L}{R}}$$

PREVISIONE DELLO STATO DI MARE A LUNGO TERMINE (7/16)

Previsione del moto ondoso

Esempio numerico

Per chiarire la sequenza delle operazioni da effettuare, applichiamo la procedura dell'onda di progetto ad un esempio numerico che si riferisce al paraggio di Vado Ligure, in cui le altezze significative sono state ottenute con misure dirette, relative al periodo di osservazione ($\tau=1$ anno). Sono state prese in esame le $N = 10$ altezze significative che superano la soglia di 1 m, i cui valori ordinati sono riportati in tabella, insieme alla loro probabilità di superamento e probabilità totale.

m	H_m	$P_s(H_m)$	$P(H_m)$
1	2.81	0.0909	0.9091
2	2.30	0.1818	0.8182
3	2.11	0.2727	0.7273
4	1.72	0.3636	0.6364
5	1.71	0.4545	0.5455
6	1.63	0.5455	0.4545
7	1.44	0.6364	0.3636
8	1.34	0.7273	0.2727
9	1.30	0.8182	0.1818
10	1.19	0.9091	0.0909

PREVISIONE DELLO STATO DI MARE A LUNGO TERMINE (8/16)

Previsione del moto ondoso

La media e la varianza stimate del campione di dati sono fornite da:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N H_m \qquad \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (H_m - \mu)^2$$

cioè rispettivamente

$$\mu = 1.755 \text{ m} \quad \sigma^2 = 0.235$$

La funzione di distribuzione adottata è del tipo Gumbel espressa da:

$$P(H) = \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{H - \varepsilon}{\theta} \right] \right\}$$

in cui ε e θ (parametri della distribuzione) vengono ricavati con il metodo dei momenti attraverso le equazioni

$$\hat{\mu} = \varepsilon + \gamma\theta \cong \varepsilon + 0.577\theta \qquad \hat{\sigma}^2 = \frac{\pi^2}{6}\theta^2 \cong 1.645\theta^2$$

Si ottiene quindi:

$$\varepsilon = 1.547 \text{ m} \qquad \theta = 0.378 \text{ m}$$

Pertanto la distribuzione di Gumbel che interpola i dati è

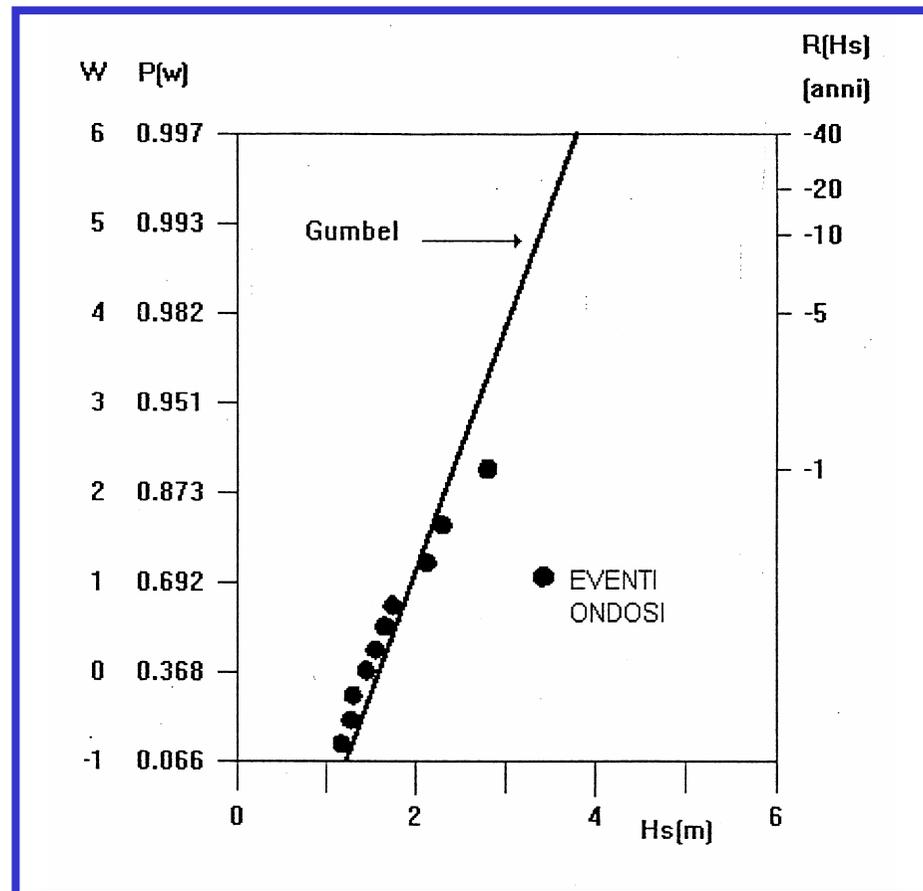
$$P(H) = \exp \{ \exp[-2.643(H-1.547)] \}$$

PREVISIONE DELLO STATO DI MARE A LUNGO TERMINE (9/16)

Previsione del moto ondoso

Le altezze significative ordinate secondo la tabella vengono rappresentate nel piano di Gumbel riportando in ascissa l'altezza significativa H_m nella scala metrica, in ordinata la probabilità totale nella scala metrica nel parametro

$$W = -\ln\{-\ln[P(H_m)]\}$$



PREVISIONE DELLO STATO DI MARE A LUNGO TERMINE (10/16)

Previsione del moto ondoso

Dalla definizione di periodo di ritorno, si ottiene il valore della probabilità cumulata dell'altezza d'onda di progetto, da cui attraverso la distribuzione di Gumbel precisata con i parametri calcolati a partire dal set di dati è possibile ottenere il valore dell'altezza d'onda di progetto. In simboli:

$$\frac{T_R}{r} = \frac{1}{1 - P(H_{T_R})} = \frac{1}{\exp\{-\exp[-2.645(H_{T_R} - 1.547)]\}}$$

Fissato un periodo di ritorno di 10 anni ed essendo $r = 0.1$ anni, si ha:

$$P(H_{T_R}) = 0.99 \quad \Rightarrow \quad H_{T_R=10yr} = 3.3m$$

Il periodo significativo associato con l'altezza significativa può essere ottenuto dalla seguente espressione di Boccotti:

$$T_S = 0.95 \cdot 9\pi \sqrt{\frac{H_s}{4g}} \quad \Rightarrow \quad T_{T_R=10yr} = 7.8 s$$

Pertanto l'onda di progetto nel paraggio in esame corrispondente ad un periodo di ritorno di 10 anni presenta un'altezza di 3.3 m ed un periodo di 7.8 s.

Lo stato di mare di Progetto

Per le opere di difesa portuale o costiera, si fa riferimento ad uno stato di mare convenzionale di progetto. I valori dell'altezza significativa di tale stato di mare sono quelli derivabili dalla procedura prima rappresentata.

Le norme (vedere le Istruzioni Tecniche per la Progettazione delle Dighe Marittime del Ministero dei LL.PP.) fissano in base al tipo di struttura sia la vita di progetto della struttura "L" sia il rischio sostenibile. Più precisamente, per ogni opera marittima si valuterà la durata di vita presunta, in relazione al progetto in cui è inserita, tenuto conto delle sue caratteristiche funzionali.

Si valuterà, inoltre, **il livello di rischio o probabilità di superamento dell'onda di progetto**, tenuto conto dei danni che tali onde possono arrecare all'opera e della possibilità di ripristinare la normale funzionalità con operazioni di manutenzione.



Si consigliano i valori riportati nelle seguenti tabelle.

Tabella 1. Durata minima di vita per opere o strutture di carattere definitivo (T_v).

Tipo dell'opera	Livello di sicurezza richiesto		
	1	2	3
	Vita di progetto (anni)		
Infrastrutture di uso generale	25	50	100
Infrastrutture ad uso specifico	15	25	50

Per infrastrutture di uso generale si intendono opere di difesa di complessi civili, commerciali e industriali, che non siano destinati ad uno specifico.

Per infrastrutture ad uso specifico si intendono le opere di difesa di singole installazioni industriali, di porti industriali, di depositi o piattaforme di carico e scarico, di piattaforme petrolifere, ecc.

Il livello di sicurezza 1 si riferisce ad opere ed installazioni di interesse locale ed ausiliario, comportanti un rischio minimo di perdita di vite umane a di danni ambientali in caso di collasso della stessa (difese costiere, opere in porti minori o marina, scarichi a mare, strade litoranee, ecc...).

Il livello di sicurezza 2 si riferisce ad opere ed installazioni di interesse generale, comportanti un moderato rischio di perdita di vite umane a di danni ambientali in caso di collasso dell'opera (opere di grandi porti, scarichi a mare di grandi città, ecc...).

Il livello di sicurezza 3 si riferisce ad opere ed installazioni per la protezione dall'inondazione, opere di interesse sopranazionale, comportanti un elevato rischio di perdita di vite umane o di danno ambientale in casa di collasso della stessa (difese di centri urbani a industriati, ecc...).

Si assumeranno le probabilità corrispondenti al danneggiamento incipiente o alla distruzione totale in relazione alle deformazioni-modificazioni subite dall'opera in caso di danneggiamento ed alla difficoltà di riparare il danno subito.

Per strutture rigide (dighe a parete verticale), per le quali è estremamente difficile riparare il danno, si assume la probabilità di distruzione totale.

Per strutture flessibili o comunque per opere riparabili, si assume la probabilità corrispondente al danneggiamento incipiente inteso come il livello di danneggiamento predefinito in relazione al tipo di Struttura, al di sopra del quale il danno è apprezzabile e risulta necessario intervenire con lavori di manutenzione.

Per queste opere si deve comunque verificare anche lo scenario di rovina totale, cioè del superamento di un livello di danneggiamento predefinito in relazione al tipo di struttura, al di sopra del quale l'opera cessa di svolgere un'apprezzabile funzione protettiva.

Per rischio limitato per la vita umana si intendono i casi in cui, a seguito del danneggiamento, non è logico prevedere alcuna perdita di vite umane. Quando queste perdite sono preventivabili, il rischio è elevato.

PREVISIONE DELLO STATO DI MARE A LUNGO TERMINE (15/16)

Previsione del moto ondoso

Per ripercussione economica bassa, media ed alta si intendono casi in cui il rapporto fra i costi diretti del danneggiamento, sommati a quelli indiretti dovuti alla perdita di funzionalità delle opere protette ed il costo totale per la realizzazione dell'opera è minore di 5, è compreso fra 5 e 20 a è maggiore di 20.

La combinazione del tempo di vita dell'opera T_v e della probabilità di danneggiamento P_f determina il tempo di ritorno dell'evento di progetto T_m :

Tabella 2. Massima probabilità di danneggiamento ammissibile nel periodo di vita operativa dell'opera (P_f).

<i>Danneggiamento incipiente</i>		
	Rischio per la vita umana	
Ripercussione economica	Limitato	Elevato
Bassa	0.50	0.30
Media	0.30	0.20
Alta	0.25	0.15

<i>Distruzione totale</i>		
	Rischio per la vita umana	
Ripercussione economica	Limitato	Elevato
Bassa	0.20	0.15
Media	0.15	0.10
Alta	0.10	0.05

In relazione a questo tempo di ritorno, dalla statistica degli eventi estremi, si desumerà l'altezza d'onda di progetto, e dalla statistica altezza-periodo, il periodo di questa.

L'onda così valutata ha approssimativamente la probabilità P_f (detta anche probabilità di incontro) di essere superata nell'arco di vita dell'opera. In relazione a questa intensità della sollecitazione ondosa, si sceglierà il valore caratteristico della altezza d'onda come specificato nel seguito caso per caso; valore in relazione al quale dovranno essere assunti nei calcoli ulteriori margini di sicurezza, che assicurino una probabilità di danneggiamento dell'opera effettivamente prossima a P_f .

Tutto ciò deriva dalla incertezza:

- delle caratteristiche stimate dell'onda di progetto;
- della intensità della sollecitazione effettiva per data onda sollecitante, cioè del modello;
- dell'azione ondosa utilizzato nei calcoli;
- del comportamento dell'opera e della fondazione, cioè dei modelli di verifica strutturale e geotecnica utilizzati.

Stime di rischio

Individuati i periodi di ritorno delle mareggiate riferiti alle onde significative, è possibile prevedere la probabilità $P(V)$ che prefissate mareggiate si verifichino durante la vita V di un'opera marittima, ovvero durante un intervallo di tempo V .

Nell'ipotesi che gli eventi mareggiate possano considerarsi stocasticamente indipendenti tra loro, la funzione densità di probabilità $p(\tau)$ degli intervalli temporali tra tali eventi può essere assunta di tipo esponenziale, cioè:

$$p(\tau) = \frac{1}{\tilde{R}} \exp\left(-\frac{\tau}{\tilde{R}}\right)$$

e la probabilità $P(V)$ viene ad esser espressa dalla seguente relazione:

$$P(V) = 1 - \exp\left(-\frac{V}{\tilde{R}}\right)$$

la quale conduce al risultato che qualora si assuma un periodo di ritorno R pari a V , la probabilità che durante V si abbia una mareggiata con quel periodo di ritorno è pari a 0.63.



PREVISIONE DELLO STATO DI MARE A LUNGO TERMINE

Previsione del moto ondoso

In ogni caso si ha che:

$$P(V) \leq \left(\frac{V}{\tilde{R}} \right)$$

e quindi la probabilità che durante V si realizzi una mareggiata con periodo di ritorno \tilde{R}

è sempre inferiore o al più uguale al rapporto: $\frac{V}{\tilde{R}}$