

XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche
Palermo, 14-17 settembre 2010

REVISIONE CRITICA DEL MODELLO SMB ATTRAVERSO UN CASO STUDIO NEL MEDITERRANEO

C. Lo Re¹, M. Cannarozzo¹ & L. Ortoleva¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali, Università di Palermo, Italia, e-mail: mcannarozzo@unipa.it

SOMMARIO

La conoscenza del clima ondoso al largo di un paraggio è la condizione fondamentale per qualsiasi studio volto alla progettazione di opere di ingegneria marittima.

I dati ondametrici necessari per una realistica ricostruzione del clima ondoso attraverso i metodi diretti sono ancora oggi insufficienti, sia per la scarsa copertura spaziale sia per il limitato periodo di registrazione.

La disponibilità di una stazione anemometrica ricadente all'interno dell'aria di generazione del moto ondoso e le esigue serie ondametriche, consentono interessanti analisi sui metodi di ricostruzione indiretta degli stati di mare.

Pur avendo oggi svariate possibilità di ottenere dati di onda calcolati da modelli complessi a scala di bacino risulta ancora utile, al fine di risolvere problemi ingegneristici, l'utilizzo di modelli più semplici, in grado di descrivere fisicamente la trasformazione vento-onde. Nel presente lavoro si vogliono, quindi, analizzare le potenzialità di un metodo indiretto di trasformazione vento-onde. A tal fine si utilizza un caso studio per ricostruire il clima ondoso al largo di Capo Gallo con il metodo indiretto SMB, secondo la metodologia proposta dallo Shore Protection Manual, a partire dalle registrazioni anemometriche effettuate dalla stazione di Ustica, gestita dall'Aeronautica Militare.

Un'analisi critica dei parametri del modello e nuove correzioni, rendono tale modello uno strumento alternativo per il calcolo dell'onda di progetto.

Particolare cura è stata posta alla ricostruzione dei dati anemometrici mancanti, attraverso dei criteri empirici ma efficaci ai fini della generazione di serie sintetiche continue di stati di mare.

1 INTRODUZIONE

La determinazione del clima ondoso può essere effettuata a partire da osservazioni dirette degli stati di mare (*metodi diretti*), dalle misure anemometriche che li hanno generati (*metodi indiretti*), o dalla combinazione di entrambi (*metodi misti*).

Quale che sia il metodo di ricostruzione del clima ondoso adottato, questo richiede la conoscenza di serie storiche continue per un periodo di almeno 15-20 anni.

Come si evince dalla figura 1, la stazione anemometrica di Ustica ricade nell'area di generazione del moto ondoso misurato dalla stazione ondametrica di Capo Gallo, di recente installazione. Per questo motivo e per la disponibilità di lunghe serie

anemometriche, il sito in esame risulta idoneo per valutare, attraverso i metodi indiretti, l'attendibilità degli stati di mare generati.



Figura 1. Individuazione geografica, attraverso una foto satellitare, della boa di Capo Gallo con tracciamento del settore di traversia principale e del fetch efficace.

Nell'ambito del presente studio sono state svolte le seguenti attività: reperimento ed analisi delle misure anemometriche; reperimento ed analisi delle misure strumentali del moto ondoso; individuazione dei fetch geografici, efficaci e del settore di traversia; elaborazione di un modello matematico per la ricostruzione automatica del clima ondoso, ricostruzione dei dati anemometrici mancanti nella serie storica registrata dalla stazione di Ustica nel periodo 2004-2008, verifica ed analisi critica dei risultati del modello, analisi statistica delle onde estreme.

2 REGIME DEI VENTI

Gli stati di mare che interessano una località possono essere determinati conoscendo il campo dei venti che li generano. In ragione di ciò, la conoscenza del clima anemologico locale, cioè la frequenza di apparizione per fissate direzioni e per fissate classi di velocità del vento, risulta utile per una valutazione del conseguente clima ondoso.

I dati disponibili riguardano la stazione meteorologica di Ustica, gestita dall'Aeronautica Militare (ITAV), con serie storiche che coprono il periodo 1951-2008. Le osservazioni meteorologiche, eseguite secondo gli standard indicati dall'OMM (Organizzazione Meteorologica Mondiale), vengono effettuate ogni tre ore e sono

rappresentative di un'area di circa 70 chilometri di raggio.

La stazione meteorologica si trova nell'Italia insulare, in provincia di Palermo, sull'isola di Ustica, a 243 m s.l.m. e alle coordinate geografiche 38°42' N e 13°11' E .

Da una prima analisi sulla continuità di tali dati si osserva un funzionamento regolare nell'arco temporale compreso tra l'1/1/1951 e l'11/08/1996, a meno di sporadiche interruzioni al massimo di una settimana, e una interruzione delle osservazioni per le ore 21, 00, 03 nel rimanente periodo di osservazione. A partire dal 2000 i dati risultano ulteriormente frammentati per la sospensione delle registrazioni nei mesi di aprile e maggio, a cui segue un grosso vuoto temporale dal 17/05/2002 al 15/11/2003.

Per il periodo di osservazione regolare omogeneo compreso tra l'1/01/1951 e l'11/08/1996, al fine di verificare se in tale arco temporale vi siano state sensibili variazioni in direzione, velocità e frequenza di apparizione, si sono effettuate delle analisi di persistenza per decenni e per l'intero periodo. Tali elaborazioni si riferiscono alle otto direzioni principali, con angoli di 45° posti a cavallo delle stesse, ed alle seguenti classi di velocità: 1-6 [nod] , 7-10 [nod], 11-16 [nod], 17-21 [nod], 22-27 [nod], >=28 [nod].

Dalle analisi decennali si rileva una variazione delle frequenze di accadimento che interessa principalmente le direzioni W, NW e N con differenze maggiori per le classi di velocità superiori. Tra i due periodi '51-'79 e '80-'96 si è riscontrata una limitata ma significativa riduzione della frequenza di apparizione lungo W (-23%) e NW (-18%), un significativo incremento lungo N (+25%) ed un leggero aumento della frequenza di calma (9%).

Al fine di verificare l'esistenza di una possibile stagionalità, per il periodo di osservazione regolare, si sono effettuate anche le analisi di persistenza mensili, dalle quali si rileva una frequenza di accadimento maggiore per le direzioni W, NW e N durante i mesi invernali con una punta del 3.33% per le velocità superiori a 28 nod, ed una riduzione delle velocità per i mesi estivi accompagnata da una rotazione sulle direzioni N, NE ed E. Poiché il settore di traversia compreso tra la direzione W e la direzione NW presenta anche i maggiori fetch geografici ed efficaci, per esso ci si aspetta il verificarsi di altezze significative maggiori, come confermato dalla seguente tabella 1 relativa allo studio sul regime del moto ondoso.

3 REGIME DEL MOTO ONDOSI

Per la definizione del clima ondoso al largo si fa riferimento alle registrazioni ondamiche della boa direzionale della stazione ondometrica di Capo Gallo (Palermo), gestita dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale dell'APAT.

La boa è ormeggiata al largo della riserva naturale di Capo Gallo, in corrispondenza della batimetrica 100 metri e alle coordinate geografiche 38°15'29.99" N e 13°19'59.99" E (nel sistema WGS84).

Sulla base delle registrazioni semiorarie di altezza e direzione dell'onda significativa e per il periodo di osservazione compreso tra l'1/01/2004 e il 31/03/2008, si è determinata la frequenza di accadimento per le otto direzioni principali e per le sei classi di altezza di onda significativa.

Come rilevato dall'analisi di persistenza riportata in tabella, si ha una predominanza delle onde significative nelle direzioni W-NW, con una frequenza di accadimento

compresa tra il 20% e il 30%. Per quanto riguarda le classi delle altezze d'onda significativa più elevate, $H_s > 1.5$ m, si osserva una maggiore persistenza nelle direzioni W-NW, una piccolissima apparizione nelle direzioni N-NE e la loro totale assenza nelle restanti direzioni.

Classi di altezza d'onda significativa H_s [m]							
	$0 < H_s \leq 0.3$	$0.3 < H_s \leq 1$	$1 < H_s \leq 1.5$	$1.5 < H_s \leq 2.5$	$2.5 < H_s \leq 4$	$H_s > 4$	TOT
<i>N</i>	7.70%	6.49%	1.16%	0.76%	0.16%	0.01%	16.27%
<i>NE</i>	4.78%	4.35%	0.65%	0.53%	0.13%	0.01%	10.44%
<i>E</i>	2.14%	2.87%	0.18%	0.16%	0.02%	0.02%	5.39%
<i>SE</i>	0.32%	1.23%	0.08%	0.02%	0.01%	0.01%	1.67%
<i>S</i>	0.07%	0.21%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.33%
<i>SW</i>	0.09%	0.38%	0.04%	0.02%	0.02%	0.01%	0.56%
<i>W</i>	1.42%	9.82%	4.10%	3.28%	0.84%	0.06%	19.52%
<i>NW</i>	6.41%	14.94%	4.80%	3.05%	0.69%	0.11%	29.99%
<i>CALMA</i>							15.82%
<i>TOT</i>							100.00%

Tabella 1. Frequenza di apparizione direzionale, per le onde misurate presso la stazione ondometrica di Capo Gallo, riferite al periodo compreso tra l'1/01/2004 e il 31/03/2008.

4 INDIVIDUAZIONE DEI FETCH GEOGRAFICI, EFFICACI E DEL SETTORE DI TRAVERSA

L'analisi del fetch di Capo Gallo è effettuata con l'ausilio della carta del Mar Mediterraneo Bacino Occidentale alla scala 1:2.250.000, pubblicata dall'Istituto Idrografico della Marina (Genova, IV edizione gennaio 2006).

Il fetch efficace è stato calcolato secondo la relazione proposta da *Seymour* (1977).

Come si rileva dalla figura 1, il settore di traversia principale (foraneo) è compreso tra la direzione 260° N e la direzione 75° N, procedendo in senso orario.

5 MODELLO MATEMATICO PER LA RICOSTRUZIONE AUTOMATICA DEL CLIMA ONDOSO

Tra gli studi effettuati sull'elaborazione di un modello automatico di rapida e facile utilizzazione per la determinazione del clima marino, si ricordano quelli condotti da *Giacobello et al.* (1980) e da *Franco et al.* (1982), che fanno riferimento al metodo SMB (Sverdrup, Munk e Bretschneider) secondo la formulazione proposta dallo *Shore Protection Manual* (1977). Da questi studi, confrontando i dati ottenuti attraverso l'impiego del metodo SMB con le esigue serie ondometriche strumentali, si evince una buona attendibilità dei risultati.

Il metodo SMB utilizzato nel presente lavoro fa riferimento alla formulazione proposta dallo *Shore Protection Manual*, che, rivisitata alla luce di recenti correzioni ed implementata attraverso un programma di calcolo, permette di determinare le caratteristiche delle onde (altezza e periodo), note che siano il fetch efficace, il fattore di

attrito e la durata del vento.

Nel processo di trasferimento di energia dal vento al mare, la crescita delle onde risulta limitata:

- dal fetch quando il vento abbia soffiato in modo costante e a lungo perché le altezze d'onda raggiungano l'equilibrio al termine del fetch stesso;
- dalla durata quando la durata del vento è limitante nel senso spiegato in seguito.

Le equazioni che si utilizzano per la ricostruzione degli stati di mare in acque profonde e per i suddetti casi (evento limitato dal fetch ed evento limitato dalla durata), sono state ricavate a partire dal modello parametrico di *Hasselmann et al.* (1976), ed avendo assunto uno spettro di forma JONSWAP, si presentano come di seguito:

$$g \cdot H_{m0} / U_a^2 = 1.6 \cdot 10^{-3} \cdot (g \cdot F / U_a^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$g \cdot T_m / U_a = 2.857 \cdot 10^{-1} \cdot (g \cdot F / U_a^2)^{1/3} \quad (3)$$

$$g \cdot t / U_a = 6.88 \cdot 10 \cdot (g \cdot F / U_a^2)^{2/3} \quad (4)$$

ove:

- F : fetch efficace espresso in km;
- U_a : fattore di attrito del vento espresso in m/s;
- t : durata dell'azione del vento costante che spirava sul fetch, espressa in s;
- H_{m0} : altezza significativa espressa in m;
- T_m : periodo di picco espresso in s;

Noti il fattore di attrito, la durata del vento ed il fetch efficace l'evento risulta limitato dal fetch se la durata della perturbazione meteorica è maggiore della durata minima calcolata dalla (4). In questo caso i valori di H_{m0} e di T_m sono ricavati dalla (2) e dalla (3) in corrispondenza del fattore di attrito U_a e del fetch efficace F.

Se la durata minima calcolata dalla (4) è maggiore della durata per cui ha spirato il vento, l'evento risulta limitato dalla durata. In questo secondo caso i valori di H_{m0} e di T_m sono sempre ricavati dalla (2) e dalla (3) ma in corrispondenza di un fetch ridotto F_r calcolato dalla (4).

Qualora l'evento ondoso non risulti limitato né dal fetch né dalla durata, esso si considera completamente sviluppato ed analiticamente espresso dai rapporti adimensionali:

$$g \cdot H_{m0} / U_a^2 = 2.433 \cdot 10^{-1} \quad (5)$$

$$g \cdot T_m / U_a = 8.134 \quad (6)$$

$$g \cdot t / U_a = 7.15 \cdot 10^4 \quad (7)$$

con ovvio significato dei termini.

Si osserva che il periodo significativo dell'onda è ricavato, quale che sia lo stato del mare (stazionario, transitorio, completamente sviluppato) come:

$$T_s = 0.95 \cdot T_m \quad (8)$$

Il modello di ricostruzione automatica del clima ondoso, implementato in un programma di calcolo, prevede delle operazioni preliminari finalizzate alla determinazione del fattore di stress, ed alla suddivisione delle serie storiche dei dati anemometrici in eventi (pacchetti di registrazioni successive che presentano direzioni adiacenti, cioè appartenenti ad un dato settore angolare).

Le correzioni preliminari consentono di riportare il valore del vento dalla quota anemometrica di 243 m sulla terra ferma alla quota di 10 m sul livello del mare, a cui è calibrato il metodo SPM. Queste correzioni sono ampiamente descritte nello *Shore Protection Manual* (1984).

Il modello è così strutturato:

- Lettura delle tabelle anemometriche;
- Adeguamento della quota
- Correzione dovuta alla localizzazione dell'anemometro sulla terra ferma
- Correzione di stabilità dovuta alla differenza di temperatura aria-mare
- Correzione dovuta alla durata media (*Simiu and Scanlan, 1978*) della velocità del vento
- Calcolo del fattore di attrito
- Determinazione del numero di eventi
- Correzione della direzione di propagazione dell'onda
- Determinazione del moto ondoso tramite l'applicazione del metodo SPM84 modificato

5.1 Calcolo del fattore di attrito

Il metodo SPM84 per la determinazione dell'altezza e del periodo delle onde significative, richiede la conoscenza del fattore di attrito U_a , definito dalla seguente espressione:

$$U_a = 0.71 \cdot U_{10}^{1.23} \quad (9)$$

essendo U_{10} la velocità del vento che spira a 10 m sulla superficie del mare.

È interessante osservare che a valle di tutte le correzioni apportate alla velocità del vento si registra un decremento per le velocità maggiori, con riduzioni anche del 30%, ed un incremento per le velocità minori, con punte del 20%, nonostante l'applicazione dell'equazione precedente incrementi maggiormente le velocità più elevate. Quanto detto trova un immediato riscontro sugli stati di mare generati dal modello di ricostruzione automatica che sottostima maggiormente i valori delle onde più alte.

5.2 Determinazione del numero di eventi

I modelli di previsione indiretta permettono di ricavare per ogni terna di valori F , U_a e t (fetch efficace, fattore di attrito e durata del vento) l'altezza ed il periodo della relativa onda significativa come se il mare avesse inizialmente un livello energetico nullo.

Poiché, generalmente, il vento incontra un mare a contenuto energetico non nullo, per valutare l'evoluzione del moto ondoso si deve:

- suddividere la serie storica delle registrazioni anemometriche in eventi (pacchetti di registrazioni anemometriche successive che presentano direzioni adiacenti), supposti disaccoppiati tra di loro;
- determinare, per ogni evento, l'evoluzione degli stati di mare generati dalle

registrazioni anemometriche susseguenti (appartenenti allo stesso evento), tenendo conto dell'energia fornita dal vento precedente.

La suddivisione delle serie storiche anemometriche in eventi, si effettua secondo i seguenti criteri:

- a) la direzione del vento si discosta di oltre $\pm\alpha/2$ dalla direzione di propagazione dell'agitazione ondosa. Questa si determina come media ponderata delle direzioni dei venti che appartengono al medesimo evento, essendo le intensità i pesi;
- b) si incontrano due valori consecutivi di velocità del vento inferiori ad una soglia prefissata ($U_{a,soglia}$);
- c) si incontrano due valori consecutivi del vento che spirano su fetch efficaci inferiori o uguali ad una soglia prestabilita (F_{soglia});
- d) si incontrano due valori consecutivi di cui uno al caso b) e l'altro al caso c), o viceversa.

Affinché eventi diversi possano essere considerati appartenenti ad uno stesso evento ondoso, le direzioni di propagazione del vento devono ricadere all'interno dello stesso angolo α centrato nella direzione di propagazione della mareggiata. In letteratura è consigliato assumere $\alpha=30^\circ$, poiché valori inferiori porterebbero a frequenti interruzioni delle serie di vento, quindi a durate troppo brevi e conseguentemente ad altezze caratteristiche sottostimate.

Nel presente lavoro, al fine di avere un quadro completo delle mareggiate, si assumono valori nulli sia per $U_{a,soglia}$ sia per F_{soglia} .

6 RICOSTRUZIONE DATI ANEMOMETRICI ANNI 2004-2007

Il modello automatico di ricostruzione del moto ondoso, implementato nel presente lavoro, genera serie sintetiche di stati di mare a partire da misure anemometriche continue, con passo triorario. Pertanto l'interruzione sistematica delle osservazioni del vento per le ore 21, 00, 03 ne compromette il corretto funzionamento. In ragione di quanto appena detto, utilizzando dei criteri empirici, si è cercato di ricostruire i dati di vento mancanti per l'arco temporale 2004-2007, per il quale si hanno misure contemporanee del moto ondoso presso la boa di Capo Gallo e del vento presso la stazione anemometrica di Ustica.

I metodi di ricostruzione empirica adottati ricostruiscono i dati anemometrici mancanti a partire dalle registrazioni delle ore 18 e delle ore 06 secondo la seguente procedura:

- se la direzione del vento delle ore 18 (D_{18}) si discosta dalla direzione del vento delle ore 06 (D_{06}) al più di β , allora la direzione assegnata alle osservazioni delle ore 21, 00 e 03 si ottiene per interpolazione lineare, supponendo una rotazione del vento dalla direzione misurata alle 18 (D_{18}) sulla direzione misurata alle 06 (D_{06}). La velocità del vento assegnata alle osservazioni delle ore 21, 00, 03 si pone uguale alla massima tra la velocità del vento alle ore 18 (U_{18}) e la velocità del vento alle ore 6 (U_{06});
- se il valore assoluto della differenza tra la direzione del vento alle ore 18 e la direzione vento alle ore 06 è superiore di β , supponendo i dati anemometrici come generati da differenti gradienti di pressione, si assegnano alla direzione e alla velocità del vento delle 21 (D_{21}) la direzione e la velocità del vento della

registrazione alle ore 18 (D_{18}), mentre alle direzioni e alle velocità delle ore 00 e 03 quelle relative alle ore 06.

Per verificare l'affidabilità del metodo lo si applica alle registrazioni anemometriche ricadenti nel decennio 1980-1989, avendo preventivamente eliminato i dati di vento relativi alle ore 21, 00 e 03.

Il confronto tra le registrazioni storiche (U_{ST}) e quelle ricostruite (U_{RC}), per β pari a 30° , evidenzia che la distribuzione dell'errore percentuale commesso sulle velocità si ripartisce equamente ($\mu=10.23\%$; $\sigma=193.6\%$) talvolta sovrastimando e talvolta sottostimando la velocità realmente misurata.

Effettuata l'analisi di persistenza sui dati anemometrici ricostruiti e storici, ad un aumento della frequenza di apparizione in corrispondenza della direzione N corrisponde una diminuzione della frequenza di apparizione per la direzione S, in misura maggiore per le velocità minori. Per le restanti direzioni NE, E, SE, SW, W, NW non si registrano sostanziali variazioni.

Dalle simulazioni del moto ondoso in corrispondenza delle tre serie di registrazioni anemometriche (storiche, storiche epurate e ricostruite) risulta quanto segue:

- le onde generate utilizzando i dati di vento ricostruiti presentano un buon adattamento alle onde generate con le serie anemometriche storiche, come si desume dal grafico sotto riportato. Gli statistici della distribuzione degli errori relativi, commessi sulla stima dell'altezza dell'onda significativa, presentano i seguenti valori: $\mu=0.32$ e $\sigma=1.45$.
- le onde generate dai dati anemometrici epurati, a causa delle frequenti interruzioni, non possono essere utilizzate per la ricostruzione delle mareggiate.

Suddivise le serie sintetiche degli stati di mare nelle direzioni cardinali, i risultati ottenuti evidenziano come il moto ondoso generato dai dati anemometrici ricostruiti è equivalente al moto ondoso generato dai dati di vento effettivamente rilevati.

Si osserva che la scelta di assumere, in fase di ricostruzione dei dati mancanti, il valore di velocità maggiore tra le velocità del vento alle ore 18 ed alle ore 06, produce delle piccole sovrastime del moto ondoso, del tutto trascurabili e comunque a vantaggio di sicurezza.

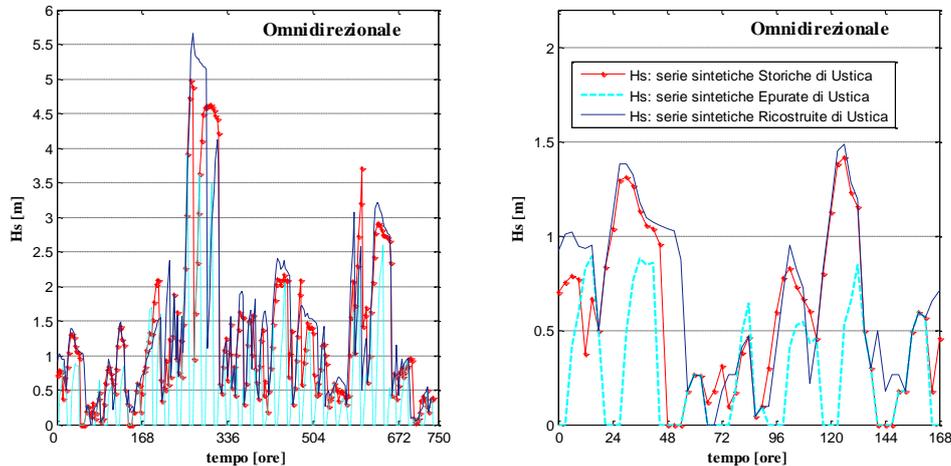


Figura 2. Confronto tra serie sintetiche di H_s generate a partire dalle serie anemometriche storiche, epurate e ricostruite di Ustica relative al mese di ottobre 1980.

7 VALIDAZIONE E TARATURA DEL MODELLO

Ricostruiti i dati anemometrici delle ore 21, 00 e 03 per gli anni 2004-2007, si confrontano gli stati di mare misurati dalla boa di Capo Gallo con le serie sintetiche generate dal modello automatico di ricostruzione. Lo studio si effettua per valori dell'angolo α pari a $30^\circ (\pm 15^\circ)$, $45^\circ (\pm 22.5^\circ)$ e $60^\circ (\pm 30^\circ)$, al fine di valutarne la dipendenza dal paraggio in esame.

Le analisi omnidirezionali sull'altezza significativa indicano un buon adattamento delle serie sintetiche alle serie storiche e suggeriscono di assumere per α il valore di 60° .

Dalle analisi sulle direzioni cardinali si evidenzia una rotazione delle onde generate rispetto alle onde misurate sensibilmente ridotta (vedi figura 3) dalla correzione della direzione di propagazione dell'onda, eseguita mediante la seguente relazione:

$$\Delta\Theta = \arctg \cdot \left(\frac{\sum_i F_i \sin \Theta_i \cdot \cos^n \Theta_i}{\sum_i F_i \cos \Theta_i \cdot \cos^n \Theta_i} \right) \quad (10)$$

essendo F_i il fetch geografico e Φ_i l'angolo tra la direzione media del vento e le direzioni adiacenti comprese in un settore di ampiezza $\pm 90^\circ$.

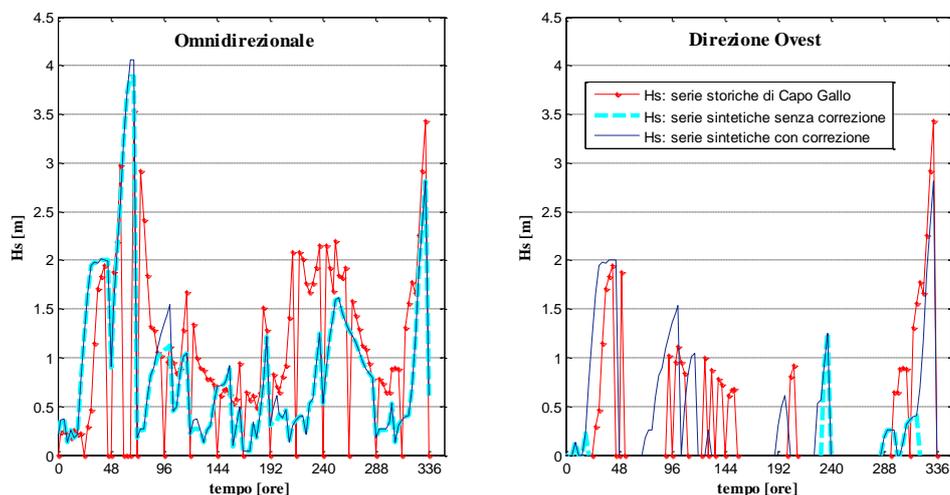


Figura 3. Confronto omnidirezionale ed unidirezionale tra l' H_s storica di Capo Gallo e l' H_s sintetica prima e dopo la correzione della direzione di propagazione dell'onda. I grafici si riferiscono al periodo compreso tra il 6 e l'19 novembre 2004 e sono generati a partire dai dati anemometrici (ricostruiti) di Ustica, per $\alpha=60^\circ$ e $n=1$.

8 ANALISI STATISTICA DELLE ONDE ESTREME

Per il periodo di sovrapposizione 2004-2007, le probabilità di superamento omnidirezionali dell'altezza significativa (storiche di Capo Gallo e sintetiche da modello SMB) sono rappresentate attraverso la distribuzione teorica di Weibull a due parametri (Boccotti, 1997). Tale distribuzione assume l'espressione $P(H_s > h) = \exp[-(h/w)^u]$, dove h è la soglia di altezza significativa che ha probabilità P di essere superata ed u e w [m] sono i parametri della distribuzione. Per garantire la verifica dell'ipotesi di indipendenza stocastica, si sono elaborate solamente le altezze significative con frequenza trioraria, eliminando pertanto tutte le registrazioni fornite dalla boa di Capo Gallo con frequenze più piccole.

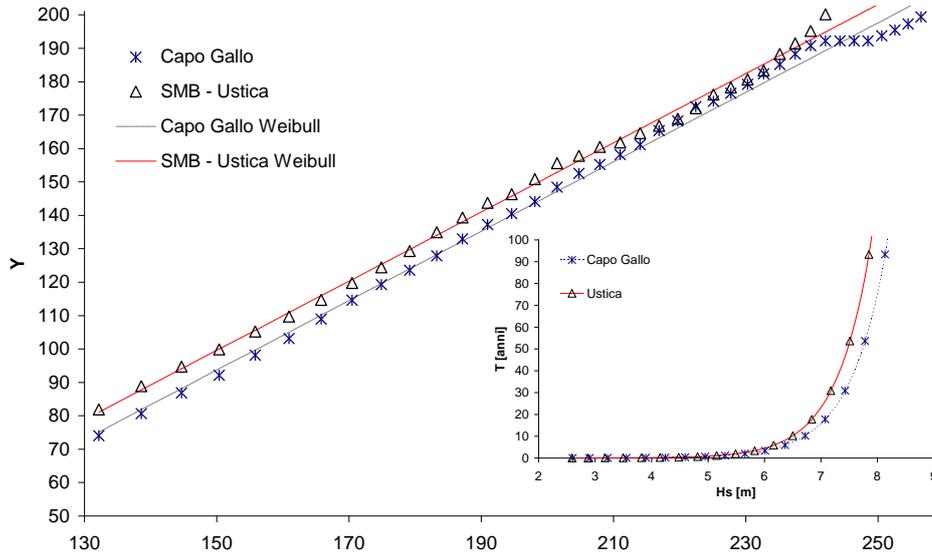


Figura 4. Nel riquadro grande le probabilità di superamento sul piano delle variabili ausiliarie. Nel riquadro piccolo le altezze significative in funzione del tempo di ritorno.

Adottate le variabili ausiliarie $X = 100 \ln(2.5 h)$ e $Y = 100 \ln[\ln(1/P)]$ proposte da *Boccotti* (1997), le probabilità di superamento $P(H_s > h)$ rappresentate sul piano delle suddette variabili, tendono a disporsi lungo delle rette i cui coefficienti sono stimati con il metodo dei minimi quadrati per valori di Y compresi tra 50 e 200 circa (vedi Figura 4). Infatti per valori di $Y > 200$ i dati estremi sono affetti da incertezza statistica (*Boccotti*, 1997).

I parametri statistici della distribuzione di Weibull determinati per le altezze significative misurate dalla boa di Capo Gallo (pedice ond) e generate dal modello (pedice SMB), assumono i seguenti valori: $u_{ond}=1.039$, $w_{ond}=0.728$; $u_{SMB}=1.036$, $w_{SMB}=0.686$.

Per il calcolo dei valori estremali si fa riferimento al concetto di tempo di ritorno T , cioè all'intervallo di tempo, espresso in anni, in cui l'altezza significativa viene mediamente uguagliata o superata una sola volta. Il valore di T è legato alla probabilità di superamento dalla relazione $T=1/[\lambda \cdot P(H_s > h)]$, dove λ indica il numero medio di eventi per anno.

Assumendo per la probabilità di superamento le distribuzioni teoriche di Weibull precedentemente determinate, si ricava l'andamento delle altezze significative al variare del tempo di ritorno dal cui confronto si rileva una sottostima delle $H_{s,SMB}(T)$ rispetto alle corrispondenti $H_{s,ond}(T)$, con scarti inferiori al 5%, relativamente all'esiguo periodo di osservazione.

Tali risultati per serie ondometriche statisticamente significative comproverebbero la bontà del metodo SMB proposto, relativamente alla determinazione dell'onda di progetto per quei siti sprovvisti di misure dirette del moto ondoso e per quei siti, come quello oggetto di studio, con brevi periodi di osservazione.

9 CONCLUSIONI

Il modello SPM proposto nel presente lavoro permette di ricavare il moto ondoso al largo di un paraggio sulla base delle registrazioni anemometriche ricadenti nell'aria di generazione. Pertanto esso non valuta gli stati di mare morto generati in aree non coperte dall'anemometro, spesso determinanti nell'evoluzione della costa, ma ininfluenti per la determinazione delle onde di progetto.

I criteri empirici adottati per la ricostruzione dei dati anemometrici mancanti, fondamentali per il confronto tra i dati ondometrici rilevati e i dati ondometrici generati, forniscono risultati migliori di quelli attesi, producendo risultati equivalenti sia per l'altezza sia per la direzione dell'onda significativa.

A fronte delle approssimazioni introdotte con le correzioni della velocità del vento e con la ricostruzione dei dati anemometrici le analisi omnidirezionali e unidirezionali indicano un buon adattamento delle onde sintetiche alle onde storiche.

L'adattabilità ai siti di interesse attraverso la determinazione dei fetch efficaci e delle serie anemometriche che interessano l'area di generazione del moto ondoso, la semplicità di utilizzo e la rapidità di calcolo rendono il modello di ricostruzione indiretta del moto ondoso, limitatamente alla sola determinazione dell'onda di progetto, uno strumento alternativo ancora proponibile. Gli sviluppi futuri del presente lavoro riguardano la verifica di dettaglio del modello in altri paraggi.

Ringraziamenti. Si ringrazia il prof. G. Scarsi per i proficui suggerimenti, e l'ITAV per avere fornito i dati anemometrici.

BIBLIOGRAFIA

- Boccotti, P. *Idraulica Marittima*, Utet, Torino 1997.
- Franco, L., Pagani, S., Togna, A. Un modello per la ricostruzione automatica del clima marino al largo delle coste italiane, *Idrotecnica*, n. 4, Luglio – Agosto 1982.
- Giacobello, N., Lamberti, A., Stura, S., Tomasicchio, U. Modello per la definizione automatica del clima marino in zone costiere italiane. *Note e pubblicazioni di Ingegneria Idraulica* n.23, Università di Firenze, 1979.
- Hasselmann, K., Ross, D. B., Muller, P., Sell, W. A Parametric Wave Prediction Model, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 6, pp. 200-228, 1976.
- Saville, T. J. The effect of fetch width on wave generation. Technical Memorandum n. 70, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers.
- Scarsi, G. Appunti del Corso in Ingegneria Marittima e Costiera, Università di Genova.
- Seymour, R.J. Estimating wave generation on restricted fetches, *Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division*, Proc. ASCE, n.103 WW2 may 1977.
- Simiu, E., and Scanlan, R. N. "Wind Effect on Structures: An Introduction to Wind Engineering," New York, Wiley, p. 62, 1978.
- Tomasicchio, U. *Manuale di ingegneria portuale e costiera*, 2° ed., Editoriale Bios, Cosenza 2001.
- U.S. Corp of Engineers, *Shore Protection Manual*, Vol. 1, 4° ed., Coastal Eng. Research Center, Washington, D.C., 1984.