

REGIONE SICILIANA

ASSESSORATO DELLE INFRASTRUTTURE E DELLA MOBILITA'
DIPARTIMENTO DELLE INFRASTRUTTURE DELLA MOBILITA' E DEI TRASPORTI

ISOLA DI SALINA (MESSINA)

COMUNE DI MALFA

LAVORI DI RIQUALIFICA E DI ADEGUAMENTO DELLE OPERE FORANEE, DELLE BANCHINE, DELLO SCALO DI ALAGGIO E DEI FONDALI DELL' APPRODO DI SCALO GALERA

Progetto Definitivo:

Approvato in linea tecnica in Conferenza Speciale di Servizi Ufficio del Genio Civile di Messina in data 21.07.2004

Progetto Esecutivo 1° stralcio funzionale:

Approvato in linea tecnica in Conferenza Speciale di Servizi del Genio Civile di Messina in data 20.12.2006 dell'importo complessivo di € 4.800.000,00

Progetto Esecutivo 1° stralcio di completamento:

A seguito di rescissione contrattuale ed approvazione Perizia di riparazione danni di forza maggiore di variante in diminuzione in Conferenza Speciale di Servizi del Genio Civile di Messina in data 07 marzo-26 marzo 2013 dell'importo complessivo di € 1.612.247,45

Progetto Esecutivo stralcio di completamento:

Approvato in linea tecnica in Conferenza Speciale di Servizi del Genio Civile di Messina in data 19.07.2017 dell'importo complessivo di € 13.700.00,00



PROGETTO ESECUTIVO DI RIUNIONE ED AGGIORNAMENTO DEI LAVORI DEL 1° STRALCIO E DI QUELLO DI COMPLETAMENTO

REV.	DATA	EMISSIONE	RED.	VER.	APPR.
0	27/06/19	PRIMA EMISSIONE	F.GIORDANO	F.GIORDANO	F.GIORDANO
1					
2					
CODICE PROGETTO 1 9 0 1		ELABORATO: All. 9.1	REV. A	SCALA:	-

Studio idraulico-marittimo

(1 Parte)

IL R.U.P.:

Geom. Arturo Ciampi
4° Settore Tecnico Lavori Pubblici

DINAMICA S.r.l.
PROGETTO VERIFICATO

IL PROGETTISTA:

Ing. Francesco Giordano
ingfrancescogiordano@gmail.com

COLLABORAZIONE:

Sigma Ingegneria S.r.l.
sigmaingsrl@gmail.com

IL SUPPORTO ESTERNO AL R.U.P.:

Ing. Salvatore Perillo

IL SINDACO:

Dott.ssa Clara Rametta

Clara Rametta

REGIONE SICILIANA
 UFFICIO DEL GENIO CIVILE - MESSINA
 Visto: Si esprime parere favorevole in linea tecnica
 ai sensi dell'art. 12 del R. C. N. e con riferimento alla
 nota di pari data e numero di protocollo.

22829
 15 NOV 2019
 DIRETTORE CAPO
 Ing. Antonino Platania



UFFICIO DEL GENIO CIVILE
 — MESSINA —

attesta che le previsioni del presente progetto
 sono conformi alle norme di cui alla sismica.
 autorizzazione allo fuori del lavori è subordi-
 na alla formale domanda ai sensi dell'Art 17

22829
 15 NOV. 2019
 Messina, 15 NOV. 2019

DIRETTORE CAPO
 Ing. Antonino Platania



Regione Siciliana
 Assessorato delle Infrastrutture e della Mobilità
 Dipartimento Regionale Tecnico
COMMISSIONE REGIONALE DEI LAVORI PUBBLICI
 Legge regionale 12 luglio 2011, n. 12 art.5, comma 12
 Copia conforme all'elaborato esaminato nelle sedute
 del 04 Dicembre 2019 e 17 Dicembre 2019
 Parere n° 128
 Ing. Antonino Platania
 (Capo Ufficio del Genio Civile di Messina)



1. Premessa

Il progetto dei "lavori di riqualifica e di adeguamento delle opere foranee, delle banchine, dello scalo di alaggio e dei fondali dell'approdo di Scalo Galera – Malfa" prevede in particolare la realizzazione di una diga sopraflutto al fine di creare uno specchio liquido ridossato per le operazioni di attracco e ormeggio dei natanti in sicurezza.

A tal fine, si è proceduto alla valutazione delle caratteristiche ondose nel paraggio di Malfa (ME), sviluppando uno specifico studio idraulico-marittimo per la previsione del moto ondoso al largo.

Non essendo disponibile una serie di dati ondametrici di lunga durata, si è fatto ricorso ai dati anemometrici d'archivio rilevati nella stazione di Ustica, perché ricadente in una zona che rappresenta bene le condizioni climatiche del mare ove si genera il moto ondoso.

Si è, pertanto, proceduto ad elaborare i dati in parola, non con il semplice fine di valutare alcuni parametri statistici relativi all'analisi dei dati stessi (come, ad esempio, la frequenza storica), ma nell'intento di ricavare dall'esame della serie storica disponibile i parametri relativi ad una serie più lunga.

Lo studio ha consentito la valutazione dei parametri statistici anemometrici e, attraverso l'utilizzazione di noti modelli matematici di previsione, la definizione dei valori ondametrici estremi al largo corrispondenti ad assegnati valori del tempo di ritorno per le direzioni di attacco del moto ondoso al largo di 315.00 °N, 337.50 °N, 360.00 °N, 22.50 °N, 45.00 °N e 67.50 °N.

Lo studio meteomarino è riportato per esteso nell' **Appendice 1** alla presente relazione.

In particolare lo studio della previsione al largo ha evidenziato che il paraggio in esame può essere investito da mareggiate, che per un intervallo di ricorrenza di 100 anni, hanno i seguenti valori massimi: $H = 11,62$ m e $T = 13,47$ s, mentre le onde aventi tempo di ritorno pari a 50 anni si modificano come di seguito: $H = 9,87$ m e $T = 12,43$ s sempre provenienti da 360.00 °N.

Infine, per un intervallo di ricorrenza pari a 3 anni si ha un valore dell'altezza d'onda pari a 3,62 m ($T=7,56$ s) per la direzione di 360.00 °N.

I dati riepilogativi sono riassunti nelle seguente tabella:

MALFA - SCALO GALERA CARATTERISTICHE ONDOSE A LARGO			
DD al largo (gradi)	H al largo (m)	T (s)	tr (anni)
315,00	3,98	7,94	3
337,50	3,80	7,76	
360,00	3,62	7,56	
22,50	2,96	6,86	
45,00	2,49	6,28	
67,50	1,84	5,42	
315,00	5,77	9,57	10
337,50	5,91	9,69	
360,00	6,06	9,74	
22,50	4,77	8,66	
45,00	3,51	7,44	
67,50	2,58	6,40	
315,00	7,38	10,80	30
337,50	7,90	11,12	
360,00	8,63	11,65	
22,50	5,88	9,59	
45,00	4,67	8,48	
67,50	3,36	7,28	
315,00	8,10	11,27	50
337,50	8,94	11,87	
360,00	9,87	12,43	
22,50	5,88	9,59	
45,00	5,30	9,08	
67,50	3,36	7,28	

315,00	9,15	12,82	100
337,50	10,31	12,72	
360,00	11,62	13,47	
22,50	6,92	10,36	
45,00	6,23	9,80	
67,50	4,21	8,10	

Per verificare le trasformazioni che il treno d'onde subisce nel propagarsi verso riva, in relazione alla morfologia costiera, sono stati utilizzati due modelli numerici agli elementi finiti per lo studio della rifrazione e del frangimento e per la valutazione dello stato di agitazione in punti specifici, per diverse direzioni di provenienza del moto ondoso.

Sono stati, pertanto, applicati due diversi modelli numerici agli elementi finiti:

- A. STWAVE (Steady-State Spectral Wave Model);
- B. CGWAVE (Coastal Wave Prediction Model).

Tali modelli numerici utilizzano entrambi come interfaccia grafica il modello SMS (Surface modeling system) e sono modelli agli elementi finiti all'avanguardia per calcolare le altezze d'onda all'interno dell'area in esame per tutte le condizioni di moto ondoso incidente.

Con tali modelli è possibile studiare la rifrazione e gli effetti di shoaling derivati dalle variazioni di profondità; la diffrazione delle onde provocata dalle strutture emergenti e quella dovuta alle caratteristiche del fondale marino; la riflessione parziale o totale causata dalle strutture costiere e portuali; gli effetti d'attrito di fondo e frangimento delle onde.

Come dati di input per il modello STWAVE (rifrazione, frangimento ed effetti di shoaling) si sono considerate, quindi, mareggiate con tempi di ritorno di 3, 10, 30, 50 e 100 anni facendo riferimento ai risultati dello studio idraulico-marittimo precedentemente riassunti nella tabella sopra riportata.

I risultati di detto modello numerico applicato al caso in esame, hanno consentito di determinare le altezze d'onda, periodi e direzioni sottocosta da utilizzare come dati di input per il modello numerico CGWAVE, per la determinazione

dello stato di agitazione residua in prossimità dello specchio liquido ridossato dall'opera foranea in progetto.

2. Il modello numerico STWAVE

La valutazione della propagazione e trasformazione delle onde generate dal vento è un elemento fondamentale nella maggior parte delle progettazioni di ingegneria, come per esempio, nella previsione dei cambiamenti batimetrici e delle linea di riva, nella progettazione o ristrutturazione di opere costiere, nella valutazione delle condizioni di navigazione, nella previsione di evoluzione naturale delle baie costiere oppure per valutare gli effetti della costruzione di opere di ingegneria costiera. La propagazione delle onde sottocosta è condizionata dalla:

- morfologia dei fondali;
- correnti generate dalla marea;
- vento;
- onde;
- variazione del livello d'acqua dovuto alla marea o causato dalle presenza di strutture costiere.

L'utilizzo dei modelli numerici è diventato molto diffuso per rappresentare la trasformazione delle onde, principalmente a causa degli elevati costi relativi ai rilievi e agli studi su modello fisico.

Il modello statico alle differenze finite STWAVE (Resio 1987, 1988a, 1988b; Davis 1992; Smith, Resio, e Zundel 1999) per la propagazione delle onde sotto costa è semplice da applicare, flessibile e affidabile. I miglioramenti apportati al modello nella versione utilizzata (versione 3.0) rispetto alla versione precedente (2.0) includono:

- a) Il calcolo del radiation stress. Questo può essere utilizzato per il calcolo delle corrente indotte dal moto ondoso e dalle variazioni del livello d'acqua in un modello di circolazione. Tali caratteristiche possono essere utilizzate in un modello di Circolazione Avanzato 3-D (ADCIRC);
- b) l'efficienza del modello è cresciuta di 25 – 40 %. Il maggior incremento si riscontra per i casi che includono l'interazione corrente-moto ondoso.;

- c) l'introduzione di un'opzione di input ICUP = 2 per leggere un singolo campo di corrente in corrispondenza di uno spettro multiplo;
- d) L'introduzione di un ulteriore output, che individua le celle dove si verifica il frangimento delle onde;
- e) Un formato riveduto dell' output spettrale. Queste modifiche eliminano un errore nel formato di lettura dello spettro per elevati livelli di energia;
- f) Una revisione dei parametri ondosi nelle condizioni al contorno rispetto alla versione precedente nella quale le condizioni a contorno includevano sia le celle a terra che quelle a mare;
- g) Il perfezionamento dell'interfaccia grafica (SMS), software di appoggio per l'elaborazione della griglia , per interpolazione dei campi di corrente, per la generazione dello spettro d'onda, per la visualizzazione degli output del modello. la versione 8.1 del SMS fornisce miglioramenti significativi nella conversione dei sistemi di coordinate, per l'interpolazione dei campi di corrente, per la visualizzazione degli spettri di onde input/output.

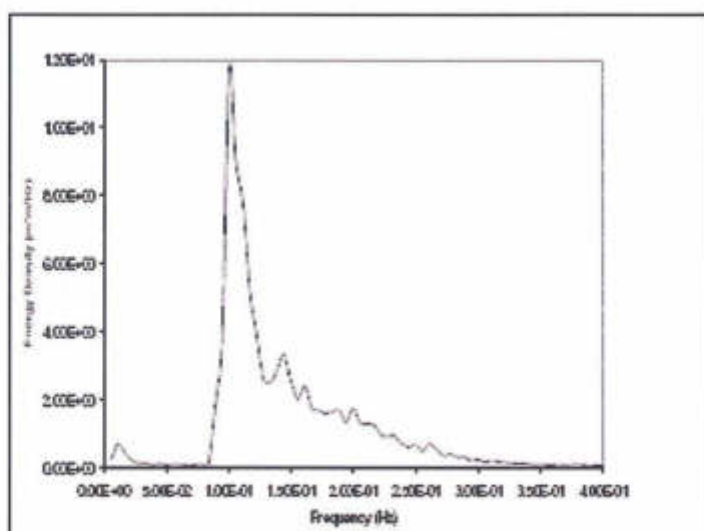
Lo scopo dell'applicazione dei modelli di trasformazione ondosa sottocosta è di descrivere i cambiamenti quantitativi dei parametri ondosi (altezza d'onda, periodo, direzione, e la forma dello spettro) dal largo a sottocosta (profondità usuale di 40 m o meno).

In acque relativamente profonde, il campo ondoso è moderatamente omogeneo su una scala di chilometri; ma sottocosta, dove le onde sono molto influenzate dalla variazione della batimetria, dal livello acqueo e dalle correnti, i parametri delle onde possono variare significativamente su una scala dell'ordine delle decine di metri.

Le condizioni delle onde al largo sono di solito disponibili da misure standard o da previsioni a scala ondosa globale o regionale. I valori delle onde sottocosta sono necessari per realizzare la maggior parte dei progetti ingegneria costiera, per il calcolo del trasporto dei sedimenti dovuto alle correnti litoranee, per considerare i fenomeni di wave setup e runup, per l'oscillazione delle onde nelle darsene, o per calcolare gli effetti sulle strutture costiere. I gradienti longitudinali e trasversali di altezza di onda e direzione risultano importanti per valutare alcuni problemi nella progettazione di strutture costiere.

STWAVE simula i fenomeni di rifrazione e shoaling dovuti all'azione del moto ondoso, rifrazione e shoaling dovuti alle correnti, profondità e ripidità dovuti al frangimento delle onde, diffrazione, propagazione delle onde generate dal vento e interazione onda-onda.

Uno spettro ondoso è una rappresentazione statistica di un campo ondoso. Concettualmente, un spettro è una sovrapposizione lineare di onde monocromatiche. Uno spettro descrive la distribuzione dell'energia ondosa come una funzione della frequenza (spettro monodimensionale) oppure la frequenza e direzione (spettro bidimensionale). Un esempio di un spettro ondoso monodimensionale è rappresentato nella figura seguente:



Il periodo di picco dello spettro è il reciproco della frequenza del picco dello spettro. L'altezza del onda (significativa o altezza di onda al momento-zero) è pari a quattro volte la radice quadrata dell'area sottesa dalla curva dello spettro. Per esempio, nello spettro rappresentato in figura, la frequenza di picco è di 0,105 Hz, il periodo di picco è 9,5 sec., e l'altezza d'onda è 2,8 m.

STWAVE è fondato sulla teoria che le fasi relative delle componenti spettrali sono random.

Nelle applicazioni pratiche, l'informazione sulla fase dell'onda lungo un dominio di un modello è difficilmente calcolabile come sufficiente accuratezza per

poter implementare un modello fase-risolutivo. Di solito, l'informazione sulla fase dell'onda è necessaria soltanto per calcolare le variazioni dell'altezza d'onda in prossimità di strutture costiere, nei campi di riflessione e diffrazione. In questi casi è necessario l'applicazione di un modello fase-resolving.

Le basi della teoria del modello STWAVE sono:

1. *scarpata di fondo a debole pendenza e trascurabile riflessione di onda.* STWAVE è un modello semipiano, ovvero l'energia d'onda può propagarsi solo dal largo verso sottocosta ($\pm 87.5^\circ$ dall'asse x della griglia, che è di solito orientato lungo la direzione normale alla linea di costa). Le onde riflesse dalla linea di costa oppure dalle caratteristiche del fondale si muovono in direzione opposta a tale verso e pertanto risultano trascurabili.
2. *condizioni ondose a largo omogenee.* Le variazioni dello spettro d'onda lungo il contorno del dominio del modello raramente sono note e per domini dell'ordine di decine di km è plausibile che risultino trascurabili. Quindi lo spettro di input in STWAVE è costante lungo tutto il contorno esterno;
3. *condizioni statiche di onde corrente e vento.* STWAVE è un modello basato su condizioni statiche. Ciò riduce i tempi di elaborazione. Per la generazione delle onde la teoria della condizione statica implica che i venti agiscano staticamente per un tempo sufficientemente lungo per ottenere fetch limitati o condizioni pienamente sviluppate (le onde non sono limitate dalla durata dei venti).
4. *rifrazione e shoaling.* STWAVE prevede soltanto rifrazione e shoaling lineare, quindi non rappresenta la asimmetria delle onde.
5. *corrente uniforme.* L'interazione onda-corrente del modello si basa sulla corrente che rimane costante lungo la colonna d'acqua. Se si verificano diversi gradienti di corrente lungo la verticale, la loro ripercussione sui fenomeni di rifrazione e shoaling non viene rappresentata nel modello.
6. *attrito del fondale trascurabile.* La distanza di propagazione in un modello sottocosta è relativamente breve (decine di km), per cui la dissipazione totale dovuta all'attrito del fondale è trascurabile.

7. *Radiation stress lineare.* Il Radiation stress viene calcolato in base alla teoria dell'onda lineare.

L'interazione delle onde con le correnti viene considerata rispetto ad un sistema di riferimento che si muove con la corrente. I parametri d'onda in questo sistema sono indicate con il pedice r, che sta per "relativo" alla corrente; i parametri nel sistema di riferimento fisso sono invece indicati con il pedice a, che sta per "assoluto". La relazione di dispersione dell'onda è espressa nel sistema di riferimento relativo come (Jonsson 1990 e altri):

$$\omega_r^2 = gk \tanh kd \quad (1)$$

dove

ω = frequenza angolare

g = accelerazione di gravità

k = numero d'onda

d = profondità dell'acqua

Nel sistema di riferimento assoluto, l'equazione della dispersione è:

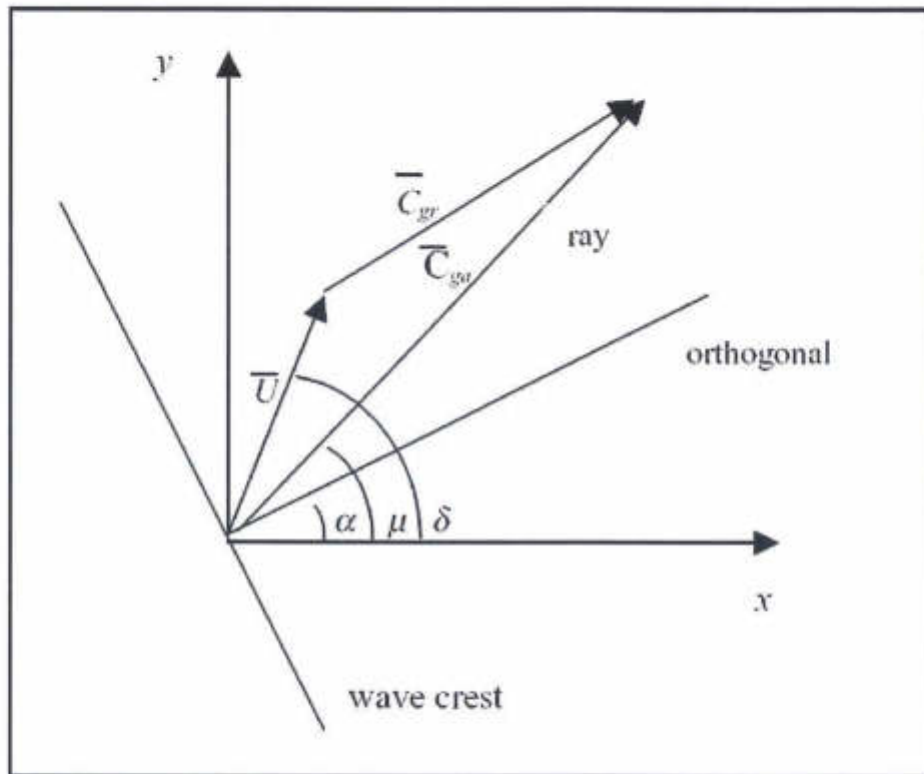
$$\omega_a = \omega_r + kU \cos(\delta - \alpha) \quad (2)$$

dove

U = velocità della corrente

δ = direzione della corrente rispetto all'asse x del sistema di riferimento

α = direzione ortogonale all'onda (normale alla cresta dell'onda) (vedi la figura riportata di seguito)



Il numero d'onda viene determinato sostituendo l'Equazione 1 nella 2 e risolvendo iterativamente. E' importante inoltre segnalare che il numero d'onda e la lunghezza d'onda ($L = 2\pi/k$) sono gli stessi in entrambi i sistemi di riferimento.

Al fine di studiare la rifrazione e lo shoaling è necessario determinare inoltre la celerità, C , e la celerità di gruppo, C_g , in entrambi i sistemi di riferimento. Nel sistema di riferimento relativo alla corrente si hanno:

$$C_r = \frac{\omega_r}{k} \quad (3)$$

$$C_{gr} = 0.5C_r \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (4)$$

Sia la celerità relativa che la celerità di gruppo hanno come direzione α , corrispondente alla direzione ortogonale all'onda. Di conseguenza nel sistema di riferimento assoluto si ha che:

$$C_a = C_r + U \cos(\delta - \alpha) \quad (5)$$

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i \quad (6)$$

dove il pedice i è una notazione vettoriale che sta per indicare le componenti nella direzione x e y del sistema di riferimento assoluto. La direzione della celerità assoluta corrisponde naturalmente con l'ortogonale all'onda. La direzione della celerità di gruppo assoluta rappresenta la direzione di propagazione dell'energia dell'onda (wave ray), definita da:

$$\mu = \tan^{-1} \left(\frac{C_{gr} \sin \alpha + U \sin \delta}{C_{gr} \cos \alpha + U \cos \delta} \right) \quad (7)$$

La distinzione tra la direzione di propagazione dell'onda e dell'energia è importante nella descrizione dell'interazione onda-corrente.

La direzione ortogonale all'onda in condizioni stazionarie è data da (Mei 1989; Jonsson 1990):

$$C_{ga} \frac{D\alpha}{DR} = - \frac{C_r k}{\sinh 2kd} \frac{Dd}{Dn} - \frac{k_l}{k} \frac{DU_l}{Dn} \quad (8)$$

dove

D = derivata

R = coordinata nella direzione di propagazione dell'energia

n = coordinata normale all'ortogonale dell'onda

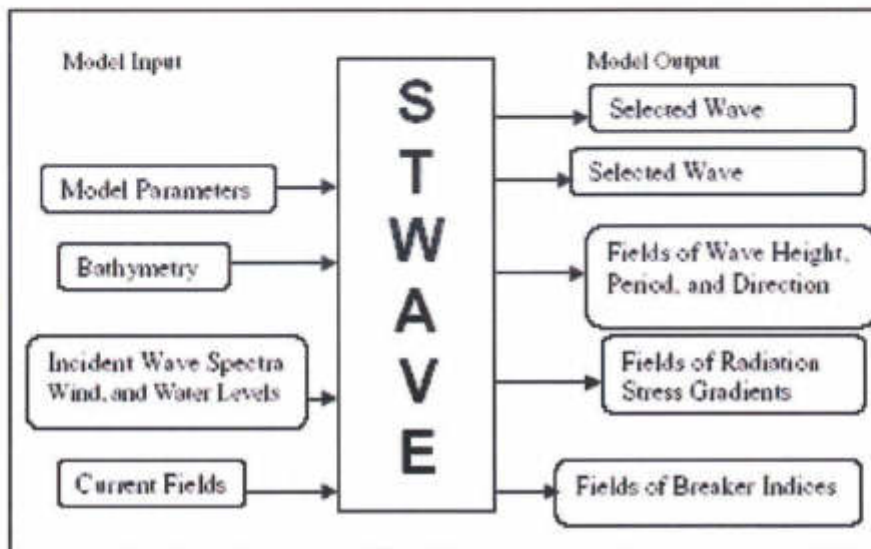
L'equazione che governa la conservazione dello spettro dell'onda lungo la direzione di propagazione dell'energia è data da (Jonsson 1990):

$$(C_{ga})_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E(\omega_a, \alpha)}{\omega_r} = \sum \frac{S}{\omega_r} \quad (9)$$

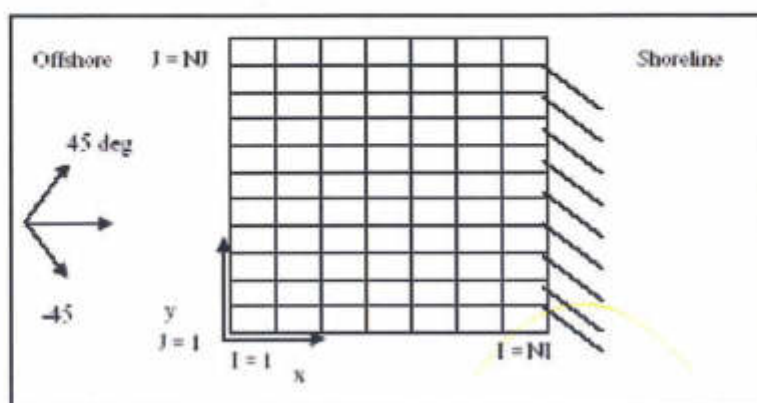
dove

E = densità di energia dell'onda diviso per $(\rho_w g)$, dove ρ_w è la densità dell'acqua

STWAVE ha quattro file di input. Tali file specificano i parametri del modello: batimetria, spettro d'onde incidente e campi di corrente. Il campo di corrente è un dato opzionale e viene richiesto solo nelle interazione onde-corrente. Gli altri 3 dati sono invece sempre necessari. I file di input sono facilmente generabili usando l'interfaccia SMS. Una schematizzazione dei file di input e output di STWAVE è di seguito riportata:



STWAVE è un modello numerico alle differenze finite basato su una griglia cartesiana. Le celle della griglia sono quadrate ($Dx=Dy$). Un es. di schematizzazione della griglia è riportata nella seguente figura:



STWAVE opera con un sistema di riferimento di coordinate locale, con l'asse x orientato nella direzione trasversale (origine al largo) e l'asse y orientato lungo la costa.

L'orientamento dell'asse x ($\pm 87.5^\circ$) definisce il piano rappresentato dal modello. L'asse y è generalmente allineato con il contorno inferiore. Gli angoli sono considerati dal punto di vista matematico, misurati in senso antiorario a partire dall'asse x.

I contorni laterali del modello possono essere individuati come "terra" o come "acqua", specificando la quota delle celle, positiva (acqua) o negativa (terra). Chiaramente specificando come terra tutti contorni della griglia si otterranno risultati differenti rispetto al caso in cui i contorni laterali siano indicati come acqua.

I contorni definiti come terra riducono la propagazione delle onde in prossimità del contorno poiché ne bloccano la propagazione. Se invece i contorni sono definiti come acqua, viene applicato un tipo di contorno a gradiente zero, che consente all'energia, compatibilmente con le celle vicine, di propagarsi dentro o fuori il dominio lungo il contorno laterale.

I risultati del modello numerico STWAVE sono presentati di solito sotto forma di grafici contenenti le altezze d'onda in specifici punti d'analisi, interni all'area d'interesse. Il modello STWAVE rilascia anche altri grafici rappresentativi, tra l'altro, della fascia di frangimento.

Le direzioni di attacco del moto ondoso al largo prese in considerazione sono 315.00°N , 337.50°N , 360.00°N , 22.50°N , 45.00°N e 67.50°N .

Si è definita una prima maglia agli elementi finiti per le direzioni di attacco del moto ondoso al largo 315.00°N , 337.50°N e 360.00°N e una seconda maglia per le

direzioni di attacco del moto ondoso provenienti da 22.50 °N, 45.00 °N e 67.50 °N al fine di valutare con maggiore accuratezza e precisione il corretto avanzamento delle onde verso la linea di riva.

In particolare, i risultati delle elaborazioni eseguite con il modello STWAVE, applicato allo stato attuale, sono riportate nelle figure di seguito elencate:

- Fig. 2a – Maglia elementi finiti
- Fig. 2b – Batimetria
- Fig. 2.1.1 – Altezze d'onda – dir = 315.00 °N – tr = 3 anni
- Fig. 2.1.2 – Piano d'onda – dir = 315.00 °N – tr = 3 anni
- Fig. 2.1.3 – Altezze d'onda – dir = 337.50 °N – tr = 3 anni
- Fig. 2.1.4 – Piano d'onda – dir = 337.50 °N – tr = 3 anni
- Fig. 2.1.5 – Altezze d'onda – dir = 360.0 °N – tr = 3 anni
- Fig. 2.1.6 – Piano d'onda – dir = 360.00 °N – tr = 3 anni
- Fig. 2.1.7 – Altezze d'onda – dir = 315.00 °N – tr = 10 anni
- Fig. 2.1.8 – Piano d'onda – dir = 315.00 °N – tr = 10 anni
- Fig. 2.1.9 – Altezze d'onda – dir = 337.50 °N – tr = 10 anni
- Fig. 2.1.10 – Piano d'onda – dir = 337.50 °N – tr = 10 anni
- Fig. 2.1.11 – Altezze d'onda – dir = 360.00 °N – tr = 10 anni
- Fig. 2.1.12 – Piano d'onda – dir = 360.00 °N – tr = 10 anni
- Fig. 2.1.13 – Altezze d'onda – dir = 315.00 °N – tr = 30 anni
- Fig. 2.1.14 – Piano d'onda – dir = 315.00 °N – tr = 30 anni
- Fig. 2.1.15 – Altezze d'onda – dir = 337.50 °N – tr = 30 anni
- Fig. 2.1.16 – Piano d'onda – dir = 337.50 °N – tr = 30 anni
- Fig. 2.1.17 – Altezze d'onda – dir = 360.00 °N – tr = 30 anni
- Fig. 2.1.18 – Piano d'onda – dir = 360.00 °N – tr = 30 anni
- Fig. 2.1.19 – Altezze d'onda – dir = 315.00 °N – tr = 50 anni
- Fig. 2.1.20 – Piano d'onda – dir=315.00 °N – tr = 50 anni
- Fig. 2.1.21 – Altezze d'onda – dir=337.50 °N – tr = 50 anni
- Fig. 2.1.22 – Piano d'onda – dir=337.50 °N – tr = 50 anni
- Fig. 2.1.23 – Altezze d'onda – dir=360.00 °N – tr = 50 anni
- Fig. 2.1.24 – Piano d'onda – dir=360.00 °N – tr = 50 anni

- Fig. 2.1.25 – Altezze d'onda – dir = 315.00 °N – tr = 100 anni
- Fig. 2.1.26 – Piano d'onda – dir = 315.00 °N – tr = 100 anni
- Fig. 2.1.27 – Altezze d'onda – dir = 337.50 °N – tr = 100 anni
- Fig. 2.1.28 – Piano d'onda – dir = 337.50 °N – tr = 100 anni
- Fig. 2.1.29 – Altezze d'onda – dir = 360.00 °N – tr = 100 anni
- Fig. 2.1.30 – Piano d'onda – dir = 360.00 °N – tr = 100 anni

- Fig. 2.1a – Maglia elementi finiti
- Fig. 2.1b – Batimetria
- Fig. 2.1.1.1 – Altezze d'onda – dir = 22.50 °N – tr = 3 anni
- Fig. 2.1.1.2 – Piano d'onda – dir = 22.50 °N – tr = 3 anni
- Fig. 2.1.1.3 – Altezze d'onda – dir = 45.00 °N – tr = 3 anni
- Fig. 2.1.1.4 – Piano d'onda – dir = 45.00 °N – tr = 3 anni
- Fig. 2.1.1.5 – Altezze d'onda – dir = 67.50 °N – tr = 3 anni
- Fig. 2.1.1.6 – Piano d'onda – dir=67.50 °N – tr = 3 anni
- Fig. 2.1.1.7 – Altezze d'onda – dir = 22.50 °N – tr = 10 anni
- Fig. 2.1.1.8 – Piano d'onda – dir = 22.50 °N – tr = 10 anni
- Fig. 2.1.1.9 – Altezze d'onda – dir = 45.00 °N – tr = 10 anni
- Fig. 2.1.1.10 – Piano d'onda – dir = 45.00 °N – tr = 10 anni
- Fig. 2.1.1.11 – Altezze d'onda – dir = 67.50 °N – tr = 10 anni
- Fig. 2.1.1.12 – Piano d'onda – dir = 67.50 °N – tr = 10 anni
- Fig. 2.1.1.13 – Altezze d'onda – dir = 22.50 °N – tr = 30 anni
- Fig. 2.1.1.14 – Piano d'onda – dir = 22.50 °N – tr = 30 anni
- Fig. 2.1.1.15 – Altezze d'onda – dir = 45.00 °N – tr = 30 anni
- Fig. 2.1.1.16 – Piano d'onda – dir = 45.00 °N – tr = 30 anni
- Fig. 2.1.1.17 – Altezze d'onda– dir = 67.50 °N – tr = 30 anni
- Fig. 2.1.1.18 – Piano d'onda – dir = 67.50 °N – tr = 30 anni
- Fig. 2.1.1.29 – Altezze d'onda – dir = 22.50 °N – tr = 50 anni
- Fig. 2.1.1.20 – Piano d'onda – dir = 22.50 °N – tr = 50 anni
- Fig. 2.1.1.21 – Altezze d'onda – dir = 45.00 °N – tr = 50 anni
- Fig. 2.1.1.22 – Piano d'onda – dir = 45.00 °N – tr = 50 anni
- Fig. 2.1.1.23 – Altezze d'onda – dir = 67.50 °N – tr = 50 anni

Fig. 2.1.1.24 – Piano d'onda – dir = 67.50 °N – tr = 50 anni
 Fig. 2.1.1.25 – Altezze d'onda – dir = 22.50 °N – tr = 100 anni
 Fig. 2.1.1.26 – Piano d'onda – dir = 22.50 °N – tr = 100 anni
 Fig. 2.1.1.27 – Altezze d'onda – dir = 45.00 °N – tr = 100 anni
 Fig. 2.1.1.28 – Piano d'onda – dir = 45.00 °N – tr = 100 anni
 Fig. 2.1.1.29 – Altezze d'onda – dir = 67.50 °N – tr = 100 anni
 Fig. 2.1.1.30 – Piano d'onda – dir = 67.50 °N – tr = 100 anni

Fig. 2.2.1 – Fascia di frangimento – dir = 315.00 °N – tr = 3 anni
 Fig. 2.2.2 – Fascia di frangimento – dir = 337.50 °N – tr = 3 anni
 Fig. 2.2.3 – Fascia di frangimento – dir = 360.00 °N – tr = 3 anni
 Fig. 2.2.4 – Fascia di frangimento – dir = 22.50 °N – tr = 3 anni
 Fig. 2.2.5 – Fascia di frangimento – dir = 45.00 °N – tr = 3 anni
 Fig. 2.2.6 – Fascia di frangimento – dir = 67.50 °N – tr = 3 anni
 Fig. 2.2.7 – Fascia di frangimento – dir = 315.00 °N – tr = 10 anni
 Fig. 2.2.8 – Fascia di frangimento – dir = 337.50 °N – tr = 10 anni
 Fig. 2.2.9 – Fascia di frangimento – dir = 360.00 °N – tr = 10 anni
 Fig. 2.2.10 – Fascia di frangimento – dir = 22.50 °N – tr = 10 anni
 Fig. 2.2.11 – Fascia di frangimento – dir = 45.00 °N – tr = 10 anni
 Fig. 2.2.12 – Fascia di frangimento – dir = 67.50 °N – tr = 10 anni
 Fig. 2.2.13 – Fascia di frangimento – dir = 315.00 °N – tr = 30 anni
 Fig. 2.2.14 – Fascia di frangimento – dir = 337.50 °N – tr = 30 anni
 Fig. 2.2.15 – Fascia di frangimento – dir = 360.00 °N – tr = 30 anni
 Fig. 2.2.16 – Fascia di frangimento – dir = 22.50 °N – tr = 30 anni
 Fig. 2.2.17 – Fascia di frangimento – dir = 45.00 °N – tr = 30 anni
 Fig. 2.2.18 – Fascia di frangimento – dir = 67.50 °N – tr = 30 anni
 Fig. 2.2.19 – Fascia di frangimento – dir = 315.00 °N – tr = 50 anni
 Fig. 2.2.20 – Fascia di frangimento – dir = 337.50 °N – tr = 50 anni
 Fig. 2.2.21 – Fascia di frangimento – dir = 360.00 °N – tr = 50 anni
 Fig. 2.2.22 – Fascia di frangimento – dir = 22.50 °N – tr = 50 anni
 Fig. 2.2.23 – Fascia di frangimento – dir = 45.00 °N – tr = 50 anni
 Fig. 2.2.24 – Fascia di frangimento – dir = 67.50 °N – tr = 50 anni

- Fig. 2.2.25 – Fascia di frangimento – dir = 315.00 °N – tr = 100 anni
- Fig. 2.2.26 – Fascia di frangimento – dir = 337.50 °N – tr = 100 anni
- Fig. 2.2.27 – Fascia di frangimento – dir = 360.00 °N – tr = 100 anni
- Fig. 2.2.28 – Fascia di frangimento – dir = 22.50 °N – tr = 100 anni
- Fig. 2.2.29 – Fascia di frangimento – dir = 45.00 °N – tr = 100 anni
- Fig. 2.2.30 – Fascia di frangimento – dir = 67.50 °N – tr = 100 anni

L'applicazione di detto modello numerico al caso in esame, ha consentito di determinare le altezze d'onda, periodi e direzioni sottocosta da utilizzare come dati di input per il modello numerico CGWAVE per il calcolo dello stato di agitazione residua nello specchio acqueo ridossato dall' opera foranea in progetto.

Il modello STWAVE, infatti, è applicabile su profondità comprese tra 15 e 60 m, mentre per profondità minori come quelle su cui si attesta l'opera in progetto, il modello numerico più appropriato è CGWAVE (vedi paragrafo 3), specifico per acque basse ovvero inferiori a 15 m, al quale sono stati forniti come dati di input i valori di altezza d'onda, periodo e direzione sottocosta, ricavati con STWAVE.

Si è, quindi, considerato un punto di osservazione (indicato nelle figure elaborate) nel quale sono state ricavare le caratteristiche ondose sottocosta (altezza e direzione sottocosta).

I valori di output del modello STWAVE, nel punto considerato, sono di seguito riassunti nella seguente tabella:

MALFA - SCALO GALERA – MODELLO NUMERICO STWAVE					
DD al largo (gradi)	H al largo (m)	T (s)	H sottocosta (m)	DD sottocosta (gradi)	tr (anni)
315,00	3,98	7,94	3,51	323,00	3
337,50	3,80	7,76	3,51	340,00	
360,00	3,62	7,56	3,37	359,00	
22,50	2,96	6,86	2,79	21,00	
45,00	2,49	6,28	2,35	42,00	
67,50	1,84	5,42	1,73	63,00	
315,00	5,77	9,57	4,97	327,00	10
337,50	5,91	9,69	5,34	342,00	
360,00	6,06	9,74	5,48	358,00	
22,50	4,77	8,66	4,42	20,00	
45,00	3,51	7,44	3,24	40,00	
67,50	2,58	6,40	2,34	60,00	
315,00	7,38	10,80	6,31	330,00	30
337,50	7,90	11,12	7,14	344,00	
360,00	8,63	11,65	7,82	358,00	
22,50	5,88	9,59	5,46	19,00	
45,00	4,67	8,48	4,30	38,00	
67,50	3,36	7,28	2,98	57,00	
315,00	8,10	11,27	6,92	331,00	50
337,50	8,94	11,87	8,12	344,00	
360,00	9,87	12,43	9,01	358,00	
22,50	5,88	9,59	5,46	19,00	
45,00	5,30	9,08	4,90	37,00	
67,50	3,36	7,28	2,98	57,00	
315,00	9,15	12,82	7,87	333,00	100
337,50	10,31	12,72	9,44	345,00	
360,00	11,62	13,47	9,61	358,00	
22,50	6,92	10,36	6,47	18,00	
45,00	6,23	9,80	5,81	36,00	
67,50	4,21	8,10	3,71	55,00	

3. Il modello numerico CGWAVE

A partire dagli anni '80 la ricerca in ambito costiero ha focalizzato l'attenzione sull'importanza degli effetti combinati della rifrazione e della diffrazione, si sono così iniziati a sviluppare nuove teorie e i relativi modelli numerici. Esistono infatti diverse teorie riguardanti il moto ondoso che possono adeguatamente descrivere l'effetto combinato della rifrazione e diffrazione subita dall'onda andando da largo verso riva.

Una di queste è la "mild-slope equation" (MSE). Questa è un'equazione differenziale parziale di tipo ellittico, mediata nella profondità, in cui si ipotizza che la variazione di profondità sia di non notevole entità; allo stesso modo non deve essere eccessivo il rapporto tra la profondità stessa e la lunghezza d'onda, da ciò deriva l'acronimo "mild-slope" (leggera pendenza).

Per risolvere la MSE è necessaria una elevata potenza di calcolo, questo perché siamo in presenza di una equazione bidimensionale, che deve essere quindi risolta con appropriate condizioni al contorno; l'intero dominio di interesse deve essere discretizzato e risolto simultaneamente e la dimensione degli elementi deve essere abbastanza ridotta, in modo che siano presenti da 10 a 15 nodi all'interno di ogni lunghezza d'onda. Tali requisiti pongono esigenze importanti alle risorse di un computer quando si applicano questi modelli su grandi domini costieri.

Un difficile problema nella predizione del comportamento dell'onda sottocosta è determinare dove avviene la rottura dell'onda (linea di frangimento). Nei modelli numerici attualmente usati, questa posizione è conosciuta a priori, ed è determinata di solito con criteri ad hoc basati sul rapporto tra l'altezza d'onda e la profondità.

Una versione semplificata della mild-slope equation è conosciuta come la "parabolic approximation" (PA), che normalmente riduce di molto gli eccessivi requisiti computazionali del modello MSE tramite l'ulteriore ipotesi, e semplificazione, che può rendere le predizioni numeriche imprecise e inappropriate per molti problemi di ingegneria marittima e costiera.

L'unica utilità della approssimazione parabolica (PA) è quella di convertire la MSE in un set di equazioni semplificate che descrivono la propagazione dell'onda in una fissata direzione mentre la rifrazione e la diffrazione lungo le direzioni laterali sono ancora considerate. Il grande vantaggio della PA è la sua efficienza numerica,

può essere risolta abbastanza facilmente con metodi numerici e così può essere usata per la predizione della trasformazione delle onde su una regione costiera relativamente grande. Quando la riflessione ha una maggiore importanza nei processi in esame, come nei porti, dovrebbe essere usata la MSE dato che la PA ignora la riflessione. Bisogna anche ricordare che la approssimazione parabolica assume che la variazione dell'ampiezza dell'onda nella direzione di propagazione dell'onda (direzione x) è maggiore rispetto a quella presente nella direzione trasversale (direzione y).

Il modello matematico utilizzato nel presente studio della propagazione del moto ondoso è applicabile per la valutazione delle trasformazioni subite dalle mareggiate in porti, aree costiere aperte, insenature costiere, attorno alle isole, ed in corrispondenza di strutture fisse o galleggianti. Esso simula l'effetto combinato della rifrazione-diffrazione incluso nella originale mild-slope equation (MSE), inoltre il modello include l'effetto della dissipazione dell'onda dovuta a: attrito, frangimento, dispersione non lineare dell'ampiezza, e perdite all'imboccatura dei porti.

3.1 - Equazioni fondamentali

La soluzione dell'equazione bidimensionale ellittica "mild-slope" (MSE) è un metodo molto autorevole per la modellazione di onde a superficie libera in aree costiere (es.: Chen e Houston, 1987; Chen, 1990; Xu e Panchang, 1993; Mei, 1983; Berkhoff, 1976; Kostense et al., 1986; Tsay and Liu, 1983). Tale equazione può essere scritta come:

$$\nabla(CC_{\varepsilon} \cdot \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_{\varepsilon}}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \quad (1)$$

dove

$\hat{\eta}(x, y)$	funzione complessa della quota di superficie, da cui è possibile stimare l'altezza dell'onda
σ	frequenza dell'onda in esame (in radianti/secondo)
$C(x, y)$	celerità dell'onda = σ / k

$C_g(x, y)$ celerità di gruppo $= \partial \sigma / \partial k = nC$ con

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (2)$$

numero d'onda $(= 2\pi/L)$, legato alla profondità locale

$d(x, y)$ attraverso la relazione lineare della dispersione:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \quad (3)$$

L' equazione 1 simula i fenomeni della rifrazione, diffrazione e riflessione in domini costieri di forma arbitraria. Comunque, anche molti altri meccanismi influenzano il comportamento delle onde in area costiera. La MSE può essere modificata come segue per includere l'effetto della dissipazione dovuta all'attrito (Dalrymple et al. 1984; Chen 1986; Liu e Tsay 1985) e al frangimento (Dally et al. 1985; De Girolamo et al. 1988):

$$\nabla(C C_g \cdot \nabla \hat{\eta}) + \left(\frac{C_g}{C} \sigma^2 + i \sigma w + i C_g \sigma \gamma \right) \hat{\eta} = 0 \quad (4)$$

dove w è un fattore di attrito e γ è un parametro di frangimento. Seguendo gli studi fatti da Dalrymple et al. (1984) si ottiene la seguente formula per il fattore di smorzamento:

$$w = \left(2n \frac{\sigma}{k} \right) \left[\frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd) \sinh kd} \right] \quad (5)$$

dove $a (= H/2)$ è l'ampiezza dell'onda e f_r è un coefficiente di attrito stabilito dall'utente. Il coefficiente f_r dipende dal numero di Reynolds e dalla scabrezza del fondo e può essere ottenuto da Madsen (1976) e Dalrymple et al. (1984). Normalmente, i valori di f_r si avvicinano ai corrispondenti valori del coefficiente di Manning "n". Per quanto riguarda il parametro di frangimento γ , viene utilizzata la seguente formulazione (Dally et al. 1985, Demirbilek 1994, Demirbilek et al. 1996):

$$\gamma = \frac{\chi}{d} \left(1 - \frac{\Gamma^2 d^2}{4 a^2} \right) \quad (6)$$

dove X è una costante (viene utilizzato un valore di 0.15 come indicato negli studi di Dally et al. (1985)) e F è una costante empirica (viene usato nel modello un valore di 0.4).

In aggiunta ai precedenti meccanismi, con la MSE possono essere simulate le onde non lineari. Questo è ottenuto considerando la dispersione come funzione dell'ampiezza. La relazione della dispersione non lineare, usata al posto della Equazione 3, è la seguente:

$$\sigma^2 = gk \left[1 + (ka)^2 F_1 \tanh^5 kd \right] \tanh [kd + kaF_2] \quad (7)$$

dove

$$F_1 = \frac{\cosh(4kd) - 2 \tanh^2(kd)}{8 \sinh^4(kd)} \quad (8a)$$

$$F_2 = \left[\frac{kd}{\sinh(kd)} \right] \quad (8b)$$

3.2 - Condizioni al contorno

Lungo muri verticali rigidi e impermeabili, l'assenza di moto in direzione ortogonale alla superficie dà la condizione

$$\frac{\partial \hat{\eta}}{\partial n} = \alpha \hat{\eta} \quad (9)$$

dove $\alpha = \alpha_1 + i\alpha_2$ è un coefficiente complesso. Per semplicità, α è rappresentato generalmente come

$$\alpha = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad (10)$$

dove K_r è il coefficiente di riflessione (Tsay e Liu, 1983; Chen e Houston, 1987).

Lungo il confine del dominio del modello corrispondente al mare aperto (*open boundary*), dove le onde uscenti si devono propagare all'infinito, viene applicata la condizione di irraggiamento di Sommerfeld:

$$\lim_{kr \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \hat{\eta}_s \rightarrow 0 \quad (11)$$

dove $\hat{\eta}_s$ è il potenziale di diffusione. E' stato dimostrato (Mei, 1983) che tale potenziale di diffusione rappresenta una soluzione della mild-slope equation (MSE) che soddisfa la condizione di irraggiamento (Equazione 11), e può essere espressa come:

$$\hat{\eta}_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(kr) (\alpha_n \cos n\theta + \beta_n \sin n\theta) \quad (12)$$

dove $H_n(kr)$ sono le funzioni di Hankel del primo tipo. Le funzioni di Hankel del secondo tipo non soddisfano la condizione di irraggiamento di Sommerfeld all'infinito e sono quindi escluse dalla (12).

D'altro canto, il potenziale di diffusione dato dalla (12) richiede che il dominio esterno abbia una profondità costante. Inoltre per i casi riguardanti i porti (Fig.1), il potenziale di diffusione, come descritto nella (12), richiede che le linee di costa nella regione esterna (fuori dal dominio di calcolo) siano dritte, collineari e totalmente riflettenti. Per ovviare a questi problemi, Xu, Panchang e Demirbilek (1996) hanno sviluppato uno schema alternativo per il trattamento del contorno aperto (*open boundary*):

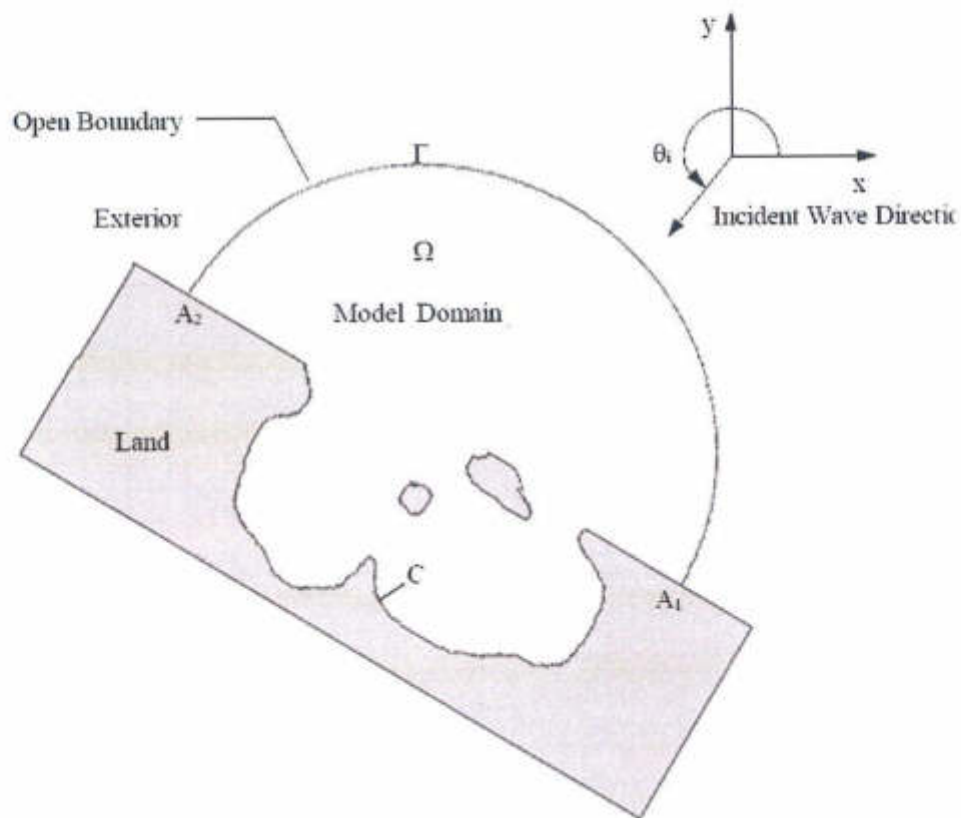
$$\frac{\partial \hat{\eta}_s}{\partial r} + p \hat{\eta}_s + q \frac{\partial \hat{\eta}_s^2}{\partial \theta^2} = 0 \quad (13)$$

dove

$$p = \frac{k^2 r^2 + k_0^2 r^2 + ik_0 r + \frac{1}{4}}{2ik_0 r^2} \quad \text{and} \quad q = \frac{1}{2ik_0 r^2} \quad (14)$$

Nella Equazione 14, k_0 può essere considerato come il numero d'onda corrispondente alla profondità media lungo il contorno aperto (*open boundary*).

All'interno del dominio Ω viene applicata la mild-slope equation (MSE).
L'approssimazione parabolica (13) viene usata soltanto lungo l'arco semicircolare Γ come condizione sul contorno aperto.



Schema del dominio del modello

3.3 - Applicazione del modello numerico nel caso in esame

Al fine di valutare le caratteristiche ondose in prossimità dell'opera foranea in progetto, si è proceduto allo studio della trasformazione subita dalle onde per effetto di diffrazione, rifrazione, frangimento e riflessione.

Lo studio permette di valutare la configurazione, in termini di collocazione planimetrica, che meglio risponde alle esigenze di difesa della costa e di fruibilità del mare.

Lo studio della diffrazione consiste in quell'insieme fenomenologico conseguente alla propagazione delle onde in base a leggi che non seguono quelle della propagazione rettilinea nei mezzi omogenei, secondo i dettami dell'ottica geometrica.

Occorre precisare che il fenomeno della diffrazione si manifesta in modo sensibilmente apprezzabile solo se le onde incontrano un ostacolo capace di limitare l'estensione utile dei fronti a dimensioni dell'ordine della lunghezza d'onda.

L'esame teorico della diffrazione del moto ondoso viene, com'è noto, condotto con gli stessi metodi elaborati per lo studio degli analoghi fenomeni nell'ottica e nell'acustica.

Il fenomeno della diffrazione può essere, infatti, spiegato con il seguente principio di Huygens-Fresnel.

"Sia S una sorgente puntiforme ed s una superficie chiusa che la contiene in cui ogni elemento dA diviene a sua volta sorgente di onde elementari che, con opportune intensità e fase, si propagano in tutte le direzioni".

Ciò, ovviamente, comporta che in un punto posto al di fuori della superficie s , l'intensità della perturbazione che vi giunge è la risultante dell'interferenza di tutte le onde elementari emesse da ciascun elemento di s ; allorquando, in particolare, la superficie s sia una superficie d'onda, le diverse onde elementari risultano in fase.

Ove, per ricondurre subito il discorso al problema della diffrazione, vi sia un ostacolo che taglia la superficie s , in un punto al di fuori di essa perverranno solo le onde elementari emesse dalla porzione di s non intercettata dall'ostacolo.

Ogni punto del fronte che avanza deve, pertanto, essere considerato come il centro di una perturbazione secondaria che si dirama in tutte le direzioni.

La successiva configurazione assunta dai fronti d'onda, dopo un intervallo finito di tempo, nasce dall'involuppo delle suddette perturbazioni secondarie.

Allorquando un treno d'onde supera un'opera foranea, accade che un'aliquota di energia posseduta dal treno d'onde incidente si propaga a tergo dell'ostacolo. Ove ciò non fosse, infatti, nella zona di ombra si avrebbe la calma assoluta.

L'aliquota dell'energia riflessa dall'opera dipende, invece, dalla geometria della stessa e, mentre per opere con parete verticale può assumersi un coefficiente di riflessione compreso tra 0,90 e 1, per strutture del tipo a gettata è sufficientemente realistico assumere per il coefficiente di riflessione il valore di $0,50 \pm 0,30$.

Lo studio della diffrazione, nel senso più generale del termine, affronta la valutazione delle caratteristiche del moto ondoso sia nella zona di riflessione dello stesso, sia nella zona protetta a tergo dell'ostacolo.

La conoscenza dell'agibilità e dell'affidabilità del dispositivo portuale implica quindi un approfondimento dello studio del fenomeno di che trattasi, la cui soluzione è stata posta sotto forma di grafici e tabelle dal Wiegel nel caso di ostacolo rettilineo semidefinito e perfettamente riflettente che si erge su profondità costante.

Il modello numerico utilizzato nel nostro caso è un modello agli elementi finiti all'avanguardia per calcolare le altezze d'onda all'interno dell'area in esame per tutte le condizioni di moto ondoso incidente.

Note le altezze d'onda, è possibile stimare, con un'unica simulazione, l'agitazione ondosa in diversi punti, per particolari condizioni di moto ondoso incidente. Il modello numerico utilizzato è CGWAVE (Coastal and Hydraulics Laboratory -United States Army Corps of Engineering) che utilizza come interfaccia grafica il modello SMS (Surface modeling system).

CGWAVE include: la diffrazione delle onde provocata dalle strutture emergenti e quella dovuta alle caratteristiche del fondale marino; la rifrazione e gli effetti di shoaling derivati dalle variazioni di profondità; la riflessione parziale o totale causata dalle strutture costiere e portuali; gli effetti d'attrito di fondo e frangimento delle onde.

Il modello è stato applicato per studiare sia la configurazione di progetto sia il primo stralcio del progetto, considerando quindi due differenti domini e relative maglie ad elementi finiti triangolari.

Per ottenere dei risultati accurati, è importante rappresentare con una certa precisione le lunghezze d'onda alle diverse profondità.

Il vantaggio di usare una maglia d'elementi finiti triangolari è che la risoluzione di tale reticolo può essere personalizzata in base al periodo dell'onda ed alla profondità, in modo da minimizzare la quantità di calcoli necessari che, ricordiamo, dipende dal numero di nodi.

CGWAVE può essere usato in modalità mono-frequenza o random, e inoltre come modello mono-direzionale o multi-direzionale. In modalità "mono-frequenza" il modello considera una sola componente di periodo e direzione. In alcune situazioni, questo tipo d'applicazione fornisce una descrizione ragionevolmente precisa dello stato di mare. A causa dell'interferenza costruttiva e distruttiva dovuta all'interazione delle onde caratterizzate dallo stesso periodo, qualche volta, è possibile avere una descrizione più esauriente del campo di moto ondoso usando onde incidenti di tipo random. In questo caso possono essere simulate e combinate automaticamente nel modello molte componenti di periodo e direzione, in funzione dello spettro delle onde incidenti.

Il modello CGWAVE rilascia, come risultato di una simulazione, le altezze d'onda sotto forma, normalmente, di grafici a colori ottenuti con l'applicazione del pacchetto software SMS.

SMS versione 8.1. è un modello con capacità di pre-processing e post-processing per tutti i modelli numerici CHL (Coastal and Hydraulics Laboratory - United States Army Corps of Engineering), inclusi ADCIRC, TABS (RMA2, RMA4, SED2D), ADH, HiVEL, M2D, STWAVE, BOUSS2D e CGWAVE.

SMS è diviso in moduli: Scatter, Map and Mesh. Il modulo Scatter utilizza dati anche disomogenei, per esempio dati batimetrici, e interpola questi dati in maglie e reticoli del modello. Il Modulo Map è usato per creare e manipolare modelli concettuali. L'utente può creare e definire attributi per oggetti caratteristici, come punti, archi e poligoni, che definiscono il sistema modellato. Immagini, come raster o fotografie possono essere utilizzate in questo processo e possono anche rendere l'output più facile da interpretare. Il Modulo Mesh e altri moduli sono usati per creare e implementare modelli numerici. Questi moduli consentono:

- a) interazione grafica con editing delle maglie e della rete, condizioni al contorno, parametri del modello e materiali,
- b) visualizzazione della configurazione del modello numerico e dei dati di output.

Ognuno dei moduli utilizzati per creare e gestire modelli numerici, può avere differenti collegamenti alle cosiddette "coverages" (utilities). Per esempio, il Modulo Mesh ha tante coverages, una per ognuno dei modelli supportati.

I risultati del modello numerico CGWAVE sono presentati di solito sotto forma di grafici contenenti le altezze d'onda in specifici punti d'analisi, interni all'area d'interesse. Il modello CGWAVE può rilasciare anche altri parametri fisici e, nel caso di simulazioni con singolo periodo e direzione, può calcolare la quota di pelo libero e la fase dell'onda, oltre a molte altre grandezze.

Usando l'altezza e la fase dell'onda si può calcolare, in un secondo momento, la quota di pelo libero a step temporali in cui è stato suddiviso un singolo periodo dell'onda. Il modello può essere usato, per esempio, per esaminare gli effetti del cambiamento di lunghezza od orientamento di un frangiflutti sulla sua azione schermante nei confronti degli ormeggi in progetto, per creare grafici dell'altezza d'onda in funzione del periodo dell'onda in diversi punti interni allo specchio acqueo ridossato.

Nel caso in esame le maglie ad elementi finiti sono state generate in modo che il modello CGWAVE fosse rappresentativo della batimetria esistente.

In particolare, i risultati delle elaborazioni eseguite con il modello CGWAVE applicato al caso in esame per la configurazione di progetto sono riportate nelle figure di seguito elencate:

Fig. 3.3.1.a – Progetto – Maglia elementi finiti

Fig. 3.3.1.b – Progetto – Batimetria

Fig. 3.3.1.1a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 323.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.1b – Progetto – Direzione – dir = 323.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.1c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 323.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.1d – Progetto – Sea surface – dir = 323.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.2a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 340.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.2b – Progetto – Direzione – dir = 340.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.2c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 340.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.2d – Progetto – Sea surface – dir = 340.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.3a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 359.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.3b – Progetto – Direzione – dir = 359.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.3c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 359.0° N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.3d – Progetto – Sea surface – dir = 359.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.4a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 21.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.4b – Progetto – Direzione – dir = 21.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.4c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 21.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.4d – Progetto – Sea surface – dir = 21.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.5a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 42.00 °N – tr = 3anni

Fig. 3.3.1.5b – Progetto – Direzione – dir = 42.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.5c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 42.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.5d – Progetto – Sea surface – dir = 42.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.6a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 63.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.6b – Progetto – Direzione – dir = 63.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.6c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 63.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.6d – Progetto – Sea surface – dir = 63.00 °N – tr = 3 anni

Fig. 3.3.1.7a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 327.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.7b – Progetto – Direzione – dir = 327.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.7c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 327.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.7d – Progetto – Sea surface – dir = 327.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.8a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 342.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.8b – Progetto – Direzione – dir = 342.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.8c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 342.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.8d – Progetto – Sea surface – dir = 342.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.9a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 358.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.9b – Progetto – Direzione – dir = 358.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.9c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 358.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.9d – Progetto – Sea surface – dir = 358.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.10a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 20.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.10b – Progetto – Direzione – dir = 20.00 °N – tr = 10anni

Fig. 3.3.1.10c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 20.00 °N – tr = 10anni

Fig. 3.3.1.10d – Progetto – Sea surface – dir = 20.00 °N – tr = 10anni

Fig. 3.3.1.11a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 40.00° N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.11b – Progetto – Direzione – dir = 40.00° N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.11c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 40.00° N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.11d – Progetto – Sea surface – dir = 40.00° N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.12a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 60.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.12b – Progetto – Direzione – dir = 60.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.12c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 60.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.12d – Progetto – Sea surface – dir = 60.00 °N – tr = 10 anni

Fig. 3.3.1.13a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 330.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.13b – Progetto – Direzione – dir = 330.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.13c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 330.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.13d – Progetto – Sea surface – dir = 330.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.14a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 344.00 °N – tr = 30anni

Fig. 3.3.1.14b – Progetto – Direzione – dir = 344.00° N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.14c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 344.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.14d – Progetto – Sea surface – dir = 344.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.15a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 358.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.15b – Progetto – Direzione – dir = 358.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.15c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 358.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.15d – Progetto – Sea surface – dir = 358.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.16a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 19.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.16b – Progetto – Direzione – dir = 19.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.16c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 19.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.16d – Progetto – Sea surface – dir = 19.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.17a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 38.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.17b – Progetto – Direzione – dir = 38.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.17c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 38.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.17d – Progetto – Sea surface – dir = 38.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.18a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 57.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.18b – Progetto – Direzione – dir = 57.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.18c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 57.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.18d – Progetto – Sea surface – dir = 57.00 °N – tr = 30 anni

Fig. 3.3.1.19a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 331.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.19b – Progetto – Direzione – dir = 331.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.19c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 331.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.19d – Progetto – Sea surface – dir = 331.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.20a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 344.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.20b – Progetto – Direzione – dir = 344.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.20c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 344.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.20d – Progetto – Sea surface – dir = 344.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.21a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 358.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.21b – Progetto – Direzione – dir = 358.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.21c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 358.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.21d – Progetto – Sea surface – dir = 358.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.22a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 19.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.22b – Progetto – Direzione – dir = 19.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.22c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 19.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.22d – Progetto – Sea surface – dir = 19.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.23a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 37.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.23b – Progetto – Direzione – dir = 37.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.23c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 37.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.23d – Progetto – Sea surface – dir = 37.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.24a – Progetto – Altezza d'onda – dir = 57.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.24b – Progetto – Direzione – dir = 57.00 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.24c – Progetto – Fase dell'onda – dir = 57.0 °N – tr = 50 anni

Fig. 3.3.1.24d – Progetto – Sea surface – dir = 57.00 °N – tr = 50 anni

Il limite al largo del modello CGWAVE è stato ubicato in acque relativamente profonde, quindi ogni condizione d'onda incidente poteva essere assunta approssimativamente costante lungo il confine del modello. Come dati di input si sono considerate mareggiate con tempi di ritorno di 3, 10, 30 e 50 anni facendo riferimento ai risultati del modello numerico STWAVE precedentemente riportati nel paragrafo 2.

Dalle elaborazioni effettuate con il modello CGWAVE si sono ricavati i valori di altezza d'onda residua in corrispondenza di n. 4 punti scelti all'interno dello specchio liquido ridossato dall'opera foranea in progetto.

I valori di altezza d'onda residua in ciascuno dei punti stazione considerati, sono riportate nelle **tabb. da 3.3.1 a 3.3.4** per la configurazione di progetto e nelle **tabb. da 3.3.5 a 3.3.8** per lo stralcio funzionale della configurazione di progetto.

4. Conclusioni e determinazione altezza d'onda di progetto

Per verificare le trasformazioni che il treno d'onde subisce nel propagarsi verso riva ed in particolare in prossimità dell'opera di difesa in progetto, sono stati utilizzati due modelli numerici agli elementi finiti per lo studio della rifrazione, del frangimento e della diffrazione al fine di valutare lo stato di agitazione residuo in punti specifici, per diverse direzioni di provenienza del moto ondoso e per diversi tempi di ritorno. Sono stati, pertanto, applicati due diversi modelli numerici agli elementi finiti:

- STWAVE (Steady-State Spectral Wave Model);
- CGWAVE (Coastal Wave Prediction Model);

Come dati di input per il modello STWAVE (rifrazione, frangimento ed effetti di shoaling) si sono considerate mareggiate con tempi di ritorno di 3, 10, 30, 50 e 100 anni facendo riferimento ai risultati dello studio idraulico-marittimo precedentemente redatto.

I risultati del modello numerico STWAVE applicato al caso in esame, hanno consentito di determinare le altezze d'onda, periodi e direzioni sottocosta da utilizzare come dati di input per il modello numerico CGWAVE, per la determinazione dello stato di agitazione residua in prossimità dello specchio liquido ridossato dall'opera foranea in progetto.

Il modello STWAVE, infatti, è applicabile su profondità comprese tra 15 e 60 m, mentre per profondità minori come quelle su cui si attesta l'opera foranea in progetto, il modello numerico più appropriato è CGWAVE, specifico per acque basse ovvero inferiori a 15 m, al quale sono stati forniti come dati di input i valori di altezza d'onda, periodo e direzione sottocosta, ricavati con STWAVE.

Il modello CGWAVE è stato applicato per studiare la configurazione di progetto (che prevede la realizzazione dell'intera opera foranea dalla progr. 0.00 m alla progr. 142.10 m a presidio del tratto del litorale Scalo Galera), considerando quindi un dominio con maglie ad elementi finiti triangolari.

Dalle elaborazioni effettuate con il modello CGWAVE si sono ricavati i valori di altezza d'onda residua in corrispondenza di n. 4 punti scelti all'interno dello specchio liquido ridossato dall'opera foranea in progetto.

APPENDICE 1

STUDIO METEOMARINO PER LA DETERMINAZIONE
DELLE CARATTERISTICHE ONDOSE AL LARGO

RELAZIONE

C A P I T O L O I
S T U D I O A N E M O L O G I C O

1. STUDIO DEI VENTI NEL PARAGGIO IN ESAME

1.1 INTERPRETAZIONE STATISTICA DEI DATI DEL VENTO

Per la valutazione delle caratteristiche ondametriche al largo del paraggio di Malfa (ME) (Fig.1), non essendoci a disposizione misurazioni ondametriche, e' necessario ricorrere ad una elaborazione statistica dei dati anemometrici disponibili, rilevati dall'Aeronautica Militare.

Per la valutazione delle caratteristiche delle onde al largo occorre conoscere la velocita' del vento.

A tale scopo si e' considerata la stazione anemologica di Ustica (latitudine 38,42; longitudine 13,11) in quanto la sua posizione ricade nella zona di generazione del moto ondoso.

Si sono, pertanto, prese in esame le osservazioni triorarie per i ventitre anni che vanno dal 1951 al 1973, per un totale di 67.053 dati.

Le osservazioni dei venti sono espresse in nodi per trentasei direzioni di dieci gradi in dieci gradi a partire dal Nord geografico.

Considerando quindi, accanto alla velocita', la variabile relativa alla direzione, si e' elaborato un totale di circa 135.000 dati.

Si sono elaborati i dati anemometrici, direzione di provenienza del vento e velocita', cercando di ricavare, dalla serie storica disponibile, una serie piu' lunga tramite la costruzione di un modello teorico di probabilita' in grado di rappresentare la distribuzione della serie storica.

Il vento, come tutti gli eventi meteorologici determinati

da una serie così grande di cause governate da leggi così poco note, può considerarsi un fenomeno stocastico; gli eventi si ipotizzano indipendenti e quindi elaborabili con i metodi del calcolo della probabilità. Si tratta, quindi, in generale, di ricavare equazioni di probabilità la cui distribuzione statistica risulti da un numero sufficiente di osservazioni e che consenta, almeno teoricamente, estrapolazioni aldilà del limite stesso delle osservazioni.

In altri termini, la distribuzione degli eventi storici deve essere ampliata statisticamente al fine di ottenere un numero di eventi sufficientemente grande da potere ritenere la frequenza di un certo evento come un valore approssimato della sua probabilità.

L'elaborazione statistica della serie storica presuppone, come precedentemente accennato, l'adattamento di essa ad una certa legge di probabilità; in altre parole, è necessario stabilire se lo schema teorico di probabilità è in grado di rappresentare adeguatamente la distribuzione della serie storica.

Il considerare il fenomeno stocastico e quindi l'ipotesi che trattasi di eventi incompatibili permette, poi, di ammettere l'esistenza di una funzione di probabilità.

Per la elaborazione dei dati del vento, per la previsione del legame velocità-durata, per fissato tempo di ritorno, si fa ricorso al metodo di Galton che ammette il verificarsi che la

grandezza $\log x$ compresa tra $-\infty$ a $+\infty$ segue la legge normale.

La condizione di distribuzione simmetrica rappresenta una condizione essenziale per l'applicabilita' della legge normale di Gauss e si riscontra appunto che anziche' dalla variabile x , tale condizione viene seguita dal logaritmo di questa. Si considera quindi come variabile stocastica che segue la legge di Gauss la espressione:

$$z = A \log (x - x_0) + B$$

dove: A , B ed x_0 sono parametri da determinare.

Ad ogni valore della variabile aleatoria x corrisponde pertanto, un valore di z ottenuto dalla precedente formula ed a questa un valore della probabilita' totale $P(z)$, cioe' la probabilita' che si verifichi un evento uguale o minore di z , secondo la nota espressione:

$$P(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^z \exp(-z^2) dz$$

mentre:

$$1 - P(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} \exp(-z^2) dz$$

rappresenta la probabilita' che si verifichi un evento uguale o maggiore di z . Trattandosi di distribuzione simmetrica rispetto l'origine si ha:

$$P(z) = P(-z)$$

e quindi:

$$P(-z) = 1 - P(z)$$

Si tratta quindi di determinare le costanti A, B ed x_0 e quindi la relazione $z = f(x)$ e allora noto il legame funzionale di z con il tempo di ritorno risulta noto il legame di x con tr .

Quando da una serie storica di n osservazioni in cui si conosce la frequenza di ogni evento si vuole passare ad una serie piu' vasta, e' necessario definire la frequenza probabile da assegnare ad ogni evento della nuova serie.

Tale frequenza probabile sara' diversa a secondo che l'evento considerato sia da considerare il minimo, il massimo o il mediano tra gli eventi similari che si presenterebbero nella nuova serie.

Nella elaborazione statistica di dati del vento si considera l'evento come mediano, per cui la frequenza probabile $P(m)$ in per cento del tempo, di un evento di ordine m una serie di n osservazioni e' fornita dalla:

$$P(m) = 100 \frac{2m - 1}{2n}$$

e il tempo di ritorno, cioe' l'intervallo di tempo in cui, mediamente, l'evento e' superato una sola volta:

$$tr = \frac{2n}{2m - 1}$$

Nella elaborazione statistica di dati meteorologici

interessa riferirsi infatti alla probabilita' di superamento e quindi all'evento mediamente eguagliato o superato m volte in n anni.

La regolarizzazione dei dati del vento rilevati nella stazione di Ustica e' stata condotta per durate variabili, con incremento di tre ore fino un massimo di novanta ore, in riferimento ad ogni direzione.

Prefissata, pertanto, la direzione, si sono eseguiti lo spoglio e la raccolta di tutti i valori di velocita' u del vento caratterizzati da un'assegnata durata; cio' ha consentito di individuare, oltre i massimi annuali di ogni serie, anche il numero di ordine degli eventi.

E' stato cosi' possibile assegnare in corrispondenza ad ogni numero d'ordine dell'evento (considerato come mediano) della serie storica un valore di frequenza probabile; si puo' allora ottenere la variabile aleatoria come argomento della funzione di errore.

Assunta pari a zero la costante di aggiustamento x_0 , per la valutazione delle rimanenti costanti A e B si sono posti in diagramma semilogaritmico, in ascisse, i valori del logaritmo decimale della variabile x definita dal rapporto tra il generico valore della velocita' u e la media di tutti i valori appartenenti alla stessa serie; in ordinate, il valore corrispondente della variabile z .

I risultati di tale regolarizzazione sono riportati nelle

Figg. da 1.1.1 a 1.1.5 (W, NW, N, NE e E).

Nel piano semilogaritmico, alla relazione:

$$z = A \log (x-x_0) + B$$

corrispondono, per ogni prefissata direzione, tante rette quanto sono le durate prese in esame; ad ogni retta compete il termine noto, B, variabile con la durata, e un coefficiente angolare, A, che con buona approssimazione si mantiene costante al variare della durata.

E' stato cosi' possibile effettuare una regolarizzazione generale considerando tutti gli eventi per ognuna delle otto direzioni fondamentali, ricavando l'equazione della retta che meglio interpola i dati relativi ad ogni direzione nel piano semilogaritmico prima definito.

Prefissato un valore del tempo di ritorno, t_r , e' possibile determinare, in funzione di esso, la corrispondente probabilita' totale $P(z)$; si determina quindi il valore di z , prescelta la direzione, per ogni durata, si risale al valore di x e in definitiva al ricercato valore di u .

Per fissata direzione, in funzione della durata e del tempo di ritorno variabile 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, e 100 anni si sono determinate le corrispondenti velocita' del vento.

1.2 - VARIAZIONE DELLA VELOCITA' DEL VENTO CON LA QUOTA

La determinazione della velocita' del vento con la quota e' un problema che presenta notevoli difficolta' connesse alla natura stessa del vento che, con le sue repentine ed improvvise variazioni di direzione ed intensita', rende complessa non solo la definizione di un modello teorico di riferimento di validita' generale, ma anche la determinazione sperimentale degli sforzi di attrito che giocano un ruolo fondamentale.

Tali sforzi, infatti, dipendono, fra l'altro, dalla velocita' del vento, dalla stabilita' termodinamica della massa aeriforme e, nello strato piu' prossimo alla superficie libera, anche dalle altezze delle onde, a loro volta dipendenti dalla velocita' del vento.

Fra le diverse leggi, quella cui usualmente si fa riferimento per rappresentare l'andamento della velocita' del vento, u , con la quota y e' espressa dalla seguente relazione:

$$u = u_{10} \left(1 + \frac{C}{K} \log \frac{y}{10} \right) \quad (1.2.2.1)$$

dove:

u_{10} e' la velocita' del vento ad una quota di 10 m sul livello indisturbato del mare

K e' la costante adimensionale di Karman il cui valore e' circa 0,41

C e' il coefficiente di drag.
D

Diversi AA. (Neumann - 1948; Sheppard - 1958; Brack - 1959, 1961;) hanno condotto studi sperimentali per la determinazione della legge che lega il valore del coefficiente di drag alla velocità del vento, ottenendo risultati spesso profondamente diversi fra loro, senza che al momento attuale vi siano valide ragioni teoriche o sperimentali che possano indurre a preferirne una anziché un'altra.

Una delle espressioni di maggiore uso, esprimendo u in $\frac{m}{s}$ e' certamente quella dovuta a Sheppard, sperimentalmente:

$$C_D = (0,8 + 0,14 u_{10}) 10^{-3} \quad (1.2.2.2)$$

Per valori di velocità del vento superiori a detto limite e' opportuno, seguendo le indicazioni di Brack, assegnare al coefficiente di drag il valore costante:

$$C_D = 2,6 \times 10^{-3} \quad (1.2.2.3)$$

Nel caso in esame le velocità del vento misurate nella stazione di Ustica posta a quota di circa 250 m sul livello del mare, sono riducibili a quelle relative ad una quota di 10 m tramite il grafico di Fig. 1.2.1, ottenuto utilizzando per la valutazione del coefficiente di drag C_D le espressioni di Sheppard e di Brack ognuna per il suo campo di validità'.

1.3 - CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I diagrammi di Figg. da 1.3.1 a 1.3.15 riportano a titolo di esempio, per fissata direzione e tempo di ritorno, l'andamento del legame tra durata e velocità del vento; per le direzioni di W, NW, N, NE, e E e per tempi di ritorno di 10, 30 e 50 anni.

Nelle tabb. da 1.3.1 a 1.3.6 sono riportate, per le direzioni 315° N, $337,5^{\circ}$ N, 360° N, $22,5^{\circ}$ N, 45° N e $67,5^{\circ}$ N le durate del vento in funzione della sua velocità variabile da 30 a 100 nodi ad intervalli di 10 nodi, ed in funzione del tempo di ritorno variabile da 3 a 100 anni.

C A P I T O L O I I
PREVISIONE DEL MOTO ONDOSO

2. PREVISIONE DEL MOTO ONDOSO AL LARGO

2.1 LE DISTANZE DI MARE LIBERO

L'individuazione del settore geografico di traversia che sottende il paraggio in esame e' stato effettuato dalle carte dell'Istituto Idrografico della Marina, esso risulta compreso nelle direzioni 303° N e 82° N.

Sono state poi rilevate le distanze di mare libero per varie direzioni, suddividendo il settore geografico di traversia in angoli di $22,5^{\circ}$ e inserendovi altre direzioni ove si e' ritenuto piu' opportuno (vedi Fig. 2.1.1).

2.2 LA VALUTAZIONE DEI FETCHES EFFETTIVI

Le onde che si muovono nell'area di generazione possono propagarsi secondo direzioni diverse da quelle secondo cui spira il vento; tale circostanza e' dovuta alla capacita' del vento di trasmettere la propria energia, non solo secondo la direzione del treno d'onde generato, ma anche secondo direzioni prossime a questa.

E' stato dimostrato, sulla scorta di studi sia teorici che sperimentali, che tale trasferimento di energia avviene secondo tutte le direzioni che, con quella del vento stessa formano un angolo $\alpha \leq 45^\circ$.

Il moto ondoso di un determinato paraggio puo' dunque essere generato anche da venti esterni al settore di traversia fino ad una direzione di 45° rispetto ad uno degli estremi del settore stesso.

Per la previsione del moto ondoso e' necessario quindi conoscere, oltre la frequenza del fetch secondo la direzione del vento anche quella secondo direzioni vicine; e' necessario cioe' determinare il fetch effettivo, intendendo per questo quella lunghezza che tiene conto di tali apporti laterali di energia.

Si e' suddiviso pertanto il settore di apertura pari a $2\alpha = 90^\circ$, simmetrico rispetto alla direzione del vento, in parti di uguale ampiezza $\delta\alpha$, arbitraria ma compresa tra 5° e 10° .

Le componenti energetiche trasmesse dal vento variano con la direzione in modo proporzionale al coseno dell'angolo α .

Indicata con f_i la lunghezza del generico fetch corrispondente all'angolo α_i , proiettata secondo la direzione del vento, la lunghezza del fetch effettivo e' espressa dalla relazione:

$$F_{eff} = \frac{\sum f_i \cos \alpha_i}{\sum \cos \alpha_i}$$

e indicando con F_i la lunghezza del fetch alla generica direzione α_i si ha:

$$f_i = F_i \cos \alpha_i$$

e quindi:

$$F_{eff} = \frac{\sum F_i \cos^2 \alpha_i}{\sum \cos \alpha_i}$$

La lunghezza del fetch effettivo puo' dunque essere maggiore, minore o uguale a quella che schematicamente si fa coincidere con la distanza di mare libero.

Indicando inoltre con b la larghezza del fetch per la generica direzione formante un angolo α_i con quella del vento, la lunghezza F_i del fetch da introdurre nella precedente sommatoria non puo' superare il seguente valore, funzione di α_i :

$$\frac{b}{2 F_i \cos \alpha_i} = \operatorname{tg} \alpha_i$$

Nella applicazione del metodo pertanto, poiche' nel Mediterraneo si ha mediamente $b = 400 \text{ km} = 216 \text{ mm}$ il valore di F_i secondo la generica direzione i coincidera' con la distanza

di mare libero nella stessa direzione solo se questa risulta inferiore a:

$$F_i = \frac{216}{2 \sin i}$$

diversamente, coincide con quest'ultimo valore.

In fig. 2.2.1 e' riportato il diagramma dei fetches effettivi per il paraggio in esame.

2.3 LE CARATTERISTICHE DELL'ONDA SIGNIFICATIVA AL LARGO.

Per la previsione del moto ondoso al largo si e' utilizzato il metodo di Sverdrup-Munk e Bretshneider con il quale e' stato possibile ricavare l'altezza e il periodo significativo per ogni prefissata terna di valori del fetch F , della velocita' del vento e della durata t , in funzione del tempo di ritorno.

Si sono considerate le direzioni: 315° N, $337,5^\circ$ N, 360° N, $22,5^\circ$ N, 45° N e $67,5^\circ$ N e i relativi fetches: per ognuna di esse si e' fatto variare il tempo di ritorno, da 3 a 100 anni, per 8 classi di velocita' del vento, da 30 a 100 nodi.

Le previsioni pervengono alla valutazione dell'altezza d'onda significativa $H_{1/3}$ (cioe' al valore medio delle altezze possedute dal terzo delle onde piu' alte che compongono il treno d'onda e al periodo significativo cioe' al valore medio dei periodi di quelle onde); i risultati sono riportati nelle Tabb. da 2.3.1 a 2.3.12.

Si osservi come le massime condizioni di sviluppo delle caratteristiche del moto ondoso non si presentano necessariamente in concomitanza delle massime velocita' del vento: al crescere della velocita' del vento diminuisce infatti la sua durata ed il piu' condizionante dei due parametri a limitare lo sviluppo del fenomeno.

L'onda piu' alta al largo del paraggio in esame, per un intervallo di ricorrenza di 30 anni, si presenta dalla direzione 360° N con $H = 8,63$ m e $T = 11,65$ s. Per un tempo di ritorno di

10 anni, l'altezza d'onda si riduce a 6,06 m ed il periodo a 9,74 s dalla direzione di 360°N.

• Per valori dell'intervallo di ricorrenza pari a 5 e 3 anni, rispettivamente, si hanno, infine, altezze d'onda di 4,68 m e 3,98 m e periodi di 8,64 s e 7,94 s, per la direzione di 315°N.

FIGURE

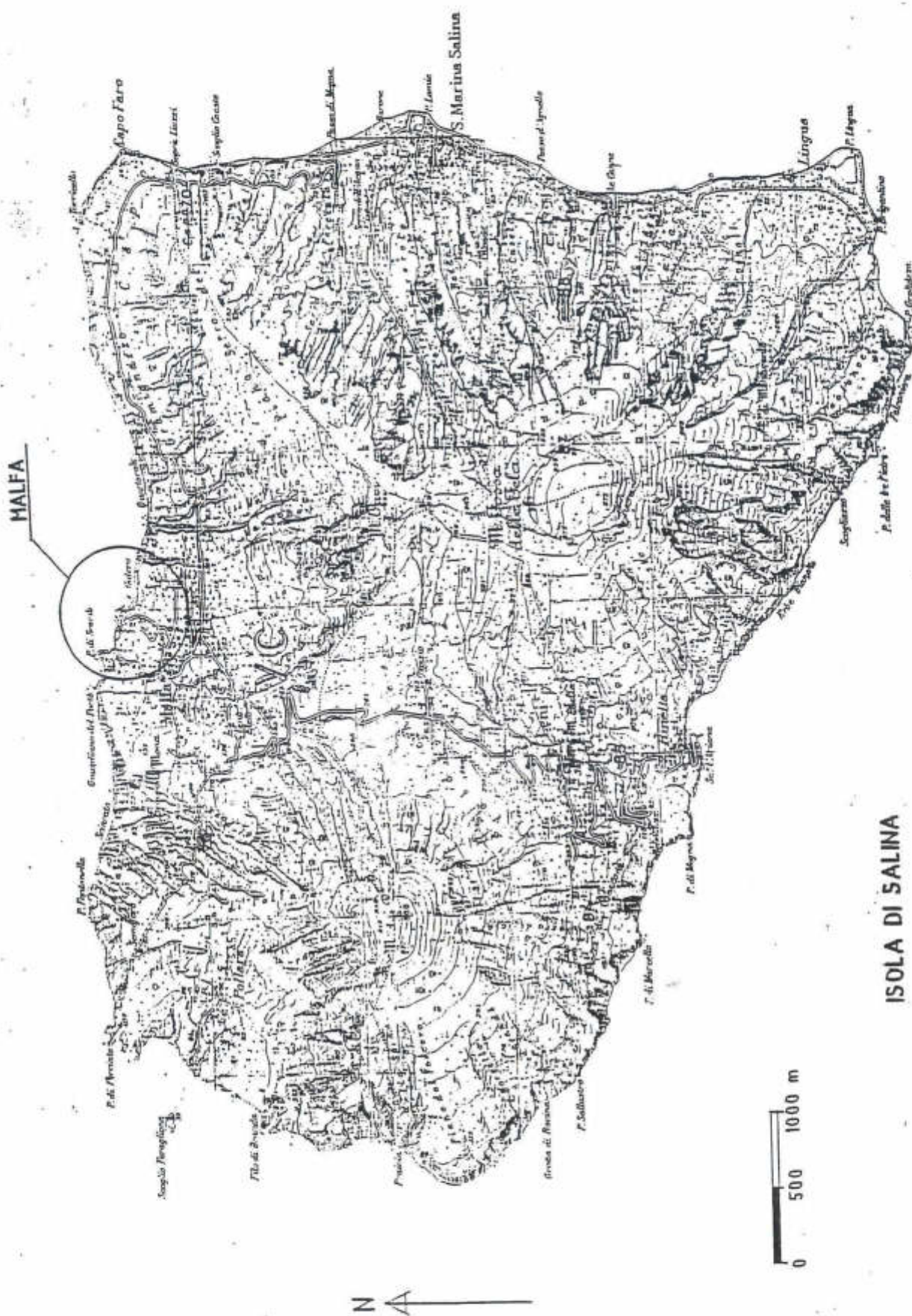


Fig. 1

REGULARIZATION OF WIND SPEEDS

STATION OF USTICA (3/I)

Z

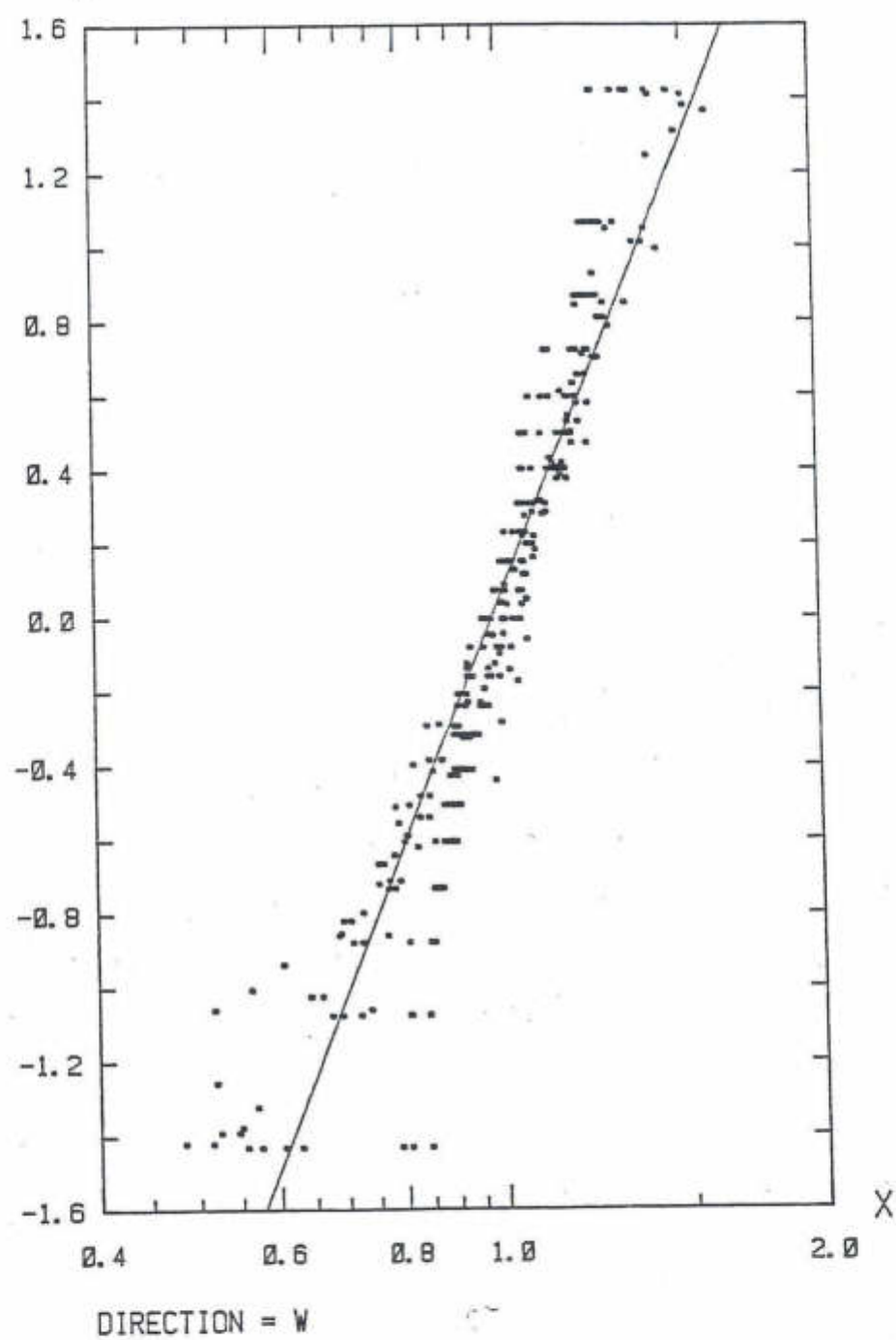


Fig. 1.1.1

REGULARIZATION OF WIND SPEEDS

STATION OF USTICA (3/I)

Z

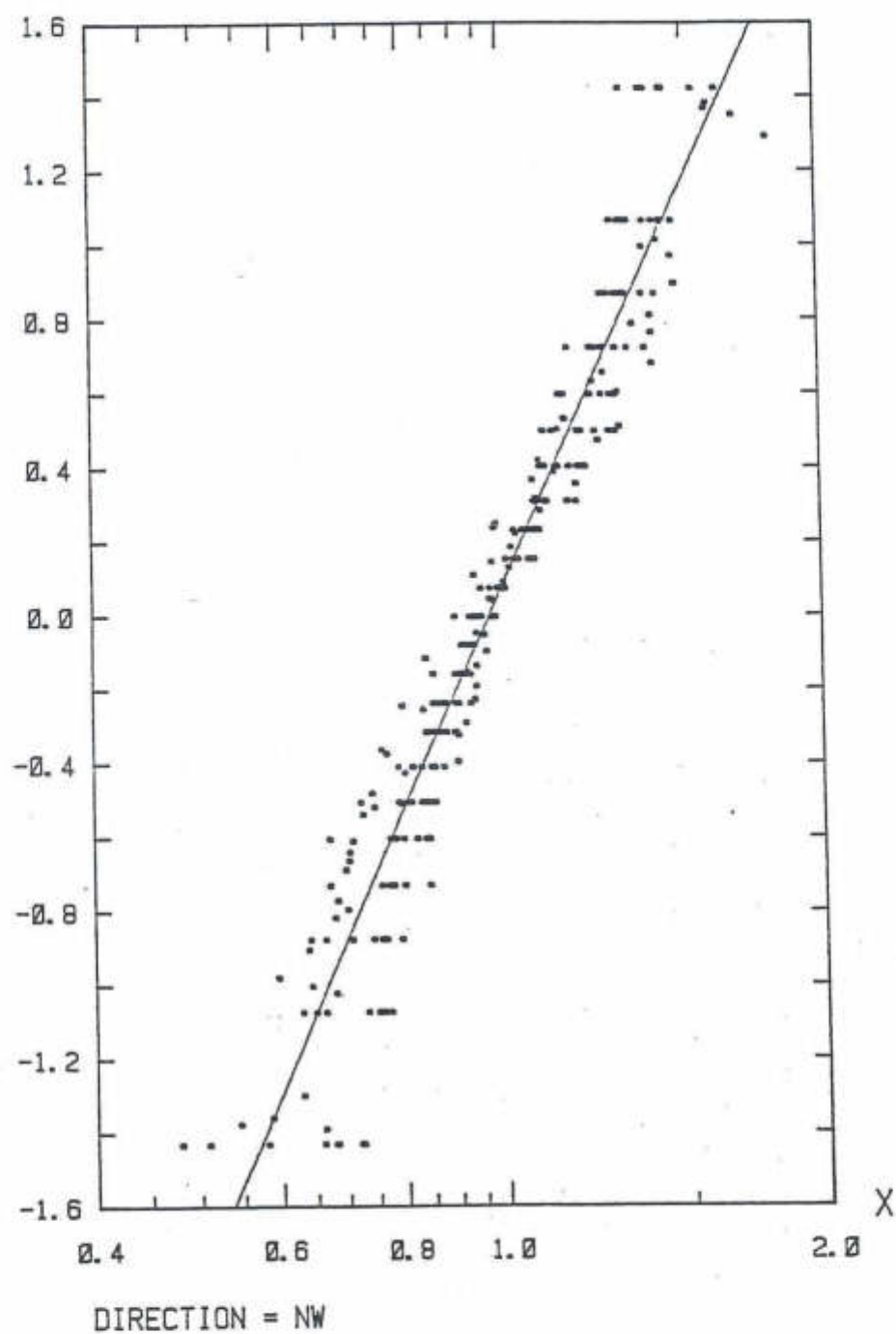


Fig. 1.1.2

REGULARIZATION OF WIND SPEEDS

STATION OF USTICA (3/I)

Z

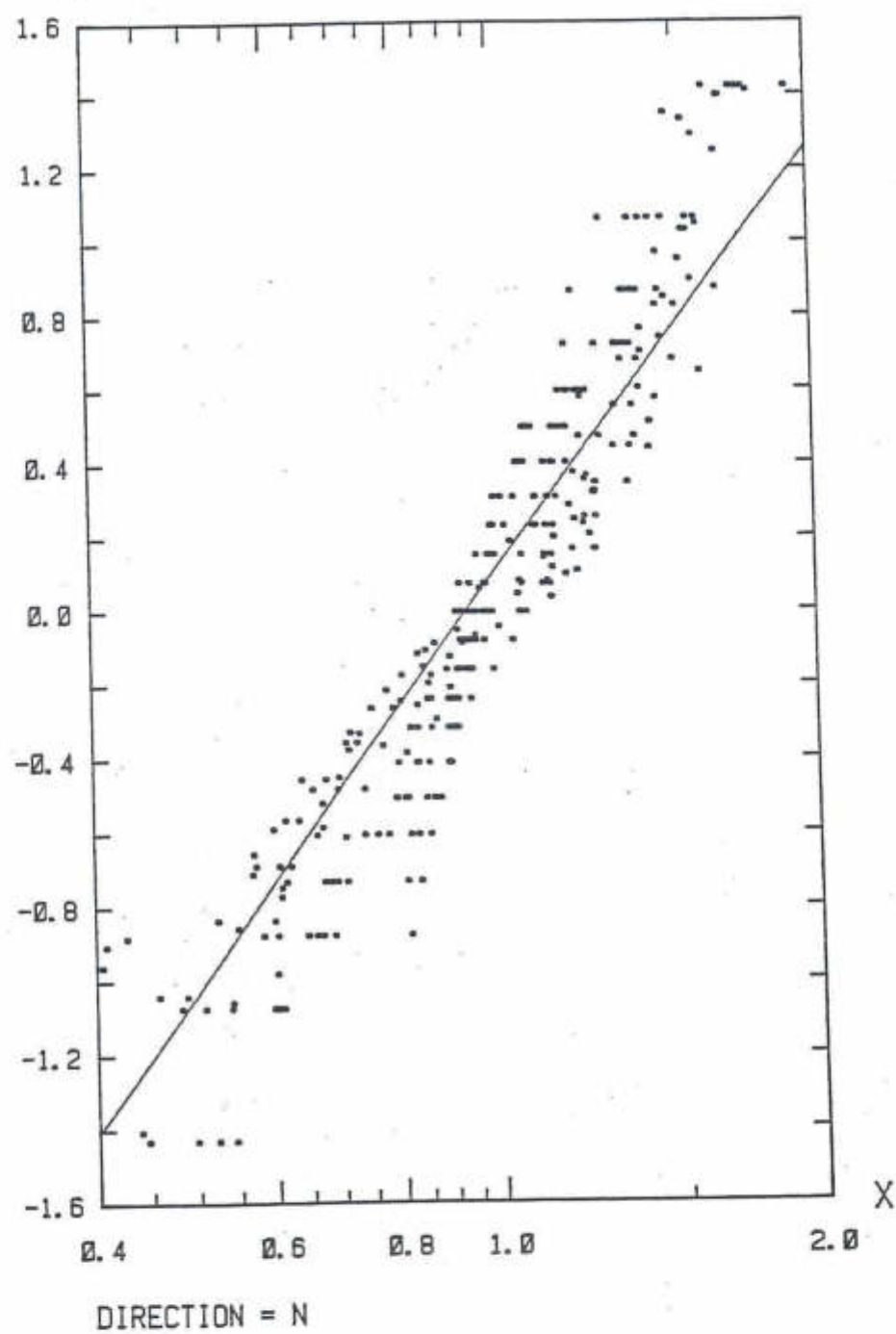


Fig. 1.1.3

REGULARIZATION OF WIND SPEEDS

STATION OF USTICA (3/I)

Z

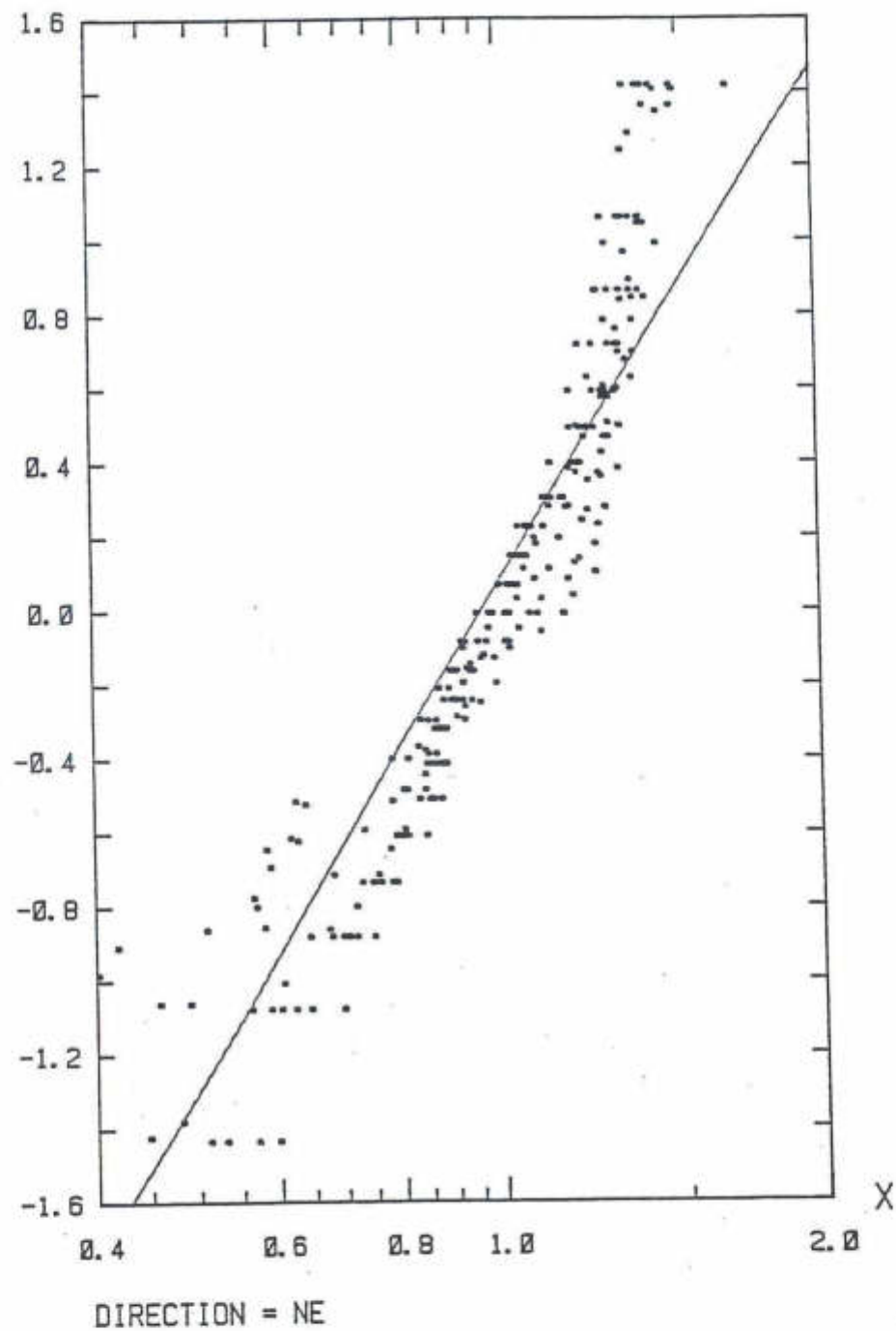


Fig. 1.1.4

REGULARIZATION OF WIND SPEEDS

STATION OF USTICA (3/I)

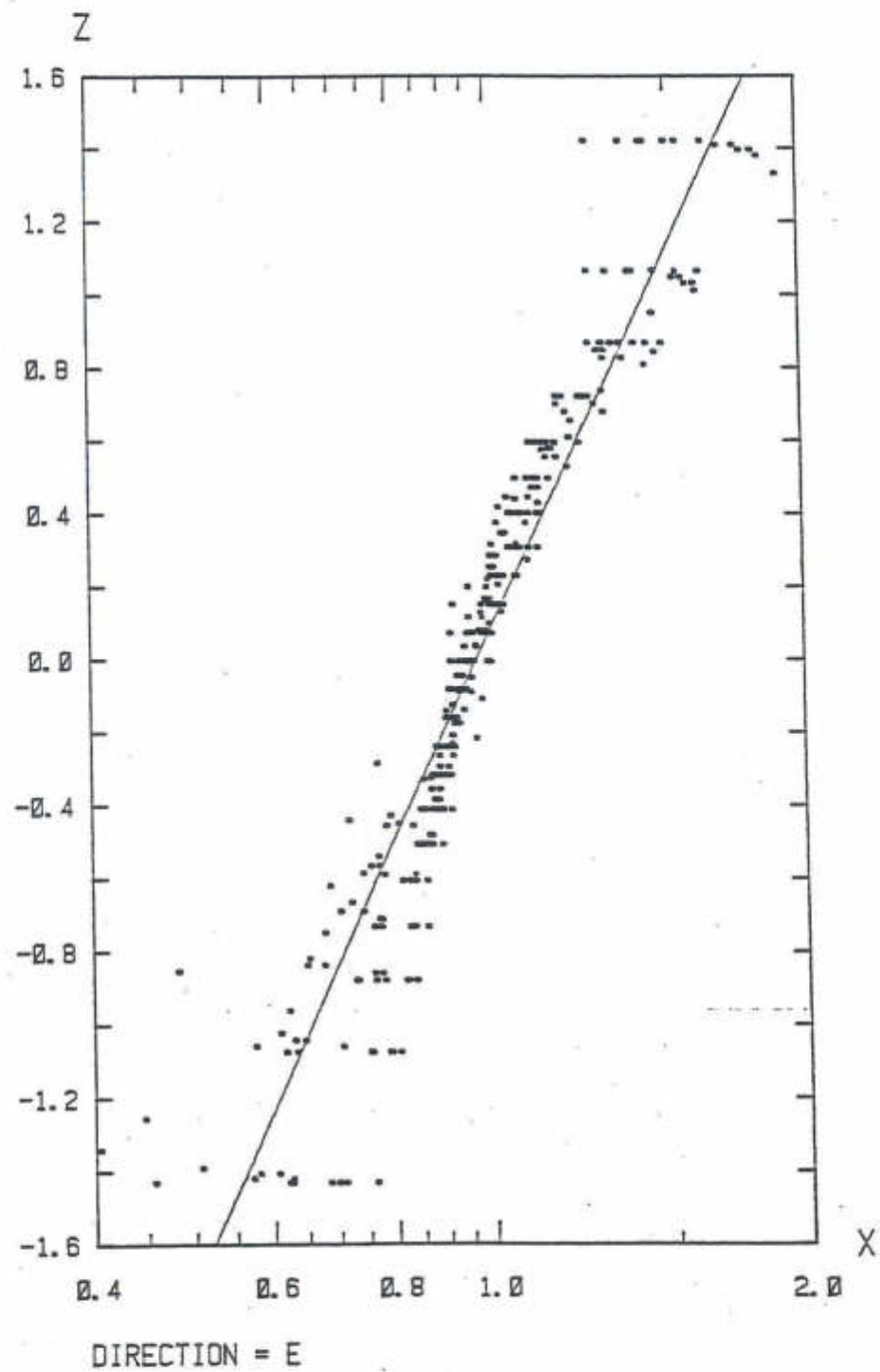
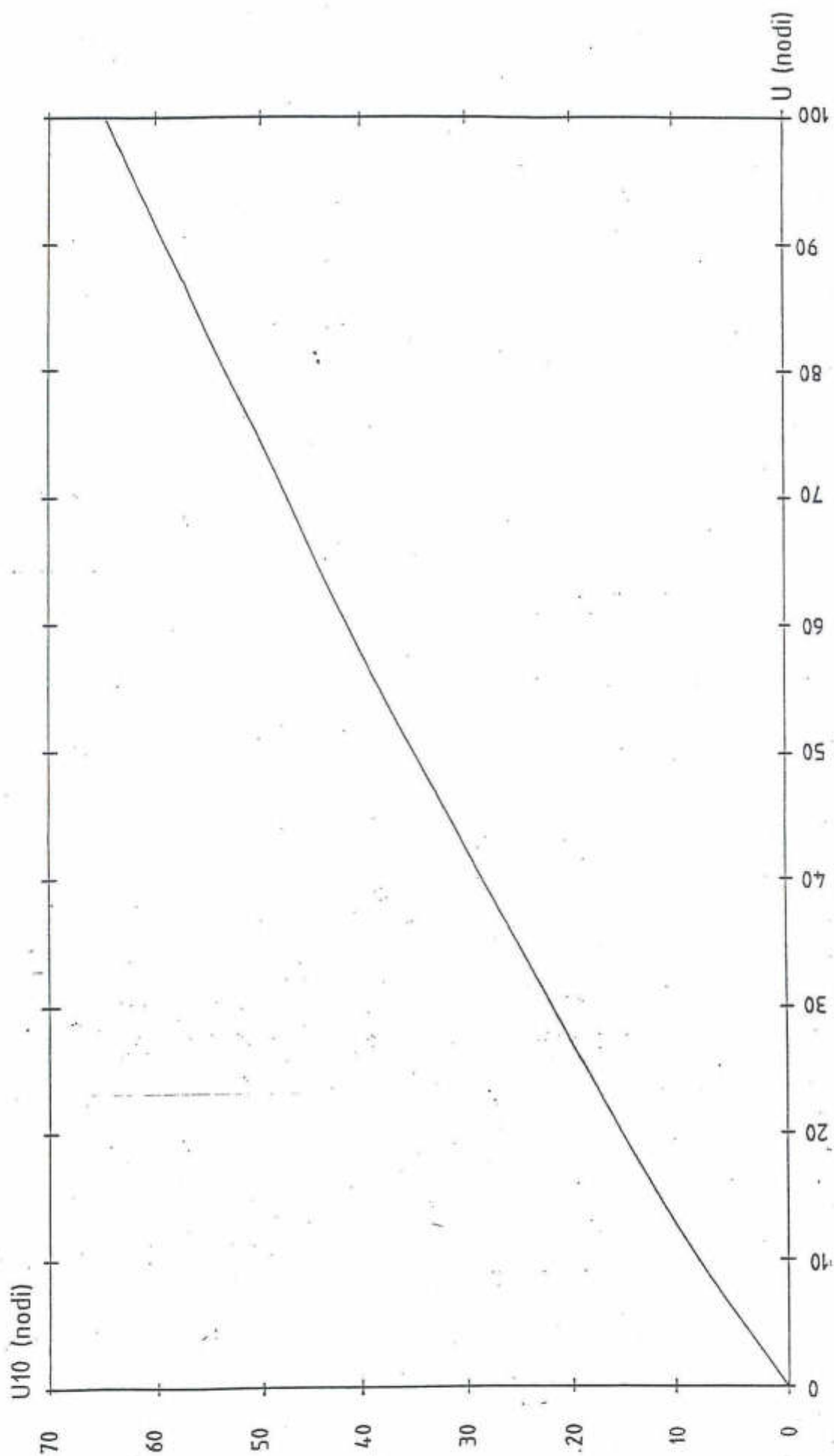


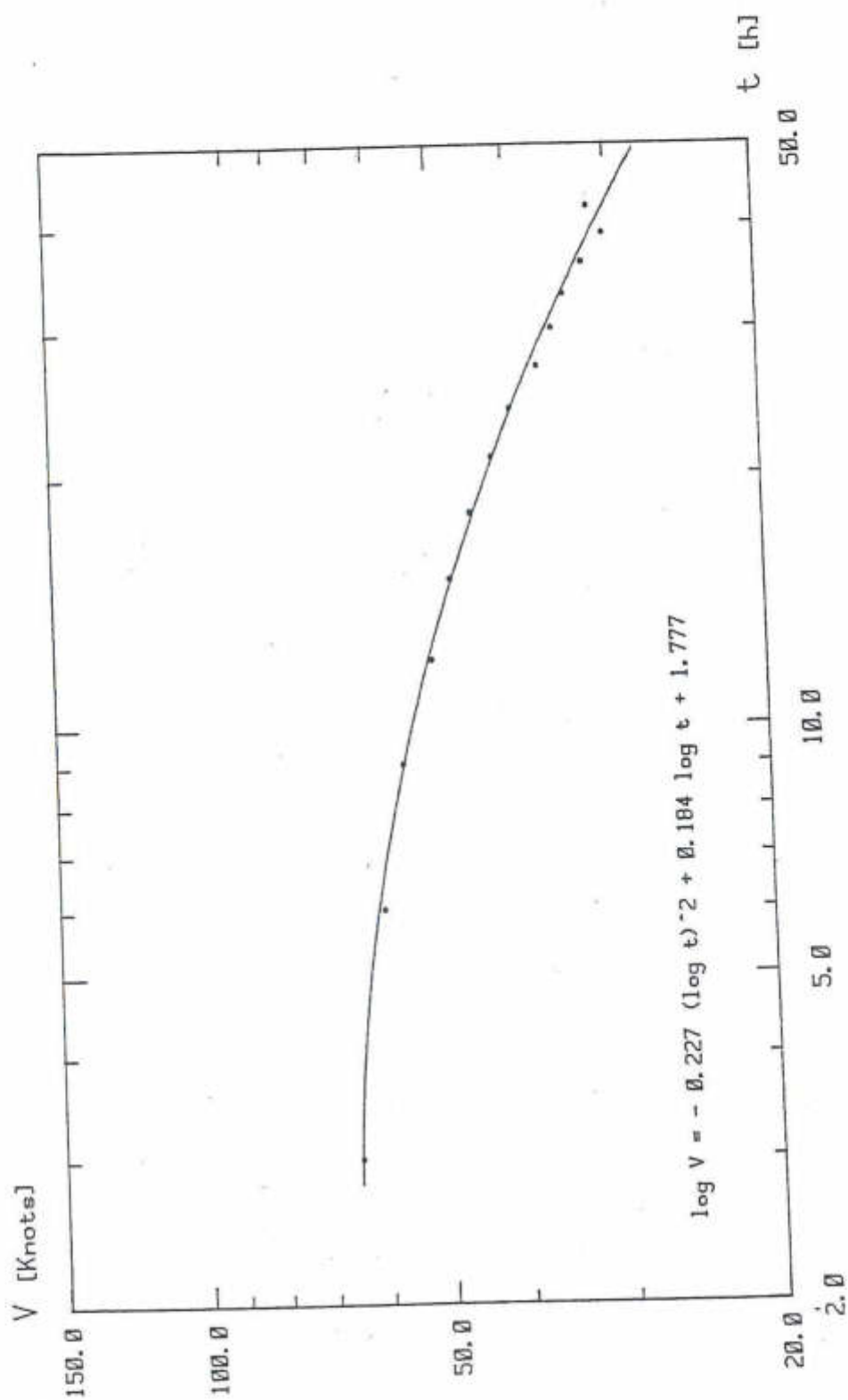
Fig. 1.15

VARIAZIONE DELLA VELOCITA' DEL VENTO DA $Z=250$ m. A $Z=10$ m.



EXTRAPOLATION OF WIND DATA

STATION OF USTICA



DIRECTION = W - RETURN PERIOD = 10 years

Fig. 1.3.1

EXTRAPOLATION OF WIND DATA

STATION OF USTICA

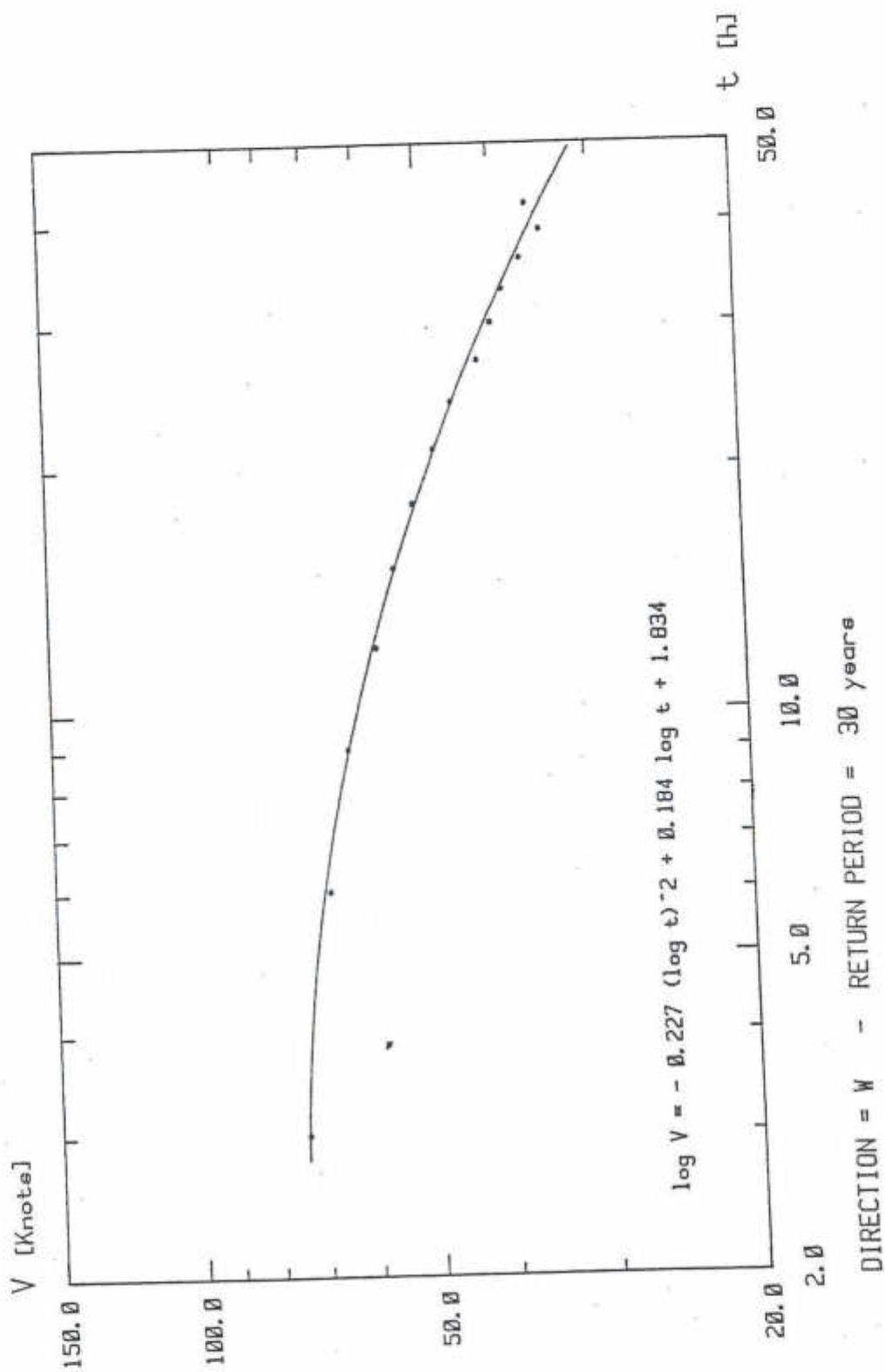


Fig. 1.3.2

EXTRAPOLATION OF WIND DATA
STATION OF USTICA

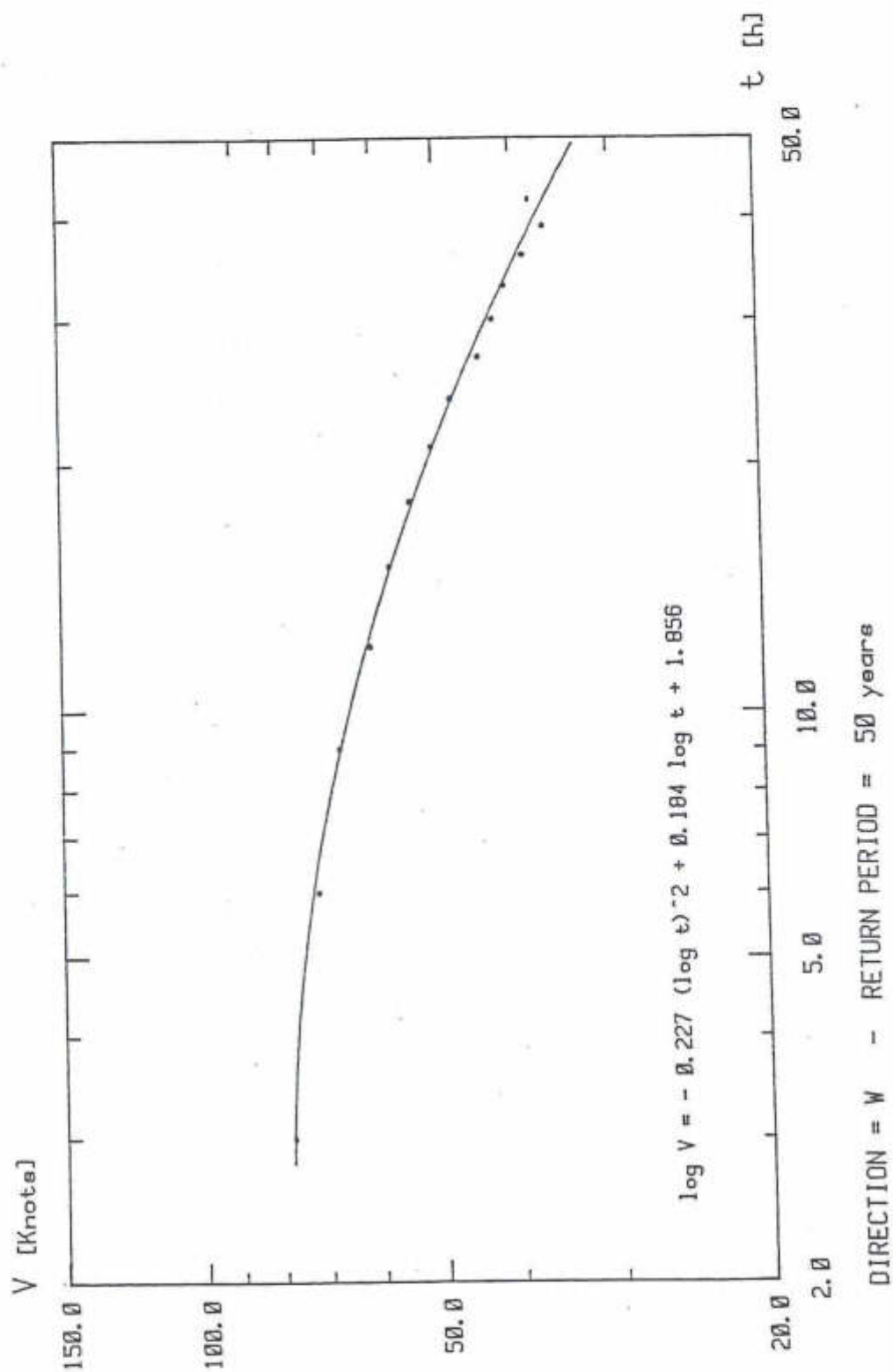
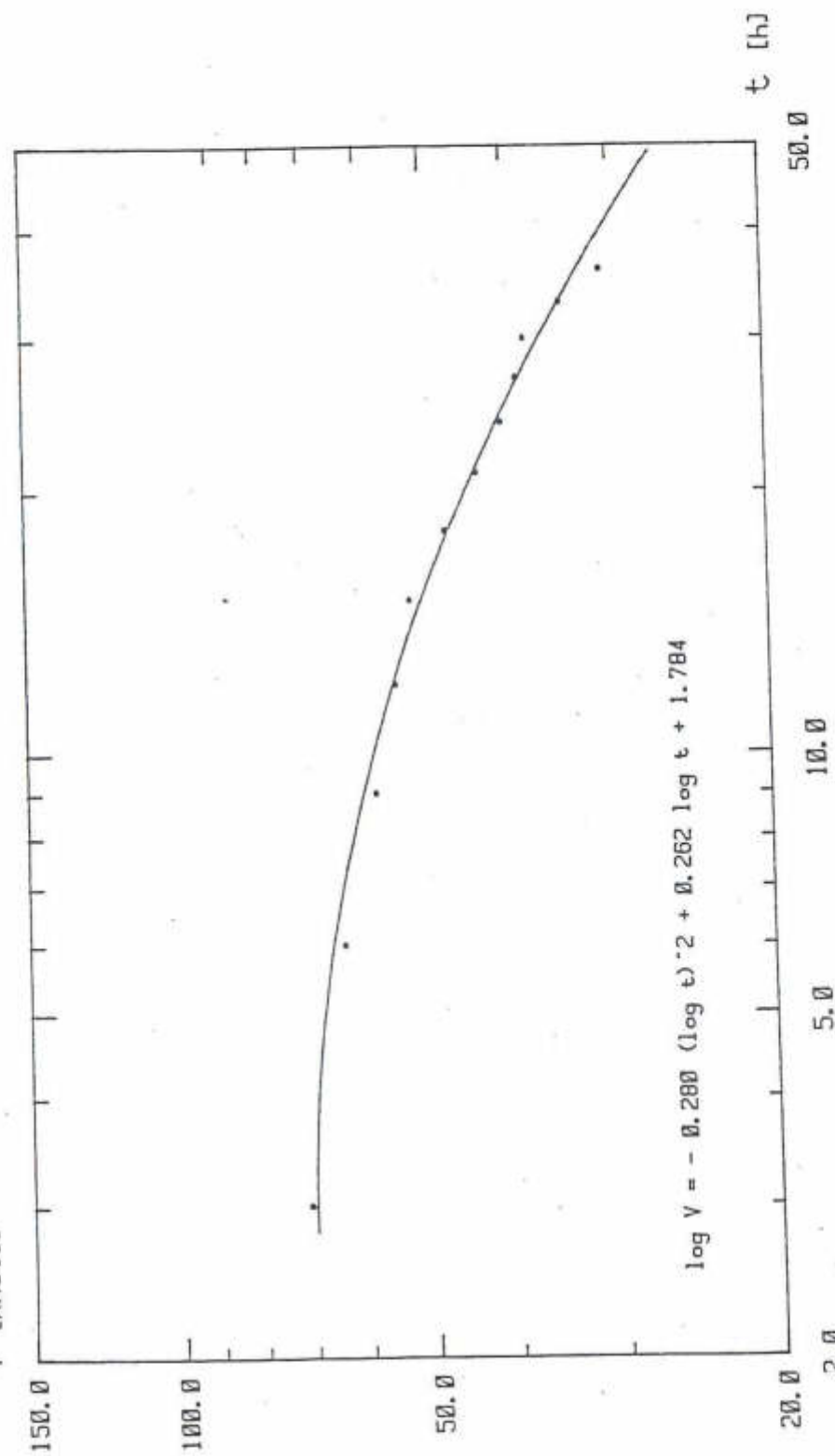


Fig. 13.3

EXTRAPOLATION OF WIND DATA

STATION OF USTICA

V [Knots]



DIRECTION = NW - RETURN PERIOD = 10 years

Fig. 1.3.4

EXTRAPOLATION OF WIND DATA
STATION OF USTICA

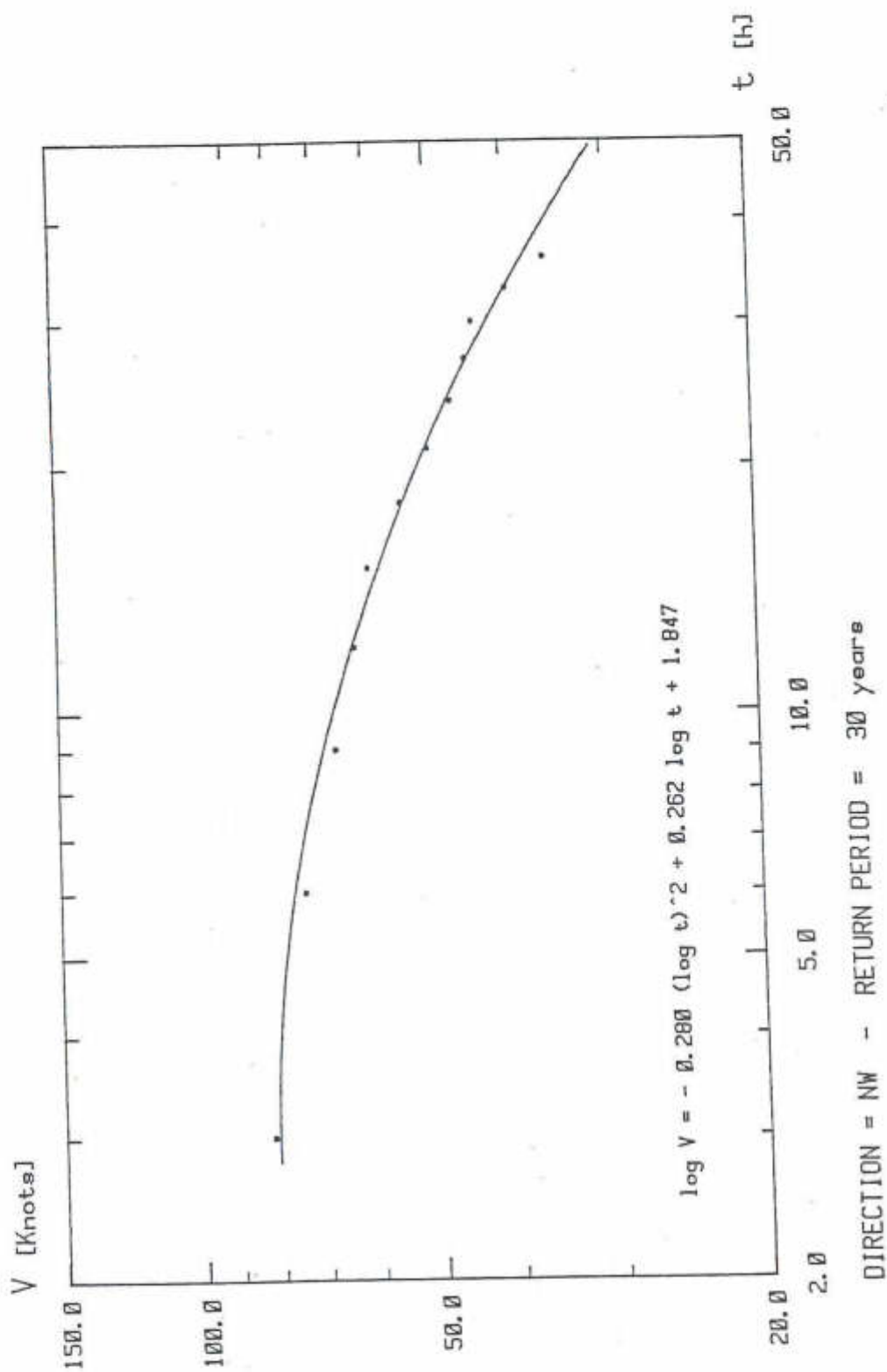


Fig. 1.3.5

EXTRAPOLATION OF WIND DATA
STATION OF USTICA

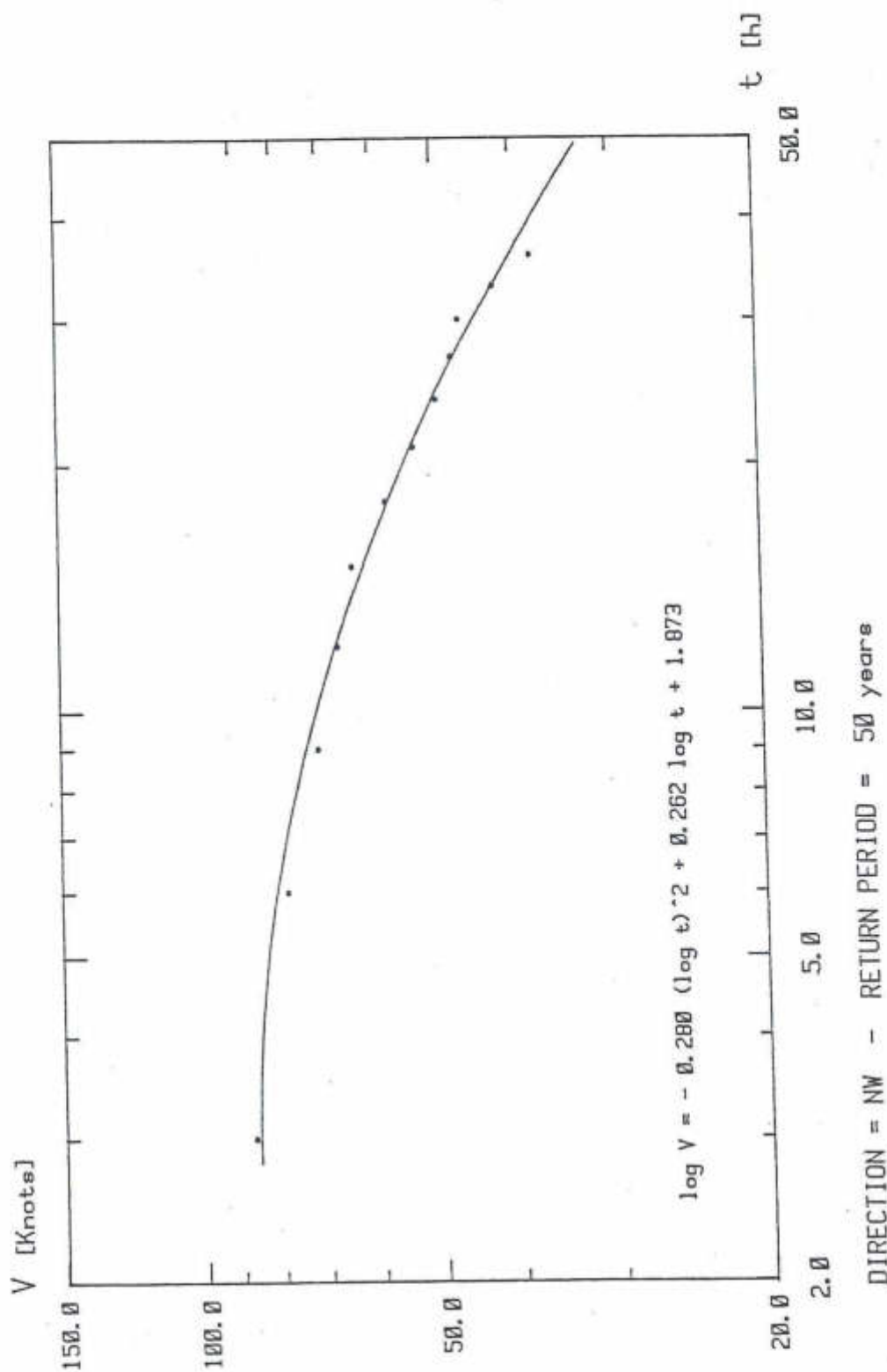


Fig. 1.3.6

EXTRAPOLATION OF WIND DATA
STATION OF USTICA

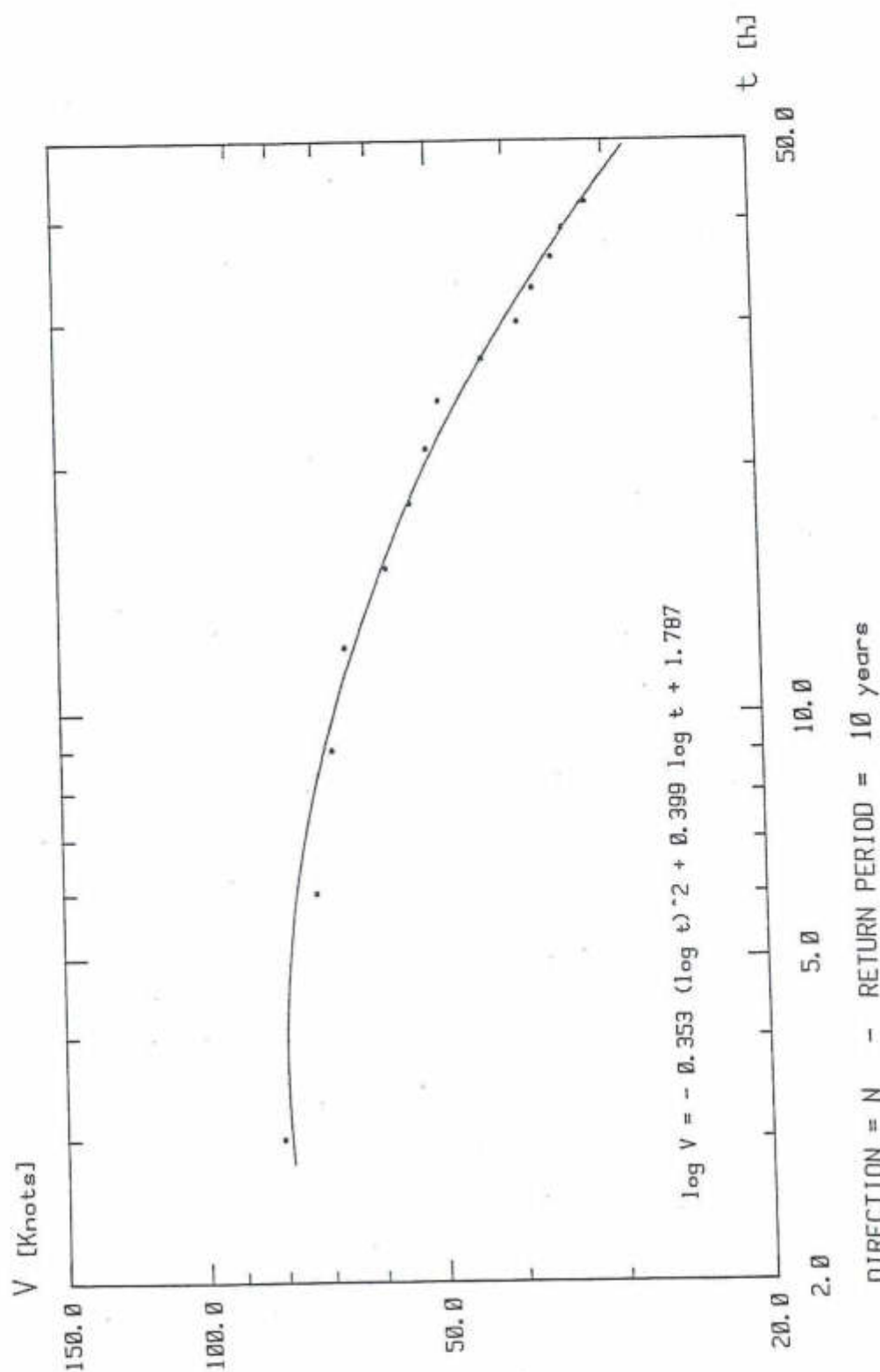
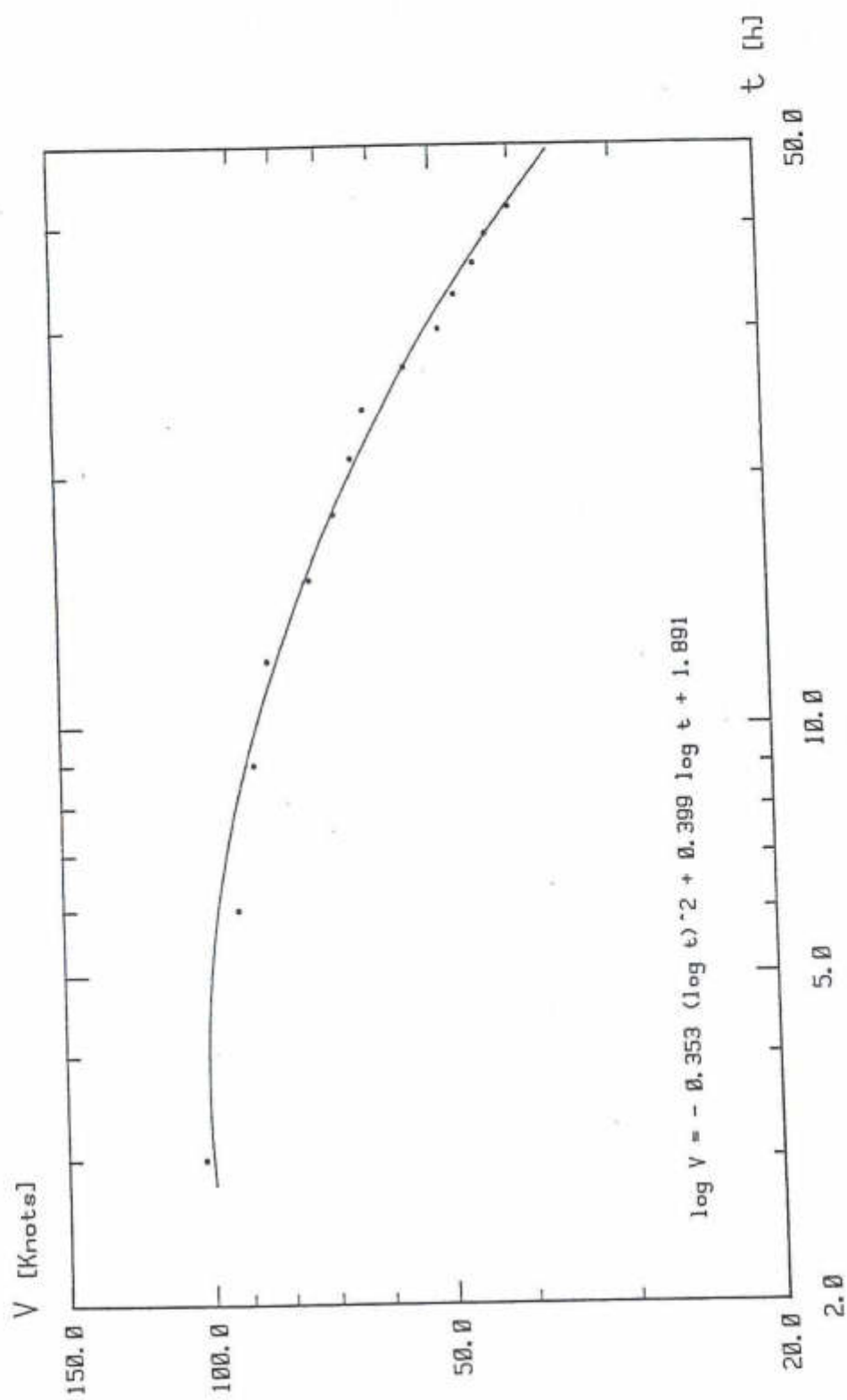


Fig. 13.7

EXTRAPOLATION OF WIND DATA
STATION OF USTICA



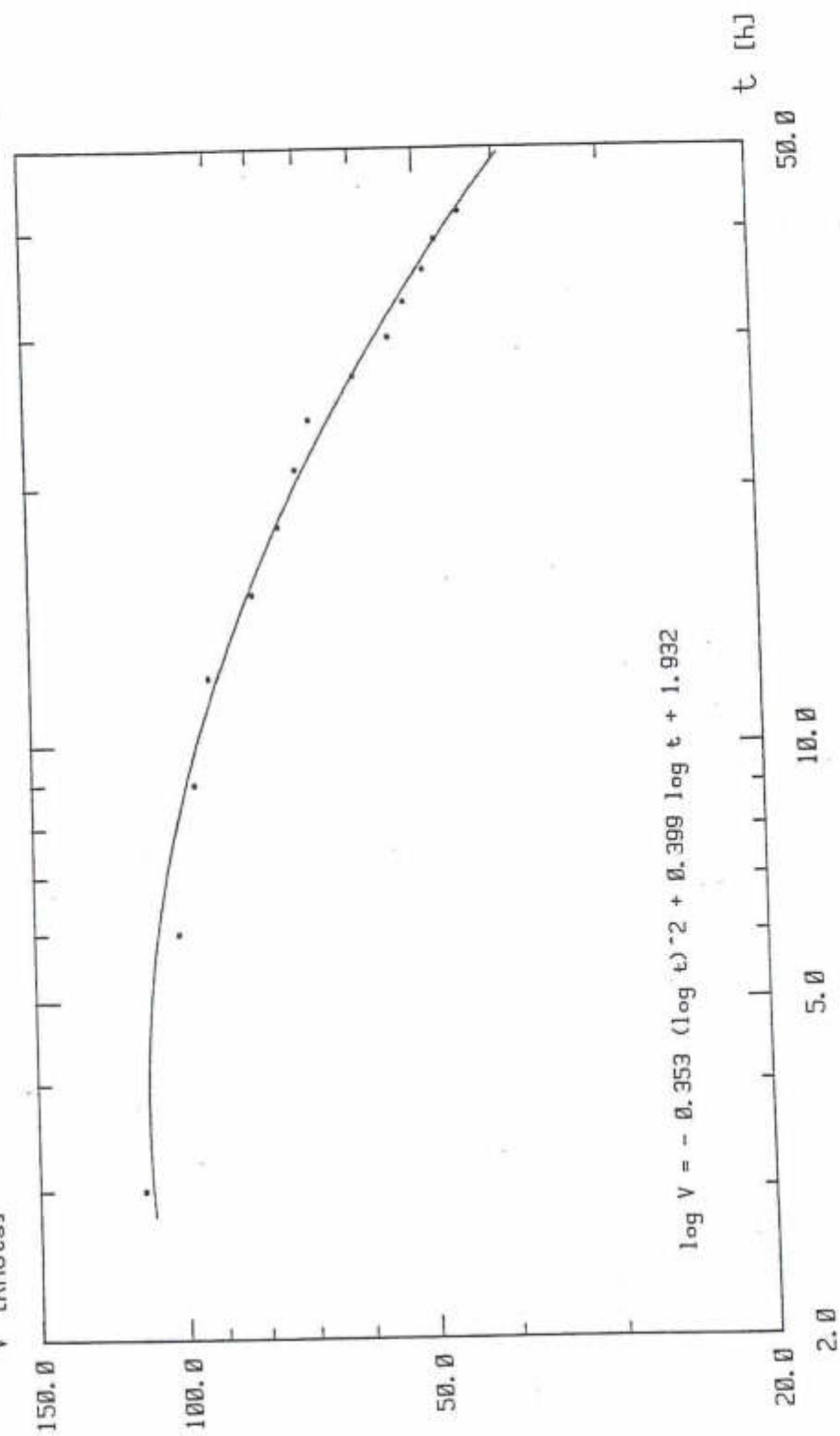
DIRECTION = N - RETURN PERIOD = 30 years

Fig. 1.3.8

EXTRAPOLATION OF WIND DATA

STATION OF USTICA

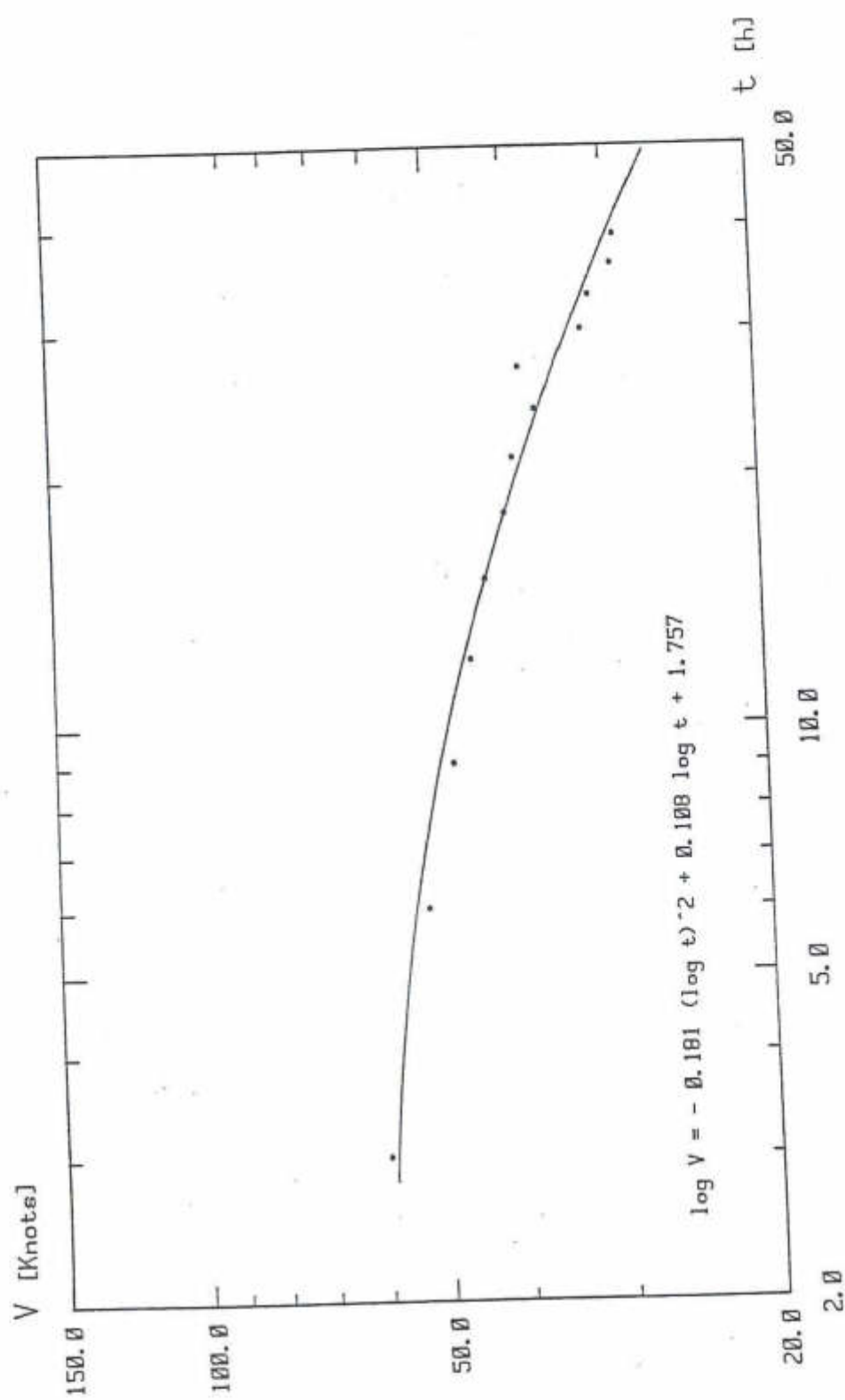
V [Knots]



DIRECTION = N - RETURN PERIOD = 50 years

Fig. 1.3.9

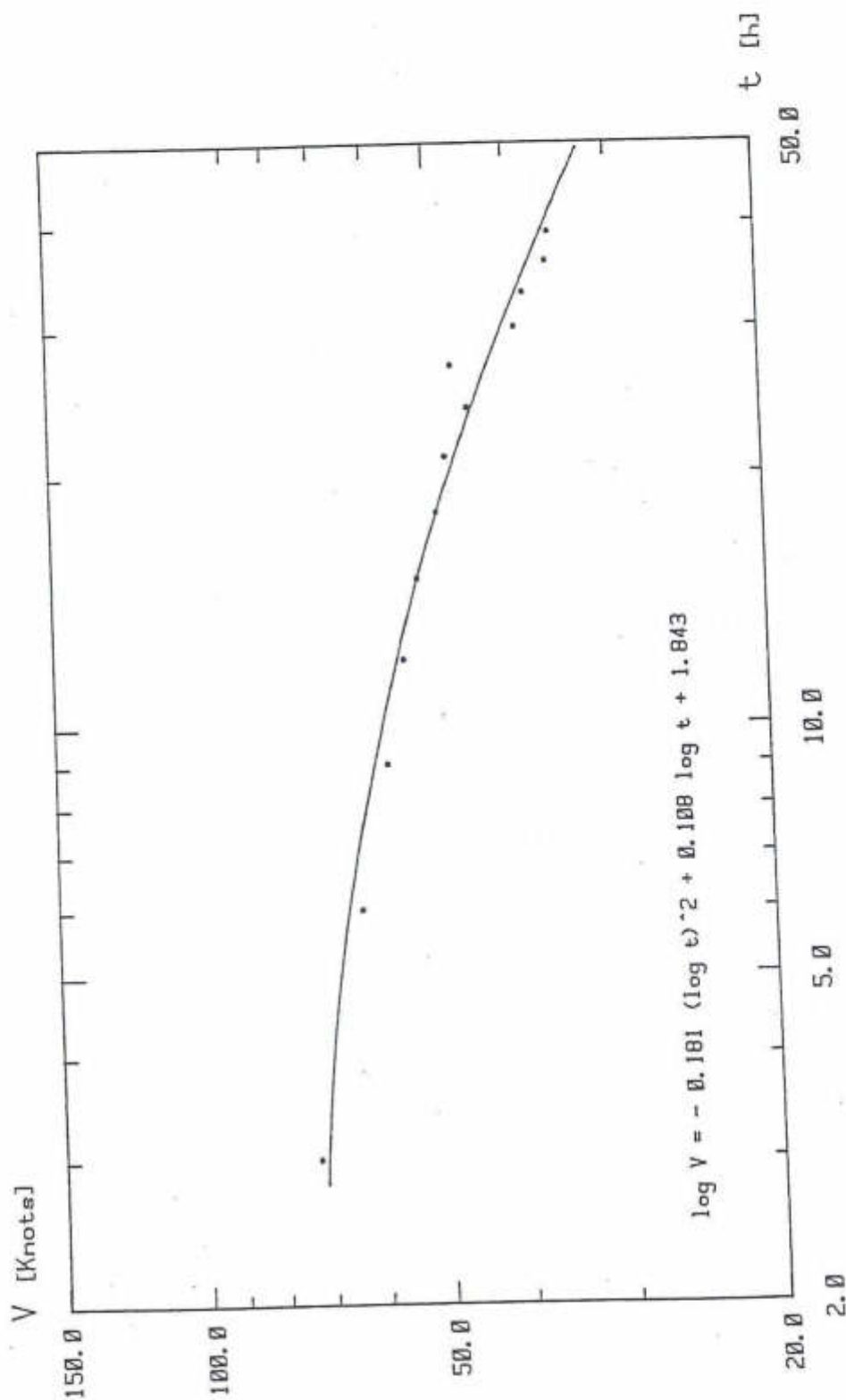
EXTRAPOLATION OF WIND DATA
STATION OF USTICA



DIRECTION = NE - RETURN PERIOD = 10 years

Fig. 13.10

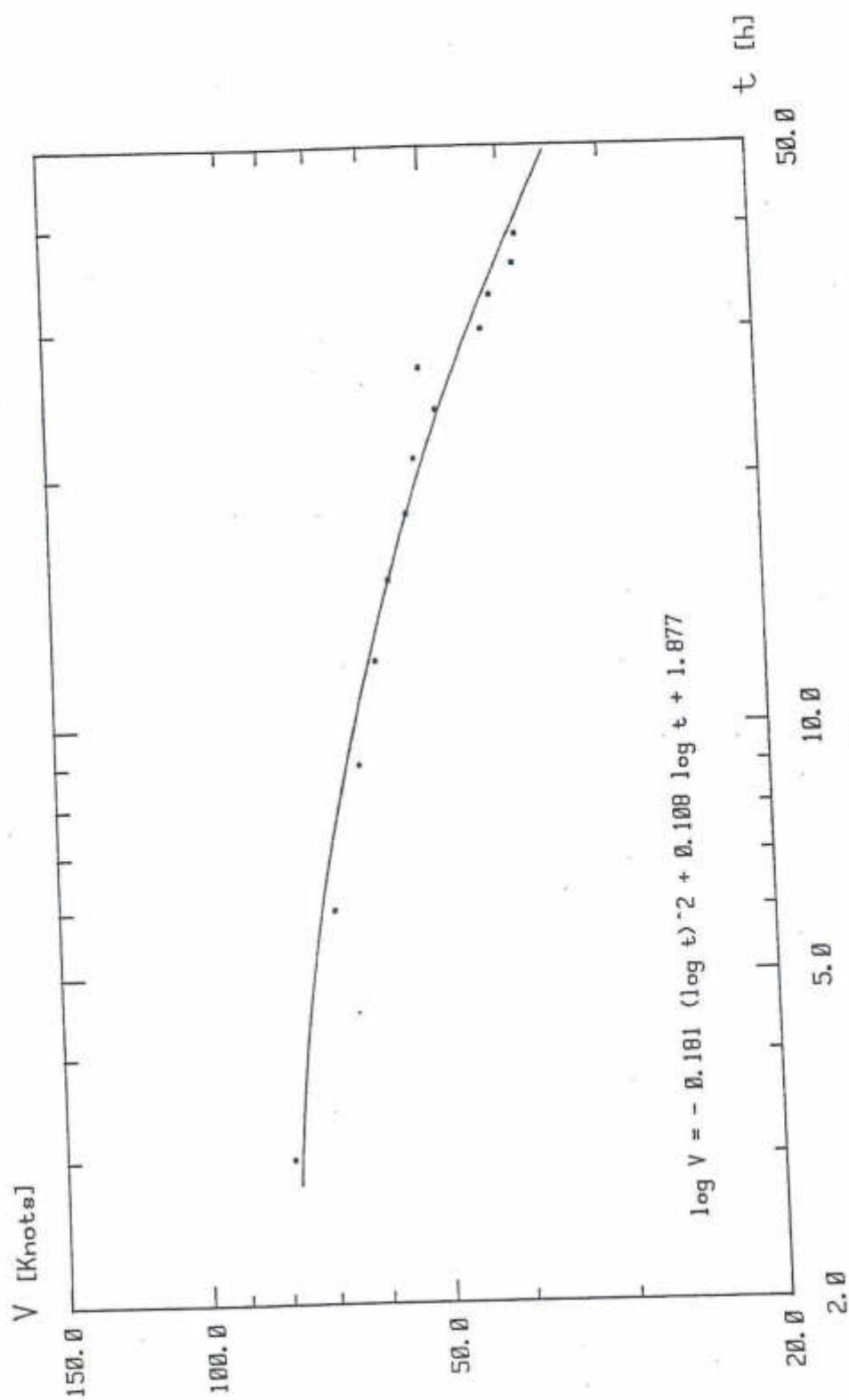
EXTRAPOLATION OF WIND DATA
STATION OF USTICA



DIRECTION = NE - RETURN PERIOD = 30 years

Fig. 1.3.11

EXTRAPOLATION OF WIND DATA
STATION OF USTICA



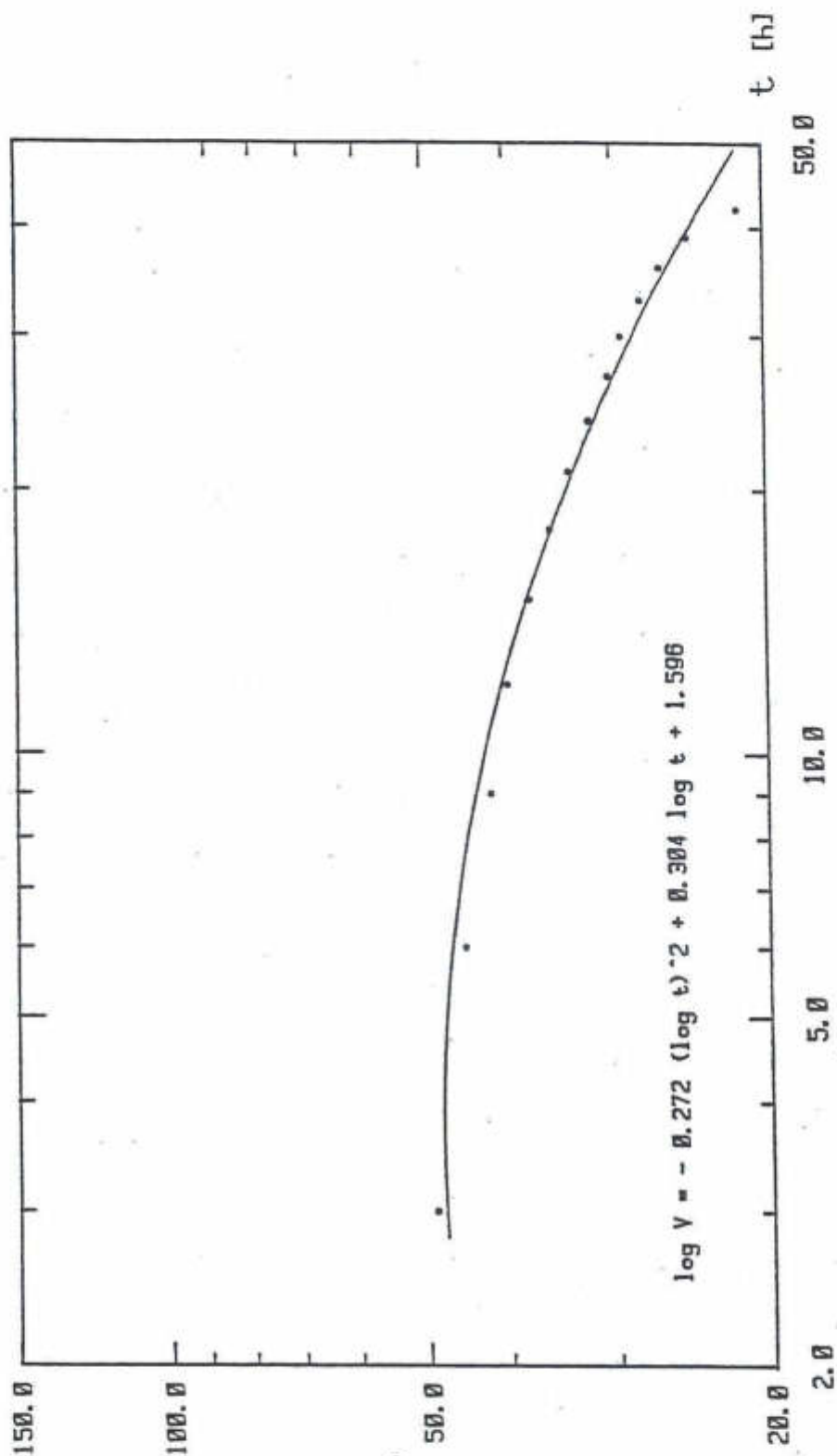
DIRECTION = NE - RETURN PERIOD = 50 years

Fig. 1.3.12

EXTRAPOLATION OF WIND DATA

STATION OF USTICA

V [Knots]

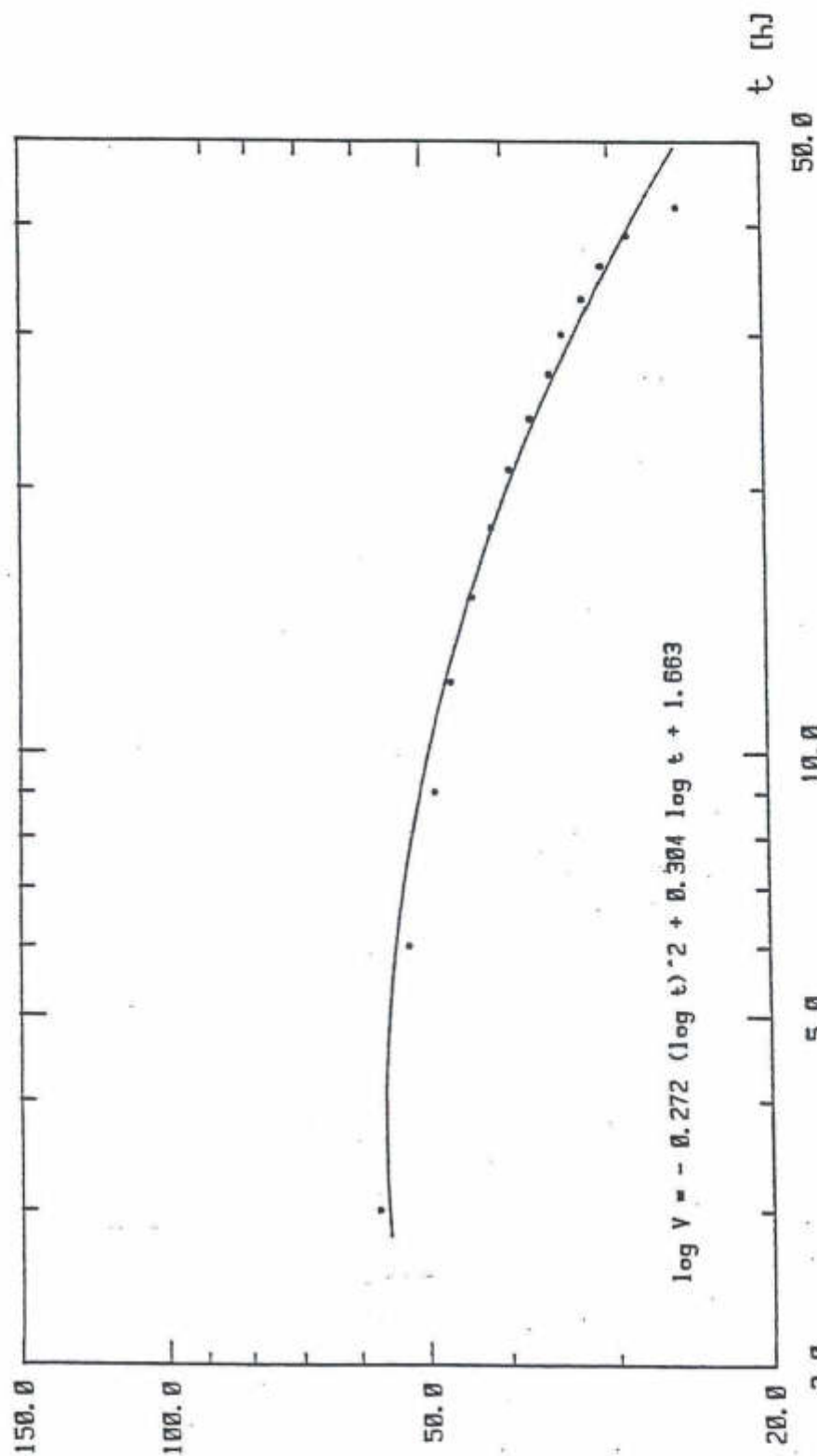


DIRECTION = E - RETURN PERIOD = 10 years

Fig. 1.3.13

EXTRAPOLATION OF WIND DATA
STATION OF USTICA

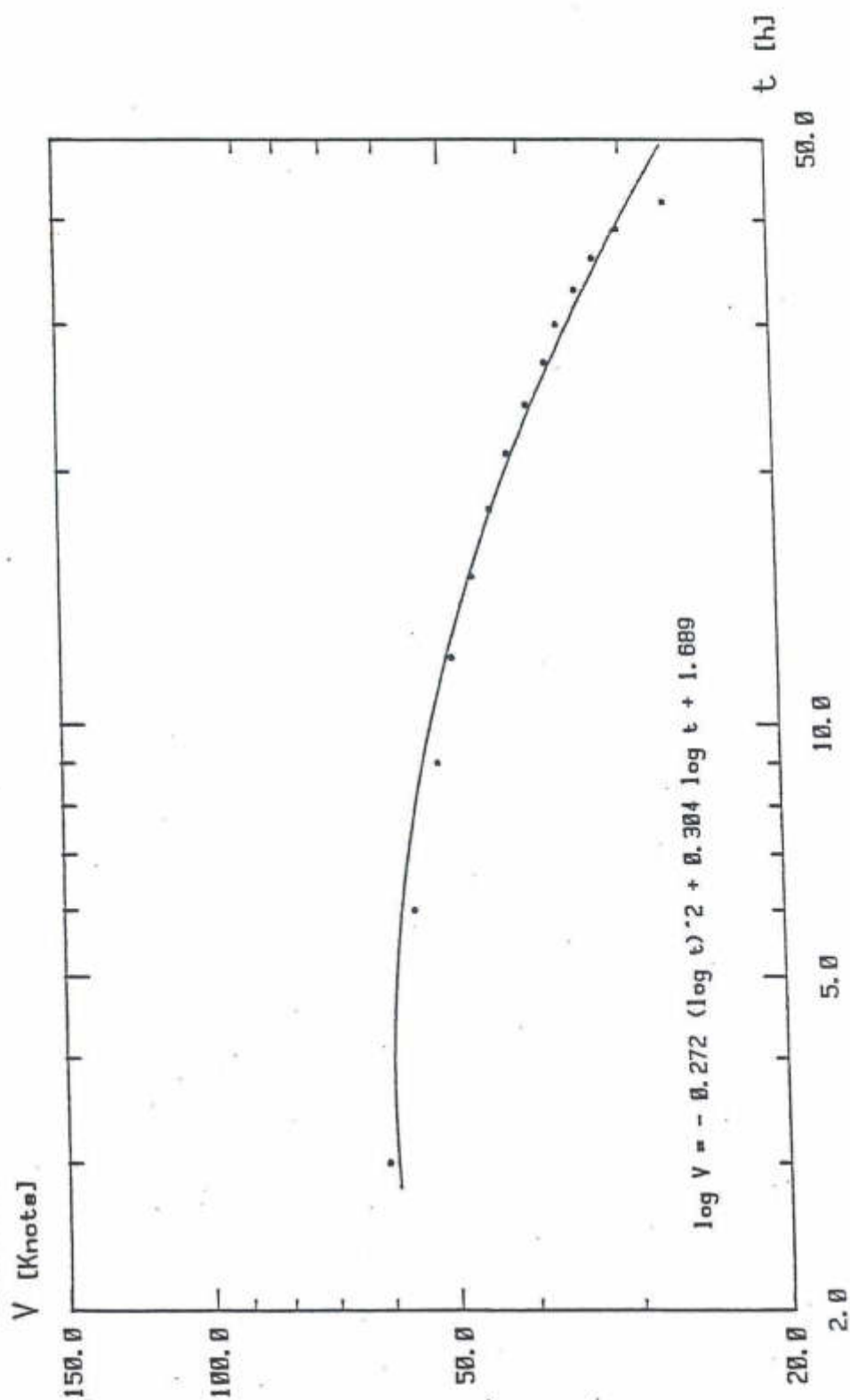
V [Knots]



DIRECTION = E - RETURN PERIOD = 30 years

Fig. 1.3.14

EXTRAPOLATION OF WIND DATA
STATION OF USTICA



DIRECTION = E - RETURN PERIOD = 50 years

Fig. 1.3.15

DISTANZE DI MARE LIBERO-MALFA (SCALO GALERA)

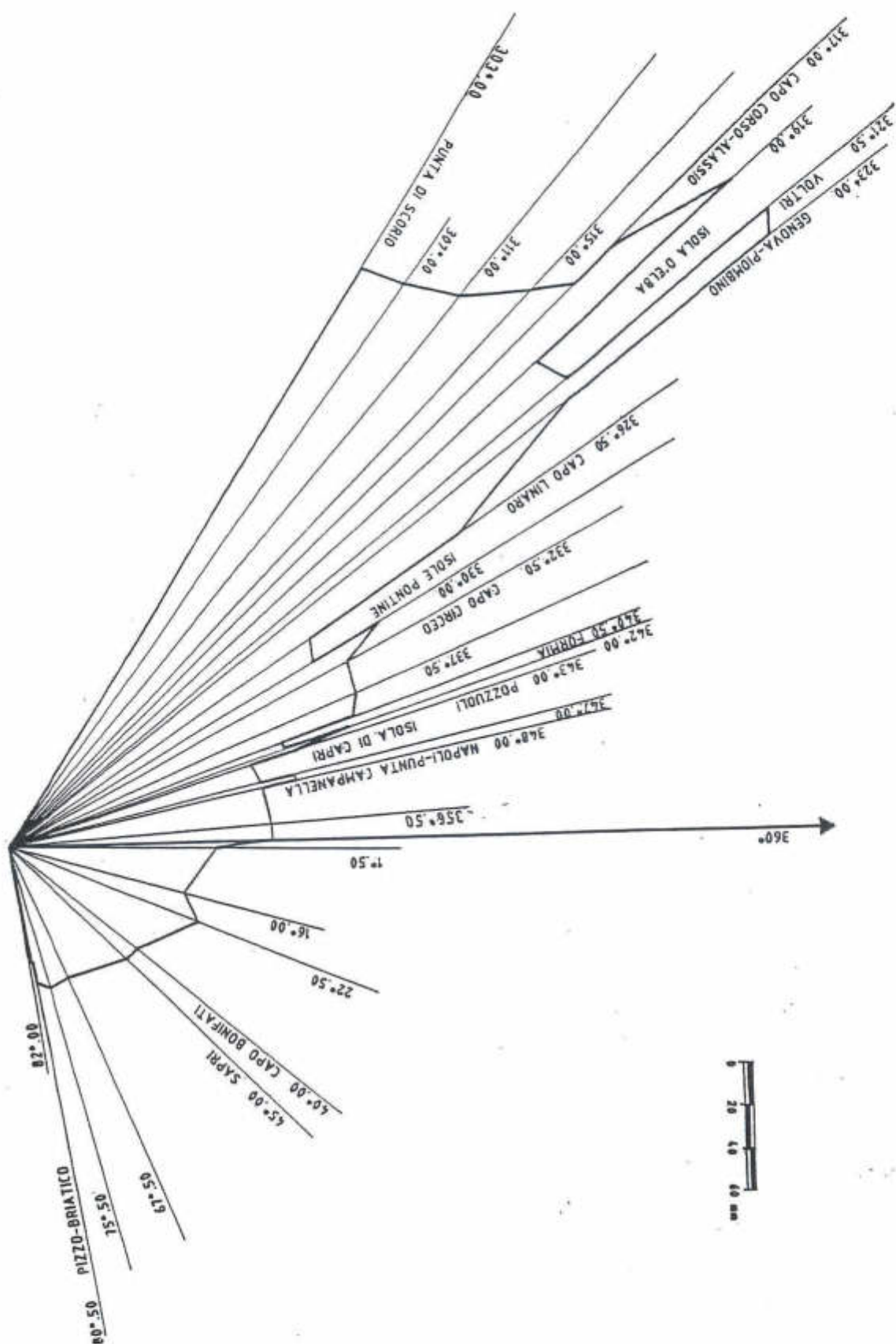


Fig. 2.1.1

FETCHES EFFETTIVI - MALFA (SCALO GALERA)

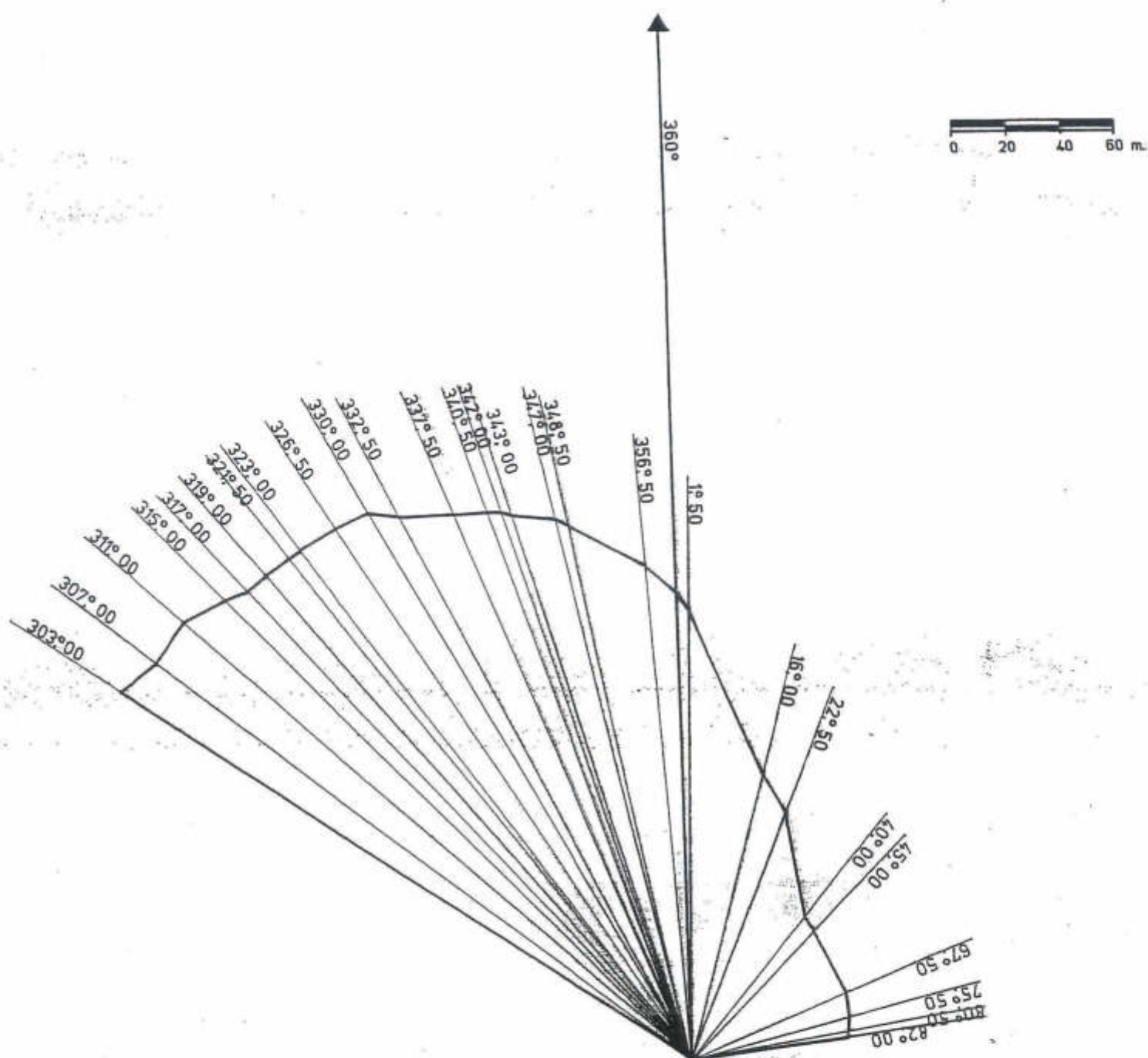


Fig. 2.2.1

T A B E L L E

DURATA [h] DEL VENTO DA 315.00 deg - STAZIONE 400AM

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' [m/s]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
3	30.72	17.87	9.75	--	--	--	--	--
5	37.85	22.79	13.93	7.53	--	--	--	--
10	44.44	28.54	18.69	11.88	6.44	--	--	--
15	48.67	31.84	21.41	14.25	8.83	--	--	--
20	51.44	34.02	23.19	15.78	10.26	5.34	--	--
30	55.19	36.95	25.61	17.85	12.13	7.47	--	--
40	57.87	39.06	27.34	19.33	13.45	8.78	--	--
50	59.93	40.67	28.67	20.46	14.45	9.73	5.36	--
75	63.55	43.53	31.02	22.46	16.21	11.37	7.26	--
100	66.83	45.49	32.63	23.84	17.42	12.47	8.38	--

DURATA [h] DEL VENTO DA 337.50 deg - STAZIONE 490AM

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' [m/s]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
3	28.78	16.60	8.88	—	—	—	—	—
5	36.88	22.20	13.65	7.52	—	—	—	—
10	44.63	28.92	19.18	12.49	7.29	—	—	—
15	49.67	32.85	22.42	15.28	9.95	—	—	—
20	53.81	35.47	24.56	17.11	11.61	7.88	—	—
30	57.55	39.84	27.58	19.61	13.84	9.26	—	—
40	60.83	41.62	29.63	21.43	15.44	10.76	—	—
50	63.35	43.61	31.27	22.82	16.66	11.89	7.76	—
75	67.84	47.16	34.28	25.32	18.84	13.87	9.78	—
100	70.93	49.68	36.22	27.04	20.35	15.22	11.07	—

DURATA [h] DEL VENTO DA 360.00 deg - STAZIONE 400AM

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' [nodi]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
3	26.84	15.33	8.82	—	—	—	—	—
5	34.95	21.62	13.36	7.50	—	—	—	—
10	44.83	29.30	19.68	13.10	8.15	—	—	—
15	50.67	33.86	23.43	16.31	11.07	6.82	—	—
20	54.57	36.92	25.94	18.44	12.97	8.67	4.62	—
30	59.91	41.12	29.39	21.38	15.55	11.85	7.31	—
40	63.79	44.18	31.92	23.53	17.42	12.74	8.96	5.58
50	66.77	46.54	33.86	25.19	18.87	14.04	10.17	6.82
75	72.12	50.78	37.37	28.17	21.47	16.36	12.31	8.93
100	75.82	53.72	39.81	30.25	23.28	17.97	13.77	10.31

DURATA [h] DEL VENTO DA 22.50 deg - STAZIONE 400AM

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' [m/s]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
3	23.78	11.28	—	—	—	—	—	—
5	32.59	17.49	9.83	—	—	—	—	—
10	43.76	25.37	14.99	8.83	—	—	—	—
15	50.56	30.21	18.67	11.31	—	—	—	—
20	55.19	33.51	21.19	13.36	—	—	—	—
30	61.60	38.12	24.78	16.18	10.23	—	—	—
40	66.32	41.53	27.31	18.27	12.83	—	—	—
50	69.99	44.18	29.34	19.98	13.48	—	—	—
75	76.62	49.81	33.86	22.87	15.88	10.72	—	—
100	81.25	52.39	35.67	24.96	17.62	12.26	—	—

DURATA (h) DEL VENTO DA 45.00 deg - STAZIONE 400AM

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' [m/s]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
3	29.71	7.23	—	—	—	—	—	—
5	30.22	13.36	4.38	—	—	—	—	—
10	42.69	21.44	10.30	2.97	—	—	—	—
15	50.46	26.56	13.92	6.32	—	—	—	—
20	55.88	30.11	16.43	8.27	—	—	—	—
30	63.29	35.12	20.01	10.98	4.92	—	—	—
40	68.65	38.88	22.70	13.01	6.65	—	—	—
50	73.20	41.82	24.82	14.61	7.94	—	—	—
75	81.11	47.23	28.74	17.56	10.29	5.09	—	—
100	86.68	51.06	31.53	19.68	11.95	6.54	—	—

DURATA [h] DEL VENTO DA 67.50 deg - STAZIONE 400AM

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' [nodi]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
3	17.78	--	--	--	--	--	--	--
5	25.46	18.26	--	--	--	--	--	--
10	34.29	16.56	--	--	--	--	--	--
15	39.93	20.38	9.29	--	--	--	--	--
20	43.76	22.98	11.41	--	--	--	--	--
30	49.89	26.62	14.17	--	--	--	--	--
40	53.81	29.31	16.19	--	--	--	--	--
50	56.86	31.41	17.74	--	--	--	--	--
75	61.58	35.24	20.58	11.12	--	--	--	--
100	65.45	37.92	22.57	12.84	--	--	--	--

ALTEZZA (m) DELL'ONDA SIGNIFICATIVA DA 315.00 deg

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' ALL'ANEMOGRAFO [nod]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
	VELOCITA' A QUOTA 10 m s.l.m. [nod]							
	22	28	35	42	49	56	63	70
3	2.84	3.71	3.98	--	--	--	--	--
5	2.84	4.06	4.68	4.62	--	--	--	--
10	2.84	4.21	5.31	5.77	5.38	--	--	--
15	2.84	4.21	5.61	6.28	6.31	--	--	--
20	2.84	4.21	5.69	6.58	6.90	5.94	--	--
30	2.84	4.21	5.69	6.95	7.38	7.08	--	--
40	2.84	4.21	5.69	7.19	7.75	7.69	--	--
50	2.84	4.21	5.69	7.29	8.01	8.10	7.09	--
75	2.84	4.21	5.69	7.29	8.46	8.75	8.31	--
100	2.84	4.21	5.69	7.29	8.74	9.15	8.94	--

PERIODO [s] DELL'ONDA SIGNIFICATIVA DA 315.00 deg

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' ALL'ANELOGRAFO [nodi]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
	VELOCITA' A QUOTA 10 m s.l.m. [nodi]							
	22	28	35	42	49	56	63	70
3	6.82	7.72	7.94	—	—	—	—	—
5	6.82	8.10	8.64	8.52	—	—	—	—
10	6.82	8.26	9.22	9.57	9.14	—	—	—
15	6.82	8.26	9.49	10.00	9.95	—	—	—
20	6.82	8.26	9.56	10.24	10.35	9.55	—	—
30	6.82	8.26	9.56	10.53	10.80	10.49	—	—
40	6.82	8.26	9.56	10.72	11.08	10.96	—	—
50	6.82	8.26	9.56	10.80	11.28	11.27	10.40	—
75	6.82	8.26	9.56	10.80	11.60	11.74	11.34	—
100	6.82	8.26	9.56	10.80	11.79	12.02	11.79	—

ALTEZZA [m] DELL'ONDA SIGNIFICATIVA DA 337.50 deg

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' ALL'ANEMOGRAFO [nodi]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
	VELOCITA' A QUOTA 10 m s.l.m. [nodi]							
	22	28	35	42	49	56	63	70
3	2.77	3.60	3.80	—	—	—	—	—
5	2.77	4.02	4.64	4.62	—	—	—	—
10	2.77	4.09	5.37	5.91	5.73	—	—	—
15	2.77	4.09	5.50	6.48	6.78	—	—	—
20	2.77	4.09	5.50	6.82	7.22	6.84	—	—
30	2.77	4.09	5.50	7.03	7.85	7.90	—	—
40	2.77	4.09	5.50	7.03	8.27	8.51	—	—
50	2.77	4.09	5.50	7.03	8.56	8.94	8.60	—
75	2.77	4.09	5.50	7.03	8.59	9.64	9.68	—
100	2.77	4.09	5.50	7.03	8.59	10.08	10.31	—

PERIODO [s] DELL'ONDA SIGNIFICATIVA DA 337.50 deg

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' ALL'ANEMOGRAFO [nodi]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
	VELOCITA' A QUOTA 10 m s.l.m. [nodi]							
	22	28	35	42	49	56	63	70
3	6.72	7.60	7.76	--	--	--	--	--
5	6.72	8.06	8.60	8.51	--	--	--	--
10	6.72	8.12	9.27	9.69	9.46	--	--	--
15	6.72	8.12	9.40	10.16	10.27	--	--	--
20	6.72	8.12	9.40	10.43	10.68	10.31	--	--
30	6.72	8.12	9.40	10.59	11.16	11.12	--	--
40	6.72	8.12	9.40	10.59	11.46	11.57	--	--
50	6.72	8.12	9.40	10.59	11.67	11.87	11.55	--
75	6.72	8.12	9.40	10.59	11.69	12.35	12.30	--
100	6.72	8.12	9.40	10.59	11.69	12.64	12.72	--

ALTEZZA [m] DELL'ONDA SIGNIFICATIVA DA 360.00 deg

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' ALL'ANEMOGRAFO [m/s]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
	VELOCITA' A QUOTA 10 m s.l.m. [m/s]							
	22	28	35	42	49	56	63	70
1	2.57	3.49	3.62	—	—	—	—	—
5	2.57	3.74	4.60	4.61	—	—	—	—
10	2.57	3.74	4.99	6.04	6.86	—	—	—
15	2.57	3.74	4.99	6.34	7.86	6.75	—	—
20	2.57	3.74	4.99	6.34	7.61	7.64	6.55	—
30	2.57	3.74	4.99	6.34	7.71	8.63	8.34	—
40	2.57	3.74	4.99	6.34	7.71	9.12	9.26	8.37
50	2.57	3.74	4.99	6.34	7.71	9.12	9.87	9.38
75	2.57	3.74	4.99	6.34	7.71	9.12	10.54	10.79
100	2.57	3.74	4.99	6.34	7.71	9.12	10.54	11.62

PERIODO [s] DELL'ONDA SIGNIFICATIVA DA 360.00 deg

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' ALL'AMEHOGRAFO [nodi]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
	VELOCITA' A QUOTA 10 m s.l.m. [nodi]							
	22	28	35	42	49	56	63	70
3	6.45	7.48	7.56	—	—	—	—	—
5	6.45	7.76	8.56	8.51	—	—	—	—
10	6.45	7.76	8.93	9.88	9.74	—	—	—
15	6.45	7.76	8.93	10.04	10.55	10.23	—	—
20	6.45	7.76	8.93	10.04	10.98	10.92	9.96	—
30	6.45	7.76	8.93	10.04	11.06	11.65	11.36	—
40	6.45	7.76	8.93	10.04	11.06	11.99	12.81	11.29
50	6.45	7.76	8.93	10.04	11.06	11.99	12.43	12.01
75	6.45	7.76	8.93	10.04	11.06	11.99	12.87	12.95
100	6.45	7.76	8.93	10.04	11.06	11.99	12.87	13.47

ALTEZZA [m] DELL'ONDA SIGNIFICATIVA DA 22.50 deg

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' ALL'ANEMOGRAFO [nodi]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
	VELOCITA' A QUOTA 10 m s.l.m. [nodi]							
	22	28	35	42	49	56	63	70
3	2.08	2.96	—	—	—	—	—	—
5	2.08	2.96	3.79	—	—	—	—	—
10	2.08	2.96	3.88	4.77	—	—	—	—
15	2.08	2.96	3.88	4.87	—	—	—	—
20	2.08	2.96	3.88	4.87	—	—	—	—
30	2.08	2.96	3.88	4.87	5.88	—	—	—
40	2.08	2.96	3.88	4.87	5.88	—	—	—
50	2.08	2.96	3.88	4.87	5.88	—	—	—
75	2.08	2.96	3.88	4.87	5.88	6.92	—	—
100	2.08	2.96	3.88	4.87	5.88	6.92	—	—

PERIODO [s] DELL'ONDA SIGNIFICATIVA DA 22.50 deg

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' ALL'ANEMOGRAFO [nodil]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
	VELOCITA' A QUOTA 10 m s.l.m. [nodil]							
	22	28	35	42	49	56	63	70
3	5.78	6.86	—	—	—	—	—	—
5	5.78	6.86	7.75	—	—	—	—	—
10	5.78	6.86	7.84	8.66	—	—	—	—
15	5.78	6.86	7.84	8.75	—	—	—	—
20	5.78	6.86	7.84	8.75	—	—	—	—
30	5.78	6.86	7.84	8.75	9.59	—	—	—
40	5.78	6.86	7.84	8.75	9.59	—	—	—
50	5.78	6.86	7.84	8.75	9.59	—	—	—
75	5.78	6.86	7.84	8.75	9.59	10.36	—	—
100	5.78	6.86	7.84	8.75	9.59	10.36	—	—

ALTEZZA [m] DELL'ONDA SIGNIFICATIVA DA 45.00 deg

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' ALL'ANEMOGRAFO [nodi]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
	VELOCITA' A QUOTA 10 m s.l.m. [nodi]							
	22	28	35	42	49	56	63	70
3	1.91	2.49	—	—	—	—	—	—
5	1.91	2.69	2.65	—	—	—	—	—
10	1.91	2.69	3.51	2.85	—	—	—	—
15	1.91	2.69	3.51	4.23	—	—	—	—
20	1.91	2.69	3.51	4.40	—	—	—	—
30	1.91	2.69	3.51	4.40	4.67	—	—	—
40	1.91	2.69	3.51	4.40	5.30	—	—	—
50	1.91	2.69	3.51	4.40	5.30	—	—	—
75	1.91	2.69	3.51	4.40	5.30	5.79	—	—
100	1.91	2.69	3.51	4.40	5.30	6.23	—	—

PERIODO [s] DELL'ONDA SIGNIFICATIVA DA 45.00 deg

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' ALL'ANELOGRAFO [nodi]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
	VELOCITA' A QUOTA 10 m s.l.m. [nodi]							
	22	28	35	42	49	56	63	70
3	5.53	6.28	—	—	—	—	—	—
5	5.53	6.54	6.41	—	—	—	—	—
10	5.53	6.54	7.44	6.57	—	—	—	—
15	5.53	6.54	7.44	8.13	—	—	—	—
20	5.53	6.54	7.44	8.30	—	—	—	—
30	5.53	6.54	7.44	8.30	8.48	—	—	—
40	5.53	6.54	7.44	8.30	9.08	—	—	—
50	5.53	6.54	7.44	8.30	9.08	—	—	—
75	5.53	6.54	7.44	8.30	9.08	9.42	—	—
100	5.53	6.54	7.44	8.30	9.08	9.80	—	—

ALTEZZA (m) DELL'ONDA SIGNIFICATIVA DA 67.50 deg

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' ALL'ANEMOGRAFO [m/s]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
	VELOCITA' A QUOTA 10 m s.l.m. [m/s]							
	22	28	35	42	49	56	63	70
3	1.84	—	—	—	—	—	—	—
5	1.84	2.58	—	—	—	—	—	—
10	1.84	2.58	—	—	—	—	—	—
15	1.84	2.58	3.36	—	—	—	—	—
20	1.84	2.58	3.36	—	—	—	—	—
30	1.84	2.58	3.36	—	—	—	—	—
40	1.84	2.58	3.36	—	—	—	—	—
50	1.84	2.58	3.36	—	—	—	—	—
75	1.84	2.58	3.36	4.21	—	—	—	—
100	1.84	2.58	3.36	4.21	—	—	—	—

PERIODO [s] DELL'ONDA SIGNIFICATIVA DA 67.50 deg

T. DI RITORNO [anni]	VELOCITA' ALL'ANEKOGRAFO [medil]							
	30	40	50	60	70	80	90	100
	VELOCITA' A QUOTA 10 m s.l.m. [medil]							
	22	28	35	42	49	56	63	70
3	5.42	—	—	—	—	—	—	—
5	5.42	6.40	—	—	—	—	—	—
10	5.42	6.40	—	—	—	—	—	—
15	5.42	6.40	7.28	—	—	—	—	—
20	5.42	6.40	7.28	—	—	—	—	—
30	5.42	6.40	7.28	—	—	—	—	—
40	5.42	6.40	7.28	—	—	—	—	—
50	5.42	6.40	7.28	—	—	—	—	—
75	5.42	6.40	7.28	8.10	—	—	—	—
100	5.42	6.40	7.28	8.10	—	—	—	—