Titolo:

INTERVENTO DI RIPRISTINO E ADEGUAMENTO DELLE OPERE DI DIFESA A MARE DELLA CONCESSIONE DELLA LEGA NAVALE ITALIANA DI GENOVA QUINTO AL MARE

Oggetto:

Relazione idraulica

Il Committente:

Lega Navale Italiana – Sez. Genova Quinto

Il Tecnico:

Ing. Alessandro Izoard
Arch. Geom. Daniel Spada

Livello di progetto:

Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica

Firme:



Alessandro
Izoard
15.02.2026
18:12:51
GMT+01:00

Rev:	Emissioni / Revisioni	Data
0	PRIMA EMISSIONE	12/02/2026

Ing. Alessandro Izoard– Via Nicola Fabrizi 4/1 16148 Genova – tel.: 3408098400 –
alessandro.izoard@ingpec.it

INDICE

1 PREMESSA 1

2 CALCOLO DELL'ONDA DI PROGETTO 3

2.1 SCELTA DEL PERIODO DI RITORNO 3
2.2 SCELTA DELL'ONDA DI PROGETTO AL LARGO 4
2.3 SETTORI DI TRAVERSIA 4
2.4 STATISTICA DELLE ONDE AL LARGO 4
2.5 SCELTA DELL'ONDA DI CALCOLO AL PIEDE DELL'OPERA 5
2.5.1 Propagazione dell'onda dal largo verso riva 5
2.6 FENOMENI DI SOVRALZO DEL LIVELLO MEDIO MARE 8
2.7 ONDA DI PROGETTO 9
2.7.1 Onda di progetto per la scogliera soffolta 10
2.7.2 Onda di progetto per la scogliera soffolta 10

3 DIMENSIONAMENTO DELLA SCOGLIERA 12

3.1 DIMENSIONAMENTO DELLA MANTELLATA MEDIANTE LA FORMULA DI VAN DER MEER 12
3.1.1 Calcoli per la scogliera soffolta 14
3.1.2 Calcoli per la scogliera emersa 14
3.2 DIMENSIONAMENTO DELLA GEOMETRIA DELLA SCOGLIERA SOFFOLTA 15
3.2.1 Variazione del risultato mantenendo fissa la sommergenza e variando la larghezza 17

1 PREMESSA

La presente relazione è parte integrante degli elaborati del Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica relativo all'*"Intervento di ripristino e adeguamento delle opere di difesa a mare della concessione della Lega Navale Italiana di Genova Quinto al Mare"* e costituisce la Relazione Idraulica con il dimensionamento delle opere a mare facenti parte del progetto di cui sopra.

L'obiettivo degli interventi è quello di implementare le opere di difesa a mare esistenti a protezione dell'area in concessione demaniale alla Lega Navale Italiana – Sez. di Genova Quinto al Mare.

In particolare, le mareggiate di forte intensità degli ultimi anni hanno disarticolato alcune parti delle scogliere poste a difesa della struttura su cui sono poste in rimessa le imbarcazioni e si sono verificati al piede della stessa struttura sgrottamenti ed erosioni alle sottomurazioni.
Altresì la Lega stessa lamenta il cospicuo trasporto solido che avviene a seguito delle mareggiate nell'area retrostante il rimessaggio a causa del sormonto della struttura da parte del mare.

Nell'ortofoto di seguito riportata è presente un inquadramento dell'area di interesse, con cerchiato in rosso il rimessaggio che si intende proteggere con le nuove opere.



Figura 1.1 – Inquadramento su ortofoto dell'area di intervento con cerchiato in rosso il rimessaggio da proteggere

All’interno del presente elaborato viene determinata l’onda di progetto attraverso il calcolo della propagazione dell’onda dal largo verso riva. Nel seguito, vengono dimensionate due opere alternative costituite o da una scogliera soffolta (“Soluzione A”) o dal prolungamento della scogliera emersa (“Soluzione B”).

Per maggiori dettagli circa la descrizione delle criticità riscontrate e delle soluzioni progettuali proposte si rimanda alla Relazione Tecnico-Illustrativa.

2 CALCOLO DELL'ONDA DI PROGETTO

All'interno del presente capitolo viene calcolata l'onda di progetto con la quale vengono dimensionate le opere marittime oggetto del presente elaborato.
Per entrambe le possibili soluzioni sopra analizzate la metodologia di calcolo è la medesima, ciò che cambia è la profondità alla quale l'onda al piede dell'opera viene calcolata.
Nel caso della scogliera soffolta la batimetrica di riferimento è a -4.50 m s.l.m. mentre per il prolungamento della scogliera emersa la batimetrica di riferimento è a -3.50 m s.l.m..

Nel seguito viene presentato il calcolo della propagazione del moto ondoso dal largo verso riva e infine vengono calcolati i due differenti valori di onda per le due diverse opere.

2.1 SCELTA DEL PERIODO DI RITORNO

Il calcolo dell'onda di progetto utilizzata per il dimensionamento della mantellata è stato eseguito secondo i criteri indicati nelle "Istruzioni tecniche per la progettazione delle dighe marittime", approvate dall'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici con voto del 23 settembre 1994 n. 156.
In particolare, si è assunta come durata minima di vita T_v per l'opera a progetto, quella corrispondente ad un'opera minore a difesa di un circolo nautico con piccole imbarcazioni, ossia 20 anni.
Come massima probabilità di danneggiamento dell'opera P_f è stata assunta quella corrispondente al danneggiamento incipiente come consigliato per le strutture flessibili (le opere in esame non sono soggette a collasso strutturale immediato) con limitato rischio per la vita umana e ripercussione economica bassa (il rapporto tra i costi diretti del danneggiamento, sommati a quelli indiretti per la perdita di funzionalità delle opere protette ed il costo totale per la realizzazione dell'opera è minore di 5), ossia $P_f = 0.50$.

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

Tabella 2.1 – Danneggiamento incipiente accettato per l'opera di difesa.

La combinazione del tempo di vita dell'opera T_v e della probabilità di danneggiamento P_f determina il tempo di ritorno dell'evento di T_{rp}:

$$T_{rp} = \frac{T_v}{-\ln(1 - P_f)} = 28\ anni$$

Ai fini dei calcoli è stato quindi assunto, un tempo di ritorno dell'onda di progetto pari a 25 anni. Nel paragrafo seguente si sceglie l'altezza d'onda al largo di progetto.

2.2 SCELTA DELL'ONDA DI PROGETTO AL LARGO

All'interno del presente capitolo si effettua un'analisi delle onde al largo e della loro propagazione verso la costa per la determinazione dell'onda di progetto con la quale svolgere i dimensionamenti ai capitoli seguenti.

2.3 SETTORI DI TRAVERSIA

Il paraggio di Genova Quinto ha due settori di traversia: quello di scirocco e quello di libeccio.

Il settore di traversia principale (che conduce a valori di altezza d'onda maggiori) è quello di libeccio (195°-225° N) compreso indicativamente tra le isole Baleari e la costa occidentale della Sardegna.
Nella mappa rappresentata nella figura seguente sono tracciati i settori di traversia del paraggio.

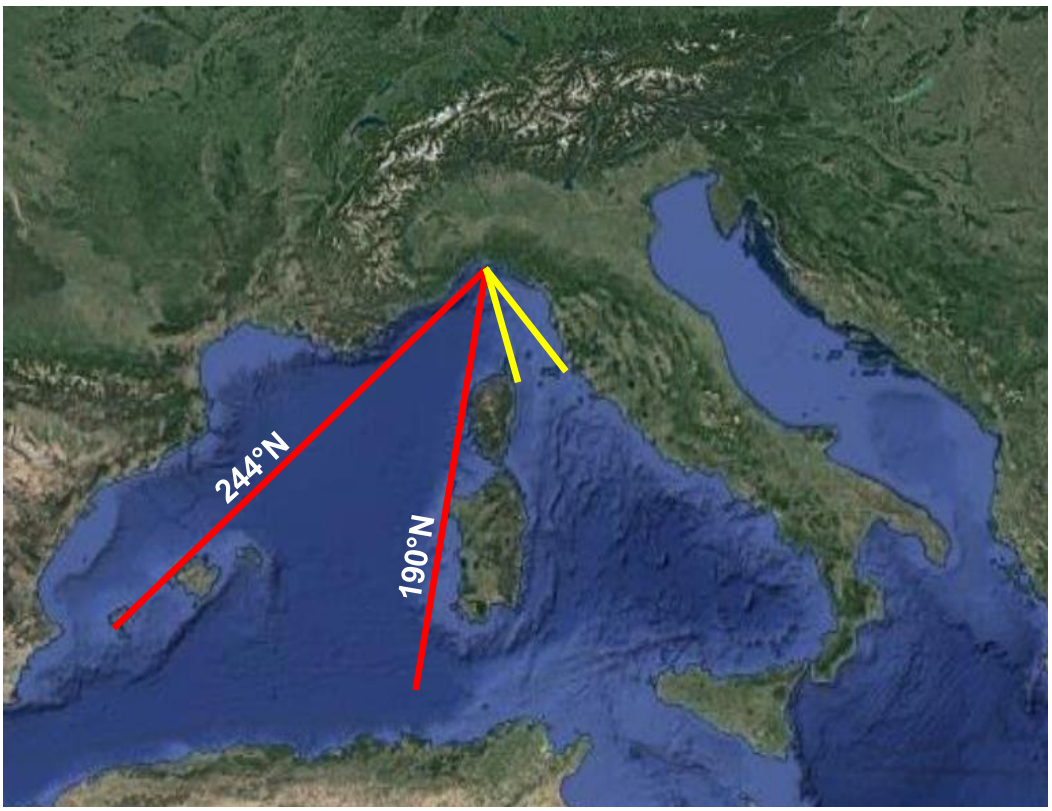


Figura 2.1– Settori di traversia di libeccio

2.4 STATISTICA DELLE ONDE AL LARGO

La stima delle caratteristiche del moto ondoso che può incidere sull'opera in progetto deriva dal calcolo della propagazione dello stato del mare dalle alte profondità verso riva.

Per la valutazione delle grandezze caratteristiche (altezza d'onda, periodo, lunghezza d'onda) si è fatto riferimento ai dati forniti dal K.N.M.I. (Istituto della Marina Reale Olandese), elaborati dal Prof. Boccotti (1986) i cui risultati sono riportati nella tabella seguente.

ZONA 2 DA PUNTA DI PORTOFINO A CAPO DI VADO **Settori di provenienza: scirocco, mezzogiorno, libeccio**						
dir °N	TR (anni)					
	1		50		100	
	H (m)	Tp (s)	H (m)	Tp (s)	H (m)	Tp (s)
150	2.5	7.1	5.4	10.5	5.8	10.9
180	3.1	7.9	6.0	11.0	6.5	11.5
210	3.4	8.3	7.8	12.6	8.5	13.2

Tabella 2.2 – altezza e periodo di picco dell'onda al largo di Genova per diversi settori di provenienza e diversi tempi di ritorno (Boccotti).

Per il settore di traversia che interessa il sito di intervento si fa riferimento ad un angolo di 210°, che costituisce la direzione più prossima alla media del settore di traversia principale individuato.
Mediante interpolazione logaritmica dei dati per lo stesso settore di provenienza sono stati ricavati i valori anche per i tempi di ritorno di 5,10, 20 e 25 anni.

Di seguito sono riassunti i valori risultanti per la direzione di 210°N e tempi di ritorno variabili tra 1 e 100 anni:

T [anni]	H [m]	T_p [s]
1	3.4	8.3
5	5.2	10.3
10	6.0	11.0
20	6.7	11.7
25	7.5	12
50	7.8	12.6
100	8.5	13.2

Tabella 2.3 – Valori di altezza e periodo dell'onda di progetto calcolati mediante interpolazione logaritmica dai valori di Tabella 1-2

I valori della tabella di cui sopra trovano riscontro anche nei documenti relativi al recente progetto delle opere per l'adeguamento funzionale del molo di protezione e delle banchine del porticciolo di Nervi, sito ad una distanza di circa 1.5 km dal sito di interesse.

2.5 SCELTA DELL'ONDA DI CALCOLO AL PIEDE DELL'OPERA

2.5.1 Propagazione dell'onda dal largo verso riva

Trattandosi di opera sotto costa l'onda di progetto che si assume a base dei calcoli è quella di altezza massima compatibile con la profondità dell'opera da verificare.

La lunghezza d'onda al largo è calcolata con la relazione valida su profondità infinita:

$$L_{p0} = \frac{gT^2}{2\pi}$$

Lo studio del moto ondoso in corrispondenza dell'area costiera tiene conto dei fenomeni di interazione dell'onda con i fondali sui quali si propaga, in particolare degli effetti di *shoaling* e *saturazione*.
A favore di sicurezza non vengono considerati nel calcolo gli effetti di *rifrazione*, considerando un moto ondoso con attacco frontale.

La profondità del fondale antistante il paraggio in esame è limitata, per cui si utilizza un modello spettrale in cui compaiono i processi di *shoaling* e *saturazione* fino alla profondità limite.

Dalla profondità limite fino alla profondità di frangimento, si utilizza un modello ad onde regolari in cui interviene soltanto il processo di *shoaling*.

Processo di shoaling

Secondo il modello di propagazione dal largo fino alla profondità limite l'altezza d'onda spettrale di *shoaling* (H_{sh}), che rappresenta la conservazione dell'energia da profondità infinita a profondità finita, si ricava da:

$$H_{sh} = K_s \cdot H_{m0}$$

dove H_{m0} è l'altezza d'onda su profondità infinita e K_s è il coefficiente di *shoaling* pari a:

$$K_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \cosh^2(kh)}{2kh + senh(2kh)}}$$

con $k = 2\pi/L_p$ numero d'onda e L_p lunghezza d'onda che, per profondità finita h, è uguale a:

$$L_p = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L_p}\right)$$

Processo di saturazione

Il processo di *saturazione* interpreta le dissipazioni superficiali di energia conseguenti ai frangimenti parziali tipo *spilling* che si hanno nella propagazione dal largo verso riva, di conseguenza l'onda spettrale di saturazione rappresenta un valore limite, cioè l'onda di massima altezza che può esistere nello stato di mare considerato.

Assumendo la profondità limite adimensionalizzata σ_{hp} pari a 0.6 e definita come:

$$\sigma_{hp} = \left(\frac{2\pi}{T_H}\right)\sqrt{\frac{h^*}{g}}$$

si ricava la profondità limite h^*.

L'altezza spettrale di saturazione H_{sat} alla profondità limite h^* si ottiene dalla relazione di Resio[1]:

$$\frac{H_{sat}}{L_p^{0.75}} = \frac{H_{m0}}{L_{p0}^{0.75}}$$

dove L_p è la lunghezza d'onda alla profondità limite, L_{p0} è la lunghezza d'onda alla profondità infinita e H_{m0} è l'altezza d'onda alla profondità infinita.

Determinazione dell'onda di progetto

L'altezza d'onda spettrale effettiva H_{mE} alla profondità limite è quindi data dalla seguente espressione:

$$H_{mE} = min\{H_{sh}, H_{sat}\}$$

Dall'altezza effettiva d'onda H_{mE} si ricava l'altezza d'onda spettrale fittizia al largo H_{m0}' che rappresenta l'altezza d'onda, la cui propagazione restituisce l'altezza H_{sat} alla profondità limite h^*.

L'altezza d'onda spettrale fittizia alla profondità limite h^* può essere espressa come:

$$H'_{m0} = \frac{H_{m0}}{K_s^*}$$

dove K_s^* è il coefficiente di *shoaling* alla profondità limite pari a 1.

Il modello di propagazione dalla profondità limite fino alla profondità di frangimento tiene conto solo del processo di *shoaling* e permette di calcolare l'altezza d'onda H_h alle varie profondità h_i fino al frangimento.

Il valore di H_h è pari al prodotto fra l'altezza d'onda spettrale fittizia H_{m0}' e il coefficiente di *shoaling* $K_s(h_i)$ calcolato alla profondità h_i.

Il calcolo dell'altezza d'onda è effettuato distinguendo tra acque basse e acque intermedie secondo le seguenti formulazioni:

acque basse d/L<0.04

$$L = T \cdot \sqrt{g \cdot h}$$

acque intermedie 0.04< d/L<0.5

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot Th\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L}\right)$$

$$K_s = \sqrt{\frac{2Ch^2(kh)}{2kh + Sh(2kh)}}$$

[1] Resio D.T. - *Shallow water waves* - Journ. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering - vol. 113 - N° 3 - 1987.

con k numero d'onda pari a $k = \frac{2\pi}{L}$

L'altezza dell'onda frangente per fissate profondità h è calcolata utilizzando la formula di Mac-Cowan-Munk

$$\frac{H_f}{h} = 0.78$$

Confrontando l'altezza dell'onda frangente H_f con l'altezza ricavata dal modello di propagazione per i soli effetti di *shoaling* H_h, si ottiene l'altezza d'onda frangente e la relativa profondità all'uguaglianza dei due valori $H_f = H_h$.
Nel paragrafo seguente vengono fatte alcune considerazioni circa le variazioni del livello medio mare al fine di considerare la corretta profondità da inserire nella formulazione di cui sopra per il calcolo dell'altezza d'onda al piede dell'opera.

2.6 FENOMENI DI SOVRALZO DEL LIVELLO MEDIO MARE

Il livello medio mare non è costante ma soggetto a continue variazioni. Nel seguito si elencano le principali cause:

- fenomeni di tipo atmosferico-barometrico;
- fenomeni dovuti al moto ondoso (wave set-up);
- effetti dell'innalzamento dei mari dovuti ai cambiamenti climatici.

Per quanto attiene i primi fenomeni, la determinazione del livello del mare per assegnati tempi di ritorno è stata ricavata dallo studio meteomarino specifico eseguito da DHI S.r.l. nel 2019 nell'ambito della progettazione definitiva degli interventi a difesa del depuratore di Chiavari ed utilizzato anche nell'ambito della recente progettazione della scogliera a difesa del depuratore di Genova Sturla.

L'analisi statistica dei dati di livello del mare si basa sulla serie di livello idrometrico registrata dal mareografo di Genova.

Il mareografo è posto all'interno del bacino portuale, pertanto è in grado di tenere in considerazione i seguenti contributi alla composizione del livello superficiale totale:

- contributo della marea astronomica;
- contributo della pressione atmosferica (effetto di "barometro inverso");
- contributo del vento (effetto "wind setup", ovvero schiacciamento della massa d'acqua verso terra in concomitanza con intensi venti provenienti dal mare).

Per la sua posizione, il mareografo non misura l'effetto dell'onda ("wave setup") che, su costa aperta e in bassi fondali, laddove si verifica il frangimento, può ulteriormente contribuire ad innalzare (localmente) la superficie marina.
Ai fini della determinazione dei livelli di riferimento di fronte alla scogliera in progetto, quest'ultimo contributo è stato quindi trascurato anche in virtù del fatto che statisticamente è improbabile che si verifichino contemporaneamente tutti gli effetti.
La statistica dei livelli per assegnato tempo di ritorno è stata impostata sui 40 valori più elevati registrati dal mareografo ed ha fornito i valori riportati nella tabella seguente.

T [anni]	Livello [m.s.l.m.]
10	0.62
25	0.68
50	0.72
75	0.74
100	0.76

Tabella 2.4 – Valori di l.m.m. per differenti tempi di ritorno

Per quel che riguarda l'innalzamento del livello medio mare dovuto ai cambiamenti climatici, basandosi su quanto riportato nel rapporto AR6 IPCC si può desumere, un aumento del livello medio mare nei prossimi 50 anni tra i 20 ed i 30 cm. Si è scelta in tal caso la condizione peggiore considerando 30 cm di aumento.
Nonostante la vita utile dell'opera risulti inferiore, si ritiene comunque necessario tenere in considerazione tale valore.

Nel complesso si ha quindi un sovralzo del l.m.m. dato dalla somma di 0.68 m e 0.30 m per un sovralzo totale di circa 1 m.

2.7 ONDA DI PROGETTO

All'interno del presente paragrafo vengono calcolate le due differenti onde di progetto per le due differenti soluzioni proposte:

- Scogliera soffolta in prolungamento alla grossa secca esistente
- Scogliera emersa in prolungamento alla scogliera già esistente

Il calcolo della propagazione dell'onda è il medesimo e viene riportato nel seguito.

Calcolo propagazione moto ondoso

Onda al largo	Altezza	H_0	7,50 m
	Periodo	T_0	12,00 s
	Lunghezza	L_0	224,9 m
Saturazione	Profondità limite	h*	**12,9** m
	Lunghezza	L*	129,9 m
		h/L	0,1
	altezza	H*	5,0 m
Shoaling	rapporto	h^*/L_0	**0,1** m
	Coefficiente	Ks	1,0
	altezza	H	7,6 m
Onda effettiva alla profondità h*	Altezza	H_0	5,0 m

Calcolo altezza d'onda verso riva

h	L	kh	Ks	H	Hf	
8,0	102,28	0,49	1,09	0,00	6,24	
7,0	96,14	0,46	1,12	0,00	5,46	frangente
6,0	89,44	0,42	1,15	0,00	4,68	
5,0	82,04	0,38	1,20	0,00	3,90	
4,0	77,00	0,33	1,28	0,00	3,12	
3,0	59,80	0,32	1,30	0,00	2,34	
2,0	49,10	0,26	1,43	0,00	1,56	
1,0	34,91	0,18	1,69	0,00	0,78	

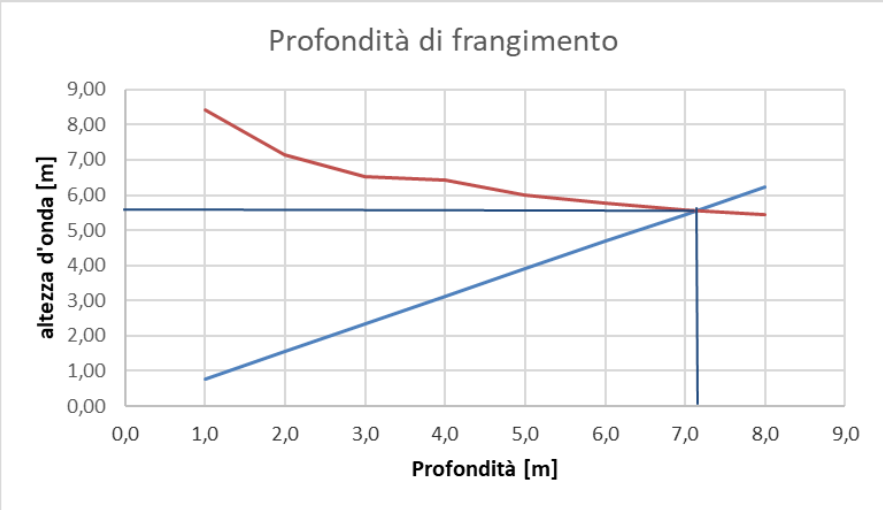


Figura 2.2 – Variazione dell'altezza di frangimento al variare della profondità

2.7.1 Onda di progetto per la scogliera soffolta

A fronte dell'innalzamento del mare calcolato in precedenza la profondità al piede della scogliera soffolta risulta aumentare da 4.50 m a 5.50 m, valutando quindi un'onda frangente al piede pari al 78% della profondità, come indicato al Paragrafo 3.2.1:
$H_d = 0.78\ h_{piede} = 4.30$ m

Di seguito si riportano i valori ricavati dal calcolo effettivo dell'altezza d'onda al piede della scogliera soffolta.

profondità al piede della soffolta	4,5 m
H al piede dell'opera	3,51 m
sovralzo mare calcolato	0,68 m
sovralzo dovuto ai cambiamenti climatici	0,30 m
profondità netta al piede della soffolta	5,48 m
H di calcolo al piede dell'opera	4,27 m

2.7.2 Onda di progetto per la scogliera soffolta

A fronte dell'innalzamento del mare calcolato in precedenza la profondità al piede della scogliera emersa risulta aumentare da 3.50 m a 4.50 m, valutando quindi un'onda frangente al piede pari al 78% della profondità, come indicato al Paragrafo 3.2.1:

$H_d = 0.78\ h_{piede} = 3.50$ m

Di seguito si riportano i valori ricavati dal calcolo effettivo dell'altezza d'onda al piede della scogliera emersa.

profondità al piede della scogliera	3,5	m
H al piede dell'opera	2,73	m
sovralzo mare calcolato	0,68	m
sovralzo dovuto ai cambiamenti climatici	0,30	m
profondità netta al piede della scogliera	4,48	m
H di calcolo al piede dell'opera	3,49	m

3 DIMENSIONAMENTO DELLA SCOGLIERA

All'interno del presente capitolo verranno adeguatamente dimensionati i massi della mantellata per le due differenti opere proposte.

3.1 DIMENSIONAMENTO DELLA MANTELLATA MEDIANTE LA FORMULA DI VAN DER MEER

La formula di Van der Meer, rispetto ad altre formulazioni, permette di tener conto dell'azione di onde irregolari e degli effetti legati alla variabilità del periodo introducendo il parametro di frangimento medio:

$$\xi_m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_{1/10}}{L_0}}}$$

dove:
$H=H_d$= onda calcolata al piede dell'opera;
α = angolo che la scarpata forma con l'orizzontale (cotg α = scarpa della mantellata);
L_0 = larghezza dell'onda al largo relativa al periodo medio T_m delle onde.

In funzione del valore assunto da ξ_m, le formule di Van der Meer per massi naturali sono:

Per $\xi_m \leq 2.5$, onda frangente di tipo plunging:

$$\frac{H_{1/10}}{\Delta * D_{n50}} = 6.2\ (p^*)^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} {\xi_m}^{-0.5} \quad per\ \xi_m \leq 2.5$$

Per $\xi_m \geq 3.5$, onda frangente di tipo surging:

$$\frac{H_{1/10}}{\Delta * D_{n50}} = (p^*)^{-0.13} (\cot \alpha)^{\ 0.5} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} {\xi_m}^{p^*} \quad per\ \xi_m \geq 3.5$$

Per $2.5 \leq \xi_m \leq 3.5$, onda con frangimento intermedio:

$$\frac{H_{1/10}}{\Delta * D_{n50}} = min\left(6.2\ (p^*)^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} {\xi_m}^{-0.5};\ (p^*)^{-0.13} (\cot \alpha)^{\ 0.5} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} {\xi_m}^{p^*}\right)$$

dove:
$\Delta = (\gamma_m/\ \gamma_a - 1)$ = massa relativa del masso;
D_{n50} = diametro nominale del masso di peso mediano;
S = livello di danneggiamento definito come rapporto A/D^2_{n50} con A area della sezione trasversale erosa dalla mareggiata;
N = numero di onde presenti nella mareggiata;
p^* = parametro indicatore della permeabilità della struttura (si è scelto il valore pari a 0.6 che indica mantellate prive di strato filtro e di nucleo come dalla figura nel seguito).

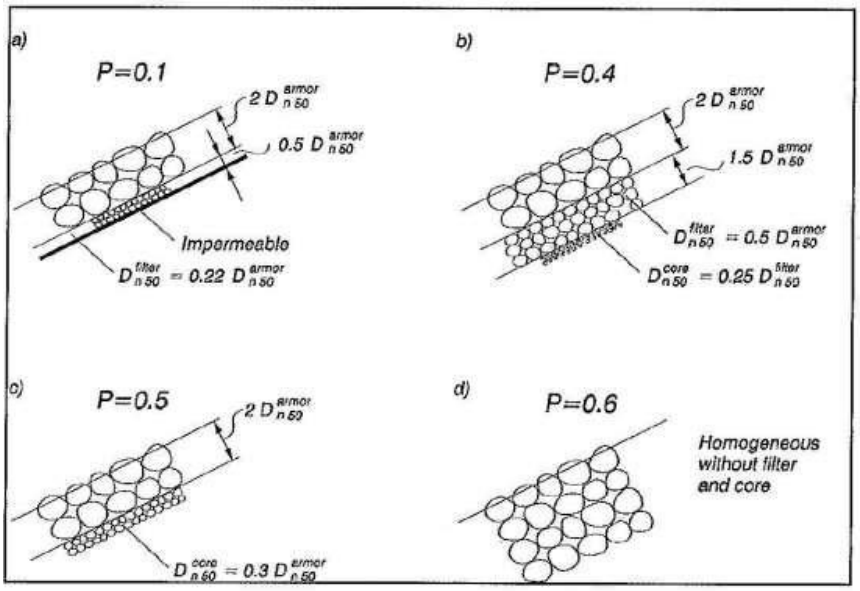


Figura 3.1 – Valori di permeabilità da inserire nella formulazione di Van der Meer

Nella seguente tabella sono riportati i valori del parametro S in funzione della pendenza (a favore di sicurezza si è considerato l'angolo della mantellata superiore, di dimensioni maggiori);:

Pendenza	**Livello di danno S**		
	Danno iniziale	Danno intermedio	Danno totale
1:1.5	2	3-5	8
1:2	2	4-6	8
1:3	**2**	6-9	12
1:4	3	8-12	17
1:6	3	8-12	17

Tabella 3.1 – Livello di danno accettato in base alla pendenza della mantellata

La verifica è stata condotta per S=2 corrispondente a danno iniziale per entrambe le due differenti tipologie di scogliera.

3.1.1 Calcoli per la scogliera soffolta

DETERMINAZIONE DEL PARAMETRO DI FRANGIMENTO MEDIO (parametro di Iribarren)				
Parametro	Valore	Unità di misura	Significato	Note
α	26,58	-	angolo di inclinazione paramento della mantellata	
$H_{1/10}$	4,30	m	media aritmetica del 33% delle onde più alte del gruppo	
T_p largo	12,00		periodo picco dell'onda al largo	
T_m	8,04	s	periodo medio dell'onda al largo	
L_0	100,98	m	lunghezza dell'onda al largo riferita al periodo medio	
ξ_m	2,42	-	parametro di frangimento medio	

DETERMINAZIONE DEL PESO E DEL DIAMETRO DEI MASSI				
Parametro	Valore	Unità di misura	Significato	Note
p*	0,60	-	coefficiente di permeabilità della struttura variabile tra 0.1 e 0.6	vedere figura
γ_m	2,65	t/m^3	peso specifico massi naturali	
γ_a	1,03	t/m^3	peso specifico acqua marina	
S	2,00	-	A/D^2 = livello di danneggiamento determinato in funzione della pendenza	vedere tabella
N	5000,00	-	numero di onde	variabile tra 3000 e 5000
D_{n50}	1,54	m	diametro nominale del masso mediano	
P_{50}	5,02	t	Peso del masso mediano	

Tabella 3.2 - Risultati ricavati dalla formula di Van der Meer per la scogliera soffolta

In base a tali valori, risulta un peso medio (P_{50}) dei massi naturali da utilizzare per la mantellata pari a circa 5 t corrispondenti a massi di III categoria.

3.1.2 Calcoli per la scogliera emersa

DETERMINAZIONE DEL PARAMETRO DI FRANGIMENTO MEDIO (parametro di Iribarren)				
Parametro	Valore	Unità di misura	Significato	Note
α	26,58	-	angolo di inclinazione paramento della mantellata	
$H_{1/10}$	3,50	m	media aritmetica del 33% delle onde più alte del gruppo	
T_p largo	12,00		periodo picco dell'onda al largo	
T_m	8,04	s	periodo medio dell'onda al largo	
L_0	100,98	m	lunghezza dell'onda al largo riferita al periodo medio	
ξ_m	2,69	-	parametro di frangimento medio	

DETERMINAZIONE DEL PESO E DEL DIAMETRO DEI MASSI				
Parametro	Valore	Unità di misura	Significato	Note
p*	0,60	-	coefficiente di permeabilità della struttura variabile tra 0.1 e 0.6	vedere figura
γ_m	2,65	t/m^3	peso specifico massi naturali	
γ_a	1,03	t/m^3	peso specifico acqua marina	
S	2,00	-	A/D^2 = livello di danneggiamento determinato in funzione della pendenza	vedere tabella
N	5000,00	-	numero di onde	variabile tra 3000 e 5000
D_{n50}	1,32	m	diametro nominale del masso mediano	
P_{50}	3,16	t	Peso del masso mediano	

Tabella 3.3 - Risultati ricavati dalla formula di Van der Meer per la scogliera emersa

In base a tali valori, risulta un peso medio (P_{50}) dei massi naturali da utilizzare per la mantellata pari a circa 3 t corrispondenti a massi di III categoria.

3.2 DIMENSIONAMENTO DELLA GEOMETRIA DELLA SCOGLIERA SOFFOLTA

Per la soluzione che prevede la costruzione di una scogliera soffolta risulta di fondamentale importanza la geometria della scogliera.
Il ruolo della scogliera soffolta è infatti quello di smorzare l'impatto dell'onda, riducendone l'altezza e quindi la forza.

L'efficacia della scogliera soffolta si esplica attraverso una combinazione di fenomeni fisici:
- dissipazione per frangimento indotto, che si verifica in corrispondenza della ridotta profondità sopra la cresta;
- perdita di energia per turbolenza e filtrazione all'interno della struttura permeabile in massi;
- rifrazione e diffusione dell'onda, dovute alla variazione batimetrica e alla geometria dell'opera.

Nel caso in esame, l'onda incidente risulta già in regime frangente o prossimo alla saturazione prima di raggiungere la soffolta; tuttavia, la presenza della scogliera consente una ulteriore riduzione dell'altezza d'onda trasmessa, con conseguente attenuazione del moto ondoso nelle aree retrostanti.

Per la valutazione dell'efficacia di una scogliera soffolta permeabile in massi, in assenza di modellazioni numeriche, è possibile stimare la trasmissione del moto ondoso mediante formulazioni empiriche derivate da prove sperimentali in vasca.

Il coefficiente di trasmissione K_t è definito come:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i}$$

dove:
- H_i è l'altezza d'onda incidente al piede della scogliera soffolta;
- H_t è l'altezza d'onda trasmessa a tergo dell'opera.

La formulazione comunemente utilizzata è quella di D'Angremond - Van der Meer - De Jong, nella quale il coefficiente di trasmissione può essere espresso come segue:

$$K_t = c_1 \frac{R_c}{H_i} + c_2 \left(\frac{B}{H_i}\right)^{c_3} [1 - \exp(c_4\, \xi)]$$

dove:
- R_c= differenza tra il livello del mare e la quota della testa della soffolta

$$R_c = l_{\text{cresta}} - l_{\text{livello mare di progetto}}$$

(negativo per scogliere soffolte);
- B= larghezza della cresta della soffolta (pratiche di buona costruzione definiscono come valore minimo tre volte il diametro mediano dei massi;
- H_i= altezza d'onda incidente (locale);
- ξ= parametro di similitudine di Iribarren (pari al parametro di frangimento medio utilizzato per il dimensionamento della mantellata nella formula di Van der Meer).

Per quanto concerne i valori dei coefficienti, per scogliere permeabili in massi naturali, si assumono:

- $c_1 = -0.40$
- $c_2 = 0.64$ (può assumere valori fino a 0.80 per strutture impermeabili)
- $c_3 = -0.31$
- $c_4 = -0.50$

Trattandosi di formulazione empirica, la formula è valida nel seguente intervallo:

$$0.075 \leq K_t \leq 0.80$$

ed è applicabile a:

- scogliere in massi sciolti;
- pendenze comprese indicativamente tra 1:1.5 e 1:4;
- onde regolari o irregolari non fortemente riflettenti;
- condizioni di moto ondoso frangente o prossimo alla saturazione.

Una volta determinato K_t, l'altezza d'onda trasmessa risulta:

$$H_t = K_t \, H_i$$

mentre l'efficacia di riduzione della scogliera soffolta può essere espressa come:

$$\eta = 1 - K_t$$

Definita la geometria della scogliera in termini di tipologia di massi e angolo della scarpata, l'efficacia dipende principalmente da due fattori, che rientrano nella formulazione sopra proposta:

- sommergenza della testa della soffolta, definita come R_c;
- larghezza della testa della soffolta, definita come B.

In particolare, affinché l'efficacia della scogliera sommersa sia apprezzabile, è necessario che la testa della scogliera non sia troppo profonda e che la larghezza della testa sia tale da acuire il frangimento.

Le condizioni al contorno sono in questo caso dettate da diversi fattori; per la sommergenza risulta necessario lasciare un pescaggio minimo per i natanti e le piccole imbarcazioni afferenti all'area, mantenendo anche un adeguato livello di sicurezza in caso di ammaraggio, mentre per quanto concerne la larghezza della testa sono necessarie valutazione di tipo economico affinché il costo dell'opera rimanga nei range pattuiti con la Committenza.

Nel seguito verranno effettuate alcune ipotesi mantenendo prima fisso il parametro della sommergenza e variando quello della larghezza e poi invertendo le due variabili al fine di simulare alcuni scenari possibili di riduzione dell'onda.

3.2.1 Variazione del risultato mantenendo fissa la sommergenza e variando la larghezza

Per differenti valori di sommergenza che vanno da -2 m slm a 0 m s.l.m., nel grafico seguente si vede come varia l'altezza d'onda ridotta al variare della larghezza della testa della scogliera.

Si tenga presente che, data la batimetria e la dimensione dei massi richiesta dal dimensionamento della mantellata (circa 1.5 m di diametro equivalente per il masso mediano), l'altezza della soffolta non potrà risultare inferiore a circa 3 m.
Altresì, per la variazione della larghezza, si consideri come massima larghezza la medesima del grosso scoglio sommerso dinanzi la scogliera esistente, che presenta una massima estensione di circa 30 m.

Nei grafici seguenti si ha evidenza dei calcoli sopra riportati.

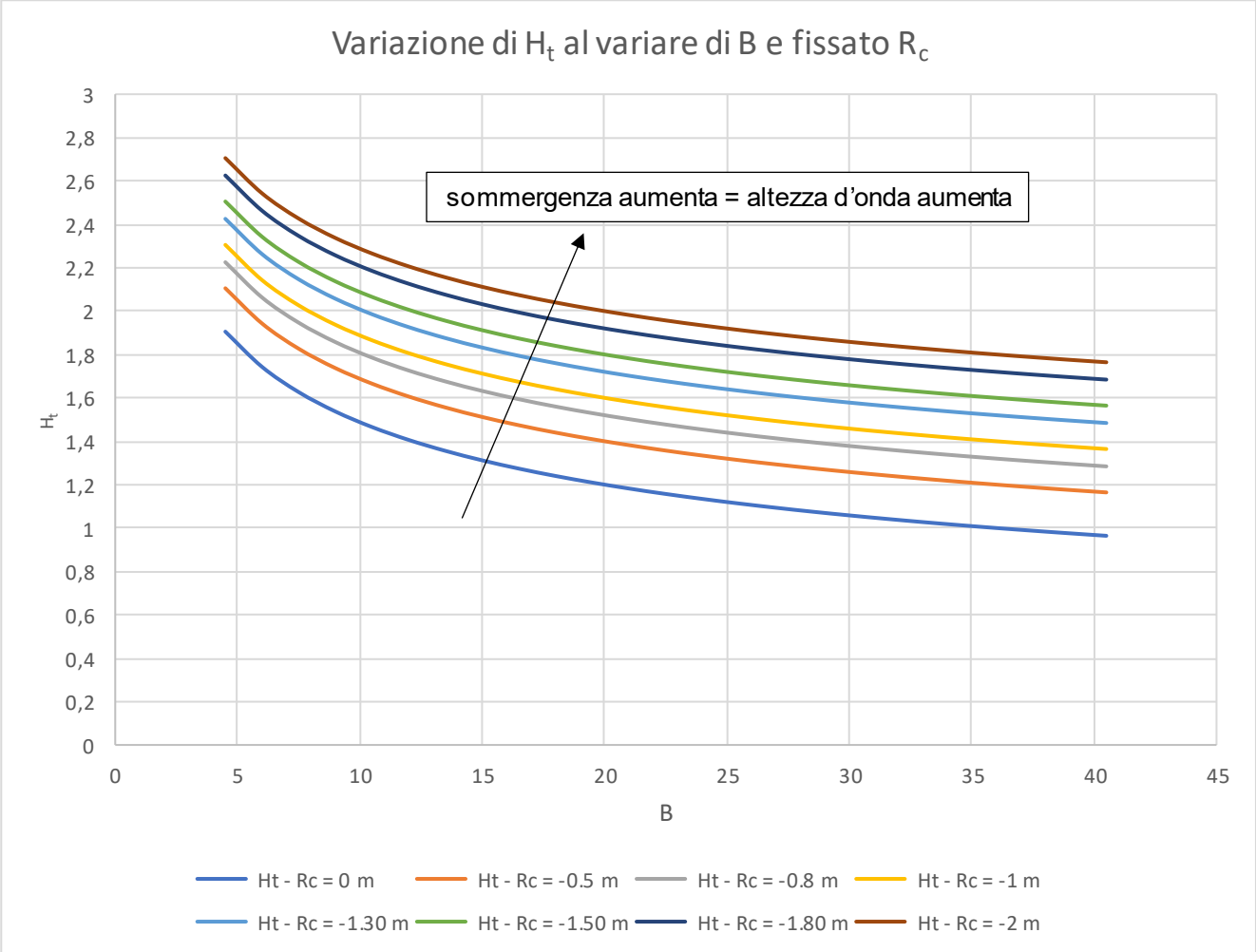


Figura 3.2 – Variazione dell'altezza d'onda trasmessa in funzione della larghezza e fissata la sommergenza (H_t=altezza d'onda trasmessa, B=larghezza testa soffolta, R_c=sommergenza testa soffolta)

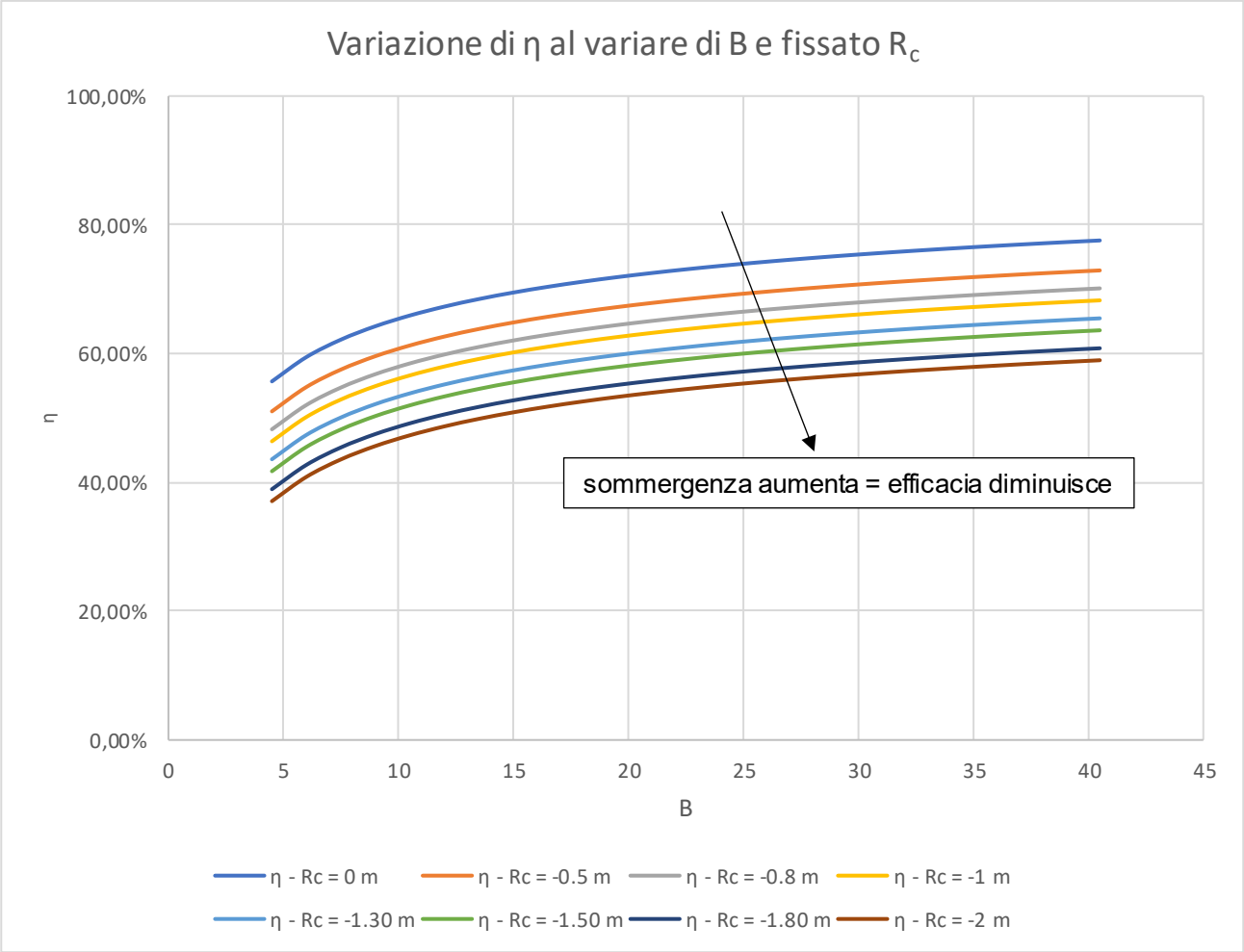


Figura 3.3 – Variazione dell'efficacia dell'opera in funzione della larghezza e fissata la sommergenza (η=efficacia dell'opera, B=larghezza testa soffolta, R_c=sommergenza testa soffolta)

Dai grafici sopra riportati si nota come all'aumento della profondità della testa della soffolta l'intervento si vanifica, diminuendo l'efficacia.
Altresì all'aumento della larghezza della testa l'efficacia aumenta ma l'andamento è di tipo asintotico e l'efficacia non aumenta considerevolmente dopo determinati valori.

Analizzando, ad esempio, il grafico dell'altezza d'onda, si può vedere come variando la larghezza in testa da 15 m a 40 m, con un considerevole aumento di spesa, il guadagno in termini di altezza d'onda sia di soli 30 cm, per nulla apprezzabile rispetto alla spesa impegnata.

Si ritiene che una larghezza ragionevole possa essere pari a 15 m se si mantiene una sommergenza che non vada oltre 1.30 m; in tal caso si ha un'efficacia di intervento che va dal 50% nel peggiore di casi al 70% nel migliore.

Nella tabella alla pagina seguente, per completezza, si riportano alcuni valori di H_t (altezza d'onda trasmessa) e di η (efficacia dell'intervento) al variare della larghezza in testa B e della sommergenza R_c.
Si tenga presente che nel tenere in considerazione il valore di sommergenza va tenuto conto dell'innalzamento del livello medio mare che incide negativamente sull'efficacia della

soffolta ed è stato stimato, per il periodo di ritorno di interesse, pari a 70 cm, cui vanno sommati i futuri 30 cm di aumento previsti a causa dei cambiamenti climatici.

R_c [m slm]	B [m]	H_t [m]	η
0	10	1,49	65%
	15	1,31	69%
	20	1,20	72%
-0,5	10	1,69	61%
	15	1,51	65%
	20	1,40	67%
-0,8	10	1,81	58%
	15	1,63	62%
	20	1,52	65%
-1	10	1,89	56%
	15	1,71	60%
	20	1,60	63%
-1,3	10	2,01	53%
	15	1,83	57%
	20	1,72	60%
-1,5	10	2,09	51%
	15	1,91	56%
	20	1,80	58%
-1,8	10	2,21	49%
	15	2,03	53%
	20	1,92	55%

Tabella 3.4 – Alcuni valori significativi di altezza d'onda trasmessa ed efficacia al variare della larghezza di testa e della sommergenza (R_c=sommergenza testa soffolta, B=larghezza testa soffolta, H_t=altezza d'onda trasmessa, η=efficacia dell'opera)