

Progettazione di un'opera marittima

Fase I:

Indagini preliminari alla progettazione e analisi delle forzanti



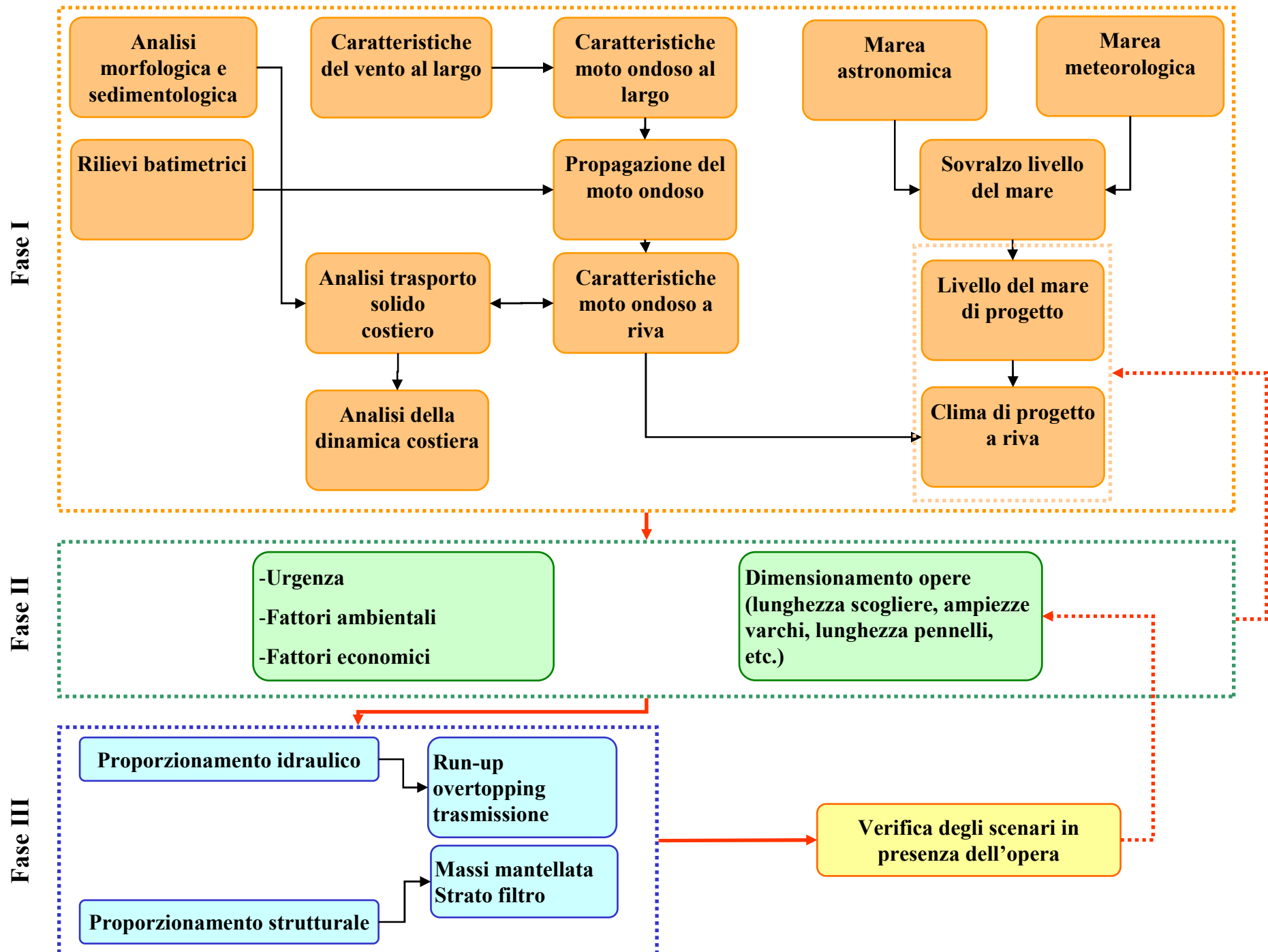
Fase II:

Scelta del tipo di opera

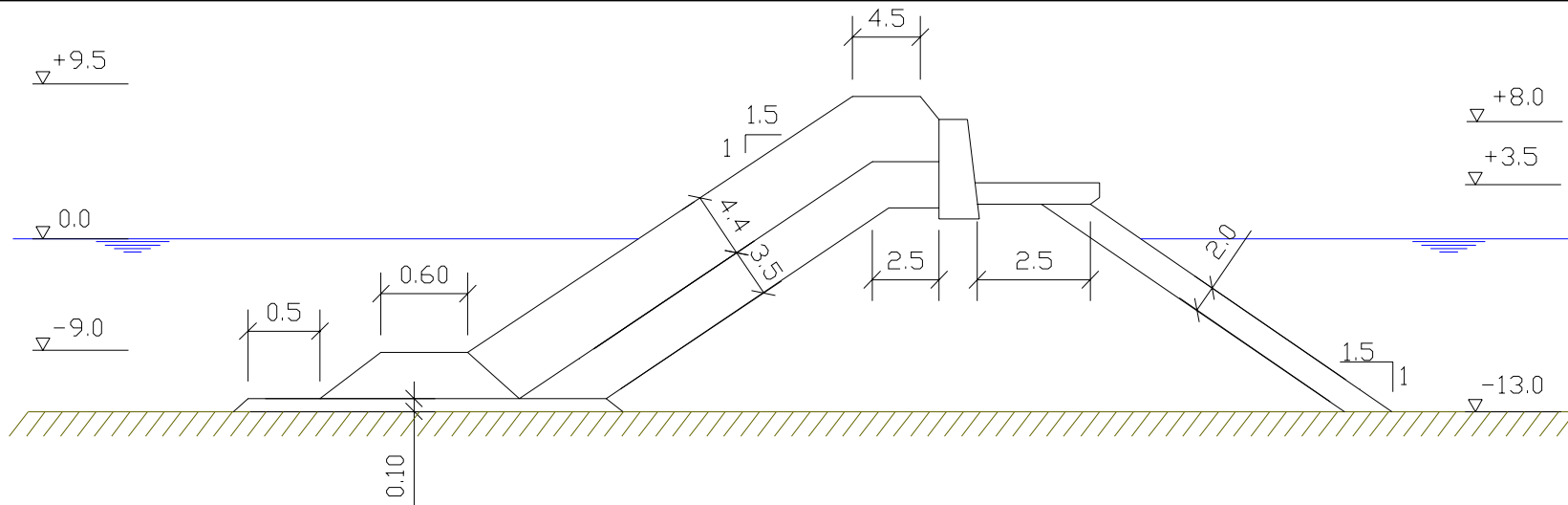


Fase III:

Criteri di proporzionamento



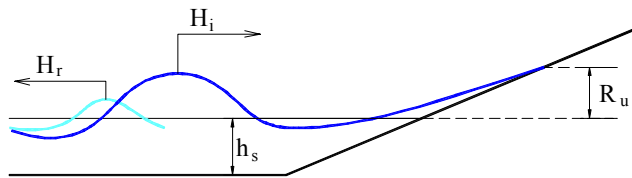
Struttura di un'opera a scogliera



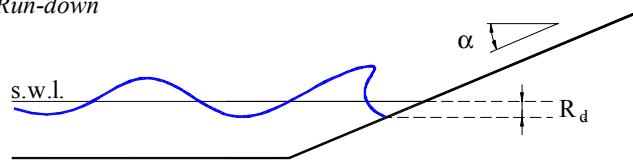
- Nucleo centrale a forma di trapezio regolare o irregolare;
- Uno o più strati esterni denominati strati filtro;
- Mantellata esterna in massi naturali o artificiali su cui si esercita l'azione diretta del moto ondoso;
- Mantellata interna che rivesta la scarpata lato terra;
- Berma al piede per il contenimento della mantellata e per la protezione dall'erosione del piano di appoggio;
- Sovrastruttura in calcestruzzo non armato per ridurre la tracimazione

Proporzionamento idraulico

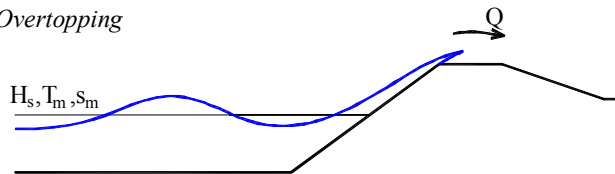
Run-up



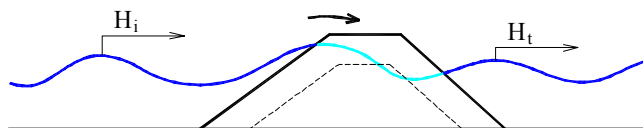
Run-down



Overtopping



Trasmissione



Il proporzionamento idraulico di una struttura è condizionato da:

- Run-up (Run-down);
- Overtopping;
- Tramissione .

Il parametro che influenza il comportamento idraulico di una struttura e che, di conseguenza, ne regola il proporzionamento è il numero di Irribarren:

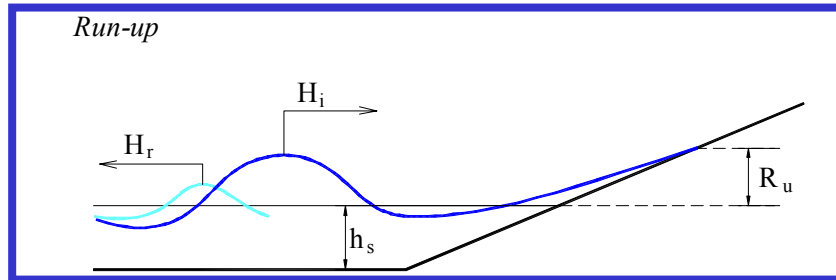
$$\xi = \frac{\text{tag} \alpha}{\sqrt{S}}$$

in cui

$$S = \frac{2\pi H_s}{gT^2}$$

è la pendenza dell'onda al largo, calcolata con T = periodo di picco

Proporzionamento idraulico



Sia R_u il massimo livello dell'onda rispetto al livello di quiete, reso dimensionale con H_s . Indichiamo con $R_{u(2\%)}$ la media del 2% dei massimi valori di R_u ; Van der Meer (1993) ha proposto le seguenti semplici espressioni (pendenze della mantellata comprese tra 1 e 2.5):

$$\frac{R_{u(2\%)}}{H_s} = 1.5 \cdot r_f \cdot \xi \quad \text{se } \xi < 2$$

$$\frac{R_{u(2\%)}}{H_s} = 3 \cdot r_f \quad \text{se } \xi \geq 2$$

in cui r_f è un fattore che tiene conto dell'attrito offerto dalla mantellata, dell'angolo d'attacco e della tridimensionalità delle onde ($r_f=0.5$ per massi naturali).

La quota massima di run-up influenza la scelta dell'altezza della struttura. In generale è opportuno ricordare che la quota di run-up diminuisce:

- all'aumentare della scabrezza;
- in presenza di una berma orizzontale;
- in presenza di un attacco obliquo del moto ondoso.

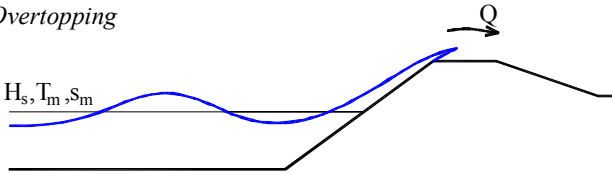
Viceversa, la quota di run-up aumenta:

- all'aumentare della profondità del fondale;
- all'aumentare della pendenza della mantellata

Proporzionamento idraulico

Overtopping

H_s, T_m, S_m



VALORI DELLA PORTATA DI OVERTOPPING (l/s/m)

1000				Danni anche se è completamente protetta	Danni se la sovrastruttura non è pavimentata
100					
10	Non sicuro a qualsiasi velocità	Pericoloso	Danni Strutturali	Danni se la cresta non è protetta	
1.0					
0.1					Nessun danno
0.01	Non sicuro alle alte velocità	Fastidioso ma non pericoloso	Danni minori alle rifiniture	Nessun danno	
0.001	Sicuro a tutte le velocità	Umido ma accettabile	Nessun danno		
0.0001					
	Veicoli	Pedoni	Edifici	Infrastrutture di banchina	Mantellata retrostante

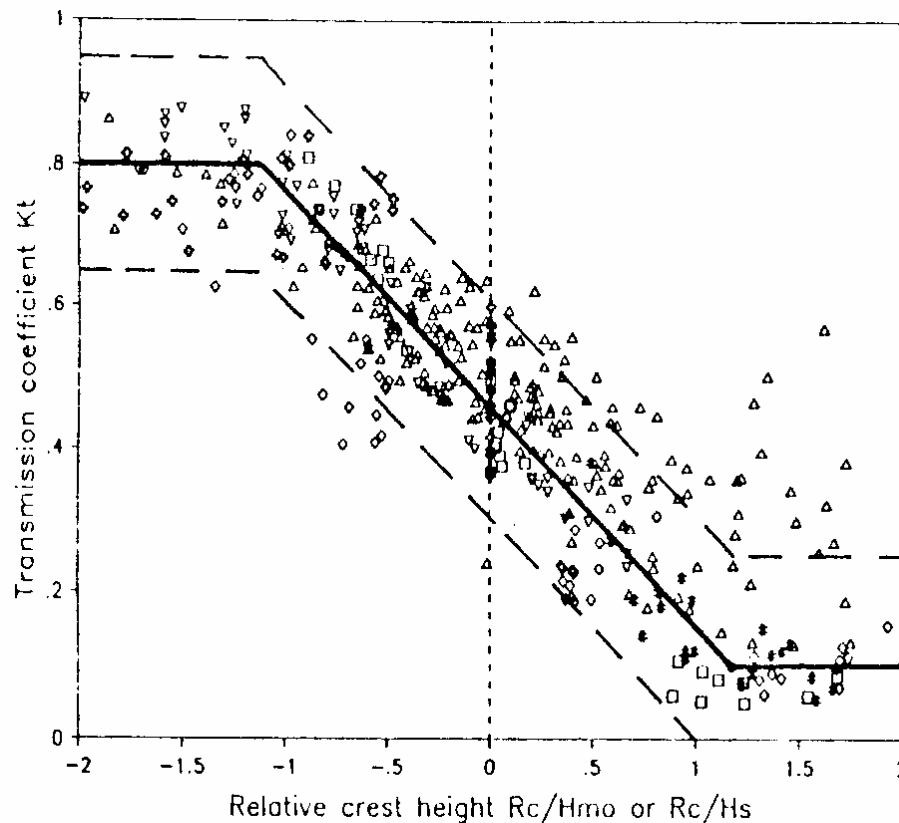
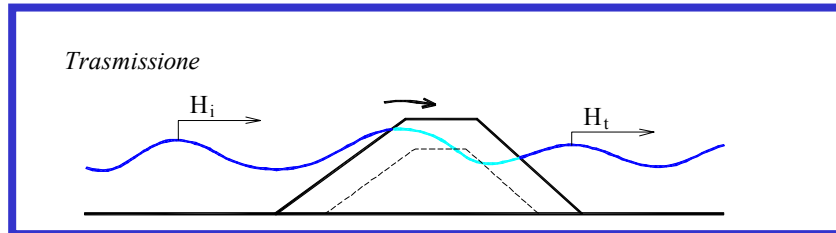
Anche la portata di overtopping influenza la scelta dell'altezza della struttura.

Infatti la quota massima di coronamento R_c deve essere scelta in maniera tale da avere dei danni connessi alla portata tracimata contenuti e, comunque, predeterminati.

La portata di tracimazione può essere calcolata semplicemente in base alla formula seguente (in $m^3 s^{-1}$)

$$Q = 8 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{gH_s^3} \exp\left(3.1 \left(\frac{R_{u(2\%)} - R_c}{H_s}\right)\right)$$

Proporzionamento idraulico



Per quanto riguarda il fenomeno della trasmissione del moto ondoso attraverso opere di difesa parallele a cresta bassa o sommerse, bisogna ricordare che esso è estremamente complesso da valutare. Esso infatti dipende da:

- struttura e geometria;
- profondità dell'acqua (quota di imbasamento);
- dalla permeabilità;
- dalle caratteristiche dell'onda.

Appare quindi opportuno ricorrere a prove in vasca o a modelli numerici piuttosto raffinati.

Tuttavia, nei casi più semplici è possibile adottare la seguente formula di Van der Meer:

$$k_t = 0.8 \text{ per } -2.0 < R_c/H_s < -1.13$$

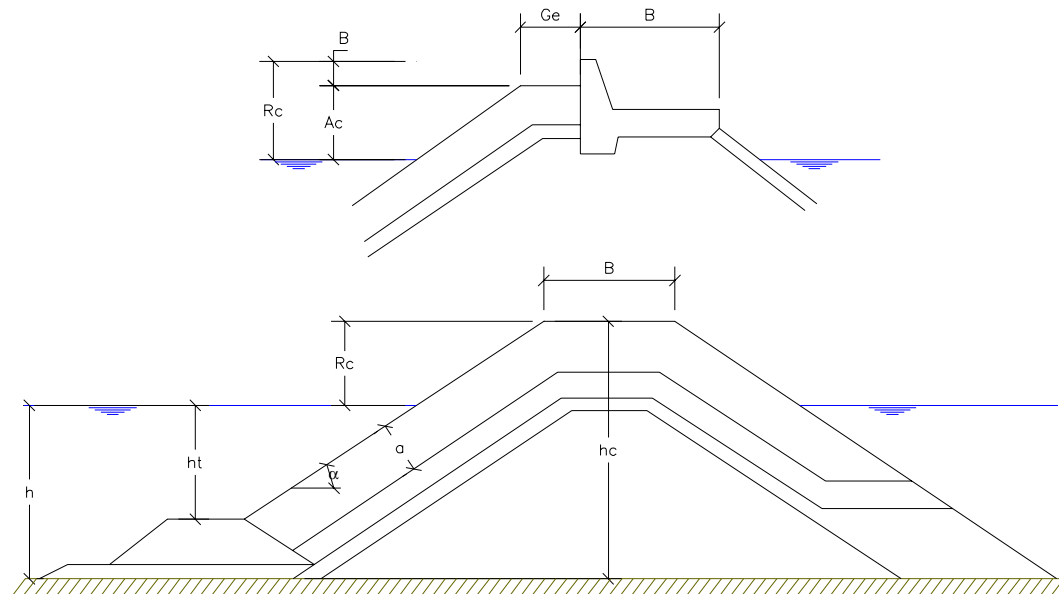
$$k_t = 0.46 - 0.3 \text{ per } -1.13 < R_c/H_s < 1.2$$

$$k_t = 0.1 \text{ per } 1.2 < R_c/H_s < 2.0$$

Proporzionamento strutturale

Calcolo dei massi della mantellata

Per quanto attiene al proporzionamento strutturale, bisogna anzitutto dimensionare i massi della mantellata. Questi ultimi vanno calcolati diversamente a seconda che ci si riferisca al tronco struttura ovvero alla testata. Quindi si procede al dimensionamento dei massi dello strato filtro e dei massi della berma.



Il proporzionamento della mantellata può essere effettuato con la formula di Hudson, oppure con quella di Van der Meer.

Proporzionamento strutturale

Calcolo dei massi della mantellata

La formula di Hudson per il calcolo della massa dell'elemento lapideo è la seguente:

$$M_{50} = \frac{\rho_a H_s^3}{K_D \cot \alpha \left(\frac{\rho_a}{\rho} - 1 \right)^3}$$

L'equazione di Hudson può essere riscritta come :

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_a}{\rho} - 1 \right) D_a} = (K_D \cot \alpha)^{1/3}$$

- D_a il diametro nominale dell'elemento lapideo

- N_s è indicato come numero di stabilità.

K_D è un coefficiente di stabilità che dipende da varie grandezze (tipo di massa e forma, posizionamento nella struttura, grado di danneggiamento considerato accettabile).

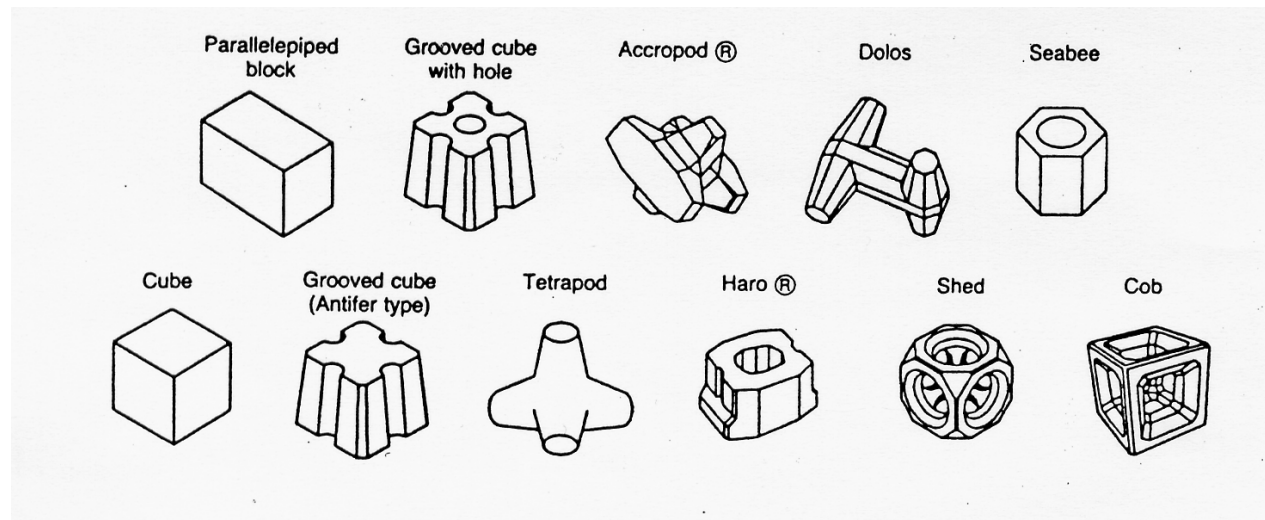
Valori tipici del coefficiente K_D sono quelli di seguito riportati per il caso di massi naturali e danno nullo.

	Onde non frangenti	Onde frangenti
Tronco struttura	4.0	2.0
Testata	3.2	1.9

Proporzionamento strutturale

Calcolo dei massi della mantellata

Quando La formula di Hudson per il calcolo della massa dell'elemento lapideo della mantellata prevede masse considerevoli, si consiglia di utilizzare elementi in calcestruzzo non armato. Rispetto ai massi naturali essi presentano un più elevato coefficiente di “bloccaggio”. In altre parole, maggiore capacità di “interlocking” tra i massi fa aumentare il coefficiente di stabilità K_D e, di conseguenza, fa diminuire la massa necessaria a verificare le condizioni di stabilità degli elementi.



Armor Unit	K_D
Rock	4
Tetrapods	8
Tribars	10
Dolos	32 (16)
Modified Cubes	7.5

Proporzionamento strutturale

Calcolo dei massi della mantellata

Se la scogliera è sommersa (h_c = altezza cresta sul fondo $< h$) la stabilità statica si ha quando:

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_a}{\rho} - 1\right) D_a} \left(\frac{H_s}{L_p}\right)^{1/3} = - \frac{1}{0.14 \ln \left[\left(\frac{h_c}{h}\right) / (2.1 + 0.16) \right]}$$
$$L_p = \frac{g T_p^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi h}{L_p} \right)$$

E' opportuno ricordare che la formula di Hudson è indipendente dal periodo dell'onda.

Essa inoltre è stata elaborata per:

1. onde regolari;
2. incidenza del moto ondoso ortogonale;
3. nessun danno della mantellata;
4. pendenza compresa tra 1.5 e 5 per la sezione corrente e tra 1.5 e 3 per la testata;
5. curva di distribuzione granulometrica degli elementi lapidei costituenti la mantellata poco assortita

Proporzionamento strutturale

Calcolo dei massi della mantellata

Van der Meer (1987) ha introdotto per il calcolo del numero di stabilità formule che tengono conto anche di altre caratteristiche dell'onda di progetto.

Calcolando il parametro di Irribarren in funzione della permeabilità " P_b " di "insieme" della struttura come:

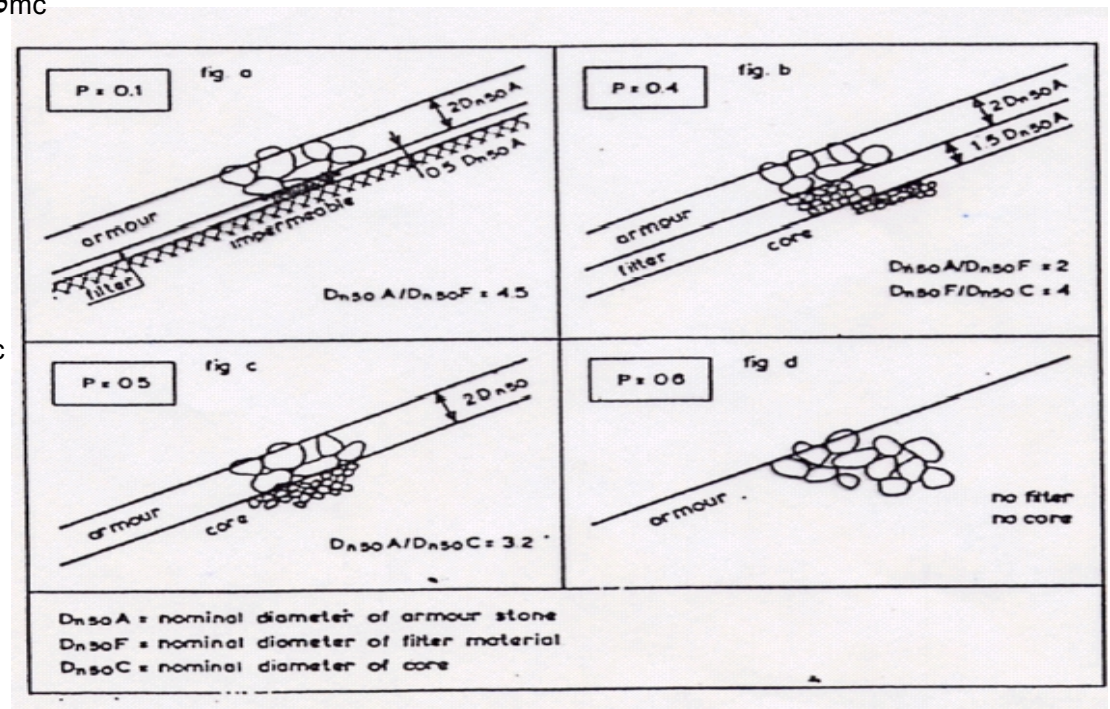
$$\xi_{mc} = \left(6.2 P_b^{0.31} \sqrt{\tan \alpha} \right)^{\frac{1}{P_b + 0.5}}$$

Per onde frangenti di tipo plunging $\xi < \xi_{mc}$

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_a}{\rho} - 1 \right) D_a} = 6.2 P_b^{0.18} \left(\frac{S_a}{\sqrt{N_w}} \right)^{0.2} \xi^{-0.5}$$

Per onde frangenti di tipo surging $\xi \geq \xi_{mc}$

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_a}{\rho} - 1 \right) D_a} = 1.0 P_b^{-0.13} \left(\frac{S_a}{\sqrt{N_w}} \right)^{0.2} \sqrt{\cotan(\alpha)} \xi^{P_b}$$

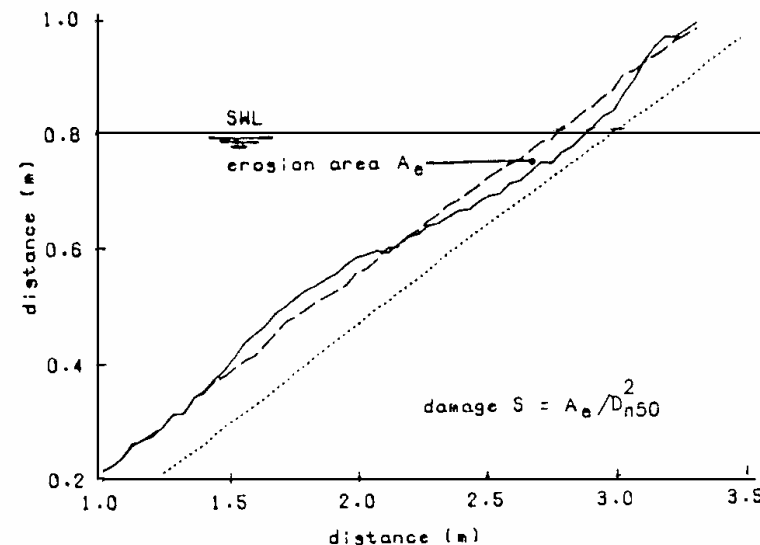


Proporzionamento strutturale

Calcolo dei massi della mantellata

Da notare che la formula di van der Meer tiene conto:

1. del periodo dell'onda (attraverso il parametro di Iribarren $\xi = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{S}}$);
2. della permeabilità della struttura;
3. del grado di danno ammissibile , dato dal rapporto tra l'area erosa del profilo trasversale compreso tra il livello medio mare e il quadrato del diametro nominale dell'elemento lapideo (vedere figura).
Si raccomanda il valore $=2$ come valore corrispondente al danno nullo;
4. del tipo di frangimento;
5. della pendenza della struttura;
6. del numero di onde nella mareggiata N_w (calcolabile come segue: se il periodo dell'onda di progetto è pari a 9s e si verifica, mediamente, 6 ore in un anno, allora per una vita della struttura di 50 anni bisognerebbe porre: $N_w = 50 \times 6 \times 3600 / 9 = 120000$. Tuttavia viene consigliato di non superare il valore massimo $N_w = 7500$).



Proporzionamento strutturale

Calcolo dello strato filtro

Al di sotto della mantellata, realizzata per resistere direttamente alle azioni del moto ondoso (in genere due strati di massi disposti casualmente), si ha lo strato filtro.

Più precisamente, lo strato filtro si frappone tra la mantellata e il nucleo della barriera frangiflutti che, rappresentando la maggior parte della barriera stessa, viene realizzato con materiale molto economico di piccola pezzatura (tout-venant di cava). Pertanto, se la mantellata venisse disposta direttamente sul nucleo, il materiale costituente il nucleo si disperderebbe facilmente sotto l'azione del moto ondoso.

Affinchè il materiale dello strato sottostante non venga rimosso attraverso la porosità dello strato sovrastante, deve essere verificata la seguente condizione:

$$D_{15}(\text{upper layer}) < 5D_{85}(\text{lower layer})$$

Se lo strato della mantellata è caratterizzato da elementi aventi massa M , ragionevolmente la massa dell'elemento filtro sarà $M/100$ (possibilmente quello del terzo strato $M/200$)

Proporzionamento strutturale

Effettuiamo un confronto tra la formula di Hudson e quella di Van der Meer nel caso in cui si voglia realizzare un dimensionamento in tronco struttura per i seguenti dati:

$$\begin{aligned} N_w &= 3000 \\ S_a &= 2 \\ P_b &= 0.4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_s &= 3\text{m} \\ \cotan(\alpha) &= 2 \\ \rho_a &= 2600 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho &= 1030 \text{ kg/m}^3; \\ T &= 8 \text{ s}; \\ K_D &= 2 \end{aligned}$$

Formula di Hudson:
$$M_{50} = \frac{\rho_a H_s^3}{K_D \cot \alpha \left(\frac{\rho_a}{\rho} - 1 \right)^3} = \frac{2600 \cdot 3^3}{2 \cdot 2 \cdot 1.52^3} = 4997 \text{ kg} = 5 \text{ t}$$

Formula di Van der Meer:
$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_a}{\rho} - 1 \right) D_a} = 6.2 P_b^{0.18} \left(\frac{S_a}{\sqrt{N_w}} \right)^{1/3} \xi^{-0.5} \quad S = \frac{2 \cdot \pi H_s}{g T^2} = 0.03 \quad \xi = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{S}} = 0.03$$

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_a}{\rho} - 1 \right) D_a} = 6.2 P_b^{0.18} \left(\frac{S_a}{\sqrt{N_w}} \right)^{1/3} \xi^{-0.5} = 1.6$$

$$D_a = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_a}{\rho} - 1 \right) N_s} = 1.24 \text{ m}$$



$$M_{50} = \rho_a D_a^3 = 4957 \text{ kg}$$

Proporzionamento strutturale

Calcolo della larghezza della cresta

L'entità del run-up e della tracimazione (portate di overtopping) influenzano anche la larghezza della scogliera. Risulta infatti sempre antieconomico realizzare delle strutture per le quali si esclude del tutto la possibilità di sormonto delle stesse.

Ai soli fini della stabilità ed escludendo ogni considerazione sulla tracimazione, si può assumere una larghezza della scogliera pari a quella ottenibile affiancando tre massi della mantellata. Inoltre bisogna anche considerare che la larghezza deve consentire il transito agevole dei macchinari per la costruzione e per la manutenzione.

Dal momento che i massi posti sulla cresta risultano molto meno stabili, è opportuno verificarne sempre la stabilità tramite prove su modello fisico.

Proporzionamento strutturale

Calcolo dello spessore della mantellata

Lo spessore dello strato di copertura e dei sottostrati e il numero dei massi di mantellata richiesto può essere determinato tramite la seguente formula:

$$r = nK_{\Delta} \left(\frac{M_{50}}{\rho_a} \right)^{1/3}$$

Tipo di elemento	Numero di strati	Collocamento in opera	K_{Δ}	P
Massi naturali:				
a spigoli arrotondati	2	alla rinfusa	1.02	38
a spigoli vivi	2	" "	1.00	37
a spigoli vivi	≥ 3	" "	1.00	40
Cubo modificato	2	" "	1.10	47
Tetrapodo	2	" "	1.04	50
Quadripodo	2	" "	0.95	49
Esapodo	2	" "	1.15	47
Tribar	2	" "	1.02	54
Dolos	2	" "	0.94	56

La densità di posa in opera dei massi è data dalla formula:

$$\frac{N_r}{A} = nK_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{\rho_a}{M_{50}} \right)^{2/3}$$

Proporzionamento strutturale

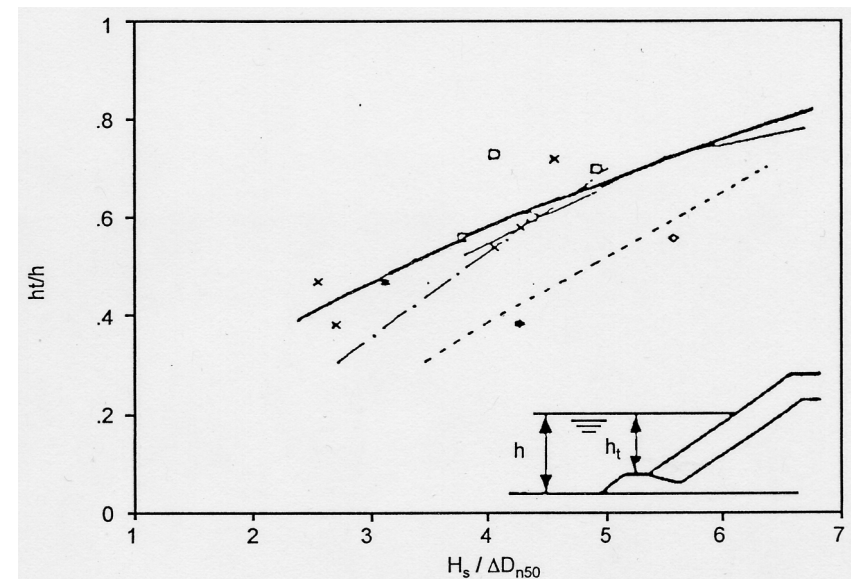
Stabilità della berma al piede

La berma al piede assolve all'importante compito di impedire che le onde frangenti sulla struttura provochino l'erosione al piede della mantellata e, quindi, lo scivolamento in massa degli elementi che la compongono.

La berma può essere realizzata con gli stessi massi che compongono la mantellata, nel qual caso la stabilità è certamente assicurata. Per motivi di costo, spesso si preferisce realizzarla con elementi più piccoli. In tal caso, bisogna anzitutto assicurarsi di collocarla ad una profondità tale da non farla interessare dall'azione diretta dei frangenti.

Per il dimensionamento degli elementi lapidei costituenti il piede della mantellata, si suggerisce una semplice formulazione valida nell'ipotesi di acque basse e per una percentuale di danneggiamento compreso tra il 3 e il 10%, ossia per livelli di danneggiamento che non alterano la funzionalità del dispositivo.

$$\frac{H_s}{\Delta D_{50}} = 8.7 \left(\frac{h_t}{h} \right)^{1.43}$$



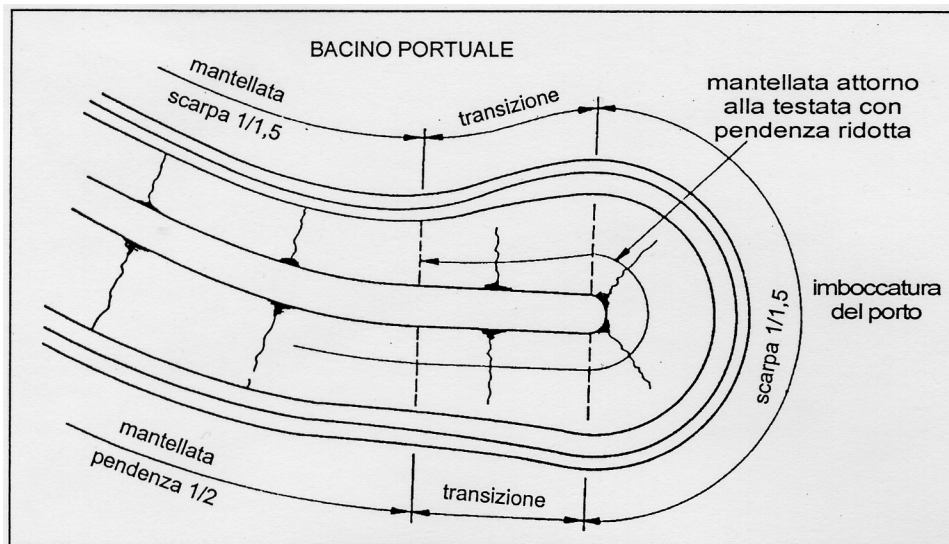
Proporzionamento strutturale

Progetto della testata

La testata di una struttura risulta un elemento particolarmente vulnerabile e pertanto richiede notevole attenzione nella verifica della sua stabilità.

E' appena il caso di far notare che gli elementi costituenti la testata possono essere particolarmente vulnerabili a causa dei seguenti motivi:

- ☐ la testata è usualmente ubicata in acque più profonde del tronco struttura;
- ☐ la testata risulta soggetta all'azione provenienti da un più ampio settore di traversia;
- ☐ le onde incidenti possono essere rifratte, diffratte o riflesse dalla struttura o dal altro frangiflutti;
- ☐ le correnti possono ivi essere più pronunciate.



Anche con gli accorgimenti citati, spesso la testata delle strutture pone problemi, soprattutto dovuti al fatto che la curvatura della parte arrotondata induce una minore interconnessione tra i massi della mantellata. **Ciò spiega il motivo per cui per la testata si utilizzano per la formula di Hudson valori di K_D inferiori.**