



**AUTORITÀ DI SISTEMA PORTUALE DEL MARE DI SICILIA OCCIDENTALE**

**PORTO DI PALERMO - PORTO TURISTICO DELL'ACQUASANTA**

**LAVORI PER LA MESSA IN SICUREZZA - MANUTENZIONE  
STRAORDINARIA - RIPRISTINO - MIGLIORAMENTO PRESTAZIONALE E  
RIQUALIFICA DELLA DIGA FORANEA DEL PORTO TURISTICO  
DELL'ACQUASANTA - CUP: I71J19000020005**



**PROGETTO DEFINITIVO**

TITOLO ELABORATO		VERIFICHE DI STABILITA' DELLA DIGA FORANEA		
REV.	DATA	EMISSIONE	CODICE ELABORATO	<b>A.4</b>
0	061221	PRIMA EMISSIONE	SCALA:	C.P. SIGMA:
			-	#P793

**PALERMO, 06.12.2021**

**PROGETTO REDATTO DA:**

**II RUP:**

**ING. SALVATORE ACQUISTA**



SIGMA INGEGNERIA S.r.l.  
Via della Libertà 201/A - 90143 Palermo  
pec: sigmaingegneriasrl@pec.it  
email: sigmaingsrl@gmail.com

**CON LA COLLABORAZIONE DI:**

Ing. Salvatore Cimino	Dott. Fabio D'Addelfio
Ing. Riccardo Giordano	Sig.ra Chiara Caronia
Ing. Federico Mela	Geom. Emanuele Macri
Arch. Valentina Scavuzzo	Geom. Vincenzo Longo
Dott.ssa Teresa Saitta	Ing. Francesco Giordano

**IL GEOLOGO: Dott. Gian Vito Graziano**



## Sommario

<b>SOMMARIO.....</b>	<b>1</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE E INDICE DELLE TABELLE.....</b>	<b>2</b>
<b>1)  PREMESSE.....</b>	<b>3</b>
<b>2)  VERIFICA DI STABILITÀ IDRAULICA DELLA MANTELLATA IN MASSI ARTIFICIALI DELL’OPERA FORANEA DI SOPRAFLUTTO.....</b>	<b>6</b>
<b>3)  VERIFICA ALLA TRACIMAZIONE (OVERTOPPING) DIGA DI SOPRAFLUTTO.....</b>	<b>10</b>

## Indice delle figure e indice delle tabelle

FIGURA 1 - INQUADRAMENTO DEL PORTO DELL'ACQUASANTA E DELLA DIGA FORANEA INTERESSATA DAL PROGETTO.....	3
FIGURA 2 ESEMPIO ESTRAZIONE ALTEZZA D'ONDA SUI 4 PUNTI SULLA DIGA FORANEA PER MAREGGIATA DI PROGETTO.....	5
FIGURA 3 DESIGN OF CONCRETE ARMOUR LAYERS, VAN DER MEER 1999.....	6
FIGURA 4 - ESEMPIO SEZIONE TIPO D INTERVENTO.....	8
FIGURA 5 - ANDAMENTO DEL NUMERO DI STABILITÀ PER $H_s >$ DELL'ALTEZZA D'ONDA DI PROGETTO PER IL TRATTO CON ECOPODE DA 6 M <sup>3</sup> .....	9
FIGURA 6 - ANDAMENTO DEL NUMERO DI STABILITÀ PER $H_s >$ DELL'ALTEZZA D'ONDA DI PROGETTO PER IL TRATTO CON ECOPODE DA 8 M <sup>3</sup> .....	9
FIGURA 7 -ANDAMENTO DELLA TRACIMAZIONE Q PER LA DIGA DI SOPRAFLUTTO IN BASE ALL'ALTEZZA D'ONDA - PROGETTO.....	12
FIGURA 8 - SEZIONE TIPO TESTATA DIGA FORANEA ESISTENTE.....	13
FIGURA 9 - TRACIMAZIONE DIGA ALLO STATO ATTUALE - SI NOTI COME ANCHE IN PRESENZA DI MAREGGIATE RILEVANTI MA NON ESTREME ( $H_s \approx 4-4.5m$ ) SI SUPERANO NETTAMENTE I LIMITI DI ACCETTABILITÀ PREVISTI DALLA NORMATIVA EUROTOP.....	14
TABELLA 2-I TRONCO DIGA SOPRAFLUTTO, DA 0 A 92 M.....	8
TABELLA 2-II - TRONCO DIGA SOPRAFLUTTO, DA 92 A 292 M.....	8
TABELLA 3-I - ESTRATTO DA TABELLA 3.1 DEL MANUALE EUROTOP 2018. VALORI DI PORTATA DI TRACIMAZIONE LIMITE PER DIVERSE CONDIZIONI STRUTTURALI.....	11
TABELLA 3-II ESTRATTO DA TABELLA 3.2 DEL MANUALE EUROTOP 2018, VALORI DI PORTATA DI TRACIMAZIONE LIMITE PER DIVERSI GRADI DI DANNEGGIAMENTO A BENI PRESENTI DIETRO IL FRANGIFLUTTI.....	11

## 1) Premesse

Il progetto e la verifica di stabilità e funzionalità idraulica di una struttura marittima richiede la conoscenza dell'azione del moto ondoso e in particolare la caratterizzazione degli eventi ondosi estremi al fine di dimensionare: le mantellate foranee, gli strati filtro di transizione sottostanti la mantellata, le quote della sommità dei muri paraonde, le berme al piede di sostegno della mantellata e quella di sommità adiacente al muro paraonde e la testata.

In particolare, si deve andare a verificare:

- che il peso dei massi sulla mantellata (nel nostro caso artificiali formati da Accropodi II ed Ecopode da 6 e 8 m<sup>3</sup>) sia sufficiente a garantire la stabilità ed un basso livello di danneggiamento della stessa anche per le condizioni d'onda estrema di progetto;
- che le portate di tracimazione al di sopra dei muri paraonde siano compatibili con l'uso delle retrostanti banchine, secondo le normative di riferimento internazionali in sintonia a quanto previsto al capitolo 12 delle NTC 2018;

Il porto dell'Acquasanta si trova all'interno Comune di Palermo, subito a Nord del porto commerciale e alle pendici del Monte Pellegrino. La mantellata della diga foranea esistente, costituita in massi artificiali parallelepipedi con volume di circa 6.00-7.00 m<sup>3</sup>, ha subito notevoli danni dalla sua realizzazione ed, infatti, in alcune sezioni risulta molto degradata.



**Figura 1 - Inquadramento del porto dell'Acquisanta e della diga foranea interessata dal progetto**

L'intervento in progetto ha l'obiettivo di risolvere i dissesti presenti sulla diga foranea del porto dell'Acquisanta e, conseguentemente, di adeguare i livelli di sicurezza e stabilità a quelli previsti dalla normativa e dalle raccomandazioni tecniche e linee guida vigenti.

Per condurre le verifiche si sono andati a considerare i risultati dello studio idraulico marittimo condotto, a cui si rimanda per maggiori informazioni a riguardo. In particolare, a seguito di analisi statistica degli eventi estremi a largo e propagazione sottocosta, si sono andati ad estrarre i risultati del modello SWAN su 4 diversi punti lungo la diga foranea (Figura 2).

Si ricorda in queste sede che tali valori di onda di progetto derivano da un aggiornamento dello studio idraulico marittimo, effettuato sulla base dei nuovi dati forniti dall'autorità di sistema portuale e raccolti dal DICCA dell'Università degli studi di Genova.

Come meglio elencato nello studio idraulico marittimo la mareggiata di dimensionamento, per un tempo di ritorno di progetto pari a  $T_r = 100$  anni, risulta essere quella con direzione di provenienza a largo pari a  $22.5^\circ\text{N}$  (NNE).

Per tale evento i valori d'altezza d'onda sui 4 punti di interesse sono:

$H_s=5.92$  m;  $T_p=14.42$  s per P1;

$H_s=5.88$  m;  $T_p=14.42$  s per P2;

$H_s=4.99$  m;  $T_p=14.42$  s per P3;

$H_s=4.47$  m;  $T_p=14.42$  s per P4;

Tali valori sono utilizzati per le verifiche riportate in questo elaborato.

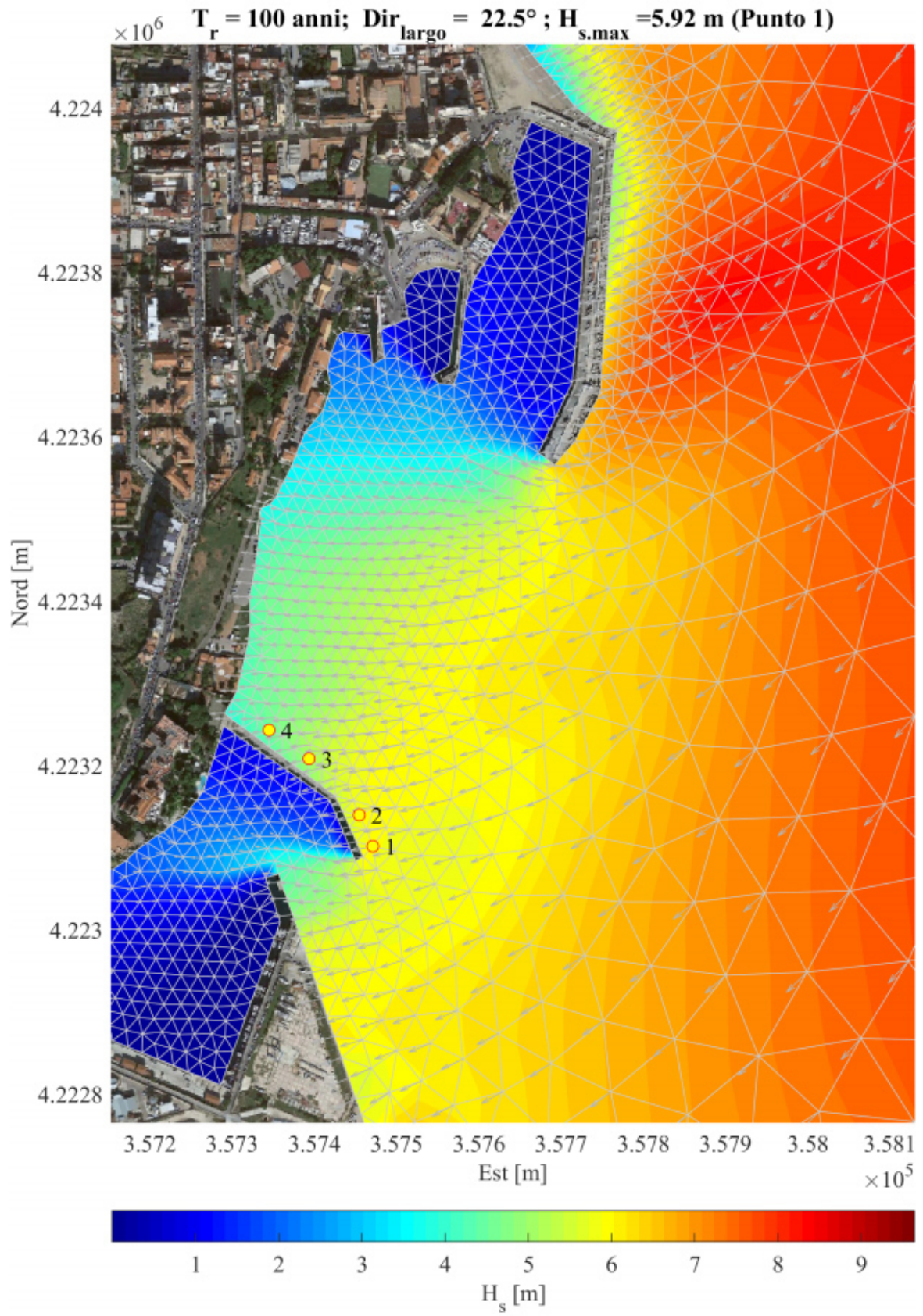


Figura 2 Esempio estrazione altezza d'onda sui 4 punti sulla diga foranea per mareggiata di progetto



## 2) Verifica di stabilità idraulica della mantellata in massi artificiali dell'opera foranea di sopraflutto

Le verifiche di stabilità della mantellata foranee di una diga a gettata sono state messe a punto con una serie di modelli di verifica delle caratteristiche dei blocchi (lapidei o artificiali), ricavati con ricerche sperimentali su modelli idraulici effettuati in canalette di prova.

Per quanto riguarda il caso di mantellate foranee create con blocchi artificiali posti in singolo strato, come nel caso in esame in cui la mantellata è realizzata in unità Ecopode da  $6 \text{ m}^3$  per i primi 200,00 m dalla radice e in Ecopode da  $8 \text{ m}^3$ , l'approccio più recente (Van der Meer 1999, The Rock Manual 2007) è quello basato sulla verifica del numero di stabilità NS massimo per garantire, con un adeguato fattore di sicurezza, che non vi sia danneggiamento della mantellata (numero di unità rimosse dalla mantellata dell'azione delle onde  $N_{od} = 0$ ).

Infatti, queste tipologie di unità presentano un comportamento "fragile", in cui si può passare rapidamente da una condizione di inizio danno ad una di fallimento della mantellata, come evidente dalla seguente figura.

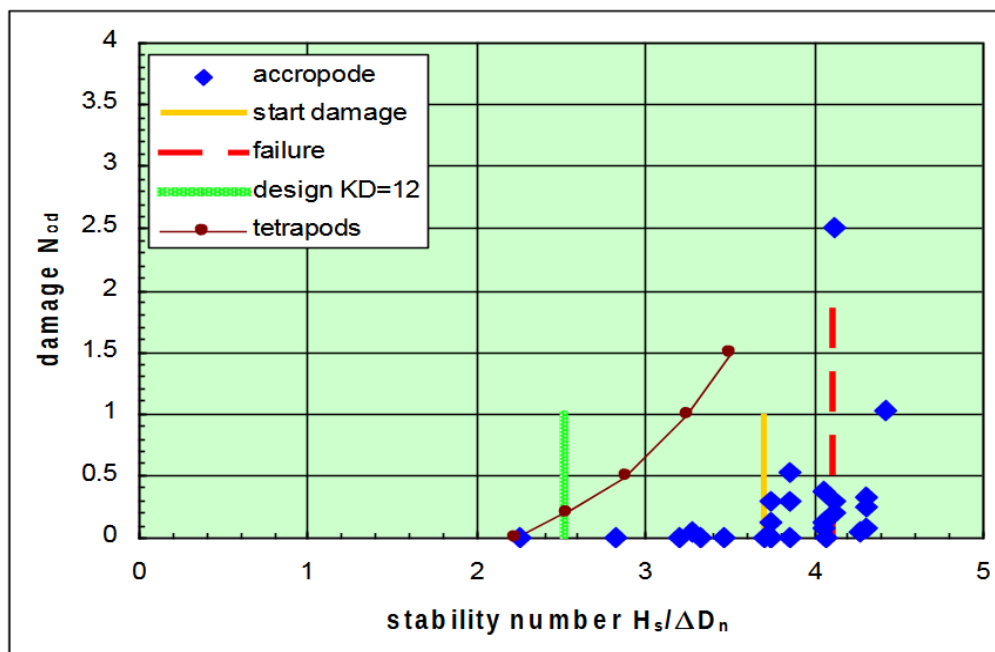


Figura 3 Design of concrete armour layers, Van der Meer 1999

Il numero di stabilità  $N_s$  viene definito nella maniera seguente:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n}$$

Dove:

- $H_s$  [m] è l'altezza d'onda significativa.;
- $\Delta = \frac{(\rho_{cls} - \rho_{water})}{\rho_{water}}$  è la densità relativa dell'unità in cls e  $D_n$  è il suo diametro nominale, definito come la radice cubica del volume dell'unità.

Il numero di stabilità massimo da considerare, per casi come il presente in cui la scarpa di posa della mantellata sia pari a 4:3, può essere ricavato dalla tabella 5.35 del The Rock Manual e dalle più recenti pubblicazioni (Van Der Meer, Coastal Structures and breakwater design). Per quanto riguarda gli accropodi II (uguali agli Ecopodi in termini di stabilità) il valore suggerito, con sufficiente margine di sicurezza, è di  $N_s = 2.80$

Dalla formulazione illustrata è evidente come sia possibile effettuare una verifica complessiva per la stabilità della mantellata realizzata in massi artificiali, a prescindere dalle diverse geometrie delle sezioni tipo.

Nel caso in esame il diametro nominale  $D_n = \sqrt[3]{V}$  è pari a 1.82m per le unità da 6m<sup>3</sup> e 2.00 m per le unità da 8m<sup>3</sup>.

Sono state considerati 3 valori di densità del calcestruzzo:  $\rho_{cls} = 2300, 2350$  e  $2400 \text{ Kg/m}^3$  per il calcolo del numero di stabilità della mantellata con la formula precedentemente indicata (si è considerato, a favore di sicurezza, il punto P2 rappresentativo per tutto il primo tratto ed il punto P4 per tutto il secondo tratto):

**Tabella 2-I Tronco diga sopraflutto, da 0 a 92 m**

Numero di stabilità NS della mantellata di progetto – tratto iniziale $V = 6 \text{ m}^3$	
Densità [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	Hs = 4.99 m (prog da 0 a 200 m)
2300	<b>2.21</b>
2350	<b>2.13</b>
2400	<b>2.05</b>

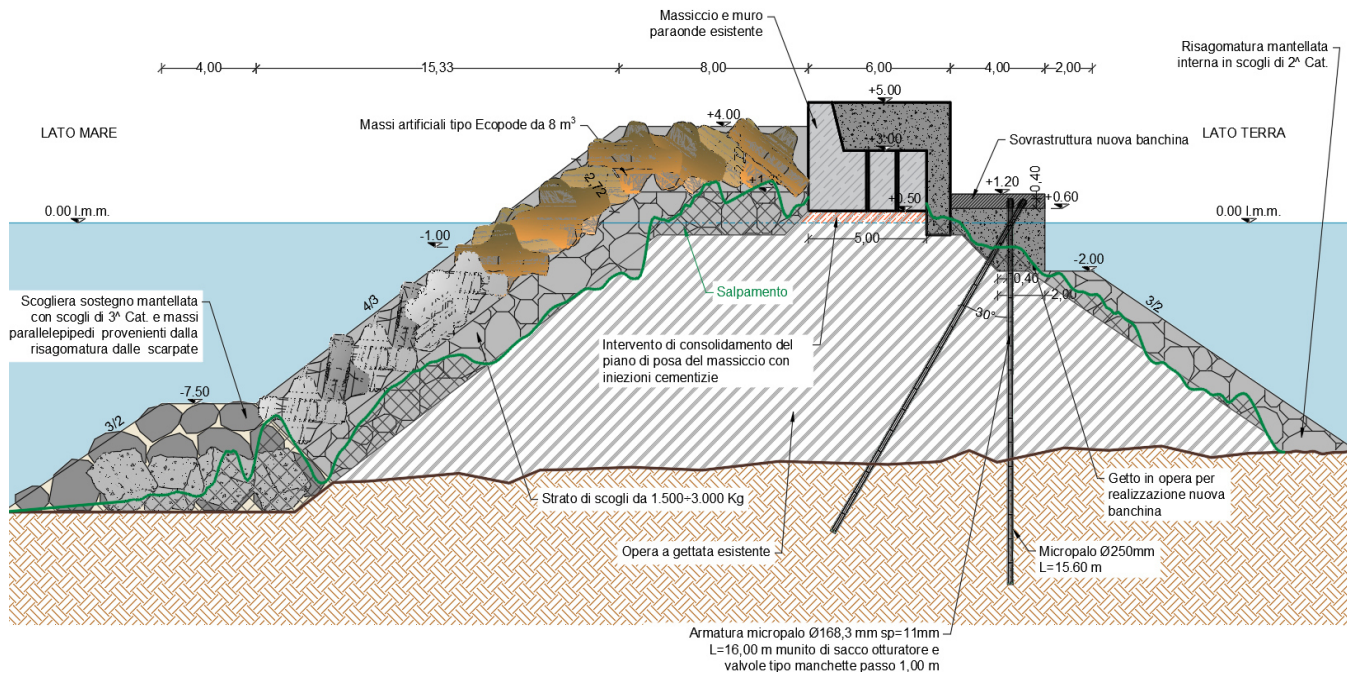
**Tabella 2-II - Tronco diga sopraflutto, da 92 a 292 m**

Numero di stabilità NS della mantellata di progetto – tratto finale $V = 8 \text{ m}^3$	
Densità [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	Hs = 5.92 m (prog da 200.00 m)
2300	<b>2.38</b>
2350	<b>2.29</b>
2400	<b>2.21</b>

Osservando i numeri di stabilità presenti nelle tabelle riportate per i diversi casi è possibile notare come essi siano significativamente minori del limite 2.80.

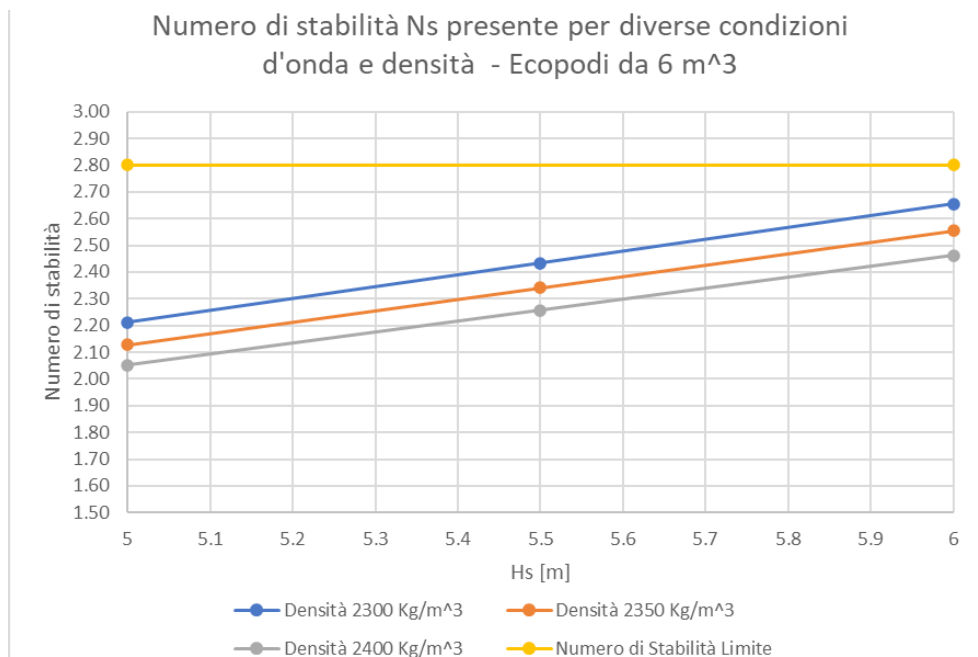
**Sezione Tipo D**

da progr. 201.70 m a progr. 232.50 m

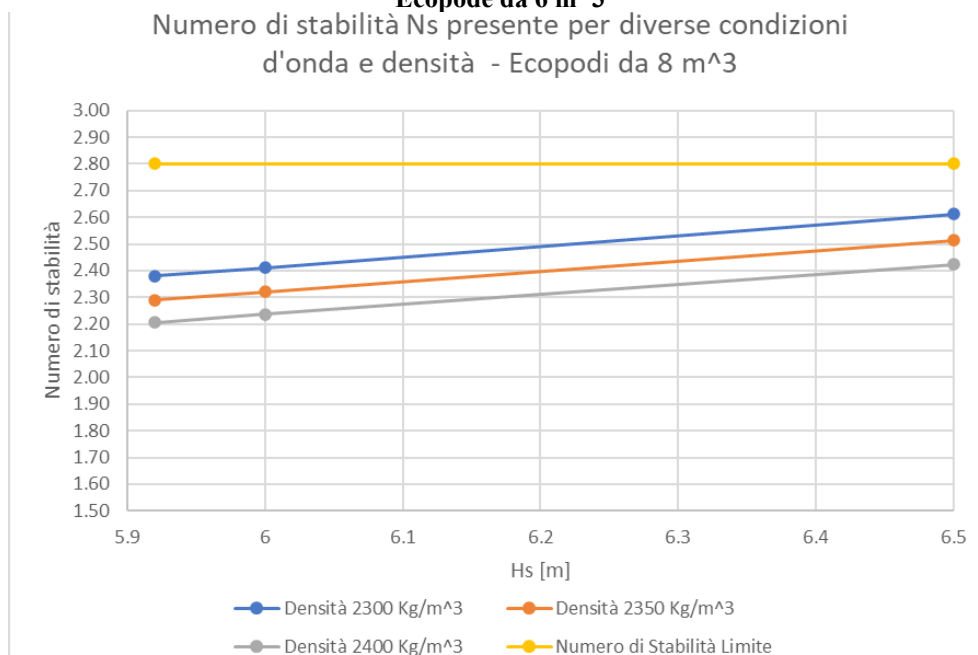


**Figura 4 - Esempio sezione tipo D intervento**

Nelle seguenti si mostra l'andamento del numero di stabilità per altezze d'onda maggiori di quelle di progetto. Si noti come anche in caso di una mareggiata di circa il 20% di quella di progetto non si raggiunga la condizione limite di  $N_s = 2.80$ .



**Figura 5 - Andamento del numero di stabilità per  $H_s >$  dell'altezza d'onda di progetto per il tratto con Ecopode da  $6 \text{ m}^3$**



**Figura 6 - Andamento del numero di stabilità per  $H_s >$  dell'altezza d'onda di progetto per il tratto con Ecopode da  $8 \text{ m}^3$**

### 3) VERIFICA ALLA TRACIMAZIONE (OVERTOPPING) DIGA DI SOPRAFLUTTO

La verifica della tracimazione delle dighe frangiflutti, date la condizione d'onda di progetto, è molto importante perché eccessivi valori di overtopping possono mettere a repentaglio la sicurezza della struttura frangiflutti stessa o delle imbarcazioni presenti nello specchio d'acqua protetto.

La stima della portata di tracimazione  $q$  [l/s/m] può essere effettuata in accordo con le metodologie riportate nel manuale EurOtop 2018.

In particolare, per le strutture frangiflutti realizzate con un massiccio di unità artificiali come nel caso presente in cui sono state utilizzate le unità accropodi è possibile utilizzare la formula 6.6 del citato manuale:

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_s^3}} = 0.1035 * \exp\left[-\left(\frac{1.35 * R_c}{H_s * \gamma_f * \gamma_\beta}\right)\right]$$

Dove:

- $g$  è l'accelerazione di gravità, pari a  $9.81 \text{ m/s}^2$
- $R_c$  è il livello della cresta della struttura rispetto al livello mare ed in questo caso, come suggerito al paragrafo 6.3.5, è uguale al livello del muro paraonde =  $5.0 \text{ m}$
- $\gamma_f$  è un parametro dipendente dalla modalità in cui è realizzata la mantellata. Nel caso in esame, dato l'utilizzo di Ecopodi equiparabili agli Accropodi II, è pari a  $0.44$  in base a quanto riportato nella tabella 6.2 dell'EurOtop.
- $\gamma_\beta$  è un parametro per tenere conto dell'inclinazione dell'onda in arrivo rispetto alla struttura frangiflutti che può essere valutato come  $\gamma_\beta = 1 - 0.0063 \sqrt{\beta}$  dove  $\beta$  è l'angolo tra la direzione dei raggi d'onda e la perpendicolare alla struttura frangiflutti. Nel caso in esame, per la condizione più gravosa quindi con onde maggiori, questo è pari a circa  $20^\circ$  quindi  $\gamma_\beta = 0.874$

Il tratto terminale della diga frangiflutti (punto P4) subisce l'attacco ondoso più gravoso ( $H_s = 5.92$  m). Per tale altezza d'onda la risultante  $q = 76.772$  l/s/m. Questo valore può tuttavia essere significativamente ridotto considerando l'effetto dovuto alla presenza di una berma sulla cresta della scogliera in accropodi. In particolare, come evidenziato nelle tavole tecniche questa larghezza della berma (indicata con  $G_c$ ) è pari a 8.00 m.

$$C_r = 3.06 \exp\left(\frac{-1.5 G_c}{H_s}\right)$$

Nel caso in esame  $C_r = 0.403$ , per cui la definitiva portata di tracimazione (overtopping discharge) è esprimibile come:

$$q = 76.772 \text{ l/s/m} \cdot C_r = 30.95 \text{ l/s/m}$$

Tale valore può essere confrontato con i limiti presenti su queste tabelle, ricavate dall'EurOtop:

**Tabella 3-III - Estratto da Tabella 3.1 del manuale EurOtop 2018. Valori di portata di tracimazione limite per diverse condizioni strutturali**

Tipologia di struttura e condizioni di esercizio	Tracimazione media $q$ [l/s/m]
Frangiflutti a scogliera; $H_s > 5$ m; assenza di danno	1
Frangiflutti a scogliera; $H_s > 5$ m; lato terra progettato tenendo in conto la possibilità di tracimazione significativa	5-10

**Tabella 3-IV Estratto da Tabella 3.2 del manuale EurOtop 2018, valori di portata di tracimazione limite per diversi gradi di danneggiamento a beni presenti dietro il frangiflutti**

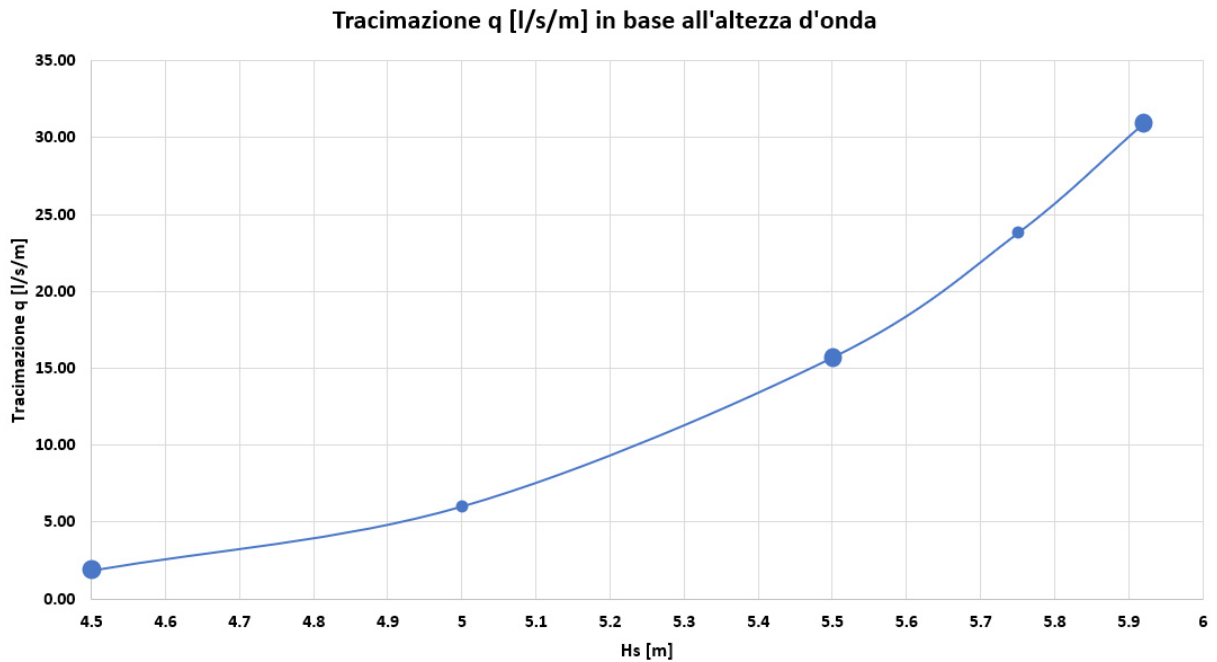
Rischi per diverse condizioni di esercizio	Tracimazione media $q$ [l/s/m]
Significativi danni o affondamento di yacht di grosse dimensioni - $H_s > 5$ m	>10
Significativi danni o affondamento di yacht di grosse dimensioni - $3\text{m} < H_s < 5\text{m}$	>20
Affondamento di barche di piccole dimensioni, posizionate da 5-10 m a valle del muro paraonde   danneggiamento degli yacht di grosse dimensioni - $3\text{m} < H_s < 5\text{m}$	>5
Sicuro per gli yacht di grosse dimensioni - $H_s > 5\text{m}$	<5
Sicuro per barche di piccole dimensioni, posizionate da 5-10 m a valle del muro paraonde	<1

Come evidente dai valori tabellati, dunque, nel tratto terminale della diga foranea, per le condizioni di progetto con tempo di ritorno pari a 100 anni, si avrebbero delle condizioni che non

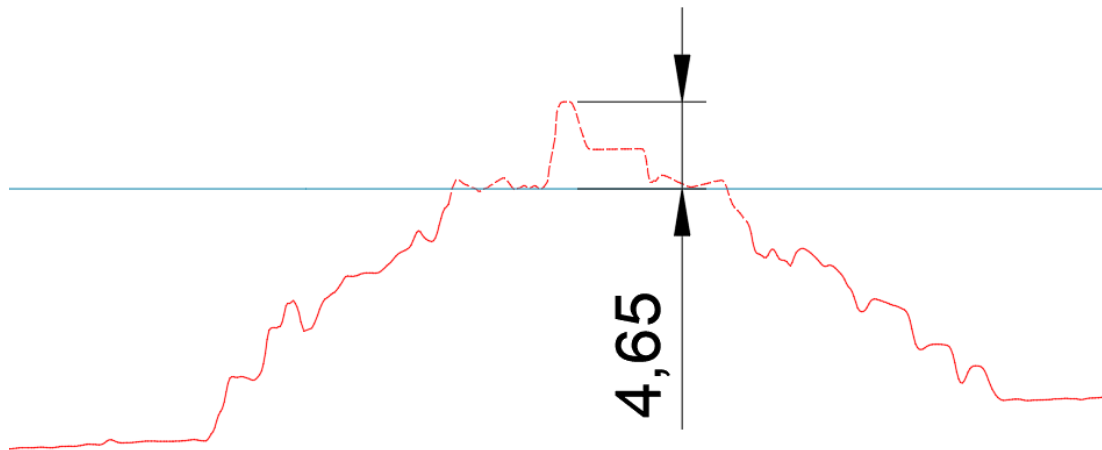
soddisfano i valori richiesti dall'EurOtop per quanto riguarda la sicurezza degli yacht ormeggiati nella banchina realizzata immediatamente a tergo del muro paraonde. Tuttavia, è fondamentale ricordare che la diga foranea dell'acquasanta è una diga esistente in cui non è possibile, per motivi paesaggistici, innalzare ulteriormente il livello del muro paraonde. Questa considerazione, congiuntamente al fatto che la diga foranea del porto dell'acquasanta non è raggiungibile in automobile o liberamente a piedi (in quanto non sono presenti varchi pubblici) permette di accettare i valori di tracimazione risultanti, che comunque sono ordini di grandezza inferiori rispetto alla situazione attuale, a condizione che la banchina realizzata a tergo della diga foranea, soprattutto nel tratto oltre i primi 200 metri dalla radice, non sia utilizzata durante i mesi invernali.

Infatti, la tracimazione del moto ondoso non è lineare rispetto all'altezza d'onda. Dunque, come evidente in Figura 7, anche con un'onda  $H_s = 5.00$  m (con un tempo di ritorno superiore a 50 anni e che difficilmente potrebbe presentarsi nei mesi estivi anche con un tempo di ritorno di 100/150 anni) i valori di tracimazione risultano complessivamente accettabili. Nel tratto iniziale della diga, in cui come evidente dallo studio idraulico marittimo i valori di altezza d'onda previsti sono ancora inferiori, non sono previste problematiche neanche in presenza di mareggiate estreme nel periodo invernale.

Il grafico dell'andamento dell'overtopping atteso per le diverse altezze d'onda analizzate è riportato nella seguente Figura:



**Figura 7 -Andamento della tracimazione q per la diga di sopraflutto in base all'altezza d'onda - progetto**  
 Si vuole dare inoltre confronto con la situazione di estremo rischio attualmente presente lungo la diga dell'Acquasanta allo stato attuale. Si è difatti eseguito lo stesso calcolo considerando lo stato attuale della diga foranea in una sezione terminale (232 m).



**Figura 8 - sezione tipo testata diga foranea esistente**

La formula è la medesima utilizzata precedentemente:

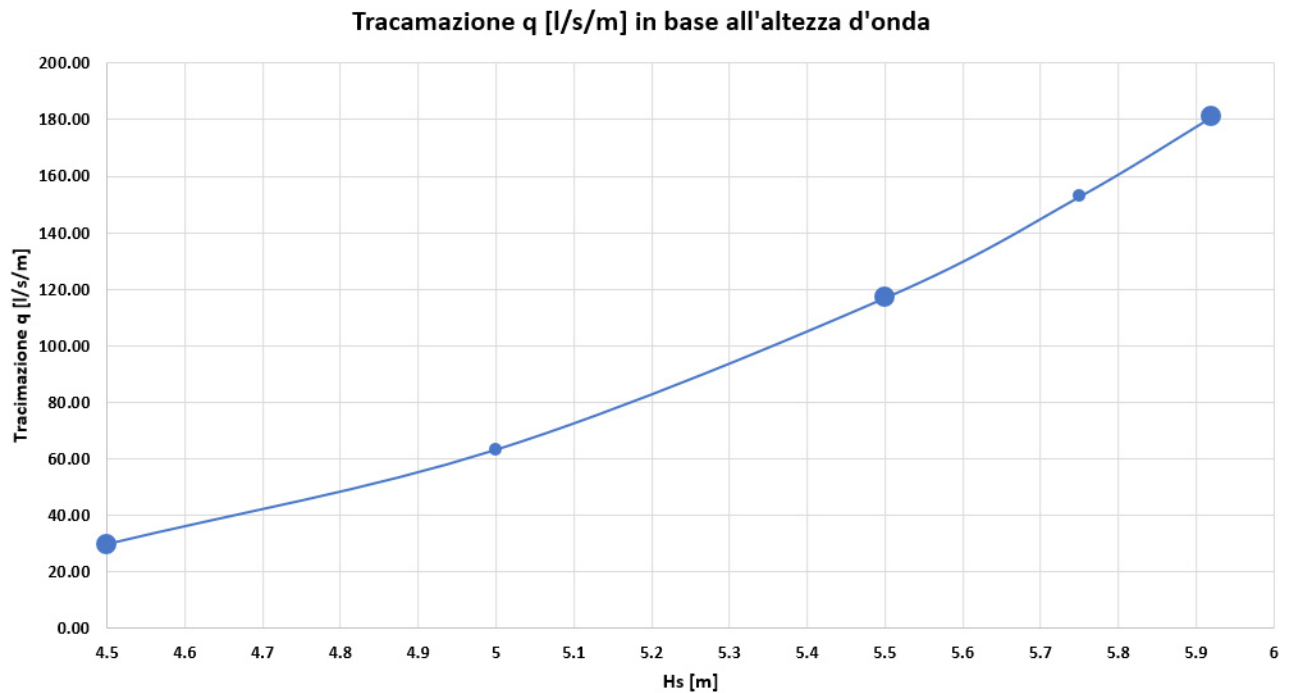
$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}} = 0.1035 \cdot \exp\left[-\left(\frac{1.35 \cdot R_c}{H_s \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right)^{1.3}\right]$$



Dove:

- $g$  è l'accelerazione di gravità, pari a  $9.81 \text{ m/s}^2$
- $R_c$  è il livello della cresta della struttura rispetto al livello mare ed in questo caso, come suggerito al paragrafo 6.3.5, è uguale al livello del muro paraonde =  $4.65 \text{ m}$
- $\gamma_f$  è un parametro dipendente dalla modalità in cui è realizzata la mantellata. Nel caso della diga esistente, considerando cubi a singolo strato con nucleo permeabile, è pari a  $0.49$  in base a quanto riportato nella tabella 6.2 dell'EurOtop.
- $\gamma_\beta$  è un parametro per tenere conto dell'inclinazione dell'onda in arrivo rispetto alla struttura frangiflutti che può essere valutato come  $\gamma_\beta = 1 - 0.0063 \sqrt{\beta} \sqrt{i}$  dove  $\beta$  è l'angolo tra la direzione dei raggi d'onda e la perpendicolare alla struttura frangiflutti. Nel caso in esame, per la condizione più gravosa quindi con onde maggiori, questo è pari a circa  $20^\circ$  quindi  $\gamma_\beta = 0.874$

Per l'altezza d'onda di progetto ( $H_s = 5.92 \text{ m}$ ) la risultante  $q = 181.05 \text{ l/s/m}$ . Come evidente dalla sezione riportata nella figura precedente non è presente allo stato attuale un'adeguata mantellata foranea nella diga, per cui non è prevedibile una riduzione della tracimazione grazie all'effetto benefico di una berma mantellata.



**Figura 9 - Tracimazione diga allo stato attuale - si noti come anche in presenza di mareggiate rilevanti ma non estreme ( $H_s \approx 4-4.5\text{m}$ ) si superano nettamente i limiti di accettabilità previsti dalla normativa EurOtop**

La riduzione del rischio per la sicurezza delle opere, delle imbarcazioni e di eventuali utenti della diga, confrontando la situazione attuale con quella di progetto, è dunque notevole.

Nello specifico, la seguente tabella riporta un confronto tra la portata di tracimazione attesa  $q$  [l/s/m] per le diverse altezze d'onda analizzate per la configurazione attuale e quella di progetto, dimostrando come si riescano ad avere sempre riduzioni maggiori del -83%.

	q – attuale	q – progetto	Riduzione %
Hs = 4.5 m	28.91	1.86	-94%
Hs = 5.0 m	63.27	6.03	-90%
Hs = 5.5 m	116.99	15.72	-87%
Hs = 5.75 m	152.87	23.81	-84%
Hs = 5.92 m	181.04	30.85	-83%