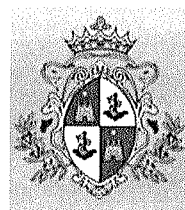




**AM3 SPIN-OFF**  
ADVANCED MODELS AND METHODS  
IN MARITIME ENGINEERING



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE  
**SPIN-OFF APPROVATO**



COMUNE DI PORTO AZZURRO

CONDIZIONI DI STABILITÀ DEL  
MOLO DI PORTO AZZURRO  
(LIVORNO)

Firenze, luglio 2020

**AM3 SPIN-OFF s.r.l.**  
SPIN-OFF ACCADEMICO  
DELL' UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI FIRENZE

info@am3spinoff.com  
www.am3spinoff.com

Via Madonna del Piano, 6  
50019 Sesto Fiorentino (FI)  
P. IVA / C.F. 06375900484

**AM3 Spin-off s.r.l.**  
*Advanced Models and Methods in Maritime Engineering*  
Via Madonna del Piano, 6  
50019 Sesto Fiorentino (FI)  
P.IVA 06375900484 REA FI 623251

## INDICE

---

Premessa.....	4
1. Dati raccolti ed analisi eseguite sulle strutture del molo.....	5
1.1 LAVORI ESEGUITI DAL 2009 SUL MOLO DI PORTO AZZURRO .....	5
1.2. RILIEVO ESEGUITO PER IL CONTROLLO DELLE STRUTTURE.....	8
1.3 DANNEGGIAMENTO E RIPRISTINO DEL MURO DI CORONAMENTO .....	11
2. Verifiche di stabilità .....	15
2.1 VERIFICHE DI STABILITÀ DEL MURO .....	15
2.2 VERIFICHE DI STABILITÀ DELLA SCOGLIERA.....	20
Conclusioni .....	22

## INDICE DELLE FIGURE

---

Figura 1 - Sezione del cassone e della sovrastruttura (Fonte: progetto Provveditorato OO.PP.) .....	6
Figura 2 - Planimetria e sezione del molo (1956) .....	8
Figura 3 - Modello del molo di Porto Azzurro ricavato dal rilievo .....	9
Figura 4 - Viste del modello digitale della scogliera .....	11
Figura 5 - Vista del muro danneggiato nella parte emersa della scogliera .....	12
Figura 6 - Particolare della parte danneggiata del muro .....	13
Figura 7 - Sezione del muro ricostruito (rilievo speditivo eseguito dal Comune nel maggio 2020).....	13
Figura 8 - Foto del muro a seguito del ripristino .....	14
Figura 9 - Relazione altezza d'onda - tempo di ritorno .....	17
Figura 10 - Criterio di Pedersen per la stima delle spinte sul muro di coronamento (CEM VI, cap. 5) .....	18

## INDICE DELLE TABELLE

---

Tabella 1 - Durata minima di vita per opere di carattere definitivo TV .....	15
Tabella 2 - Massima probabilità di danneggiamento ammissibile nel periodo di vita operativa Pf .....	16

## PREMESSA

---

Ai fini dell'emissione del parere di idoneità tecnica ai sensi dell'art. 86 della l.r. 65/2014, la Regione Toscana ed in particolare l'Ufficio del Genio Civile Valdarno Inferiore e Costa ha richiesto integrazioni riguardanti fra l'altro *"una specifica relazione per il corpo diga che prenda in considerazione lo stato attuale del manufatto, le verifiche a tracimazione, e di stabilità."*

L'ufficio del Genio Civile Basso Valdarno e Costa ha richiesto, nell'ambito di una precedente fase procedimentale, con una comunicazione nell'ambito del Proseguimento della Conferenza dei Servizi del 27/09/ 2018, una integrazione sugli aspetti riguardanti la stabilità dell'opera e tenendo conto che il 29-30 ottobre 2018 si è verificata una mareggiata particolarmente intensa. Nella nota è richiesto che la valutazione sia supportata da un rilievo per un "ulteriore controllo riguardo alla sagoma della scogliera post evento".

L'amministrazione comunale ha fatto eseguire un rilievo batimetrico di dettaglio nel mese di dicembre 2018 per verificare le condizioni della scogliera sia nella parte emersa che nella parte sommersa e sulla base di questi nuovi dati ha richiesto alla società AM3 Spin-off s.r.l., spin-off, una valutazione sulla stabilità della scogliera.

Il presente rapporto prende in esame i lavori di ripristino condotti dal Comune per la riparazione dei danni post evento 2018 ed integra e completa la precedente relazione con un aggiornamento sulle onde di progetto e sui criteri che dovrebbero essere utilizzati per una nuova progettazione.

# 1. DATI RACCOLTI ED ANALISI ESEGUITE SULLE STRUTTURE DEL MOLO

---

## 1.1 LAVORI ESEGUITI DAL 2009 SUL MOLO DI PORTO AZZURRO

Sono stati raccolti i dati di progetto disponibili presso il Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche Toscana Umbria Marche relativi agli ultimi lavori che sono stati eseguiti sul molo del porto.

Nel 2006 iniziarono le attività di progettazione da parte del Provveditorato Regionale per le Opere Pubbliche di interventi di "*Adeguamento statico del molo di sopraflutto del porto di Porto Azzurro*". Nelle ultime varianti del progetto, il molo sarebbe stato prolungato con la posa di un cassone cellulare di dimensioni in pianta di 27x12 m e di altezza 7,9 m; il cassone è formato da tre file di 7 celle quadrate di 3,5 m di lato.

Il cassone è imbasato alla quota di -8,2 m s.l.m. su uno scanno in pietrame e superiormente da un muro paraonde che arriva alla quota di + 4,2 m. Il pietrame di fondazione del cassone è stato stabilizzato prima con un processo di vibroflottazione e successivamente alla posa dei cassoni con precarica fino alla cessazione dei cedimenti di assestamento.

La parete lato mare del cassone ha delle aperture sulla prima fila di celle che sono riempite solo nella parte inferiore alla quota di -3 m s.l.m. e vuote nella parte superiore in modo da ridurre il coefficiente di riflessione. Il cassone è quindi stato progettato per risultare stabile all'attacco delle onde senza alcuna protezione esterna.

La sovrastruttura del cassone ha uno spessore di calcestruzzo di 90 cm ed il muro paraonde ha uno spessore di 2 m per un'altezza di 1,75 m sul piano banchina e di 1 m sulla parte superiore fino alla quota di 4,2 m s.l.m.

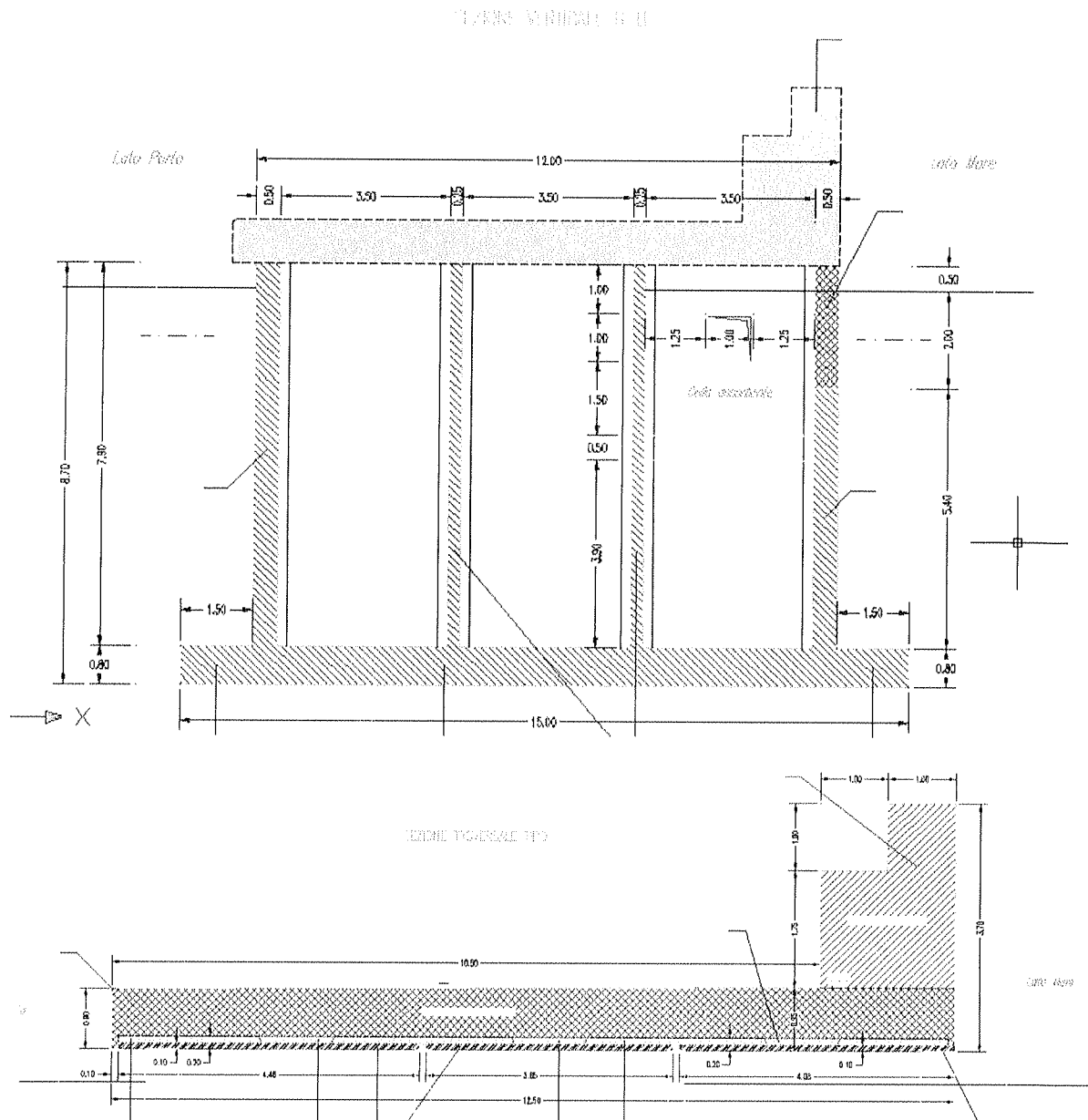


Figura 1 – Sezione del cassone e della sovrastruttura (Fonte: progetto Provveditorato OO.PP.)

Tutta la progettazione eseguita dagli ingegneri del Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche è stata condotta secondo le norme previste nelle NTC del 2008. I lavori furono completati e collaudati il 18/11/2011.

Nell'ambito di questo progetto è stata rifiorita e riportata in sagoma la scogliera di protezione lato mare del vecchio molo e non ha interessato il tratto prolungato col cassone. La scogliera ha una berma di sommità larga 4,0 m alla quota di +2,3 m s.l.m. e pendenza di 1/2 fino al fondo.

Nel 2011 viene approvato un "Progetto di realizzazione della scogliera a protezione del molo di sopraflutto di Porto Azzurro" nel quale era prevista una scogliera a protezione del tratto prolungato, analoga a quella realizzata precedentemente con berma di sommità a +2,3 m e pendenza di 1/2 ma, data la maggiore esposizione al moto ondoso è stata inserita una berma di 3,0 m di larghezza alla quota di - 8,0 m s.l.m. per aumentare la stabilità generale.

La scogliera è stata progettata con nucleo in tout-venant protetto da uno strato filtro di massi di seconda categoria e mantellata con due strati di massi di terza categoria. Nel progetto era previsto un riccio completo di testata con berma emersa alla quota + 2,3 m s.l.m. a completa protezione del cassone anche sul lato terra.

Anche questo progetto è stato redatto dagli ingegneri del Provveditorato Interregionale ed approvato dal Comitato Tecnico Amministrativo nel maggio 2011.

In fase di esecuzione del progetto fu approvata una variante che ridusse la protezione del cassone lato terra e fu realizzato un riccio di testata parziale che protegge solo il lato mare del cassone con una scogliera che si abbassa in sommità progressivamente lungo la curva, per mantenere più libera possibile tutta la parte verticale del cassone lato porto per gli accosti.

Lo stato finale di fine lavori è documentato da 5 sezioni *as built* rilevate dall'impresa SALES Costruzioni, e depositate presso l'Ufficio di Livorno del Provveditorato.

Gran parte della scogliera appoggia direttamente sul fondo fangoso che non era stato interessato dal processo di consolidamento che era stato eseguito solo sotto lo scanno di fondazione del cassone. Essendo prevedibili processi di assestamento la berma di sommità fu realizzata ad una quota di circa 3,5 m invece che di 2,3 m come da progetto.

I lavori sono stati eseguiti nel 2013 come da progetto come risulta dal verbale di regolare esecuzione emesso dal direttore dei lavori il 18/02/2014.

La parte del molo più antica, come risulta dai documenti dell'archivio del Provveditorato alle Opere Pubbliche, (Figura 2) è stata realizzata con massi in calcestruzzo sovrapposti e protetti sulla parte esposta al moto ondoso da una scogliera. Si tratta di una struttura molto robusta dove l'unico elemento debole è rappresentato dal muro paraonde costruito in muratura. È quindi sul muro che si sono concentrati gli approfondimenti per verificarne la stabilità.

Nei giorni del 29-30 ottobre 2018 una violenta mareggiata dal settore meridionale ha interessato tutta la costa toscana ed anche il molo di Porto Azzurro ha subito danni ad un tratto del vecchio muro di coronamento.



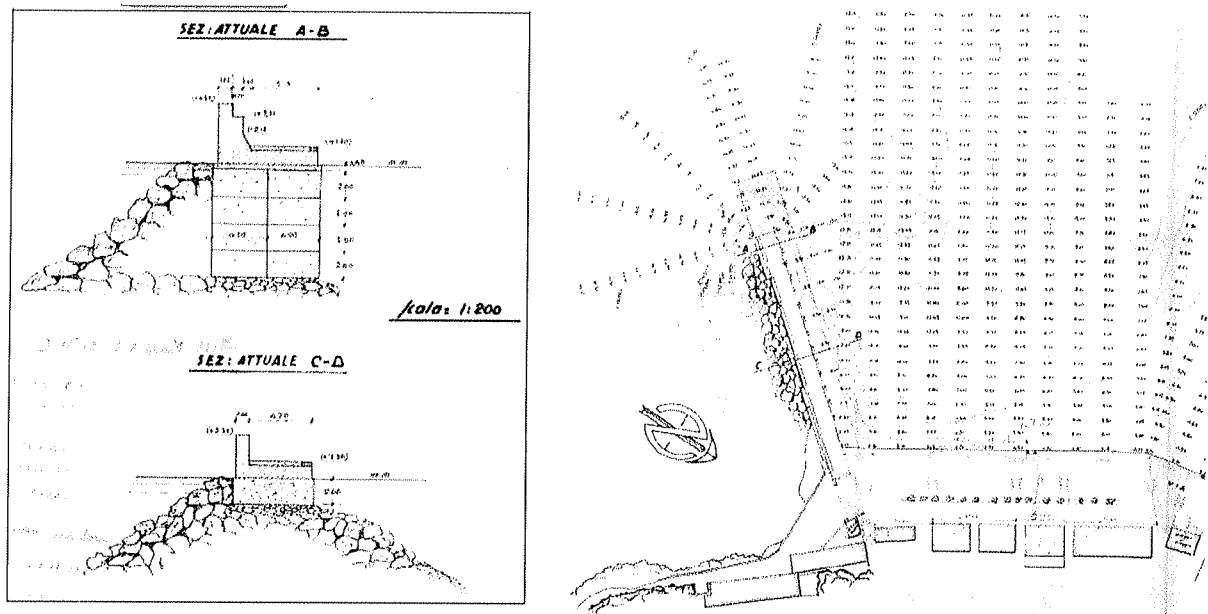


Figura 2 - Planimetria e sezione del molo (1956)

## 1.2. RILIEVO ESEGUITO PER IL CONTROLLO DELLE STRUTTURE

Il rilievo del molo è stato eseguito nel dicembre 2018 con tecnologia multibeam per la parte sommersa ed utilizzando un drone con piattaforma inerziale per il rilievo della parte emersa.

I due rilievi hanno permesso di definire un unico modello digitale che comprende il fondale fino a -16 m di profondità, la scogliera di protezione del vecchio molo e del prolungamento recente ed il muro paraonde .

Dal modello digitale sono state ricavate 10 sezioni in corrispondenza delle sezioni di progetto equispaziate di circa 10 m (vedi tavola allegata) per le quali è stato eseguito un confronto con le sezioni di progetto per le sezioni dalla 2 alla 8 che interessano la parte più vecchia del molo per la quale non sono state trovate sezioni *as-built* mentre per le sezioni dalla 9 alla 12 sono state fornite dal Provveditorato sia le sezioni di progetto sia le sezioni rilevate al termine dei lavori allegate alla contabilità dei lavori. (2014)

Queste ultime sezioni erano state eseguite con lo scopo di verificare i volumi contabilizzati e non hanno seguito le stesse convenzioni sulle quote assunte nel progetto; pertanto per un confronto è stato imposto che la quota di sommità del muro di coronamento fosse la stessa nel progetto.

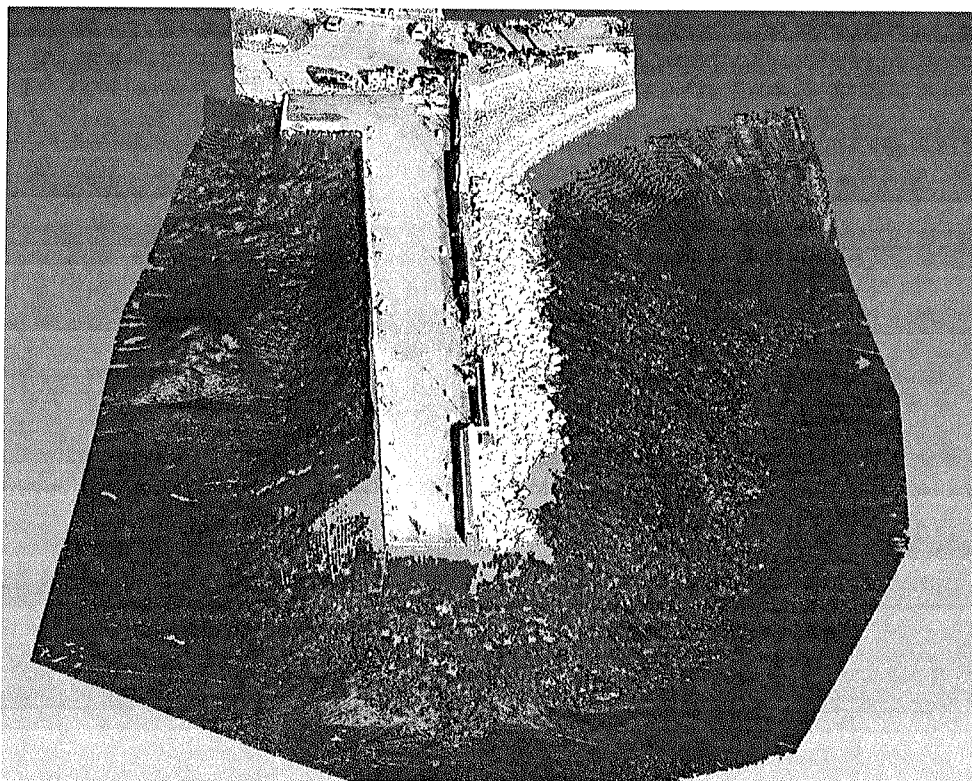


Figura 3 - Modello del molo di Porto Azzurro ricavato dal rilievo

Questa assunzione non renderebbe apprezzabili i cedimenti globali del molo e pertanto dal rilievo più recente è stato ricavato un profilo in asse al molo che partendo da terra, dove i cedimenti sono certamente nulli, arriva fino alla testata con lo scopo di evidenziare l'entità dei processi di assestamento.

Il profilo longitudinale riportato nella tavola 2 evidenzia che le quote del tratto più vecchio sono comprese fra 1,25 e 1,30 m s.l.m. mentre sul tratto terminale di 27 m dove è presente il cassone sono comprese fra 1,25 e 1,15 m s.l.m. con una differenza media di circa 7 cm. Questa modesta differenza può essere la conseguenza di un ulteriore processo di consolidamento dei terreni di fondazione sotto il cassone, (decisamente modesto se considerato il periodo di oltre 10 anni) o di non perfetta esecuzione della superficie della soletta di copertura dei cassoni.

Ai fini della stima dei cedimenti della scogliera esterna, l'ipotesi di mantenere come riferimento costante la quota di sommità del muro paraonde potrà portare ad incertezze inferiori a 10 cm del tutto influenti per il confronto fra superfici di scogliere composte da massi di dimensioni dell'ordine di un metro.

Nel periodo successivo alla fine dei lavori non ci sono state mareggiate severe fino a quella del 29-30 ottobre 2018 quindi le deformazioni fra le sezioni dei due rilievi più recenti sono ascrivibili a cedimenti della superficie di appoggio sul fondo, ad

assestamenti della scogliera dovuta al moto ondoso ordinario e agli effetti dell'evento eccezionale recente. Analizzando i profili della Tavola 2 allegata possono farsi le seguenti considerazioni.

Per le sezioni da 1 a 8 sono confrontati i profili di progetto con il profilo ricavato dal modello digitale della scogliera ottenuto dal rilievo del dicembre 2018. Si può osservare che, per le sezioni da 1 a 7 compresa, la scarpata attuale della scogliera ha la stessa pendenza di quella di progetto o addirittura inferiore per le prime sezioni. La quota della berma di sommità è abbassata rispetto alla quota di progetto, di circa 1 m nelle sezioni 1 e 2, di 60-80 cm nelle sezioni 3 e 4, di meno di 50 cm nelle sezioni 5 e 6 e di circa 1 m nelle sezioni 7 e 8 (rappresentative del tratto di muro crollato).

Per le sezioni da 9 a 12 il profilo rilevato nel dicembre 2018 è stato confrontato con le sezioni rilevate immediatamente dopo il termine dei lavori. In questo caso, per le sezioni 9 e 10 la berma di sommità si è abbassata di oltre 1,5- 1,8 m rispetto alla situazione di fine lavori ma rispetto alla quota di progetto l'abbassamento medio è di circa 1 m.

Riguardo alla pendenza della scarpata si può osservare che la pendenza di 1/2 di progetto (sostanzialmente coincidente con la pendenza rilevata a fine lavori) si è ridotta a 1/1,8 per la sezione 9, a 1/1,94 per la sezione 10 mentre per la 11 è rimasta invariata pari a 1/2 .

Per quanto riguarda la sezione 12 le differenze sembrano molto evidenti sia in termini di abbassamento della berma sia in termini di larghezza. Va tenuto presente che questa sezione interessa il tratto di protezione della testata dove la sezione è rapidamente decrescente avvicinandosi alla sezione terminale del cassone, dove, come risulta dalla sezione longitudinale, la larghezza della berma di sommità si annulla e la scogliera è interamente sommersa. Risulta quindi molto incerto determinare l'abbassamento verificatosi dopo il termine dei lavori.

Si può comunque osservare che pur risultando il cassone molto scoperto, la scogliera presenta una pendenza di 1/1,9 e che il cassone, imbasato a quota - 8,2 m è protetto sulla testata almeno fino alla quota di - 5 m. Va ricordato che il cassone era stato progettato in modo da resistere al moto ondoso senza scogliera di protezione dato che è provvisto di celle antiriflettenti per ridurre le spinte.

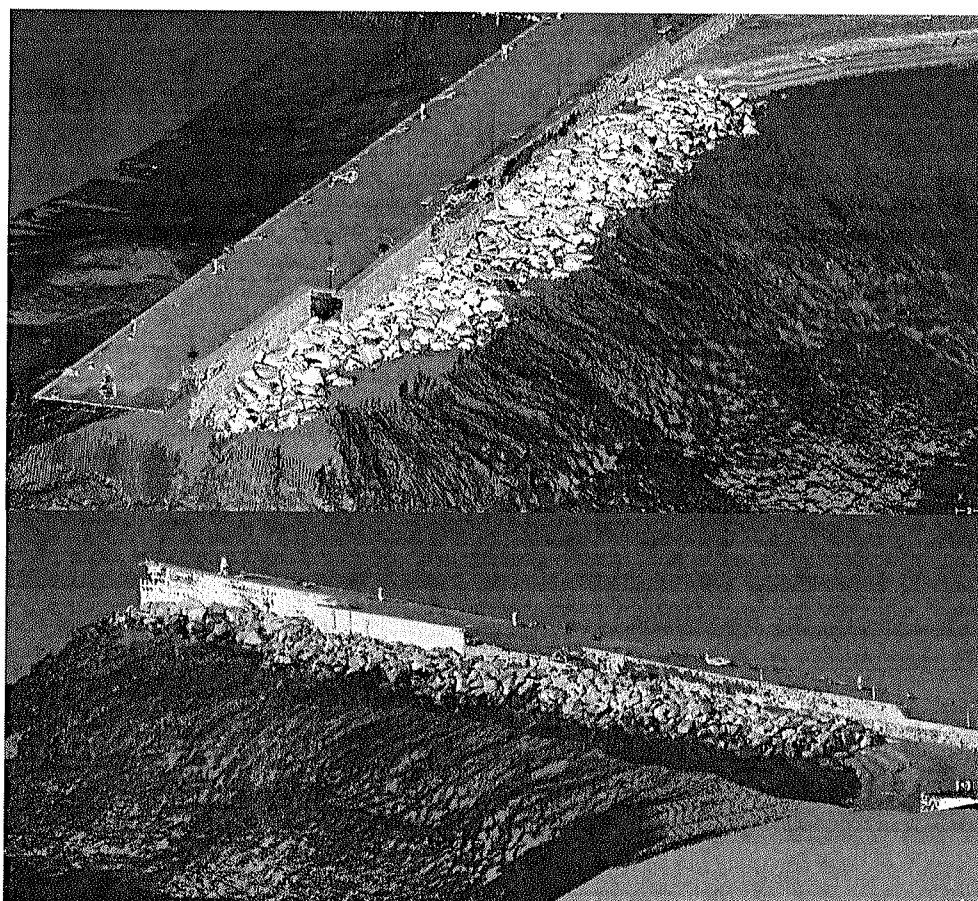


Figura 4 - Viste del modello digitale della scogliera

### 1.3 DANNEGGIAMENTO E RIPRISTINO DEL MURO DI CORONAMENTO

L'elaborazione delle immagini riprese con drone topografico hanno permesso di costruire un'ortofoto di dettaglio della parte emersa e di evidenziare la situazione dopo i danni della mareggiata del 29-30 ottobre 2018. Un primo esame ha evidenziato il perfetto allineamento della banchina e quindi la sostanziale integrità della struttura del molo.

Il tratto costruito successivamente al 2000 è in calcestruzzo armato dello spessore di 2 m al piano della banchina, che si riduce a 1 m dalla quota di 3,2 m s.l.m. fino alla sommità a quota 4,2 m s.l.m. per un'altezza complessiva di 2,8 m sul piano banchina. Questa struttura non ha evidenziato alcuno spostamento.

Il tratto, in muratura, durante l'evento del 29-30 ottobre, ha subito danni su un tratto di circa 20 m. In particolare, il danneggiamento del muro è completo nel tratto di circa 15 m a riva dove le onde della mareggiata hanno demolito la parte in muratura fino alla quota della banchina. Risulta danneggiato anche il tratto limitrofo di circa 8 m di lunghezza dove si può osservare uno spostamento del bordo superiore del muro verso

l'interno del porto dovuto ad una rotazione rigida sul piano di fondazione. (Figura 5, Figura 6, Figura 7 e Figura 8).

Il disassamento del tratto di muro non crollato rispetto al tratto lato terra non danneggiato è di 9,4 cm ed un abbassamento di 3 cm. Una crepa nella fondazione del muro permette di determinare l'allontanamento delle sezioni di rottura di 9,1 cm. (vedi Figura 6). L'analisi di queste deformazioni indica uno spostamento del muro fino al piano di fondazione sulla banchina.

Nel 2019 sono stati eseguiti i lavori di riparazione del tratto di muro danneggiato seguendo la procedura amministrativa del ripristino di un'opera esistente. Il muro è stato ricostruito in calcestruzzo con spessore di 0,95 m in sommità e 1,75 m alla base.

La sezione è stata armata con un doppio strato di rete elettrosaldata con ferri di 10 mm e maglie di 20x20 cm. Il nuovo getto è stato immorsato alla base con spezzoni di 16 mm ogni 40 cm alternando la posizione sui due paramenti. Il cordolo di sommità è stato armato con tondini di 16 mm. Sulla parete lato mare è stato eseguito un rivestimento in pietra in continuità col tratto esistente lato terra.

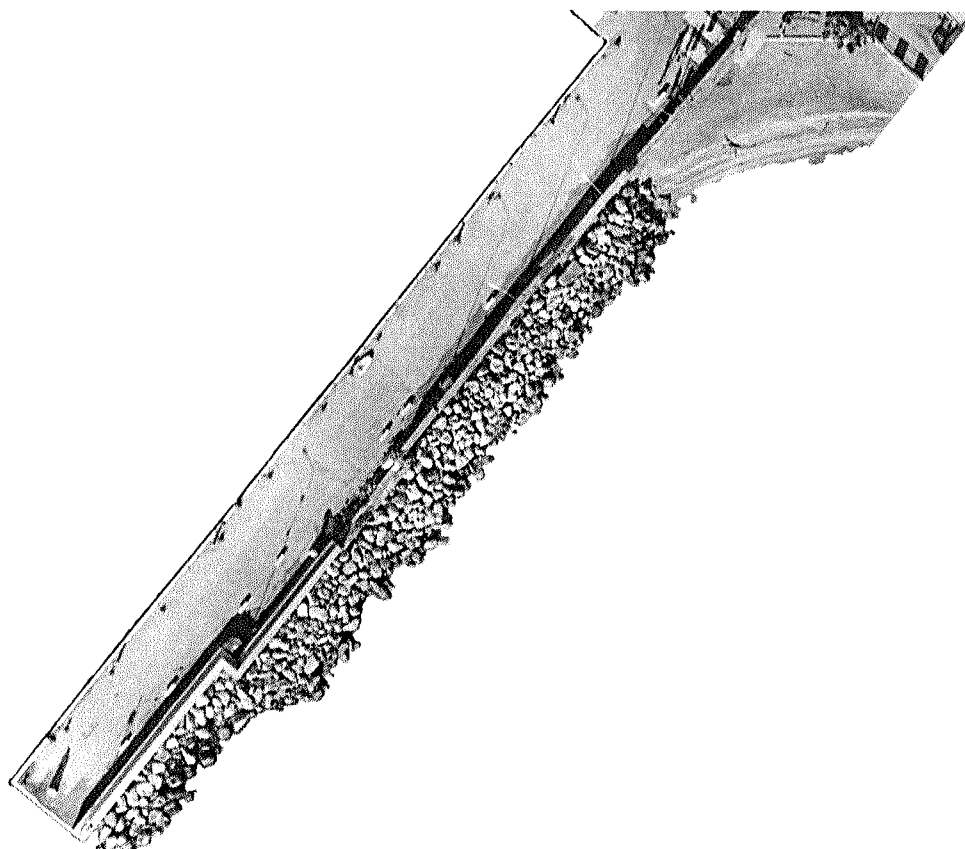


Figura 5 - Vista del muro danneggiato nella parte emersa della scogliera

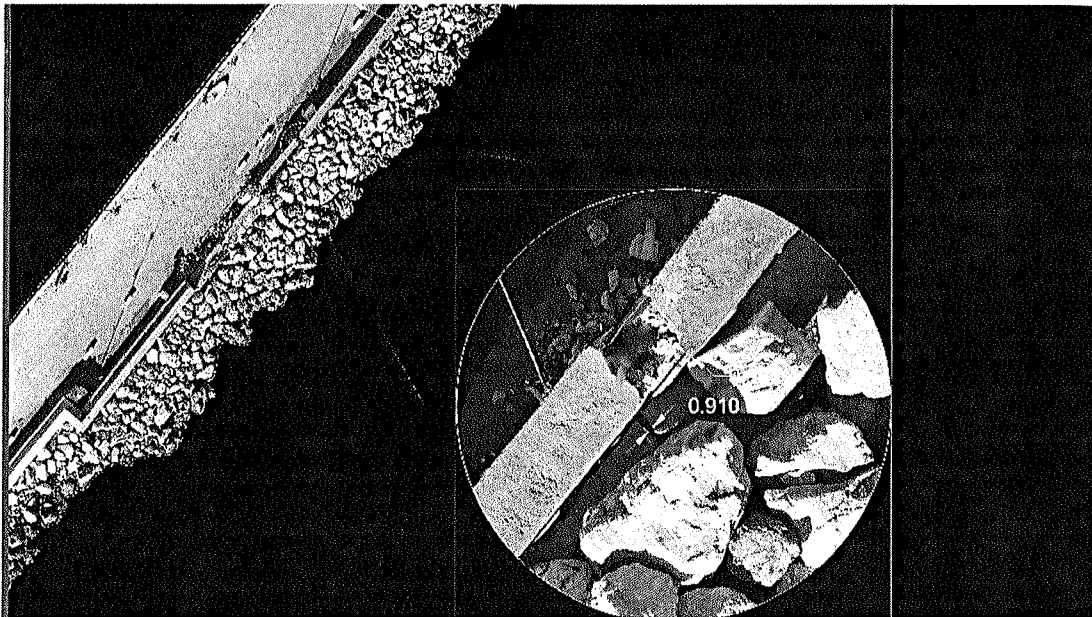


Figura 6 - Particolare della parte danneggiata del muro

Il getto è stato immerso nel modo migliore possibile con la soletta di banchina ma non è presente una continuità di collegamenti delle armature metalliche tali da realizzare un vincolo di incastro come per il tratto sopra il cassone. Un rilievo speditivo eseguito nel giugno 2020 ha evidenziato che la scogliera di protezione esterna del muro, nel tratto ripristinato, arriva ad una quota di poco superiore a quella della banchina e quindi il muro risulta quasi completamente scoperto. (Figura 7)

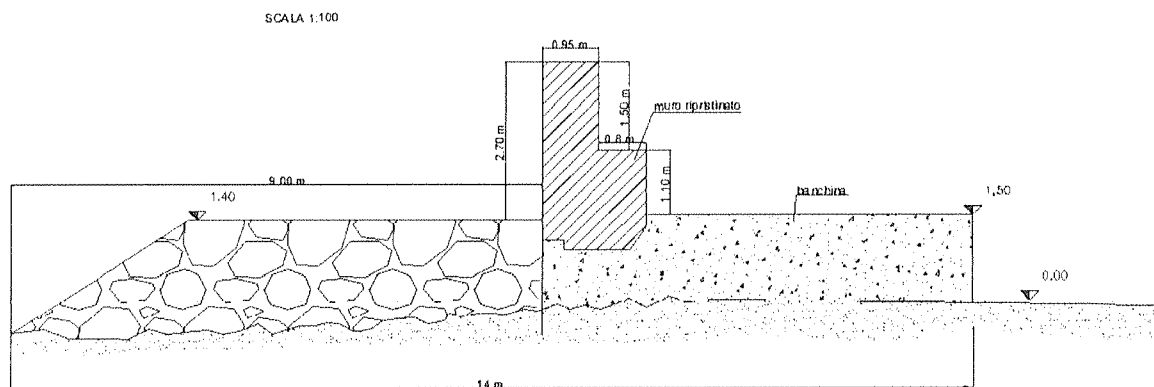


Figura 7 - Sezione del muro ricostruito (rilievo speditivo eseguito dal Comune nel maggio 2020)

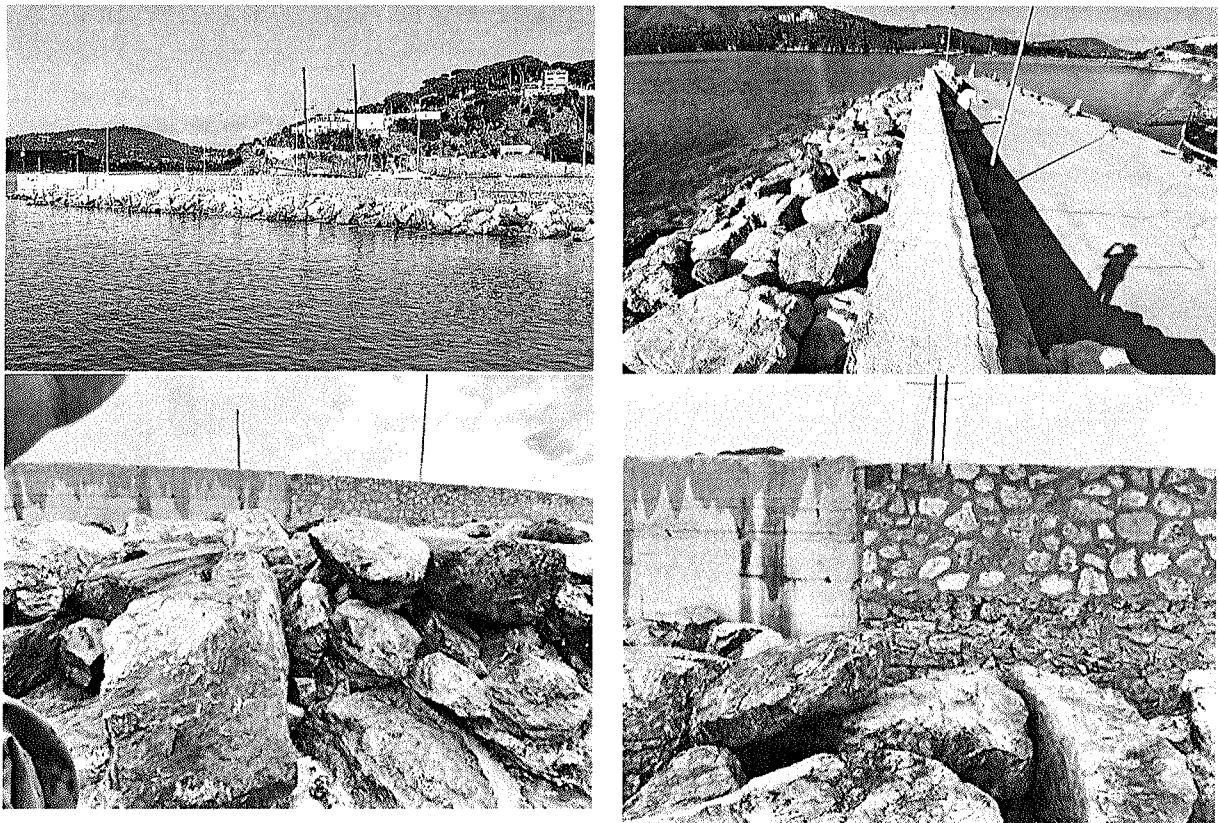


Figura 8 - Foto del muro a seguito del ripristino

## 2. VERIFICHE DI STABILITÀ

### 2.1 VERIFICHE DI STABILITÀ DEL MURO

Per la progettazione di opere marittime occorre definire le condizioni d'onda di progetto che dipendono dalla durata di vita presunta dell'opera, e tenuto conto delle sue caratteristiche funzionali. Si deve valutare, inoltre, il livello di rischio di superamento dell'onda di progetto, tenuto conto dei danni che tali onde possono arrecare all'opera. Nelle Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe marittime edite dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (1996) vengono raccomandati i valori riportati nella tabella seguente.

Tabella 1 - Durata minima di vita per opere di carattere definitivo TV

Tipo dell'opera	Livello di sicurezza richiesto		
	1	2	3
	Vita di progetto (anni)		
Infrastrutture di uso generale	25	50	100
Infrastrutture ad uso specifico	15	25	50

Per infrastrutture di uso generale si intendono opere di difesa di complessi civili o industriali, che non siano destinati ad uno specifico scopo e per i quali non è chiaramente identificabile il termine della vita funzionale dell'opera. Per infrastrutture ad uso specifico si intendono le opere di difesa comportanti un rischio minimo di perdita di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso della stessa (difese costiere, opere in porti minori o marina, scarichi a mare, ecc.).

Il livello di sicurezza 2 si riferisce ad opere e installazioni di interesse generale, comportanti un moderato rischio di perdita di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso dell'opera (opere di grandi porti, scarichi a mare di grandi città, ecc.).

Il livello di sicurezza 3 si riferisce ad opere o installazioni per la protezione dall'inondazione o di interesse sopranazionale, comportanti un elevato rischio di perdita di vite umane o di danno ambientale in caso di collasso della stessa

Nel caso in esame il molo di porto Azzurro può essere considerata una infrastruttura civile di uso generale con un livello di sicurezza pari a 2. Si è quindi assunto un tempo di vita dell'opera, pari a 50 anni.

Seguendo le indicazioni delle citate Raccomandazioni Tecniche, deve essere scelto il valore opportuno di Pf di singole installazioni industriali, di porti industriali, di depositi o piattaforme di carico e scarico ecc.



Il livello di sicurezza 1 si riferisce ad opere o installazioni di interesse locale ed ausiliario.

Tabella 2 - Massima probabilità di danneggiamento ammissibile nel periodo di vita operativa Pf

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

Per quanto riguarda la scelta dell'onda di progetto, si devono assumere le probabilità corrispondenti al danneggiamento incipiente in relazione alle modificazioni subite dall'opera ed alla difficoltà di riparare il danno subito. Per le opere di coronamento e scogliere (entrambe opere riparabili), si assume la probabilità corrispondente al danneggiamento incipiente ossia un danno che richiede un intervento di manutenzione.

Per rischio limitato per la vita umana si intendono i casi in cui a seguito del danneggiamento non è prevista alcuna perdita di vite umane.

Per ripercussione economica bassa, media ed alta si intendono casi in cui il rapporto fra i costi diretti del danneggiamento, sommati a quelli indiretti dovuti alla perdita di funzionalità delle opere danneggiate, ed il costo totale sopportato per la realizzazione dell'opera è minore di 5, è compreso fra 5 e 20 o è maggiore di 20.

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 progetto

$$Tr: Tr = T_v / [-\ln(1 - P_f)]$$

Nel caso in esame si può considerare un rischio limitato di perdita di vita umana ed una ripercussione economica medio-bassa. Considerando la condizione di danneggiamento incipiente per la scogliera si assume  $P_f = 0.40$  e quindi si ottiene

$$Tr = 50 / [-\ln(1 - 0.40)] = 98 \text{ anni}$$

Risulta quindi necessario verificare le opere per un'onda associata ad un Tempo di ritorno di 100 anni.

Dall'analisi degli eventi estremi eseguita nello studio meteomarinario è stata ricavata la relazione fra altezza d'onda al largo e periodo di ritorno sintetizzata nella Figura 9 seguente che insieme ai risultati del modello di propagazione a costa permettono di stimare le caratteristiche delle onde incidenti sulle strutture.

Il muro è quindi stato verificato nelle seguenti condizioni:

Altezza d'onda al largo associata al tempo di ritorno di 100 anni  $H_{s,0} = 4,5$  m  
 $T_p = 9.0$  s  $T_m = 8.1$  s

Altezza d'onda incidente sul molo (dal modello di propagazione tratto circa a metà lunghezza)  $H_{s,i} = 2,3$  m

Direzione inclinata di  $22^\circ$  rispetto all'ortogonale al molo.

Livello di riferimento + 0,90 m s.l.m.m.

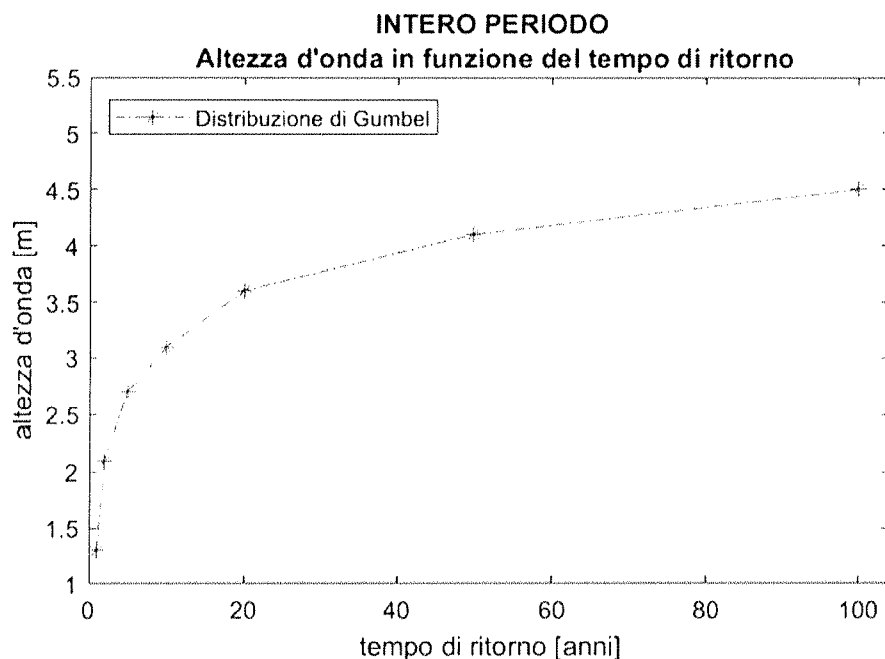


Figura 9 - Relazione altezza d'onda - tempo di ritorno

Per il calcolo della spinta orizzontale sulla parete del muro di protezione della banchina è stato fatto riferimento alla relazione di Pedersen (CEM 2012 - parte VI cap.5).

Spinta orizzontale sul muro fondato a +1,5 m e alto 2,70 m, quota di sommità +4,2 m s.l.m. (3,30 m sul livello di riferimento) e berma in sommità della scogliera  $B = 6,0$  m. (dimensioni geometriche riportate in Figura 7)

$$L_{om} = g/2\pi \cdot T_m^2 = 102 \text{ m}$$

$$\xi_m = 0,5 / (2,3/102) = 0,5 = 3,3$$

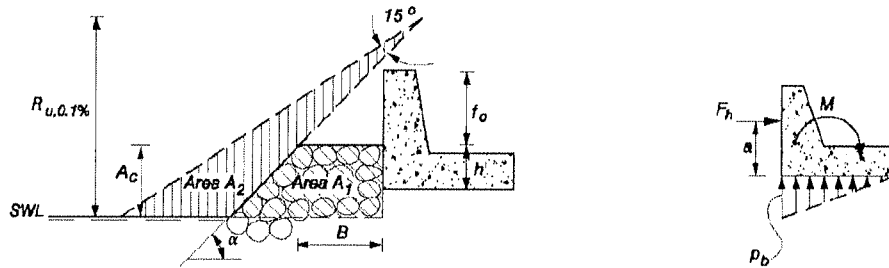
$$R_{U0.01\%} = 5,9 \text{ m}$$

$$P_m = \gamma (R_{U0.01\%} - A_c) = 5,0 \text{ m}$$

$$\gamma_{eff} = \gamma/2 = 1,48 \text{ m}$$

$$\text{Spinta orizzontale } F_h = 10,2 \text{ t/m}$$

$$\text{Momento ribaltante } M = 8,3 \text{ tm/m}$$



$$F_{h,0.1\%} = 0.21 \sqrt{\frac{L_{om}}{B}} \left( 1.6 p_m y_{eff} + A \frac{p_m}{2} h' \right) \quad (VI-5-187)$$

$$M_{0.1\%} = a \times F_{h,0.1\%} = 0.55(h' + y_{eff}) F_{h,0.1\%} \quad (VI-5-188)$$

$$p_{b,0.1\%} = 1.00 A p_m \quad (VI-5-189)$$

where  $F_{h,0.1\%}$  Horizontal wave force per running meter of the wall corresponding to 0.1% exceedence probability  
 $M_{0.1\%}$  Wave generated turning moment per running meter of the wall corresponding to 0.1% exceedence probability  
 $p_{b,0.1\%}$  Wave uplift pressure corresponding to 0.1% exceedence probability  
 $L_{om}$  Deepwater wavelength corresponding to mean wave period  
 $B$  Berm width of armor layer in front of the wall

$p_m$   $p_m = \rho_w g (R_{u,0.1\%} - A_c)$   
 $R_{u,0.1\%}$  Wave runup corresponding to 0.1% exceedence probability

$$R_{u,0.1\%} = \begin{cases} 1.12 H_s \zeta_m & \zeta_m \leq 1.5 \\ 1.34 H_s \zeta_m^{0.55} & \zeta_m > 1.5 \end{cases}$$

$$\zeta_m = \tan \alpha / \sqrt{H_s / L_{om}}$$

$\alpha$  Slope angle of armor layer  
 $A_c$  Vertical distance between MWL and the crest of the armor berm  
 $A$   $A = \min\{A_2/A_1, 1\}$ , where  $A_1$  and  $A_2$  are areas shown in the figure  
 $y_{eff}$   $y_{eff} = \min\{y/2, f_c\}$

$$y = \begin{cases} \frac{R_{u,0.1\%} - A_c}{\sin \alpha} \frac{\sin 15^\circ}{\cos(\alpha - 15^\circ)} & y > 0 \\ 0 & y \leq 0 \end{cases}$$

$h'$  Height of the wall protected by the armor layer  
 $f_c$  Height of the wall not protected by the armor layer

Figura 10 – Criterio di Pedersen per la stima delle spinte sul muro di coronamento (CEM VI, cap. 5)

Tutte le relazioni presenti nei manuali e in letteratura scientifica fanno riferimento ad onde dirette ortogonalmente al muro di coronamento in quanto rappresenta la condizione di massima sollecitazione; tuttavia nel caso di Porto Azzurro per l'orientamento del molo rispetto al golfo questa condizione può essere esclusa e le spinte risulteranno inferiori. Non esistono relazioni specifiche per stimare il valore della riduzione da apportare alle spinte mentre esistono relazioni sulla riduzione della portata di tracimazione, quindi si è operato in modo analogo anche per ridurre le spinte.

Considerando un angolo  $\beta$  di incidenza fra la direzione delle onde e l'ortogonale al muro di  $22^\circ$  il coefficiente di riduzione della portata di sormonto è espresso dalla relazione  $\gamma_b = (1 - 0,0063 \beta) = 0,86$

Per cautela si assume come coefficiente di riduzione delle spinte il valore  $\gamma_b = 0,9$

Le azioni delle onde sul muro possono infine essere così sintetizzate:

Spinta orizzontale  $F_h = 9,2 \text{ t/m}$

Momento ribaltante  $M_r = 7,5 \text{ tm/m}$

Mentre le azioni stabilizzanti sono dovute al solo peso del muro

Peso del muro ricostruito  $P = 10,0 \text{ t/m}$

Momento stabilizzante del peso proprio  $M_s = 5,8 \text{ tm/m}$

Appare evidente che, sulla base delle informazioni sulla modalità di ripristino dopo i danni subiti dalla mareggiata del 2018, il nuovo muro deve essere considerato come una costruzione non adeguatamente collegata strutturalmente alla banchina e quindi assumendo per cautela la nuova opera semplicemente appoggiata, risulta non stabile sotto l'azione di onde di mareggiata attesa con tempo di ritorno di 100 anni.

La stessa analisi è stata eseguita nell'ipotesi di una mareggiata associata ad un tempo di ritorno di 20 anni ossia una condizione molto rara ma non di assoluta eccezionalità. Per questa situazione è stato ipotizzato un sovrizzo del livello medio del mare di 0,6 m anziché il valore di 0,9 m assunto per la condizione di assoluta eccezionalità relativa al tempo di ritorno di 100 anni.

In queste condizioni le caratteristiche del moto ondoso risultano le seguenti:

Altezza d'onda al largo associata al tempo di ritorno di 20 anni  $H_{s,0} = 3,6 \text{ m}$   
 $T_p = 8,0 \text{ s}$   $T_m = 7,5 \text{ s}$

Altezza d'onda incidente sul molo (dal modello di propagazione tratto circa a metà lunghezza)  $H_{s,i} = 1,9 \text{ m}$

Direzione inclinata di  $20^\circ$  rispetto all'ortogonale al molo.

Livello di riferimento + 0,60 m s.l.m.m.

Spinta orizzontale sul muro fondato a +1,5 m e alto 2,70 m quota di sommità +4,2 m s.l.m. ( 3,60 m sul livello di riferimento).

I calcoli eseguiti con la stessa metodologia mostrano  $L_{om} = g/2\pi \cdot T_m^2 = 88 \text{ m}$

$$RU_{0.01\%} = 5,0 \text{ m}$$

$$\xi_m = 0,5 / (2,3/102)^{0,5} = 3,4$$

$$P_m = \gamma (RU_{0.01\%} - A_c) = 4,1 \text{ m}$$

$$\gamma_{eff} = \gamma/2 = 1,24 \text{ m}$$

$$\text{Spinta orizzontale } F_h = 6,5 \text{ t/m}$$

$$\text{Momento ribaltante } M = 4,4 \text{ tm/m}$$

Con la riduzione apportata per tener conto della direzione delle onde incidenti inclinata di  $20^\circ$  si ha:

$$\text{Spinta orizzontale } F_h = 5,8 \text{ t/m}$$

$$\text{Momento ribaltante } M = 4,0 \text{ tm/m}$$

Le forze stabilizzanti rimangono invariate rispetto al caso precedente

Se si ipotizza il muro semplicemente appoggiato sulla banchina per l'equilibrio alla traslazione deve essere verificato:

$$F_h < 0,6 P = 5,8 < 10 \times 0,6 \text{ dove } 0,6 \text{ rappresenta il coefficiente di attrito}$$

$$M_r < M_s \text{ con un adeguato margine di sicurezza}$$

$$\text{In questo caso si ha } M_s/M_r = 5,8/4,0 = 1,45$$

Si può concludere che il nuovo muro, pur con un'analisi molto semplificata, e con l'ipotesi cautelativa di semplice appoggio sulla banchina, risulta sostanzialmente stabile per mareggiate ordinarie fino a valori estremi associati a tempo di ritorno non superiori a 20 anni e che i lavori eseguiti, soprattutto con l'incremento di larghezza alla base, hanno significativamente migliorato la stabilità del muro.

Le condizioni della verifica precedente possono essere considerate anche rappresentative delle condizioni prevedibili nel periodo estivo (1 Aprile-30 Settembre) associate a tempi di ritorno superiori a 100 anni.

## 2.2 VERIFICHE DI STABILITÀ DELLA SCOGLIERA

La scogliera è stata progettata utilizzando le note formule di stabilità di Hudson e Van der Meer che hanno portato alla scelta di massi di 3° categoria per la costruzione della mantellata.

Analogamente a quanto fatto per la verifica del muro si assumono i valori di onda di progetti provenienti dalle analisi più recenti, riportate precedentemente.

Si assume per l'altezza d'onda al largo incidente associata al tempo di ritorno di 100 anni il valore  $H_{s,0} = 4,5 \text{ m}$  a cui corrisponde l'altezza d'onda incidente sulla scogliera di  $H_{s,i} = 2,3 \text{ m}$ .

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{\Delta K_D \cot g \alpha}$$

Da cui si ricava  $W$  (peso medio dei massi) pari a 5.0 t.

Ripetendo il calcolo per l'altezza d'onda attesa con tempo di ritorno di 20 anni con  $H_s = 1,9$  m si ottiene il peso  $W = 2,8$  t.

La scogliera è stata realizzata con massi di terza categoria (3-5 t) e pertanto risulta stabile per mareggiate associate a tempi di ritorno di 20 anni, anche nella situazione attuale dove in alcuni tratti la mantellata ha una pendenza leggermente superiore a quella di progetto, mentre è prevedibile un danneggiamento significativo in caso di mareggiata eccezionale associata al tempo di ritorno di 100 anni.

In sintesi, si può ritenere stabile la struttura della scogliera ma è opportuno migliorarne la funzionalità per proteggere adeguatamente il muro di coronamento utilizzando massi di peso superiore alle 5 t per migliorarne anche la stabilità.

## CONCLUSIONI

---

I documenti relativi ai progetti e ai collaudi eseguiti dal Provveditorato Interregionale alle Opere Pubbliche ed i rilievi specifici eseguiti a cura del Comune nel 2019, permettono di ricostruire la sequenza dei lavori condotti dal 2008 e di conoscere le condizioni generali di funzionalità e stabilità del molo di Porto Azzurro.

La struttura generale del molo è da considerarsi in buone condizioni per la sua robusta tipologia strutturale.

La scogliera ha una funzione protettiva necessaria per la base della nuova struttura a cassone e per il muro sulla parte più vecchia.

I cedimenti riferiti alla berma di sommità hanno un'importanza rilevante perché determinano un aumento della superficie del muro verticale esposto all'impatto diretto delle onde e quindi un incremento delle sollecitazioni su di esso.

Per il molo di Porto Azzurro in tutti i documenti di progetto è riportato per quota di sommità della berma a protezione del muro di coronamento il valore di 2,3 m s.l.m. con la fascia scoperta del muro di altezza di circa 2 m.

Nel tratto dove sono presenti le strutture più vecchie, precedenti alla costruzione del cassone, si sono verificati abbassamenti dell'ordine di 1 m e la superficie del muro esposta risulta molto aumentata e quindi le sollecitazioni sono più importanti e tali da non soddisfare le verifiche di resistenza del muro, previste dalle raccomandazioni tecniche che fanno riferimento a mareggiate con tempo di ritorno di 100 anni.

Le strutture sono comunque idonee a sopportare le sollecitazioni di mareggiate associate a tempi di ritorno di 20 anni.

Tuttavia, le analisi condotte sulle mareggiate prevedibili nel periodo estivo (1 Aprile -30 Settembre) indicano che le opere attuali, eseguite dopo la riparazione dei danni subiti dalla mareggiata del 2018, possono essere considerate stabili. Per il periodo estivo risultano garantiti anche i necessari livelli di sicurezza nei confronti della tracimazione, come evidenziato nel rapporto specifico.

Il ripristino delle sezioni di progetto potrebbe essere realizzato con la posa di 2-3 file di massi di IV categoria (peso 5-9 t) davanti al muro migliorando la stabilità della scogliera e riducendo sensibilmente le spinte sul muro.

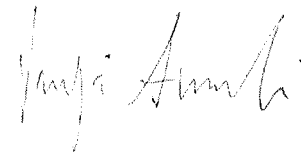
La parte terminale realizzata con un cassone in calcestruzzo armato è stata progettata secondo le normative recenti e non richiede, per la sua stabilità, la presenza di una scogliera, che comunque è stata in parte costruita. Essa deve essere considerata indispensabile per la protezione dall'erosione localizzata del materiale di imbasamento alla base del cassone.

Dal rilievo eseguito dopo la mareggiata del 2018, appare ancora ampiamente sufficiente a proteggere il piano di posa del cassone; tuttavia tenendo conto che la scogliera è posata su terreni non interessati dal processo di consolidamento per vibroflottazione, eseguito solo sotto il cassone, è necessario un periodico controllo

intorno alla sua base allo scopo di valutare la necessità di un eventuale rifiorimento con  
massi di terza categoria intorno alla testata del molo.

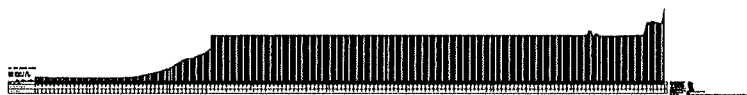
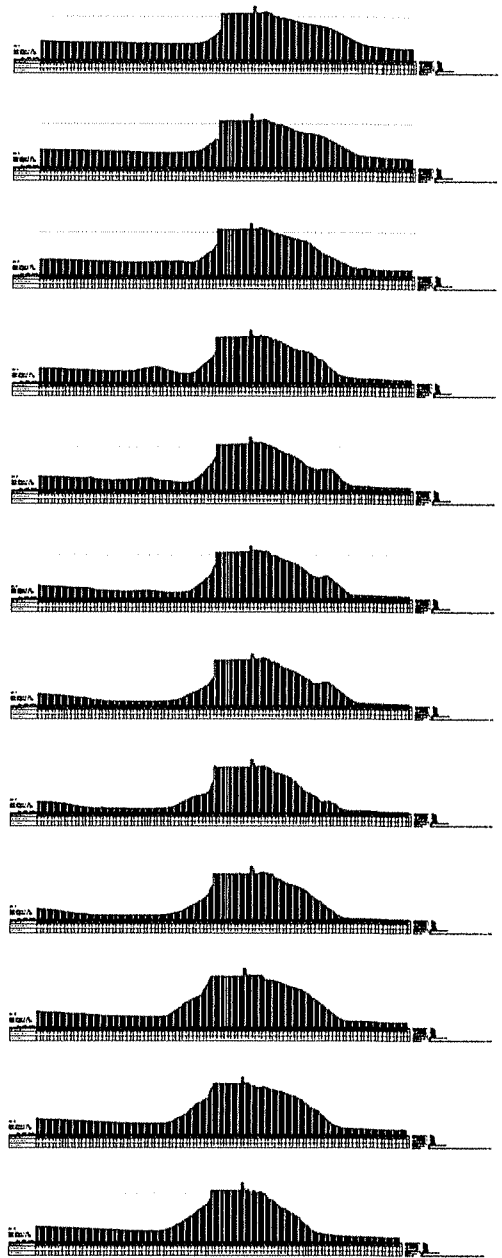
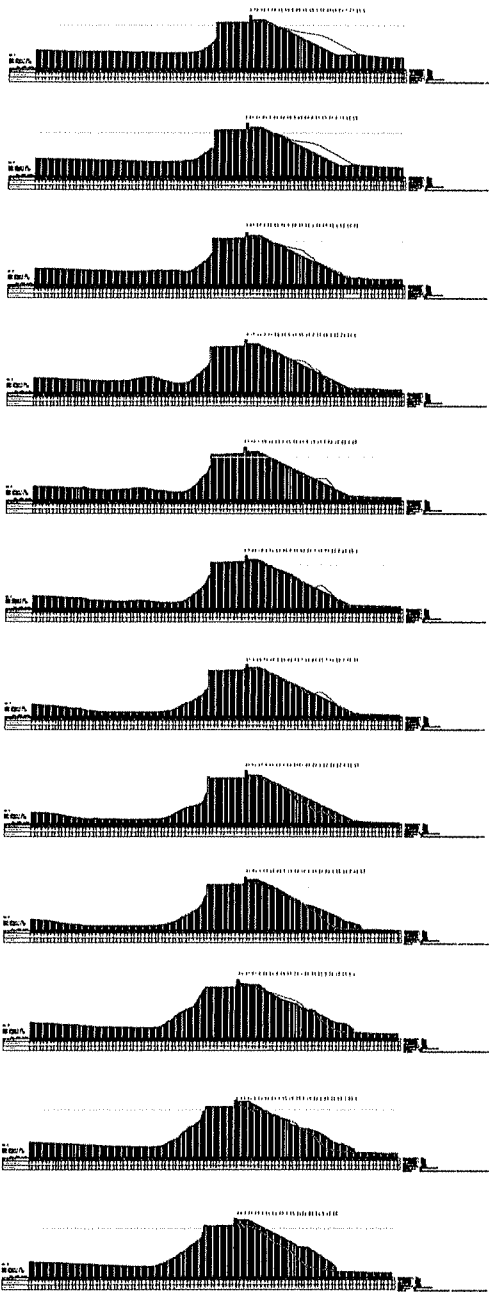
Firenze, luglio 2020

Prof. Ing. Pier Luigi Aminti









**OKOS**  
*engineering srl*  
 Via Ambro 38/C - 68100 - Grosseto P.A. 0143770038  
 Tel. 0664077098 - Fax. 0664071878 - Cell. 348884213

PLANIMETRIA SEZIONI



OPERATORE TECNICO SUBACQUEO

Francesco Crisci

Via Carducci 46, 57037 Portoferraio (LI) PI 0173060493 C.A. 08111131567021 N. REA LI-55329  
 tel. 3472643305 fax. 0111@okos.com

