Firmato digitalmente da:
Capannelli Gerardo
Firmato il 2025/05/14 17:29
Seriale Certificato: 3207156
Valido dal 18/01/2024 al 18/01/2027
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

COMMITTENTE:

RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

RETE FERROVIARIA ITALIANA S.p.A.
DIREZIONE STAZIONI-INGEGNERIA E INVESTIMENTI STAZIONI

PROGETTAZIONE:

FERRETTI PROGETTAZIONI SRL Piazza della Vittoria 12/22 - 16121 - Genova -
Tel. 010.9910827 Capitale sociale € 60.000,00 i.v. - cod. fisc. e partita i.v.a. 02466240997
-REA GE - 488370 ferretti.progettazioni@pec.it - email: info@ferrettiprogettazioni.it
NO/ APPALTATORE

SOGGETTO TECNICO:
RFI - DIREZIONE OPERATIVA INFRASTRUTTURE TERRITORIALE DI GENOVA
S.O. INGEGNERIA

# PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO - ECONOMICA

LINEA: GENOVA - LA SPEZIA

"Interventi di ripristino delle pile 2 e 3 e consolidamento della scarpata alla base della pila 4 del Viadotto Mulinetti al km 18+556 della linea Genova - La Spezia" -
Lotto 2: Consolidamento della scarpata alla base della Pila 4 con ripristino delle relative opere di protezione dall'erosione marina

**RELAZIONE IDRAULICA**

SCALA :

Foglio | | di |

| PROGETTO/ANNO | SOTTOPR. | LIVELLO | NOME DOC. | PROGR.OP. | FASE FUNZ. | NUMERAZ. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | |

| Revis. | Descrizione | Progettista | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato | Data |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | Prima Emissione | Ing. B. Bellio | Gennaio 2025 | Ing. C. Macrì | Gennaio 2025 | Ing.G.Capannelli | Gennaio 2025 | | |
| B | Seconda Emissione | Ing. B. Bellio | Maggio 2025 | Ing. C. Macrì | Maggio 2025 | Ing.G.Capannelli | Maggio 2025 | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI GENOVA
Dott. Ing.
GERARDO
CAPANNELLI
N°8573A

File: P067-24-P-RE-IDR-003-B

# INDICE

**1 PREMESSA ..... 4**
**2 DESCRIZIONE DELL'AREA IN ESAME ..... 5**
**3 INTERVENTI A PROGETTO ..... 9**
**4 DIMENSIONAMENTO DEL MASSO DI PROGETTO ..... 11**

# 1 PREMESSA

La presente relazione idraulica fa parte dei documenti relativi al progetto di fattibilità tecnico - economica degli interventi di difesa del Viadotto Mulinetti dall'azione del mare e si inserisce in un più ampio progetto che prevede anche il ripristino delle pile 2 e 3 ed il consolidamento della scarpata alla base della pila 4 del viadotto al Km 18 + 556 della linea Genova – La Spezia.

I lavori a progetto sono quindi suddivisi in due lotti distinti e consecutivi: il primo prevede la realizzazione delle opere a mare mentre il secondo prevede interventi strutturali sul manufatto ferroviario.

La scelta dare precedenza alle opere a mare è dettata dalla necessità di non lasciare le infrastrutture retrostanti la baia prive di difesa.

Il presente documento costituisce la revisione B del progetto, aggiornata a seguito delle richieste di integrazioni documentali inoltrate in data 18/02/2025 e 17/04/2025 dal Settore Valutazione Impatto Ambientale e Sviluppo Sostenibile della Regione Liguria.

Nella presente relazione viene descritto lo stato dei luoghi, gli interventi a progetto ed il dimensionamento del singolo masso costituente le opere di difesa della costa.

## 2 DESCRIZIONE DELL'AREA IN ESAME

L'area interessata dalle opere a progetto è ubicata a Mulinetti, una frazione del Comune di Recco. Rispetto al capoluogo ligure, la frazione di trova a levante, al confine con la limitrofa Sori.



*Figura 1 - Vista aerea dell'area in esame*

La spiaggia di Mulinetti è situata alla foce del rio Sonego, un rivo in parte tombinato che attraversa il territorio in un alveo particolarmente inciso.

L'arenile si trova in un'insenatura naturale caratterizzata dalla presenza di rocce a picco sia ad est che ad ovest e da un lembo di spiaggia costituita da ghiaia di lunghezza pari a circa 25 m e profondità pari a circa 20 m.

La parte sommersa è caratterizzata da un fondale roccioso sub – pianeggiante, in alcuni tratti ricoperto da sedimenti molto grossolani, che si estende dalla battigia fino a ad una distanza di oltre 100 m con profondità inferiori al metro nel primo tratto, e di circa 2 – 3 m nel settore più esterno. Tali rocce condizionano naturalmente le correnti marine, determinando un progressivo ritirarsi della spiaggia.

Come mostrato nella vista aerea soprastante, le rocce affioranti sono posizionate in direzione perpendicolare alla spiaggia e non sono in alcun modo funzionali alla protezione dell'arenile dall'azione delle onde in caso di vento soprattutto di libeccio.

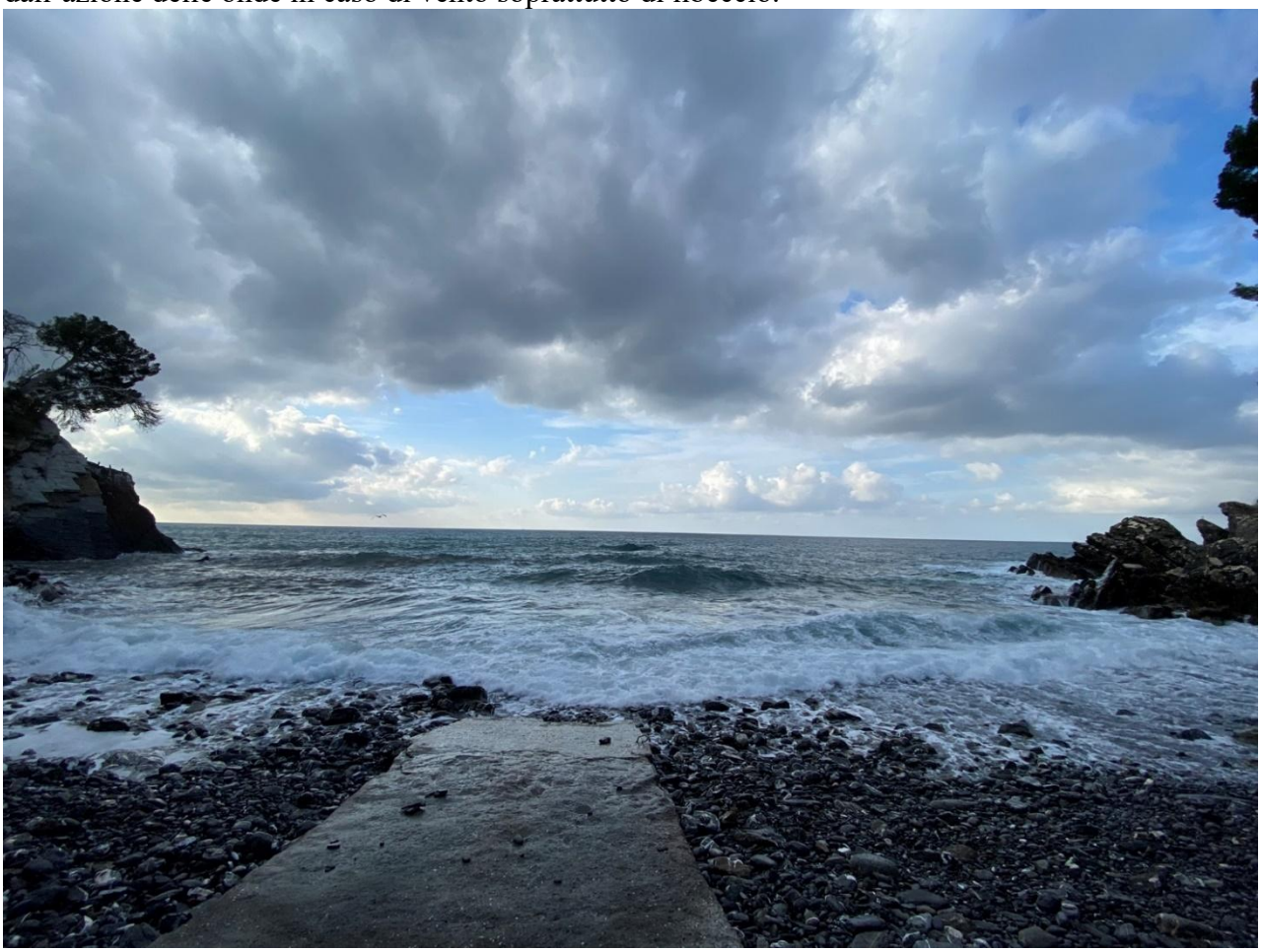


*Figura 2 - Immagine dello specchio d'acqua antistante il viadotto ferroviario*

La parte superiore della spiaggia è attraversata longitudinalmente dal viadotto ferroviario e, proseguendo verso monte, è presente anche il ponte della Strada Statale 1; l'area compresa tra i due manufatti è occupata da un cantiere navale.

Il manufatto ferroviario in esame è costituito da cinque campate della tipologia ad arco in muratura a tutto sesto, aventi luce netta pari a 12 m e freccia 6 m.

Le volte sono realizzate in muratura di mattoni; in seguito agli ultimi interventi di manutenzione l'intradosso si presenta rivestito in calcestruzzo proiettato.

La quota di imposta degli archi è a circa 15 m rispetto al livello del mare. I muri di timpano sono realizzati in muratura di blocchi di pietra.

Le pile hanno sezione variabile con l'altezza, rastremate fino a una sezione alla quota di imposta degli archi di circa 2,60x8,60 m.

Le pile centrali sono poste all'interno dell'area costiera e fondate direttamente sulla spiaggia con fondazione a sezione rettangolare pari a circa 3,60 x 9,00 m e risultano pertanto esposte all'azione erosiva del mare.

Nell'archivio della DOIT di Genova è stato possibile reperire un elaborato riguardante un intervento di manutenzione straordinaria alla Pila 4, che è stata oggetto di consolidamento della fondazione mediante cerchiaggio alla base con micropali.

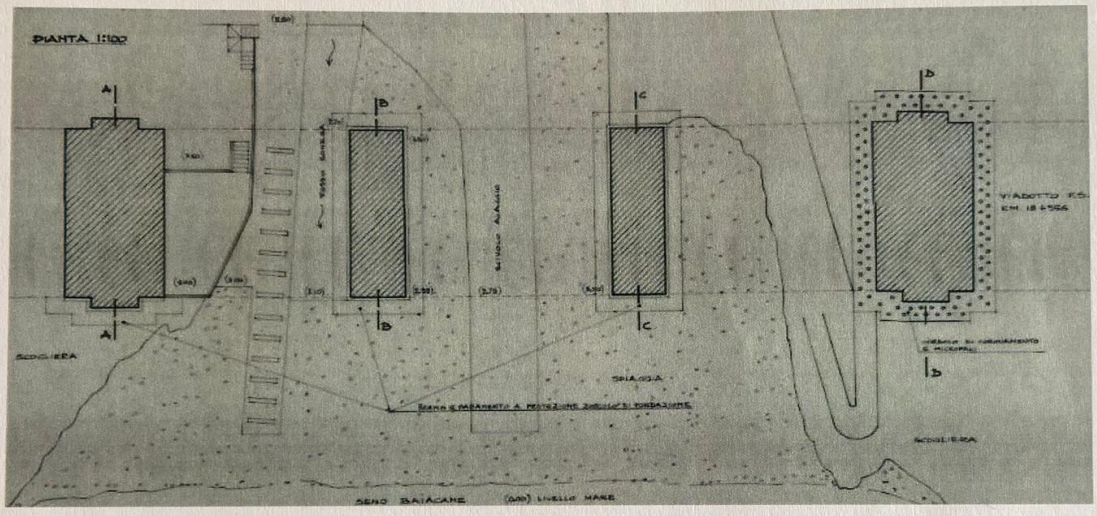



Figura 2.8 – Estratto elaborato storico intervento manutenzione: Pianta fondazioni

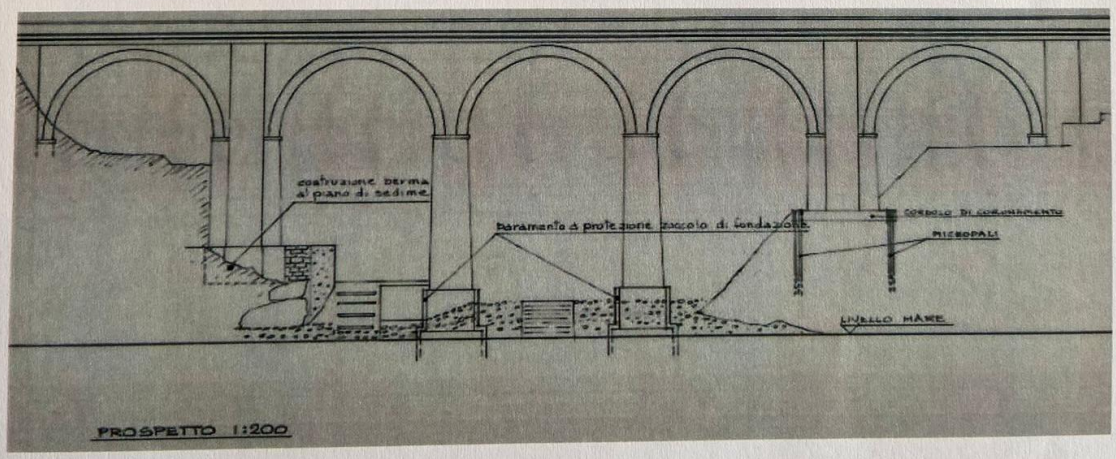



Figura 2.9 – Estratto elaborato storico intervento manutenzione: Sezione longit.

*Figura 3 - Tavole storiche reperite nell'archivio DOIT Genova*

Nel 2004, a seguito di una campagna di monitoraggio dello stato fessurativo rilevato sull'opera, sono stati eseguiti ulteriori interventi di manutenzione straordinaria sul viadotto.

Tra gli interventi principali si annoverano il cerchiaggio delle pile mediante fibre di carbonio di altezza pari a circa 20 cm (800 gr/mq) disposte in corrispondenza dei corsi orizzontali di pietra, al

fine di contrastare l'ulteriore apertura delle lesioni verticali lungo le pile ed il consolidamento delle fondazioni delle pile centrali mediante cerchiaggio con micropali.



*Figura 4 - Spiaggia di Mulinetti vista dal mare*

Si evidenzia tuttavia come, attualmente, gli interventi eseguiti nel 2004 necessitino già di manutenzione a causa principalmente delle numerose mareggiate avvenute negli ultimi anni. Da queste considerazioni risulta ancora più evidente la necessità di eseguire opere a mare per ridurre la possibilità che le onde impattino sul manufatto.

Tale scelta è legata anche alla natura e tipologia del viadotto con particolare riferimento all'importanza dello stesso sia da un punto trasportistico (unica linea di collegamento costiero) che architettonico-monumentale (l'opera ha più di 70 anni e è quindi soggetto a vincolo).

L'immagine soprastante mostra la spiaggia di Mulinetti nel suo complesso, caratterizzata dalla presenza di un versante in roccia a ponente, da una scarpata in terreno e roccia a levante e dal viadotto ferroviario che l'attraversa longitudinalmente.

Entrambe le pile fondate su spiaggia non sono in alcun modo protette dall'azione erosiva del mare.

Il rio Sonego sfocia sotto la campata di ponente, tra la pila del viadotto e lo scalo; nel tratto di monte il rivo risulta essere tombinato in uno scatolare in calcestruzzo.

# 3 INTERVENTI A PROGETTO

La necessità di realizzare gli interventi a progetto è emersa durante la periodica attività di vigilanza alle opere d'arte svolta dal personale tecnico RFI che ha evidenziato l'esigenza di eseguire opere di protezione alle fondazioni del Viadotto Mulinetti dall'azione erosiva del mare.

Come riportato in precedenza, il presente progetto è diviso in due lotti, il primo riguarda le opere di manutenzione alla struttura, il secondo riguarda le opere a mare a protezione del viadotto.

La presente relazione riguarda esclusivamente il secondo lotto.

La messa in sicurezza dell'attraversamento ferroviario dall'azione erosiva del mare avverrà mediante l'esecuzione di un ripascimento della spiaggia, di un livellamento del fondale e dalla realizzazione di un pennello.

Il ripascimento dell'arenile ha la finalità di produrre un avanzamento della linea di riva di almeno 30 m e di dissipare l'energia delle onde prima dell'impatto con le pile del viadotto.

Quest'ultimo avverrà in due fasi distinte, la prima prevede di posare della sabbia e ghiaia di granulometria pari a circa 30 mm direttamente in corrispondenza del viadotto, la seconda prevede di realizzare un riempimento in corrispondenza della linea di frangimento delle onde, in modo da avanzare la linea di riva verso mare.

In questo modo si anticiperà il frangimento delle onde verso il largo.

I quantitativi richiesti risultano pari a 125 – 130 $m^3$ per metro lineare.

Durante i sopralluoghi e dal rilievo batimetrico è emerso come il fondale, in gran parte roccioso, presenti un'area a quota inferiore di circa 1 m rispetto alla zona circostante.

Tale area ha una superficie complessiva pari a circa 630 $m^2$ ed è situata a circa 85 m di distanza dalla linea di costa.

Si prevede quindi di livellare il fondale con dei massi di diametro pari a circa 1.50 m (IV categoria).

Quest'ultimo intervento ha la finalità di anticipare ulteriormente il frangimento delle onde, di dissipare l'energia del moto ondoso, di limitare il flusso di ritorno e di limitare la dispersione trasversale di materiale.

Dalle simulazioni modellistiche del moto ondoso, è emerso come il tratto di costa in esame sia fortemente esposto alle mareggiate di libeccio che generano una corrente long-shore da ponente a levante e rip current con conseguente trasporto di materiale solido verso il largo.

Quest'ultimo fenomeno risulta amplificato dalla presenza di canaloni rocciosi sotto costa.

È stata quindi valutata l'ipotesi di inserimento di un pennello in massi ciclopici a levante della spiaggia con l'obiettivo di interrompere la corrente da levante a ponente ed attenuare i mari di scirocco provenienti da Sud Est.

Sono state valutate varie ipotesi per identificare la soluzione che meglio soddisfa le caratteristiche tecniche non solo sotto il profilo funzionale ma anche ambientale, di impatto visivo e di costo complessivo (esecuzione e manutenzione).

Per quanto riguarda la geometria e l'ubicazione del pennello di protezione sono state confrontate cinque soluzioni progettuali che vengono descritte nella relazione allegata al presente progetto.

Tra queste soluzioni quella che meglio soddisfa le caratteristiche richieste risulta essere la quinta ipotesi che comporta la realizzazione di un pennello in massi ciclopici di lunghezza complessiva pari a circa 60 m e un'altezza fuori acqua variabile da + 2.00 m s.l.m. a + 1.25 m s.l.m.

La larghezza in testa sarà costante e pari a 7 m e la pendenza della mantellata sarà pari a 2:1.

# 4 DIMENSIONAMENTO DEL MASSO DI PROGETTO

Il dimensionamento dei massi costituenti le opere a mare è stato eseguito alla luce delle simulazioni effettuate dallo studio Geoscape e riportate nelle relazioni specialistiche allegate al presente progetto.
Di seguito si riportano le immagini risultanti dalle simulazioni idrauliche nella configurazione peggiore, ossia con vento proveniente da libeccio.
Il tempo di ritorno considerato è pari a 50 anni.

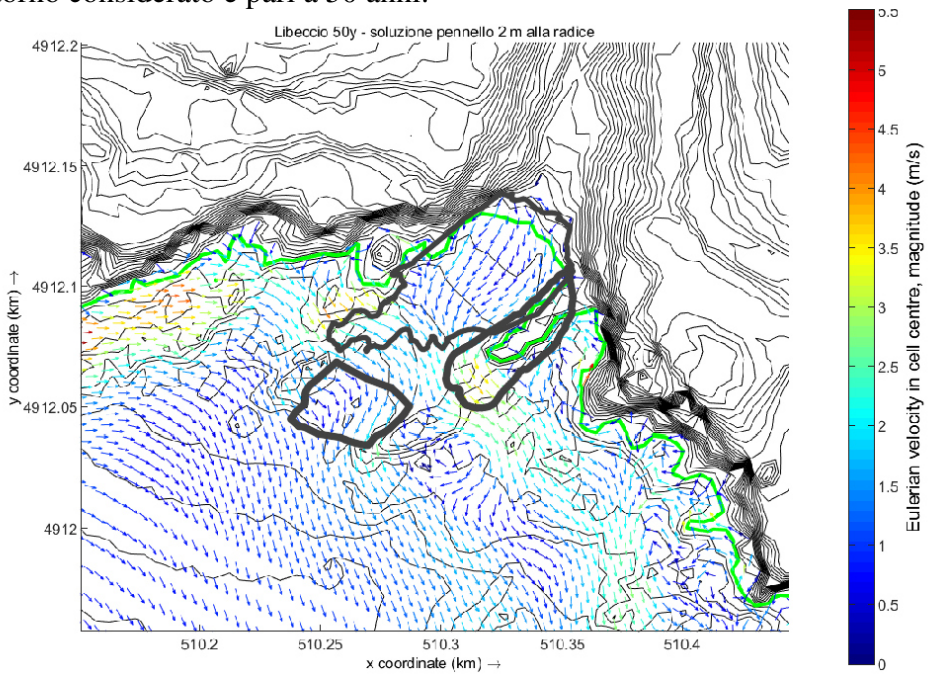



*Figura 5 - Risultato della simulazione con vento di libeccio e tempo di ritorno pari a 50 anni - Altezza d'onda*

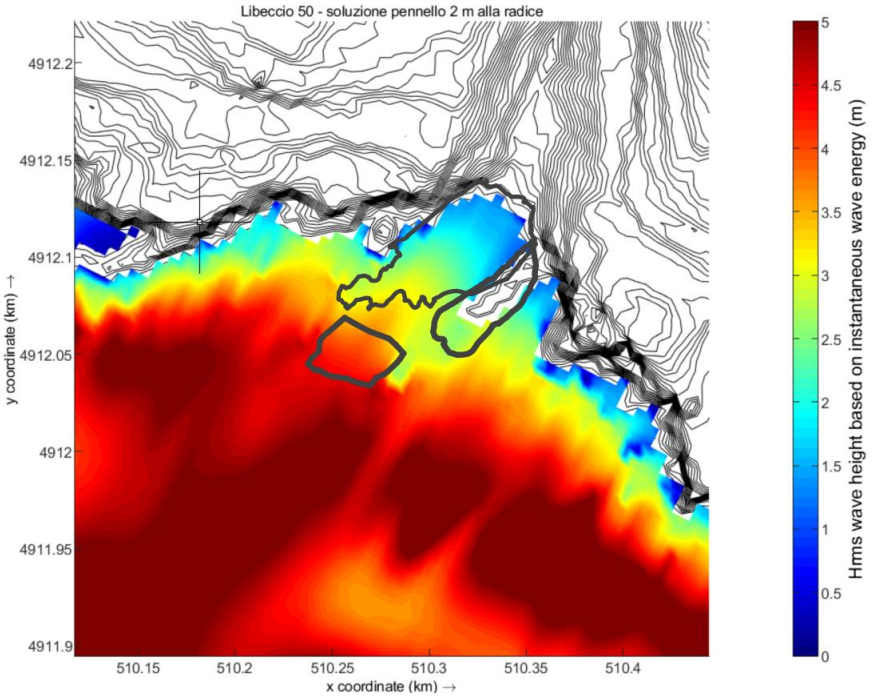



*Figura 6 - Risultato della simulazione con vento di libeccio e tempo di ritorno pari a 50 anni - Lunghezza d'onda*

Come onda di progetto per la verifica della stabilità dei manufatti è stata considerata quella che interessa il lato a mare del livellamento del fondale in caso di vento di libeccio con tempo di ritorno pari a 50 anni.

L'onda è caratterizzata da un'altezza pari a 4 m ed una lunghezza pari a circa 80 m, come rappresentato nelle immagini precedenti (Figura 5 e Figura 6).

La verifica di stabilità, con l'onda di calcolo di cui sopra, è stata effettuata con le più usuali formule presenti in letteratura ossia la formula proposta da Hudson e la formula proposta da Van Der Meer.

## 4.1 Formula di Hudson

La relazione semiempirica di Hudson è espressa dalla seguente formula:

$$W = \frac{\gamma H^3}{K_D \left(\frac{\gamma}{\gamma_w} - 1\right)^3 cotg\theta}$$

Dove:

- H = onda di progetto in m;
- $\gamma$ = peso del volume del masso;
- $\gamma_W$ = peso specifico dell'acqua di mare;
- $\theta$ = angolo della scarpata con l'orizzontale in gradi sessagesimali (cotg $\theta$ = scarpa della mantellata);
- $K_D$ = coefficiente idrodinamico di stabilità, funzione della forma del masso, delle modalità di posa, della scabrezza della superficie dei massi, del tipo di onde, della posizione sulla struttura (testata o tronco), dell'angolo di incidenza delle onde, del peso specifico dei massi, del grado di ammorsamento degli stessi e della dimensione e porosità del materiale sottostante.
  Il coefficiente è tabellato nello Shore Protection Manual, di seguito uno stralcio:

| Tipo di elemento | | Percentuale di danneggiamento (D) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0÷5 | 5÷10 | 10÷15 | 15÷20 | 20÷30 | 30÷40 | 40÷50 |
| Massi naturali (a spigoli arrotondati) | $H/H_{D=0}$ | 1.00 | 1.08 | 1.14 | 1.2 | 1.29 | 1.41 | 1.54 |
| | $K_D$ | 2.4 | 3.0 | 3.6 | 4.1 | 5.1 | 6.7 | 8.7 |
| Massi naturali (a spigoli vivi) | $H/H_{D=0}$ | 1.00 | 1.08 | 1.19 | 1.27 | 1.37 | 1.47 | 1.57 |
| | $K_D$ | **4.0** | 4.9 | 6.6 | 8.0 | 10.0 | 12.4 | 15.0 |
| Tetrapodi e quadripodi | $H/H_{D=0}$ | 1.00 | 1.09 | 1.17 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.50 |
| | $K_D$ | 8.3 | 10.8 | 13.4 | 15.9 | 19.2 | 23.4 | 27.8 |
| Tribar | $H/H_{D=0}$ | 1.00 | 1.11 | 1.25 | 1.36 | 1.5 | 1.59 | 1.64 |
| | $K_D$ | 10.4 | 14.2 | 19.4 | 26.2 | 35.2 | 41.8 | 45.9 |

*Figura 7 - Stralcio Shore Protection Manual*

Considerando un danneggiamento nullo, corrispondente ad una situazione di perdita molto limitata e facilmente riparabile degli elementi, ed un pennello realizzato in massi naturali si ottiene $K_D$ = 2.4.

La pendenza della mantellata è stata assunta pari a 1:2 e il freeboard pari a +1.25 m s.l.m.

Di seguito la tabella di calcolo con il peso ed il diametro del masso equivalente di progetto.

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Dati** | | | |
| $\rho_0$ | 1023 | kg/mc | Densità acqua di mare |
| $\rho$ | 2700 | kg/mc | Densità scogli |
| $\Delta$ | 1,639 | | |
| cotg ($\alpha$) | 2 | | Pendenza mantellata |
| tg ($\alpha$) | 0,5 | | |
| $K_D$ | 2,40 | | Coefficiente di stabilità |
| $H_d$ | 4,00 | m | Onda di progetto |
| $L_d$ | 80,00 | m | Lunghezza d'onda di progetto |
| | | | |
| **FORMULA DI HUDSON** | | | |
| W | 8,17 | t | Peso unitario masso di progetto |
| Dn | 1,45 | m | Diametro masso equivalente di progetto |

*Tabella I - Dimensionamento del masso con la formula di Hudson*

## 4.2 Formula di Van der Meer

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

Per onda frangente tipo plunging ($\xi_m \leq 2.5$):

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6{,}2\ P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0,2} \xi_m{}^{-0.5}$$

Per onda frangente tipo surging ($\xi_m \geq 3.5$):

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1{,}0\ P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0,2} \sqrt{cotg\ \alpha}\ \xi_m{}^{P}$$

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

$$\frac{H_S}{\Delta D_{n50}} = min\ (6{,}2\ P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0,2} \xi_m{}^{-0.5}; 1{,}0\ P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0,2} \sqrt{cotg\ \alpha}\ \xi_m{}^{P}$$

In cui:

- $H_s$ = altezza d'onda significativa al piede della scogliera;
- $\xi_m$ = numero di Irribarren per il periodo medio;
- $T_m$ = periodo d'onda medio in s;
- $\alpha$ = pendenza della mantellata;
- $\Delta$ = massa relativa del masso;
- $D_{n50}$ = diametro nominale del masso
- $P$ = coefficiente di permeabilità della struttura;
- $S$ = livello di danneggiamento ammesso;
- N = numero di onde;
- $\xi_{mc}$ = numero di Irribarren critico – calcolato come $\xi_{mc} = [6.2\ P^{0.31} \sqrt{tan\ \alpha}\ ]^{1/(P+0.5)}$

Nella seguente tabella sono riportati i valori del parametro S in funzione della pendenza:

| 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 II - Livelli di danno per mantellate in doppio strato in funzione della pendenza*

La verifica è stata condotta sia per indice di danneggiamento S=2 corrispondente a danno iniziale, sia per indice di danneggiamento S=4 corrispondente a un danno moderato e accettabile in relazione all'elevato tempo di ritorno.

Per le scogliere a cresta bassa può essere utilizzato un fattore riduttivo $f_i$ da applicare al primo membro della formula per tenere conto della minore sollecitazione subita dai massi.

Di seguito la tabella di calcolo con il peso ed il diametro del masso equivalente di progetto.

| **Dati** | | | |
|---|---|---|---|
| $\rho_0$ | 1023 | kg/mc | Densità acqua di mare |
| $\rho$ | 2700 | kg/mc | Densità scogli |
| $\Delta$ | 1,64 | | |
| p* | 0,4 | | permeabilità |
| cotg ($\alpha$) | 2 | | Pendenza mantellata |
| tg ($\alpha$) | 0,5 | | |
| $H_d$ | 4,00 | m | H onda di progetto |
| $T_M$ | 7,16 | s | Periodo medio |
| $L_d$ | 80,00 | | Lunghezza d'onda di progetto |
| $\xi_M$ | 2,237 | | Parametro di Irribarren |
| $\xi_{Mc}$ | 3,768 | | Parametro di Irribarren critico |
| S | 2 | | Livello di danneggiamento |
| N | 5000 | | Numero di onde presenti in mareggiata |
| | | | |
| **FORMULA DI VAN DER MEER** | | | |
| W | 7,67 | t | Peso unitario masso di progetto |
| Dn | 1,42 | m | Diametro masso equivalente di progetto |

*Tabella III – Dimensionamento della mantellata in testata – Formula di Van der Meer con S = 2*

Alla luce di quanto sopra si assume di utilizzare massi naturali di IV categoria con diametro pari a 1,5 m (peso oltre 8 t).

Si raccomanda l'utilizzo dei massi di pezzatura maggiore sul paramento esterno dei manufatti.