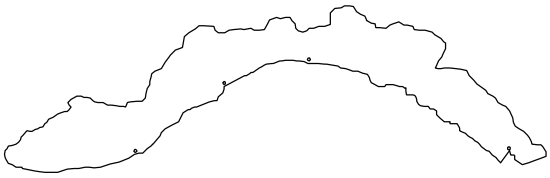
ANAS S.p.A.
Compartimento della Viabilita' per la Liguria



Sede Compartimentale - Via Savona 3 - 16129 Genova - Tel. 010/54771 - Fax. 010/5477238

Comune di Lavagna (GE)
S.S. n. 1 "Via Aurelia"

Lavori di ripristino del rivestimento della Galleria S. Anna
dal km 475+135 al km 475+760 comprese difese spondali
di protezione delle esistenti fondazioni soggette all'erosione marina

PROGETTO DEFINITIVO

R04
(rev. 0)

Scala: -

RELAZIONE IDRAULICO-MARITTIMA

PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

STUDIOELB Ingegneri Associati
Dott. Ing. Ernesto LA BARBERA - Dott. Ing. Riccardo GIAMMARINI
Dott. Ing. Andrea DEPRATI - Dott. Ing. Simona CARREGA
Dott. Ing. Michela LA BARBERA - Dott. Ing. Mauro SCAGLIONE
Corso Torino 17/6 sc.A - 16129 Genova
Tel. 010.5740568 - fax : 010.4211059
e-mail: inge@studioelb.it

CODICE PROGETTO:

NOME FILE: 962PD R04

Genova, marzo 2017

ANAS S.p.A.

PROGETTISTA RESPONSABILE
DELL'INTEGRAZIONE FRA LE VARIE
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE AI SENSI
DELL'ART. 15 COMMA 12 DEL DPR
207/2010

(Dr.Ing. Sergio Barosso)

(Geom. Andrea Angelini)

Visto: Il Responsabile del Procedimento
(Dr. Ing. Federico Murrone)

SOMMARIO

1. PREMESSA 2

2. DESCRIZIONE DELLE CRITICITÀ 3

3. INDIVIDUAZIONE DELLA SEZIONE DI INDAGINE 9

4. ESPOSIZIONE DEL PARAGGIO E DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSO AL LARGO E A COSTA 11

4.1 CLIMA DEL MOTO ONDOSO AL LARGO 11

4.2 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO DA LARGO VERSO RIVA 13

4.3 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO A SCALA DI DETTAGLIO 16

4.4 VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO 17

4.5 INDIVIDUAZIONE DELL'ONDA DI PROGETTO 18

5. DETERMINAZIONE DELLA CONFORMAZIONE DELLA SCARPATA E DEL DIMENSIONAMENTO DEGLI SCOGLI 20

5.1 FORMULA DI VAN DER MEER 20

6. SCELTA DELLA CONFIGURAZIONE DI PROGETTO 25

7. RUN-UP E TRACIMAZIONE DELL'ONDA 26

8. CONCLUSIONI 32

1. PREMESSA

L'ANAS S.p.A. - Area Compartimentale Liguria ha intenzione di eseguire opere di manutenzione e risanamento del tratto della SS 1 Aurelia compreso tra il km 475+135 e 475+760, in corrispondenza della Galleria S. Anna, che collega Lavagna a Sestri Levante.

In particolare, sono previsti interventi di ripristino del rivestimento della galleria e opere di ripristino delle difese a mare, dovute all'esigenza di consolidare le opere a mare esistenti e di mitigare i rischi per la circolazione dovuti alla tracimazione delle onde sulla sede stradale in occasione delle mareggiate più intense.

A tal fine i sottoscritti sono stati incaricati di eseguire servizi tecnici a supporto della progettazione, relativi alle caratteristiche delle opere di difesa a mare e al loro dimensionamento.

Nel presente elaborato sono riportati i calcoli per la verifica della configurazione progettuale sia nei confronti della riduzione della tracimazione sulla Via Aurelia, sia nei confronti della stabilità delle opere a progetto.

2. DESCRIZIONE DELLE CRITICITÀ

Le criticità maggiori sono quelle legate alla vulnerabilità della sede stradale e delle strutture della prima galleria lato ponente, nella zona più esposta alla traversia di libeccio, nei confronti delle ondazioni. In particolare, durante le mareggiate più forti si verifica la risalita delle onde lungo la scarpata rocciosa con raggiungimento della sede stradale da parte di spruzzi e masse d'acqua aventi portate anche notevoli e tali da obbligare l'Ente Gestore alla chiusura precauzionale della strada.



Foto 1: Ondazioni sulla Via Aurelia durante la mareggiata eccezionale del 08.11.2011



Foto 2: Ondazioni sulla Via Aurelia durante la mareggiata eccezionale del 08.11.2011

Con riferimento all'immagine aerea seguente ed agli elaborati grafici progettuali, tali fenomeni si manifestano principalmente in alcune zone puntuali, nelle quali le scogliere esistenti di protezione presentano evidenti carenze o la conformazione della scarpata in scogliera sottostante la strada favorisce la concentrazione dell'energia ondosa e la conseguente risalita dell'onda, come segue:



Foto 3: Foto aerea con indicazione delle zone più critiche

A) Tratto di scogliera tra sezz. 28 e 30: questo tratto è caratterizzato dalla presenza di una scogliera con berma lunga circa 11 m a quota +2 m s.l.m. avente una scarpata di pendenza 1:2,5 fondata su fondale naturale a -6 m circa. La scarpata a tergo della scogliera è costituita dalla scogliera naturale calcarea e manufatti in muratura aventi pendenza media pari a circa 2:1 circa culminante con il bordo stradale alla quota di circa +9 m (cfr. sez. 29)



Foto 4: Zona tra sez. 28 e 30

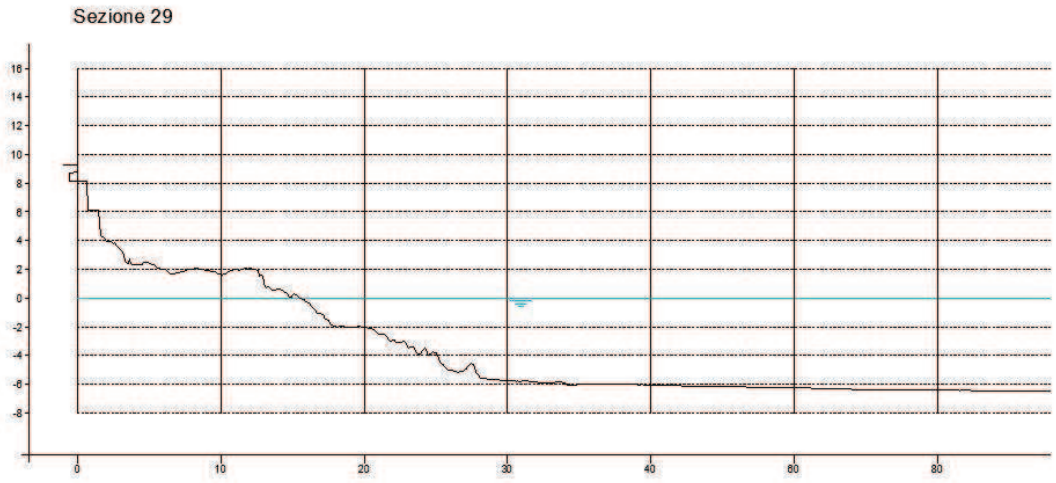


Fig. 1: Sezione 29 – stato attuale

B) Tratto di scogliera presso la sez. 35: In questo punto si manifestano fenomeni di tracimazione legati alle ondazioni particolarmente importanti. Questo tratto è caratterizzato dalla presenza di una scogliera con berma lunga circa 6 m a quota media +1,5 m s.l.m. avente una scarpata di pendenza 1:2,5 e poi 1:5 fondata su fondale naturale a -6 m circa. La scarpata a tergo della scogliera è costituita dalla scogliera naturale calcarea e manufatti in muratura aventi pendenza media pari a circa 1.5:1 circa culminante con il bordo del ponte stradale alla quota di circa +9 m (cfr. sez. 35)



Foto 5: Vista della zona presso la sez. 35 (in secondo piano)

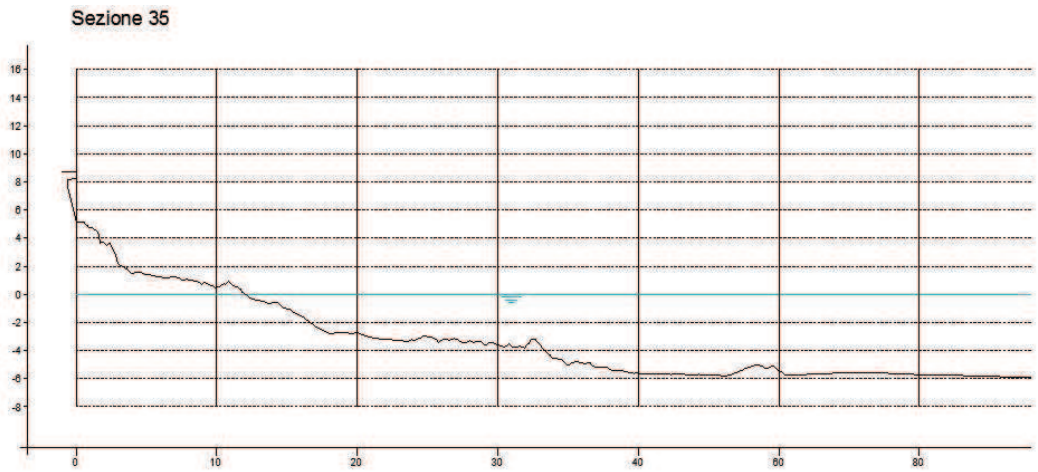


Fig. 2: Sezione 35 – stato attuale

C) Tratto di scogliera presso le sezz. 37÷1: Si tratta della zona presso l'imbocco della prima galleria artificiale. In questo punto il muraglione di difesa presente oltre la sez. 1 è rastremato e la scogliera al piede è molto ridotta. In questo punto si manifestano numerose ondazioni particolarmente importanti. La situazione rappresentativa è quella della sez. 37, con una scogliera con berma lunga circa 6 m a quota media +2,70 m s.l.m. avente una scarpata di pendenza 1:2,5 e poi 1:5 fondata su fondale naturale a -5,7 m circa. A tergo della scogliera vi è direttamente il muraglione verticale sul filo del bordo stradale.



Foto 5: Vista della zona tra le sezz. 37÷1

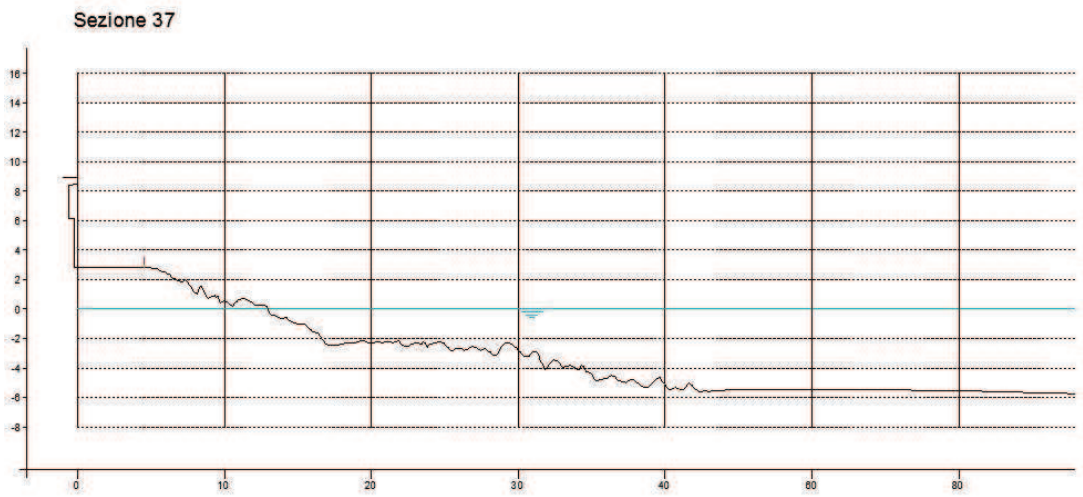


Fig. 3: Sezione 37 – stato attuale

D) Tratto di scogliera tra le sezz. 7÷16: Si tratta del tratto di scogliera antistante la porzione centrale/est della prima galleria artificiale lato ponente. La scogliera in questo tratto è particolarmente dissestata, con asportazione quasi totale della mantellata e scopertura del nucleo.

La sezione rappresentativa è la 13, caratterizzata da una scogliera con scarpata 1:4 con lunghezza parte emersa pari a circa 8 m ed altezza 2 m contro il retrostante muro verticale di sostegno della galleria. La scarpata continua in immersione fino ad una distanza di circa 30 m fino ad incontrare il fondale naturale alla batimetrica dei -4 m circa.



Foto 6: Vista della zona tra le sezz. 7÷16

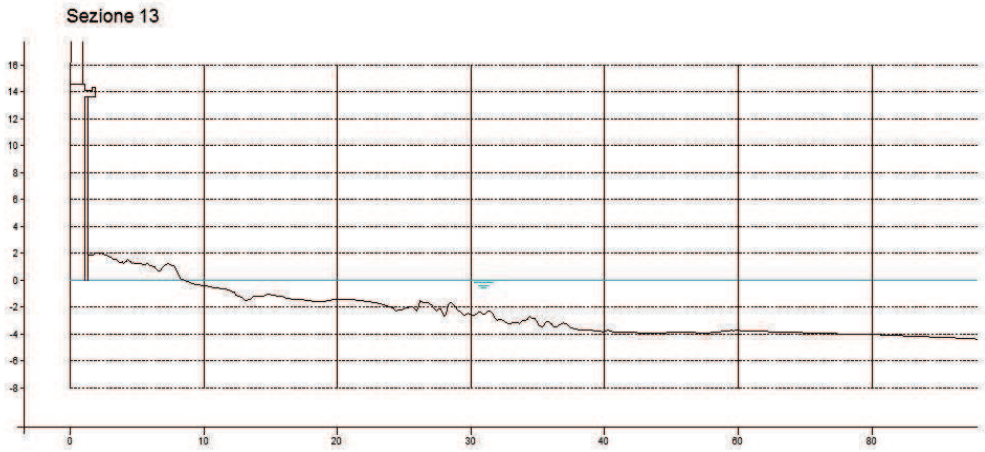


Fig. 4: Sezione 13 – stato attuale

3. INDIVIDUAZIONE DELLA SEZIONE DI INDAGINE

Il tratto di costa in questione ha una lunghezza totale di circa 320 m ed una conformazione piuttosto variegata. Nel primo tratto di 75 m a ponente (strada a cielo aperto tra sezz. 27 e 35), il piede della falesia è caratterizzato da alcuni promontori rocciosi calcarei ed alcune bancate di calcare con andamento delle fratture a reggipoggio sulle quali sono state edificate le murature di sostegno del corpo stradale (posto a circa 9 m s.l.m.). Il piede della falesia è protetto da una scogliera in massi naturali avente berma di larghezza ed altezza variabile. Nel tratto di 35 m successivi, fino all'imbocco della galleria (strada a cielo aperto tra le sezz. 35 e 1), è presente un insenatura e la strada corre su un arcata sotto la quale è presente la scogliera di massi naturali. Dalla sezione 1 inizia la galleria artificiale e, per i primi 60 m circa, il corpo stradale è protetto da una piazzuola di calcestruzzo posta ad una quota di circa 7,80 m , sostenuta da un muraglione paraonde e protetta al piede da una scogliera artificiale in massi naturali. I restanti 70 m verso levante sono caratterizzati dalla presenza della sola scogliera artificiale di massi naturali realizzata ai piedi delle strutture verticali di sostegno della galleria.

Come detto nel capitolo precedente, le zone più critiche sono quelle dove maggiormente si manifestano le problematiche durante le mareggiate: la risalita dell'onda non dipende solo dal profilo delle sezioni trasversali ma anche da fenomeni locali di concentrazione delle onde, dovute proprio alla conformazione articolata della scogliera, che favoriscono la tracimazione di masse d'acqua e la formazione di grandi spruzzi.

Dal punto di vista del fondale, si riconoscono due situazioni differenti: nel settore di ponente il fondale è maggiore ed ha una batimetrica alla base della scogliera pari a circa -6 m; nel settore di levante il fondale è invece minore, con batimetrica al piede della scogliera pari a circa -4 m.

Per stimare analiticamente l'entità della tracimazione e per verificare le opere a progetto, si assumono due sezioni caratterizzanti la prima il tratto di ponente, con strada a cielo aperto e fondale a -6 e la seconda il tratto di levante, con galleria artificiale e fondale a -4.

Nello specifico le sezioni ritenute più significative sono la 29 e la 13.

Nei capitoli seguenti sono riportate le calcolazioni per individuare le onde di progetto, le verifiche di stabilità della mantellata di progetto per determinare la conformazione della scarpata e del dimensionamento degli scogli, nonché le verifiche di tracimazione allo stato

attuale ed in quello di progetto al fine di determinare i benefici in termini di utilizzo della strada.

Le calcolazioni saranno eseguite prendendo in considerazioni mareggiate con tempo di ritorno annuale e mareggiate con tempo di ritorno cinquantennale, in modo da apprezzare le migliorie in funzione di mareggiate ordinarie ed estreme

Di seguito si riportano le sezioni di indagine:

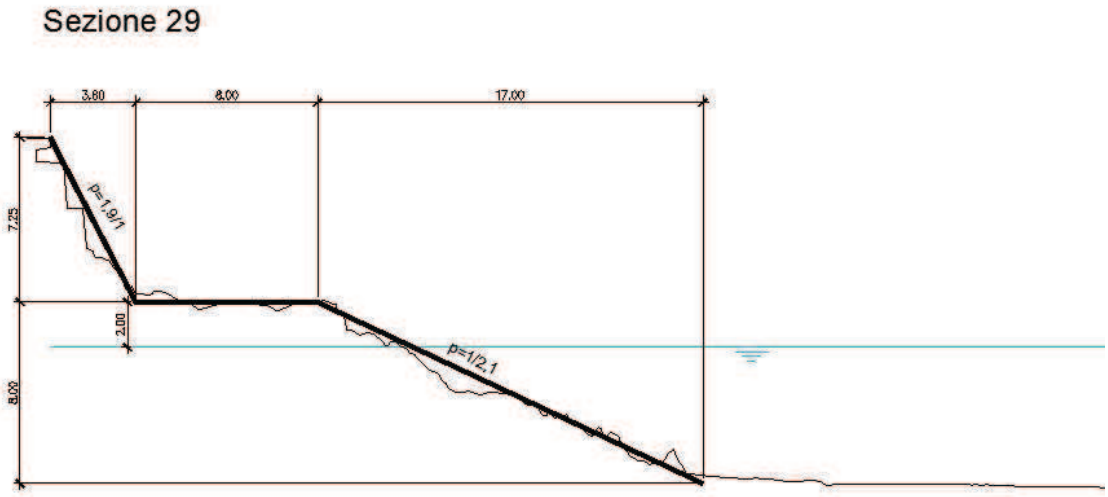


Fig. 5: Schema sezione 29 – stato attuale

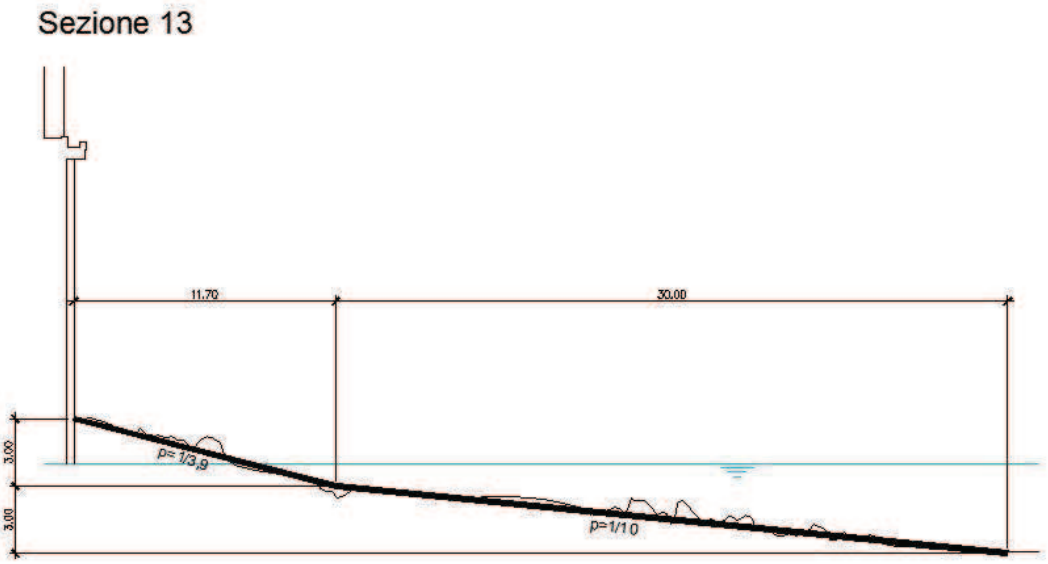


Fig. 6: Schema sezione 13 – stato attuale

4. ESPOSIZIONE DEL PARAGGIO E DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSO AL LARGO E A COSTA

Come mostrato nell'elaborato *"D01- Inquadramento cartografico"*, l'area in esame ricade nell'ambito del paraggio di Sestri Levante, da punta S.Anna a Punta di Sestri e precisamente al limitare di ponente di detto paraggio; è costituito da circa 300 m di costa alta pressoché interamente protetta da una scogliera radente.

Il paraggio di Sestri Levante è esposto ai mari prevalenti di Libeccio, essendo orientato prevalentemente secondo tale direzione ed essendo protetto dalla punta di Sestri e dal molo foraneo dai mari provenienti da mezzogiorno e da Scirocco.

I valori caratteristici degli eventi ondosi, considerati nell'analisi della propagazione del moto ondoso dal largo verso riva, riportati ai paragrafi successivi, sono stati desunti dalle Relazioni di dettaglio del Piano di Tutela dell'Ambiente marino e costiero - Ambito 15 (di seguito PTAMC).

Dall'analisi di paraggio del PTAMC emerge che le zone con maggiori concentrazioni di energia incidente si individuano in corrispondenza della costa nei pressi del promontorio delle Rocche di Sant'Anna.

4.1 Clima del moto ondoso al largo

Per la definizione del clima ondoso al largo nella "Relazione sul clima ondoso al largo (RO)" sono state utilizzate le registrazioni di altezza, periodo e direzione delle onde effettuate, a cadenza trioraria, dalla boa ondametrica direzionale della Rete Ondametrica Nazionale (RON) ancorata al largo di La Spezia, trasposte su un sito significativo posto al largo del Golfo del Tigullio alla batimetrica dei -100 m.

Nel diagramma riportato di seguito è raffigurata la distribuzione delle altezze d'onda per il sito al largo del Golfo del Tigullio.

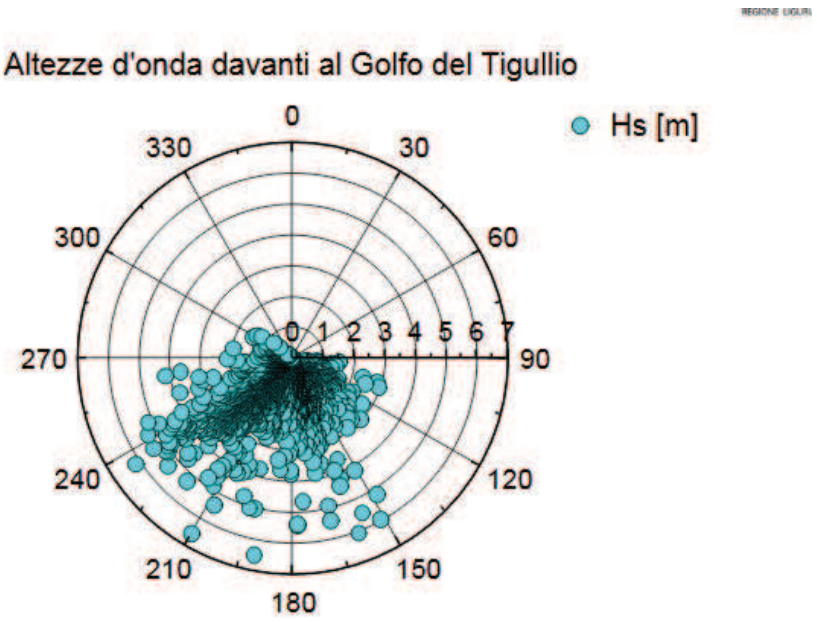


Figura 1.8 Distribuzione dei valori di altezza d'onda significativa derivanti dalla trasposizione dei dati in corrispondenza del sito significativo al largo del Golfo del Tigullio.

Tenendo conto dell'esposizione del sito oggetto di studio, rispetto all'ondametro della Spezia, sono state identificate tre direzioni rappresentative delle altezze d'onda derivanti dall'analisi statistica dei dati: la direzione di 220°N, per i mari da Libeccio, come rappresentativa del settore di traversia principale, la direzione 160°N per il settore secondario da scirocco e la direzione 180°N per le ondazioni da mezzogiorno meno significative.

I valori di altezza d'onda e periodo di picco associati ai periodi di ritorno da 1 a 100 anni sono riportati di seguito.

Periodo di ritorno	dir 160°		dir 180°		dir 220°	
	H_{m0T}	T_P	H_{m0T}	T_P	H_{m0T}	T_P
[anni]	[m]	[s]	[m]	[s]	[m]	[s]
1	3.1	8.0	2.7	7.4	4.7	9.7
2	3.9	8.9	3.3	8.2	5.1	10.2
5	4.8	9.9	4.0	9.1	5.7	10.8
10	5.4	10.5	4.5	9.6	6.2	11.2
20	6.1	11.1	5.0	10.1	6.7	11.7
30	6.5	11.5	5.3	10.4	6.9	11.9
50	6.9	11.9	5.7	10.8	7.3	12.2
100	7.6	12.4	6.2	11.2	7.7	12.6

Tabella 1.7 Valori di altezza d'onda e periodo di picco associati ai periodi di ritorno significativi per le direzioni di propagazione scelte in corrispondenza del sito al largo del Golfo del Tigullio.

4.2 Propagazione del moto ondoso da largo verso riva

Nell'ambito del PTAMC l'analisi dell'evoluzione del moto ondoso dal largo verso riva è stata condotta mediante il modello matematico STWAVE (Steady-state spectral wave model), un modello stazionario spettrale (per mare completamente sviluppato) alle differenze finite per l'analisi della propagazione verso riva delle onde generate da vento.

Il modello descrive come cambiano le caratteristiche delle onde (altezza, periodo, direzione e forma spettrale) nella propagazione dal largo verso riva in seguito ai fenomeni di rifrazione e shoaling indotti dalla profondità e dalle correnti, di frangimento, di diffrazione, di interazione tra le onde e di whitecapping.

La griglia di input è stata costruita sulla base delle isobate derivate dal modello dei fondali del Mare Mediterraneo prodotto dall'Istituto Idrografico della Marina, con maglia quadrata 50 m x 50 m.

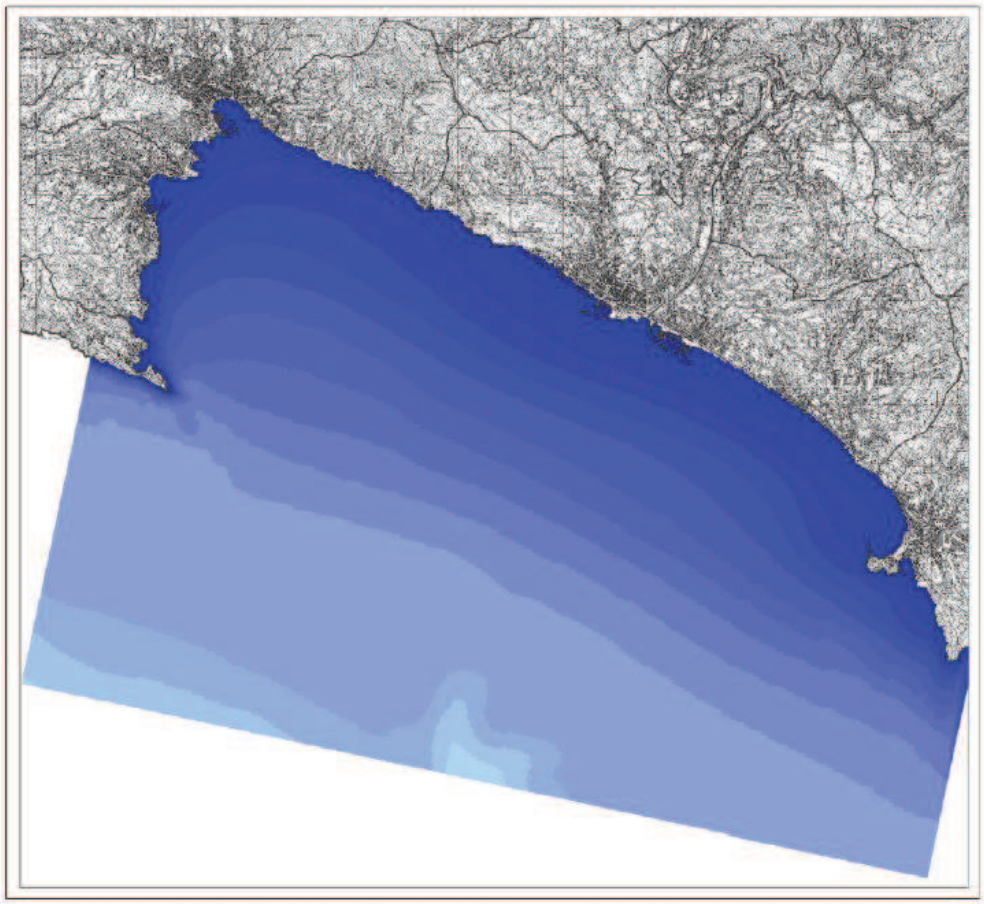


Figura 3.1 Griglia di calcolo utilizzata per la propagazione del moto ondoso dal largo verso riva per le unità fisiografiche di Golfo del Tigullio-Baia del Silenzio.

Sulla base dei valori caratteristici delle onde al largo per le tre direzioni predominanti riportati al paragrafo precedente è stata analizzata l'evoluzione del moto ondoso dal largo verso riva.

Una volta a disposizione i risultati della modellazione matematica sono stati individuati i valori dell'altezza d'onda spettrale, il periodo e la direzione dell'onda nei pressi di 24 stazioni di calcolo, individuate in punti rappresentativi per le successive elaborazioni all'interno dei paraggi.

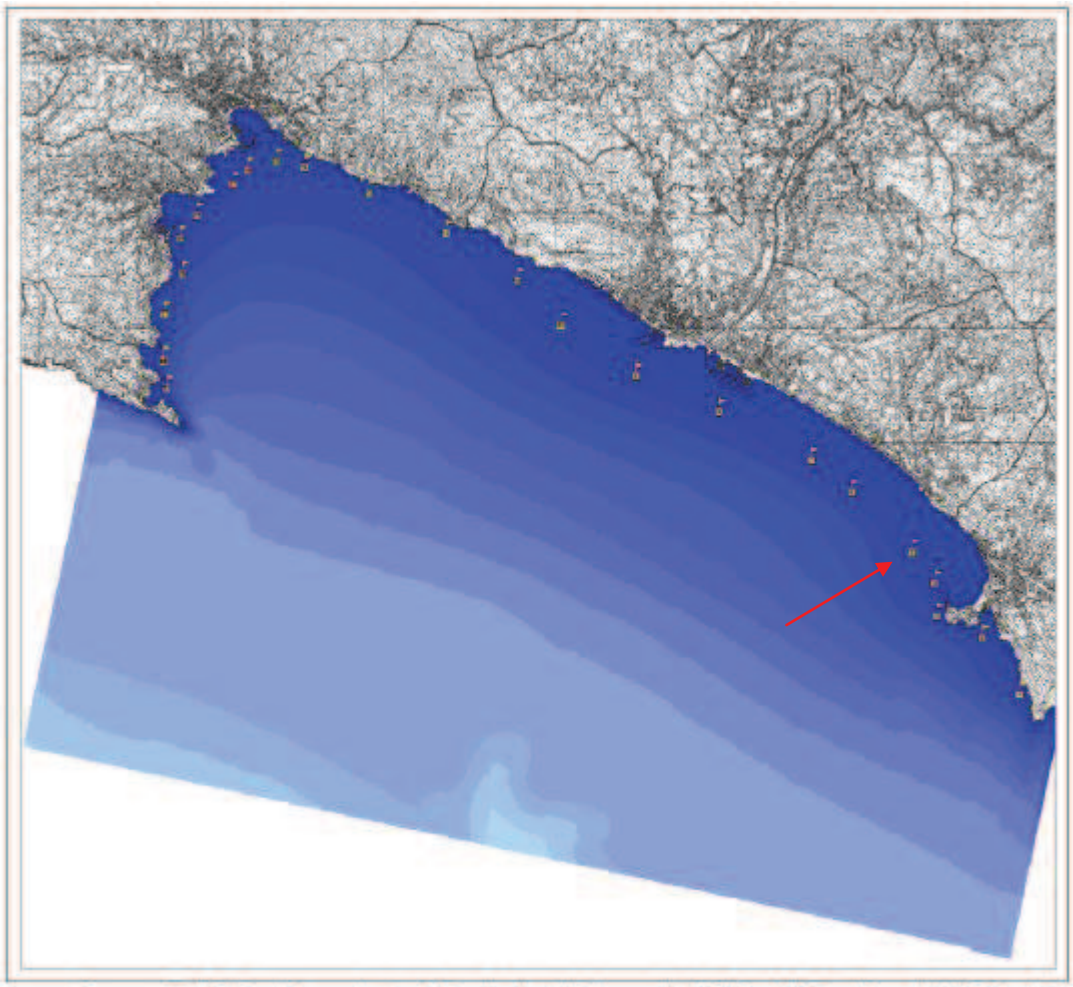


Figura 3.5 Batimetrie e stazioni di calcolo all'interno del Golfo del Tigullio e della Baia del silenzio.

Nome Stazione	N° Stazione	Coordinata x	Coordinata y	Quota IDM [m]
Riva Trigoso	50	1533572,00	4899010,00	-50
Punta Manara	1	1532030,30	4900412,24	-15
Sestri lev.baia silenzio	2	1531375,60	4901420,39	-15
Sestri lev.est	3	1530585,75	4901792,74	-15
Sestri lev. approdo	4	1530553,38	4902361,91	-15
Sestri lev.	5	1530157,87	4902906,03	-15
Cavi	6	1529101,51	4903948,44	-15
Ripamare	7	1528402,16	4904506,03	-15
Lavagna porto	8	1526794,36	4905358,95	-15
Chiavari porto	9	1525340,60	4905974,65	-15
Chiavari	10	1524047,04	4906863,01	-15
Madonna delle Grazie	11	1523291,45	4907637,02	-15
Rovereto	12	1522036,40	4908466,08	-15
Zoagli	13	1520701,25	4909158,81	-15
Rapallo est	14	1519569,05	4909603,94	-15
Rapallo	15	1519079,98	4909707,89	-15
S.Michele	16	1518587,83	4909556,92	-15
Prelo	17	1518329,83	4909305,05	-16
S.Margherita	18	1517705,61	4908773,21	-15
S.Margherita ovest	19	1517416,42	4908374,63	-14
Covo nord est	20	1517438,40	4907756,55	-15
Nozarego	21	1517135,74	4907054,13	-14
Paraggi	22	1517116,14	4906240,42	-16
Portofino	23	1517169,30	4905769,07	-15

Tabella 3.2 Caratteristiche geografiche delle 24 stazioni di calcolo individuate dal rilievo dell'Istituto Idrografico della Marina

I risultati della modellazione matematica hanno evidenziato che nella propagazione del moto ondoso dal largo verso riva le onde subiscono una trasformazione dovuta all'effetto del fondo; i fronti d'onda subiscono una rotazione a causa della diminuzione della velocità delle onde con la profondità e l'altezza d'onda subisce una diminuzione legata alla dispersione dell'energia per effetto delle differenze tra velocità di fase e velocità di gruppo.

Il moto ondoso, a causa dell'orientazione della costa, subisce modesti effetti rifrattivi e si presenta con altezze d'onda notevoli; alla profondità di circa 15 metri l'onda non ha ancora subito il fenomeno del frangimento e presenta ancora altezze d'onda molto prossime a quelle al largo (fondali di circa 100 metri).

Si riporta di seguito la tabella relativa alla sola stazione "Sestri Levante", posizionata alla profondità di - 15 m, in prossimità dell'area di intervento, in cui sono indicati le caratteristiche del moto ondoso nella stazione.

Sestri lev. (5)		H [m]	T [s]	Dir [°N]	H [m]	T [s]	Dir [°N]	H [m]	T [s]	Dir [°N]
T = 1 anno	al largo	3,1	8,0	160	2,7	7,4	180	4,7	9,7	220
	-15,00	2,4	7,9	180	2,4	7,2	190	4,3	9,7	219
T = 2 anni	al largo	3,9	8,9	160	3,3	8,2	180	5,1	10,2	220
	-15,00	3,0	9,2	182	2,9	8,3	192	4,7	10,2	219
T = 5 anni	al largo	4,8	9,9	160	4,0	9,1	180	5,7	10,8	220
	-15,00	3,8	9,7	184	3,5	8,8	193	5,3	10,8	219
T = 10 anni	al largo	5,4	10,5	160	4,5	9,6	180	6,2	11,2	220
	-15,00	4,3	10,2	186	4,0	9,3	194	5,8	11,2	219
T = 20 anni	al largo	6,1	11,1	160	5,0	10,1	180	6,7	11,7	220
	-15,00	4,9	10,6	187	4,5	9,7	195	6,4	11,8	219
T = 30 anni	al largo	6,5	11,5	160	5,3	10,4	180	6,9	11,9	220
	-15,00	5,3	11,9	187	4,8	10,8	195	6,5	11,9	219
T = 50 anni	al largo	6,9	11,9	160	5,7	10,8	180	7,3	12,2	220
	-15,00	5,6	12,2	188	5,2	11,0	196	6,9	12,2	219
T = 100 anni	al largo	7,6	12,4	160	6,2	11,2	180	7,7	12,6	220
	-15,00	6,3	12,7	189	5,6	11,5	196	7,3	12,7	219

Tabella 3.17 Valori di altezza, periodo e direzione dell'onda nella stazione di Sestri lev. (in rosso è indicata, per ogni periodo di ritorno, l'altezza d'onda più alta tra quelle ottenute tra le tre direzioni esaminate)

Tali valori caratteristici delle sono stati utilizzati come input nella modellazione matematica di propagazione del moto ondoso all'interno dei singoli paraggi dell'Ambito.

4.3 Propagazione del moto ondoso a scala di dettaglio

Come anticipato al paragrafo precedente, analogamente a quanto eseguito nell'ambito del PTAMC per il paraggio di Sestri Levante, anche nella modellazione a scala di dettaglio effettuata nell'ambito della presente relazione è stata utilizzata come stazione di ingresso la stazione "Sestri Levante", di cui sono stati riportate le caratteristiche al paragrafo precedente.

Tr	Stazione	n°	Coordinate Stazione			Direzione al largo 160°N			Direzione al largo 180°N			Direzione al largo 220°N		
			x	y	z [m]	H [m]	T [s]	Dir [°N]	H [m]	T [s]	Dir [°N]	H [m]	T [s]	Dir [°N]
1 anno	Sestri Levante	5	1530158	4902906	-15	2.4	7.9	180	2.4	7.2	190	4.3	9.7	219
50 anni	Sestri Levante	5	1530158	4902906	-15	5.6	12	188	5.2	11	196	6.9	12.2	219

Tabella 2.1 Valori di altezza, periodo e direzione dell'onda nella stazione di input per la propagazione ondosa nel paraggio- periodi di ritorno 1 e 50 anni.

Partendo quindi dai dati estrapolati nella suddetta stazione, che risulta molto prossima all'area di intervento, si è fatto uso di un modello numerico che, nota la batimetria dell'area, consente di valutare le modifiche subite dal moto ondoso incidente per effetto di shoaling, rifrazione e attrito.

A costa l'asse delle batimetriche presenta un orientamento di 215 ° N, pertanto nel percorso finale verso costa le onde subiscono una deviazione indotta dai fondali, descritta nelle simulazioni analitiche presentate nelle tabelle 1.1, 1.2 e 1.3 allegate al presente documento.

Tali simulazioni, nelle quali sono state prese in considerazione le onde con tempo di ritorno di 1 e 50 anni, sono finalizzate a valutare la modifica dell'altezza d'onda e le profondità limite di frangimento delle onde ritenute significative per il paraggio in esame.

Le onde estreme aventi come direzione di provenienza 220 °N, che corrispondono alle più gravose per il paraggio, subiscono il frangimento, valutato secondo il criterio di Miche, a partire rispettivamente dalla batimetrica –5.00 m e –8.00 m, a partire dalla quale la massima onda stabile presenta altezze significative dell'ordine di 0.70-0.80 h , con h= profondità locale (vedi tabelle 1.1).

Le onde estreme aventi come direzione di provenienza 160-180° N subiscono il frangimento, valutato secondo il criterio di Miche, a partire rispettivamente dalla batimetrica –3.00 m e –6.00 m, a partire dalla quale la massima onda stabile presenta altezze significative dell'ordine di 0.70-0.80 h , con h= profondità locale (vedi tabelle 1.2 e 1.3).

4.4 Variazioni del livello marino

Oltre al moto ondoso, la variazione del livello marino in prossimità della costa è dovuta a varie cause tra cui le maggiori sono lo stress del vento sulla superficie traversale e longitudinale (Set up da vento) e l'innalzamento dovuto alla marea.

I valori di livello indotti dai suddetti termini forzanti per l'area oggetto di studio, calcolati nel PTAMC sono riportati di seguito:

LIVELLO DEL MARE	**VALORI ESTREMI 1 ANNO (cm)**	**VALORI ESTREMI 50 ANNI (cm)**
Variazione livello idrometrico	40	50

4.5 INDIVIDUAZIONE DELL'ONDA DI PROGETTO

Il calcolo dell'onda di progetto utilizzata per il dimensionamento della mantellata della scogliera è stato eseguito secondo i criteri suggeriti nelle "Istruzioni tecniche per la progettazione delle dighe marittime", approvate dall'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici con voto del 23 Settembre 1994 n. 156.

In particolare si è assunta come durata di vita minima T_v per l'opera a progetto la vita minima per un'infrastruttura ad uso generale con livello di sicurezza richiesto pari a 1, ossia 25 anni.

Come massima probabilità di danneggiamento dell'opera è stata assunta la probabilità di danneggiamento incipiente come consigliato per strutture flessibili (le opere in esame non sono soggette a collasso strutturale immediato) con limitato rischio per la vita umana e ripercussione economica bassa (il rapporto tra i costi diretti del danneggiamento, sommati a quelli indiretti per la perdita di funzionalità delle opere protette ed il costo totale per la realizzazione dell'opera è minore di 5), ossia $P_{f\,bassa}$ pari a 0,50.

La combinazione del tempo di vita dell'opera e della probabilità di danneggiamento determina il tempo di ritorno dell'evento di progetto T_{rp} secondo la relazione:

$$T_{rp} = T_v / \left[- \ln(1-P_f) \right]$$

Ne consegue che il tempo di ritorno in caso di ripercussione economica bassa risulta pari a 36 anni; cautelativamente per i calcoli progetto si assume tempo di ritorno pari a 50 anni.

L'altezza d'onda da utilizzare per le verifiche di stabilità risulta quindi l'onda con tempo di ritorno 50 anni, proveniente dalla direzione di massimo contenuto energetico, ossia l'onda proveniente da 220° N , calcolata al piede della scogliera.

Pertanto, come mostrato nella tabelle 1.3 detta onda, per ognuna delle due sezioni di verifica individuate, presenta le seguenti caratteristiche:

SEZIONE 29 (rappresentativa della zona di ponente)

Fondale al piede: $h_d = 6,0$ m

Altezza significativa: $H_s = 5,08$ m;

Periodo: $T = 12,20$ s

SEZIONE 13 (rappresentativa della zona di levante)

Fondale al piede: h_d= 4 m

Altezza significativa: H_s= 3,43 m;

Periodo: T= 12,20 s

Per quanto riguarda le verifiche della tracimazione sarà presa in considerazione anche l'onda con tempo di ritorno pari a 1 anno, in quanto le finalità dell'intervento sono quelle di eliminare/mitigare le problematiche dovute alla chiusura della viabilità, che attualmente si verificano anche in occasione di mareggiate più frequenti.

SEZIONE 29 (rappresentativa della zona di ponente)

Fondale al piede: h_d= 6,0 m

Altezza significativa: H_s= 4,55 m;

Periodo: T= 9,70 s

SEZIONE 13 (rappresentativa della zona di levante)

Fondale al piede: h_d= 4 m

Altezza significativa: H_s= 3,38 m;

Periodo: T= 9,70 s

5. DETERMINAZIONE DELLA CONFORMAZIONE DELLA SCARPATA E DEL DIMENSIONAMENTO DEGLI SCOGLI

Per determinare la conformazione ottimale della scogliera di progetto innanzitutto è necessario individuare un giusto compromesso tra dimensioni dei massi e pendenza della scarpata.

Per il dimensionamento dei massi della mantellata, si è utilizzata la nota formula di Van Der Meer, riportata di seguito, che rispetto alla formula di Hudson permette di tener conto dell'azione di onde irregolari e gli effetti della variabilità del periodo.

5.1 Formula di Van Der Meer

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

$$\frac{H_S}{\Delta D_{n\,50}} = 6.2\,P^{0.18}\left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2}\xi_m^{-0.5}$$

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

$$\frac{H_S}{\Delta D_{n\,50}} = 1.0\,P^{-0.13}\left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2}\sqrt{\cot\alpha}\;\xi_m^{P}$$

Per onde con frangimento intermedio ($2{,}5 < \xi_m < 3.5$):

$$\frac{H_S}{\Delta D_{n\,50}} = \min\left(6.2\,P^{0.18}\left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2}\xi_m^{-0.5};\,1.0\,P^{-0.13}\left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2}\sqrt{\cot\alpha}\;\xi_m^{P}\right)$$

in cui:

H_s = altezza d'onda significativa al piede della scogliera

ξ_m = parametro di surf o numero di Iribarren per il periodo medio $\quad \xi_m = \dfrac{\tan\alpha}{\sqrt{\dfrac{2\pi H_S}{g T_m^2}}}$

T_m = periodo d'onda medio (s)

α = pendenza della mantellata (°)

$\Delta = (\gamma_m/\gamma_w - 1)$ = massa relativa del masso

γ_w = peso specifico dell'acqua marina (1030 Kg/m³)

γ_m= peso specifico del masso (2650 Kg/ m³)

D_{n50}= diametro nominale del masso, $D_{n50}= (W_{50}/\gamma_m)^{1/3}$ (m)

W_{50}= valore del peso corrispondente al 50% nella curva di distribuzione (kg)

P = coefficiente di permeabilità della struttura

S = livello di danneggiamento ammesso, $S = A/(D_{n50})^2$ (crf. tabella seguente)

A = area erosa nella sezione

N = numero di onde (tipicamente tra 1000 e 5000).

Nella tabella seguente 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

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.

Si riportano di seguito le tabelle di calcolo relative alle verifiche eseguite sia per la sezione 29 (rappresentativa della zona di ponente), sia per la sezione 13 (rappresentativa della zona di levante) con diverse pendenze. Come onda di progetto è stata assunta l'onda frangente

con tempo di ritorno 50-ennale,come definita al paragrafo precedente e cioè quella limitata dal fondale al piede dell'opera.

Per quanto riguarda la quota della berma orizzontale, si è scelto di diversificare l'altezza tra la porzione di ponente e quella di levante, al fine di armonizzare le opere a progetto con i massi esistenti, nell'ottica generale di un approccio di tipo manutentivo.

Nello specifico, nella porzione di ponente le scogliere presenti in quasi tutto il tratto hanno altezze massime di +2 m e si è scelto di limitare l'altezza della berma a +3 m; nella porzione di levante la scogliera è presente su tutto il tratto a quota variabili da +2 a +6 m, pertanto si è scelto di tenere una quota minima della berma di progetto a +3.50 m.

Dati

$\rho 0$ =	1.030,00	kg/mc	densità acqua di mare
ρ =	2.650,00	kg/mc	densità scogli
Δ =	1,57		$\rho / \rho 0$ - 1
p*=	0,60		permeabilità (tra 0,1 e 0,6)
cotg (α) =	2,50		pendenza mantellata (1 su …)
tg (α) =	0,40		1 / pendenza della mantellata
h =	6,00	m	profondità al piede
H_s =	5,08	m	H onda significativa
g =	9,81	m/s^2	accelerazione gravità
T_p =	13,06	s	periodo di picco
T_s=	12,20	s	periodo significativo
T_m =	10,17	s	periodo medio
$L_{0\,m}$	161,31	m	lunghezza d'onda al largo riferita al Tm
ξ m =	**2,254**		parametro di Iribarren
ξ mc =	2,999		parametro di Iribarren critico
S =	2,00		livello di danneggiamento
N =	4.000,00		numero onde presenti nella mareggiata (da 3000 a 5000)
Pers =	11,30	ore	durata della mareggiata
R_c=	3,00	m	altezza della mantellata sul l.m.m.

FORMULA DI VAN DER MEER

- Calcolo del parametro Ns

ξ m $\leq$2,5—>	Hs/(Δ*Dn50)=	**1,89**	frangimento tipo plunging
2,5$\leq \xi$ m $\leq$ 3,5—>	Hs/(Δ*Dn50)=	--	-
ξ m $\geq$3,5—>	Hs/(Δ*Dn50)=	**--**	-
	Ns = Hs/(Δ*Dn50)=	***1,89***	

D_{n50}	**1,71**	**m**	**diametro nominale medio**
W_{50}	**13.270**	**kg**	**peso medio del singolo masso di progetto**

DIMENSIONAMENTO DELLE MANTELLATA - FORMULA DI VAN DER MEER CON S=2

SEZIONE 29 (ZONA DI PONENTE) PENDENZA 1 SU 2,5

Dati

$\rho 0$ =	1.030,00	kg/mc	densità acqua di mare
ρ =	2.650,00	kg/mc	densità scogli
Δ =	1,57		$\rho / \rho 0$ - 1
p*=	0,60		permeabilità (tra 0,1 e 0,6)
cotg (α) =	3,00		pendenza mantellata (1 su …)
tg (α) =	0,33		1 / pendenza della mantellata
h =	6,00	m	profondità al piede
H_s =	5,08	m	H onda significativa
g =	9,81	m/s^2	accelerazione gravità
T_p =	13,06	s	periodo di picco
T_s=	12,20	s	periodo significativo
T_m =	10,17	s	periodo medio
$L_{0\,m}$	161,31	m	lunghezza d'onda al largo riferita al Tm
ξ m =	**1,878**		parametro di Iribarren
ξ mc =	2,760		parametro di Iribarren critico
S =	2,00		livello di danneggiamento
N =	4.000,00		numero onde presenti nella mareggiata (da 3000 a 5000)
Pers =	11,30	ore	durata della mareggiata
R_c=	3,00	m	altezza della mantellata sul l.m.m.

FORMULA DI VAN DER MEER

- Calcolo del parametro Ns

ξ m $\leq$2,5—>	Hs/(Δ*Dn50)=	**2,07**		frangimento tipo plunging
2,5$\leq \xi$ m $\leq$ 3,5—>	Hs/(Δ*Dn50)=	--		-
ξ m $\geq$3,5—>	Hs/(Δ*Dn50)=	**--**		-
	Ns = Hs/(Δ*Dn50)=	***2,07***		
	D_{n50}	**1,56**	**m**	**diametro nominale medio**
	W_{50}	**10.095**	**kg**	**peso medio del singolo masso di progetto**

DIMENSIONAMENTO DELLE MANTELLATA - FORMULA DI VAN DER MEER CON S=2

SEZIONE 29 (ZONA DI PONENTE) PENDENZA 1 SU 3

Dati

$\rho 0$ =	1.030,00	kg/mc	densità acqua di mare
ρ =	2.650,00	kg/mc	densità scogli
Δ =	1,57		$\rho / \rho 0$ - 1
p*=	0,60		permeabilità (tra 0,1 e 0,6)
cotg (α) =	2,00		pendenza mantellata (1 su …)
tg (α) =	0,50		1 / pendenza della mantellata
h =	4,00	m	profondità al piede
H_s =	3,43	m	H onda significativa
g =	9,81	m/s^2	accelerazione gravità
T_p =	13,06	s	periodo di picco
T_s=	12,20	s	periodo significativo
T_m =	10,17	s	periodo medio
$L_{0\,m}$	161,31	m	lunghezza d'onda al largo riferita al Tm
ξ m =	**3,429**		parametro di Iribarren
ξ mc =	3,319		parametro di Iribarren critico
S =	2,00		livello di danneggiamento
N =	4.000,00		numero onde presenti nella mareggiata (da 3000 a 5000)
Pers =	11,30	ore	durata della mareggiata
R_c=	3,50	m	altezza della mantellata sul l.m.m.

FORMULA DI VAN DER MEER

- Calcolo del parametro Ns

ξ m $\leq$2,5—>	Hs/(Δ*Dn50)=	--		-
2,5$\leq \xi$ m $\leq$ 3,5—>	Hs/(Δ*Dn50)=	1,53		frangimento intermedio plunging/surging
ξ m $\geq$3,5—>	Hs/(Δ*Dn50)=	--		-
	Ns = Hs/(Δ*Dn50)=	***1,53***		
	D_{n50}	**1,42**	**m**	**diametro nominale medio**
	W_{50}	**7.664**	**kg**	**peso medio del singolo masso di progetto**

DIMENSIONAMENTO DELLE MANTELLATA - FORMULA DI VAN DER MEER CON S=2

SEZIONE 13 (ZONA DI PONENTE) PENDENZA 1 SU 2

Alla luce dei risultati ottenuti, per garantire un livello di stabilità di danno iniziale con i massi reperibili in commercio (10-12 t), si assume una pendenza del paramento esterno della mantellata pari a 1 su 3 per le sezioni di ponente (sezione 29) e 1 su 2 per le sezioni di levante.

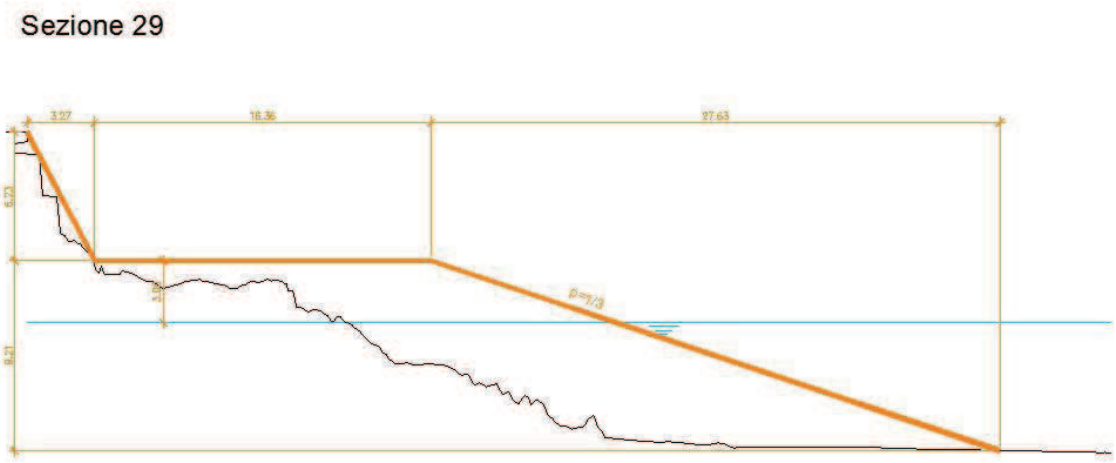
Per il rifiorimento, su tutto il tratto, è previsto l'utilizzo di almeno due strati di massi di IV categoria (oltre 10 t) posizionando quelli di maggiori dimensioni nei tratti maggiormente esposti al moto ondoso, ossia nella zona di ponente.

6. SCELTA DELLA CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

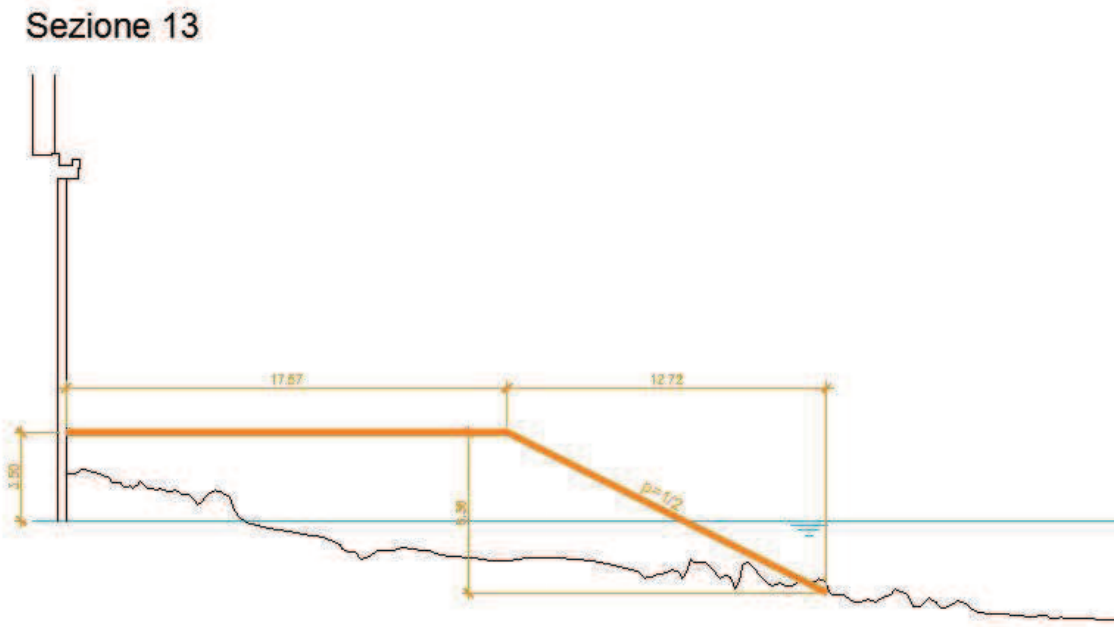
Sulla base delle analisi eseguite nel capitolo precedente, la configurazione di progetto è stata definita come segue:

- tratto di ponente: berma orizzontale a quota +3.00 m - pendenza della scarpata esterna 1:3 – composizione mantellata: massi naturali di peso unitario > 10 t
- tratto di levante: berma orizzontale a quota +3.50 m - pendenza della scarpata esterna 1:2 composizione mantellata: massi naturali di peso unitario > 7 t
- la larghezza della berma orizzontale è variabile, definita in modo che l'allineamento della scogliera sia parallelo alla strada.

Le sezioni tipologiche di progetto, come sopra descritte, sono raffigurate nelle due immagini sottostanti:



Schema sezione 29 (tratto di ponente) – stato di progetto



Schema sezione 13 (tratto di levante) – stato di progetto

7. RUN-UP E TRACIMAZIONE DELL'ONDA

Occorre innanzitutto premettere che le formule presenti in letteratura derivano da prove sperimentali effettuate in vari laboratori, per lo più su modello fisico bidimensionale e correlate a specifici casi esaminati: per tale motivo è molto difficile che rappresentino fedelmente il fenomeno che si riscontra al vero, soprattutto in situazioni molto complesse e a sezione variabile, come il caso in esame.

I valori medi della portata di tracimazione sono calcolati con formule empiriche generalizzate e conseguenti semplificazioni sull'influenza delle combinazioni dei diversi fattori (presenza di più berme, rugosità differenti…).

Si ritiene, tuttavia, che tali formule analitiche possano rappresentare un'indicazione attendibile sui fenomeni, specie nel confronto tra le due configurazioni attuale / progetto.

Per la verifica delle tracimazioni è stata presa in esame la sezione di indagine n 29, sulla quale le formulazioni empiriche possono avere una ragionevole validità, in quanto il profilo è ben assimilabile agli schemi teorici.

Tra le diverse formulazioni presenti, per il calcolo della tracimazione, nella presente relazione è stata utilizzata la formula proposta da Van der Meer nell'ambito della pubblicazione "Technical Report Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes".

La formula generale per $\xi_0 < 5$ risulta:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan\alpha}} \gamma_b \xi_0 \exp\left(-4.3 \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\xi_0 \gamma_b \gamma_\beta \gamma_v \gamma_f}\right)$$

con massimo dato dall'espressione:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.2 \cdot \exp\left(-2.3 \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta}\right)$$

dove:

q = portata media tracimante (mc/s/m)

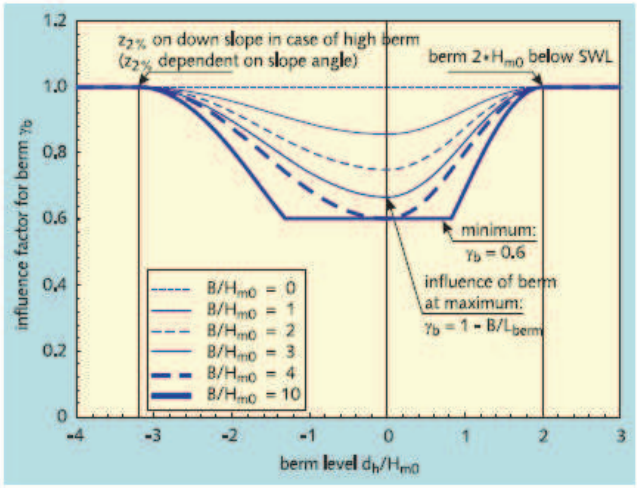
H_s=H_{m0}= altezza significativa dell'onda al piede dell'opera;

ξ_0 = parametro di frangimento = tan α/radq(2π H_s/gT_s^2);

R_c = altezza libera della sommità del muro rispetto al livello di quiete

tan α = pendenza della mantellata della mantellata

γ_b = parametro riduttivo dipendente dalla presenza di una berma orizzontale nell'ambito della mantellata calcolato in base alla posizione della berma sul livello del mare e della lunghezza della berma in rapporto all'altezza d'onda H_s secondo l'abaco tratto dal "Technical Report Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes" (per pendenze 1:3) e riportato di seguito:



γ_f = parametro riduttivo dipendente dalla "scabrezza" della scogliera

- nel caso di mantellata costituita da una doppia fila di massi naturali $\gamma_f = 0{,}55$

γ_β = parametro riduttivo dipendente dall'obliquità dell'onda incidente calcolabile con le seguenti formule:

$\gamma_\beta = 1 - 0.0033 * \beta \quad (0° \le \beta \le 80°)$

$\gamma_\beta = 1 - 0.0033 * 80 \quad (\beta \ge 80°)$

Assumendo un attacco frontale $\gamma_\beta = 1$

γ_v = parametro riduttivo dipendente dall'obliquità del paramento del muro paraonde calcolabile con la seguente formula:

$\gamma_\beta = 1.35 - 0.0078 * \alpha_{wall}$

Con α_{wall} pendenza del muro in gradi (compresa tra 45° per pendenza 1:1 e 90° per muro verticale).

Il calcolo è stato effettuato per la sezione 29 sia per onda con tempo di ritorno pari a 50 anni, sia per onda con tempo di ritorno pari a 1 anno, sia nella configurazione di stato attuale sia nella configurazione di progetto.

Riassumendo, i parametri di input assunti sono i seguenti.

T= 50 anni

SEZIONE 29 (rappresentativa della zona di ponente)

Fondale al piede:	h_d= 6,0 m
Altezza significativa:	Hs= 5,08 m;
Periodo:	T= 12,20 s

T= 1 anno

SEZIONE 29 (rappresentativa della zona di ponente)

Fondale al piede:	h d= 6,0 m
Altezza significativa:	Hs= 4,55 m;
Periodo:	T= 9,70 s

Nelle due tabelle seguenti sono riportati i calcoli della tracimazione per tempi di ritorno di 1 anno e 50 anni, affiancando la situazione attuale a quella di progetto.

CALCOLO DELLA TRACIMAZIONE (Van der Meer -TAW 2002) ***TR 1 ANNO***

Note:

Onda di riferimento :	**4.55**	m	**onda con TR 1 anno**
Sopraelevazione medio mare:	**0.40**	m	

STATO ATTUALE - SEZIONE 29		
Hs	4.55	m
Rc	8.83	m
Ts0	9.70	s
g	9.81	m/s^2
B emersa	8.00	m
db emersa	-1.60	m
B emersa/Hs	1.76	m
db emersa/Hs	-0.35	m
γb	0.78	
$\gamma \beta$	1.00	
γf	0.55	
αv	76.06	
γv	0.76	
cotg α	2.10	
tan α	0.48	
s0	0.03	
$\xi 0$	2.71	
q	**0.00**	**mc/s/m**
q	**0.47**	**l/s/m**

STATO DI PROGETTO: PENDENZA 1:3 - Q berma 3,0 m s.l.m.		
Hs	4.55	m
Rc	8.83	m
Ts0	9.70	s
g	9.81	m/s^2
B emersa	16.36	m
db emersa	-2.60	m
B emersa/Hs	3.60	m
db emersa/Hs	-0.57	m
γb	0.67	
$\gamma \beta$	1.00	
γf	0.55	
αv	76.06	
γv	0.76	
cotg α	3.00	
tan α	0.33	
s0	0.03	
$\xi 0$	1.89	
q	**0.00**	**mc/s/m**
q	**0.00**	**l/s/m**

CALCOLO DELLA TRACIMAZIONE (Van der Meer -TAW 2002) ***TR 50 ANNI***

Note:

Onda di riferimento :	**5.08**	m	onda con TR 50 anni frangente su	6.00	m
Sopraelevazione medio mare:	**0.50**	m	---> Hs = onda frangente su	6.50	m

STATO ATTUALE - SEZIONE 29		
Hs	5.48	m
Rc	8.73	m
Ts0	12.20	s
g	9.81	m/s^2
B emersa	8.00	m
db emersa	-1.50	m
B emersa/Hs	1.46	m
db emersa/Hs	-0.27	m
γb	0.81	
$\gamma \beta$	1.00	
γf	0.55	
αv	76.06	
γv	0.76	
cotg α	2.10	
tan α	0.48	
s0	0.02	
$\xi 0$	3.10	
q	**0.01**	**mc/s/m**
q	**10.28**	**l/s/m**

STATO DI PROGETTO: PENDENZA 1:3 - Q berma 3,0 m s.l.m.		
Hs	5.48	m
Rc	8.73	m
Ts0	12.20	s
g	9.81	m/s^2
B emersa	16.36	m
db emersa	-2.50	m
B emersa/Hs	2.99	m
db emersa/Hs	-0.46	m
γb	0.69	
$\gamma \beta$	1.00	
γf	0.55	
αv	76.06	
γv	0.76	
cotg α	3.00	
tan α	0.33	
s0	0.02	
$\xi 0$	2.17	
q	**0.00**	**mc/s/m**
q	**0.12**	**l/s/m**

Dalla lettura della tabella emergono i seguenti dati più significativi.

- nello stato attuale la tracimazione media calcolata al bordo stradale è pari a circa 0.47 l/s m per TR 1 anno e 10,28 l/s m per TR 50 anni;
- nello stato di progetto la tracimazione media calcolata al bordo stradale è nulla per TR 1 anno e pari a 0,12 l/s m per TR 50 anni.

Per l'interpretazione dei suddetti risultati e la comprensione del reale significato dei valori medi di tracimazione ottenuti sono necessarie alcune considerazioni.

Sulla base della letteratura scientifica in materia e da sperimentazioni eseguite (riferite in prevalenza a muri paraonde delle strutture portuali), sono state elaborate tabelle sintetiche di riferimento che riportano quanto segue :

- i valori di sicurezza per i pedoni sono definiti in circa 1÷10 l/sm per personale addestrato e 0,1 l/sm per pedoni generici, con vista aperta sul mare;
- i valori di sicurezza per i veicoli sono definiti in circa 10÷50 l/sm per guida a bassa velocità e onde puntuali, mentre scendono fino a 0,01÷0,05 per veicoli a media/alta velocità e tracimazioni a caduta / getti violenti;
- la correlazione tra il valore medio di tracimazione e la portata delle onde più alte tracimanti per unità di lunghezza raggiunge anche valori superiori di 50÷200 volte la portata media (il valore dipende dal periodo d'onda, dalla ripidità ed altri fattori); pertanto nel caso in esame, la tracimazione media nello stato attuale pari a circa 0,47 l/sm durante un evento annuale può comportare anche tracimazioni dell'ordine dei 100 l/m per onda, mentre la tracimazione pari a circa 10 l/sm durante un evento 50ennale può comportare anche tracimazione dell'ordine dei 500 l/m per onda.

Dalle indicazioni sopra riportate, emerge chiaramente che nello stato attuale la percorribilità del tratto è pericolosa anche per mareggiate con TR 1 anno, e diventa molto pericolosa per mareggiate con TR 50 anni; nello stato di progetto la pericolosità si riduce fortemente per mareggiate con TR 1 anno (nella sezione di verifica i risultati forniscono valori nulli di tracimazione ma bisogna tenere in considerazione le altre sezioni in cui possono avvenire concentrazioni anomale), mentre il transito resta pericoloso, specie per i pedoni e le auto a media/alta velocità, per TR 50 anni.

E' presumibile pertanto che le interdizioni al transito sulla strada possano ridursi in maniera significativa, e limitarsi alle sole mareggiate con frequenza media statistica maggiore di un anno.

8. CONCLUSIONI

Nel presente documento sono state esposte le varie calcolazioni analitiche necessarie ad individuare le onde di progetto, a dimensionare la forma e consistenza delle opere, nonché a stimare i benefici in termini di riduzione/eliminazione della tracimazione dovuta alla risalita dell'onda sulla scogliera e sulla sede stradale. In particolare:

Studio meteomarino – individuazione delle onde di progetto:

I valori caratteristici degli eventi ondosi, considerati nell'analisi della propagazione del moto ondoso dal largo verso riva, sono stati desunti dalle Relazioni di dettaglio del Piano di Tutela dell'Ambiente marino e costiero- Ambito 15 (PTAMC). Per la definizione del clima ondoso al largo sono state utilizzate le registrazioni di altezza, periodo e direzione delle onde effettuate, a cadenza trioraria, dalla boa ondametrica direzionale della Rete Ondametrica Nazionale (RON) ancorata al largo di La Spezia, trasposte su un sito significativo posto al largo del Golfo del Tigullio alla batimetrica dei -100 m. Nell'ambito del PTAMC l'analisi dell'evoluzione del moto ondoso dal largo verso riva è stata condotta mediante il modello matematico STWAVE (Steady-state spectral wave model), un modello stazionario spettrale (per mare completamente sviluppato) alle differenze finite per l'analisi della propagazione verso riva delle onde generate da vento. Il modello descrive come cambiano le caratteristiche delle onde (altezza, periodo, direzione e forma spettrale) nella propagazione dal largo verso riva in seguito ai fenomeni di rifrazione e shoaling indotti dalla profondità e dalle correnti, di frangimento, di diffrazione, di interazione tra le onde e di whitecapping. La griglia di input è stata costruita sulla base delle isobate derivate dal modello dei fondali del Mare Mediterraneo prodotto dall'Istituto Idrografico della Marina, con maglia quadrata 50 m x 50 m. L'onda a largo così determinata è stata fatta evolvere fino a costa mediante uno specifico programma di calcolo dell'evoluzione del raggio d'onda.

Il calcolo delle onda di progetto utilizzate per il dimensionamento della mantellata è stato eseguito secondo i criteri suggeriti nelle "Istruzioni tecniche per la progettazione delle dighe marittime", approvate dall'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici con voto del 23 Settembre 1994 n. 156. L'altezza d'onda utilizzata per le verifiche di stabilità è stata assunta con tempo di ritorno 50 anni, mentre per i calcoli della portata di tracimazione si sono assunte quelle con tempo di ritorno 1 anno e 50 anni.

Dimensionamento delle opere:

Per determinare la conformazione ottimale della scogliera di progetto sono state eseguite calcolazioni preliminari per valutare il giusto compromesso tra dimensioni dei massi e pendenza della scarpata. La configurazione di progetto è stata diversificata tra la zona di ponente, dove il fondale è circa 6 m e quella di levante, dove il fondale è circa 4 m. La diversa altezza d'onda infatti ha comportato la scelta di una scarpata a pendenza inferiore (1:2) nella zona di levante ed una scarpata meno pendente (1:3) nella zona di ponente. Con tali pendenze si sono ottenuti risultati di stabilità nell'ipotesi di danno atteso incipiente, utilizzando massi di dimensioni reperibili commercialmente. In particolare sono necessari massi naturali di IV categoria, con peso medio maggiore di 10 t (tratto di ponente) e maggiore di 7 t (tratto di levante).

La particolare esposizione della porzione di ponente, sulla quale incidono onde molto importanti, non ha consentito di limitare la pendenza della scarpata, in quanto in tal caso sarebbero stati necessari massi di dimensioni troppo elevate e non reperibili commercialmente.

Per quanto riguarda la quota della berma orizzontale, si è scelto di diversificare l'altezza tra la porzione di ponente e quella di levante, al fine di armonizzare le opere a progetto con i massi esistenti, nell'ottica generale di un approccio di tipo manutentivo. Nello specifico, nella porzione di ponente le scogliere presenti in quasi tutto il tratto hanno altezze massime di +2 m e si è scelto di limitare l'altezza della berma a +3 m; nella porzione di levante la scogliera è presente su tutto il tratto a quota variabili da +2 a +6 m, pertanto si è scelto di tenere una quota minima della berma di progetto a +3.50 m.

Riduzione della tracimazione:

La finalità principale del presente intervento è quella di eliminare o mitigare i fenomeni di risalita dell'acque e tracimazione sulla Via Aurelia durante le mareggiate. In particolare, ad oggi tali fenomeni avvengono anche più volte all'anno e impongono la chiusura precauzionale della strada. Le problematiche non sono solo quelle legate alla sicurezza della circolazione viaria, bensì anche quelle legate all'aggressione accelerata delle strutture del bordo stradale e della galleria artificiale a causa dell'azione diretta e violenta delle onde e degli spruzzi. Tali fenomeni assumono particolare rilevanza nelle mareggiate eccezionali con tempi di ritorno elevati (vedi ad es. mareggiata del novembre 2011).

Per apprezzare la diminuzione del fenomeno sono state effettuate calcolazioni di tracimazione su una sezione della porzione di ponente, dove si manifestano le problematiche

maggiori, analizzando la situazione attuale e confrontandola con quella di progetto. I risultati in termini di riduzione della tracimazione sono molto importanti, sia su mareggiate frequenti (tempo di ritorno 1 anno) che su mareggiate eccezionali (tempo di ritorno 50 anni). Nel primo caso si ha una riduzione quantitativa da 0.47 l/sm a zero, mentre nel secondo caso si passa da circa 10 l/sm a 0,1 l/sm, con una riduzione del 99%.

Su questo aspetto occorre tuttavia fare alcune considerazioni in merito alla validità dei risultati e all'estrapolazione degli stessi su tutta la lunghezza dell'intervento. Innanzitutto occorre specificare che la sezione di indagine (sez. 29), sulla quale le formulazioni empiriche possono avere una ragionevole validità in quanto il profilo è ben assimilabile agli schemi teorici, non è costante su tutto il tratto della porzione di ponente ma anzi, vi sono alcune situazioni particolari (zona sez. 35 e zona sez. 37) dove la particolare conformazione della falesia e delle murature contribuiscono a creare condizioni per puntuali concentrazioni energetiche durante le ondazioni. Tali situazioni non sono descrivibili analiticamente, lo sarebbero maggiormente con l'utilizzo di un modello fisico, tuttavia anche in questo caso i risultati potrebbero non riprodurre esattamente la situazione reale.

Sicuramente il miglioramento nella situazione di progetto è significativo, in quanto la scogliera esistente verrebbe integrata ed allungata in modo molto importante (la berma nelle zone critiche suddette passerà da 2÷5 m a circa 15 m di lunghezza, con un altezza da +1,5 m circa a +3,0 m).

Oltre a ciò occorre tener presente che durante le mareggiate vi è quasi sempre la concomitanza di forte vento da mare, che contribuisce a veicolare gli spruzzi verso la strada, anche quando la risalita dell'onda non è tale da raggiungerla: questo fenomeno difficilmente è eliminabile, tuttavia la sua rilevanza è certamente trascurabile, in termini di sicurezza, rispetto al fenomeno di tracimazione diretta delle masse d'acqua sul bordo stradale.