

## Studio sperimentale del sistema di protezione costiera a Marina di Pisa

Amanda Zannella<sup>1,2</sup>, Andrea Esposito<sup>2,3</sup>, Irene Simonetti<sup>1,2</sup> & Lorenzo Cappietti<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale,  
Via di Santa Marta 3 – 50139 Firenze

<sup>2</sup>Laboratorio congiunto A-MARE, Università degli Studi di Firenze

<sup>3</sup>AM3 Spin-off s.r.l., Via Madonna del Piano, 6, 50019 Sesto Fiorentino, Firenze

<sup>4</sup>GNRAC – Gruppo Nazionale per la Ricerca sull’Ambiente Costiero,  
Corso Europa 25 – 16132 Genova  
lorenzo.cappietti@unifi.it

### Riassunto

La costa di Marina di Pisa, situata a sud del delta del fiume Arno, è soggetta a intensa erosione dalla seconda metà del XIX secolo e fin dai primi anni del XX secolo iniziarono tentativi di protezione che si sono gradualmente rafforzati nel tempo. Nel 2000, il sistema di difesa era costituito da un muro a scogliera, aderente alla strada costiera, dalla foce dell’Arno fino a 2.3 km a Sud, alto circa 3.0-4.0 m s.l.m.m., davanti al quale, a distanza di circa 50-100 m, si trovavano 10 scogliere frangiflutti emerse, oggi alte circa 2.0-3.0 m s.l.m.m., lunghe da 200 a 270, separate da varchi di circa 15 m e collegate alla costa da una serie di pennelli. Nei primi anni 2000, il sistema di difesa ha iniziato ad essere modificato con un intervento sperimentale basato sull’aggiunta di un ripascimento in ghiaia davanti al muro radente e successiva trasformazione dei frangiflutti emersi in frangiflutti sommersi. Questa tipologia di intervento è stata applicata ad un primo tratto centrale lungo circa 500 m e successivamente estesa verso Nord di ulteriori 500 m. La parte terminale di questa seconda realizzazione non garantisce tutt’ora una protezione soddisfacente, poiché durante le mareggiate più intense si verificano ingenti tracimazioni di acqua e ghiaia sulla strada litoranea, nonostante le numerose operazioni di rimodellamento effettuate fino alla fine del 2021. In questo lavoro è stato studiato tale tratto di opera di protezione ricostruendo il modello fisico in scala e testandolo all’interno di un canale marittimo, al fine di esaminare l’effetto dei parametri progettuali delle due principali componenti del sistema di difesa, ovvero il frangiflutti sommerso e il ripascimento in ghiaia, sul fenomeno della inondazione di acqua e ghiaia. Sono stati variati tre parametri di progetto: larghezza e altezza del ripascimento in ghiaia, e larghezza della berma del frangiflutti sommerso. Complessivamente, sono state studiate quindici configurazioni basate su diverse combinazioni dei suddetti parametri di progetto, tutte sottoposte alle stesse sollecitazioni di moto ondoso incidente. L’effetto di tali parametri è stato valutato con riferimento a tre principali indici: la tracimazione di ghiaia, la tracimazione d’acqua e il profilo di equilibrio finale del ripascimento in ghiaia, che include l’altezza e la distanza dalla strada litoranea della cresta formatasi sotto l’azione del moto ondoso.

**Parole Chiave:** Frangiflutti Sommersi, Ripascimenti in Ghiaia, Marina di Pisa, Modellazione Sperimentale.

### Abstract

*The coast of Marina di Pisa, located in the south of the delta of the Arno River, has been subjected to intense erosion since the second half of the XIX century, with protective initiatives starting in the first half of the XX century, and being reinforced overtime. By 2000, the defense system was composed of a 3.0-4.0 m m.s.l. seawall against the promenade, starting at the south of the mouth of the Arno River to 2.3 km south. Furthermore, located 50-100 m offshore, there were 10 emerged breakwaters at 2.0-3.0 m m.s.l., at 200 to 270 meters long, separated by gaps of 15 m and connected to the coast by a series of groins. In the early 2000s, the defense system began to be modified based on an experimental study testing the addition of gravel nourishment in front of the seawall and the submergence of the corresponding emerged breakwater. This type of intervention was applied to an initial central section approximately 500 m long and subsequently extended northwards by another 500 m. The final section of this second implementation does not yet*

*guarantee satisfactory protection, since during intense storm surges large overtopping of water and gravel occurs on the promenade, despite the numerous remodeling operations carried out until the end of 2021. In this study, the unsatisfactory section of the protection system was studied by reconstructing the scaled physical model and testing it inside a wave flume, in order to examine the effect of the design parameters of the two main components of the defense system, i.e. the submerged breakwater and the gravel nourishment, on water and gravel overtopping. Three design parameters were varied: width and height of the gravel nourishment, and width of the berm of the submerged breakwater. Overall, fifteen configurations were studied based on different combinations of the aforementioned design parameters, all subjected to the same incident wave stresses. The effect of these parameters was evaluated with reference to three main indices: gravel overflow, water overflow and the final equilibrium profile of the gravel nourishment, which includes the height and distance of the crest from the coastal road formed under the wave motion action.*

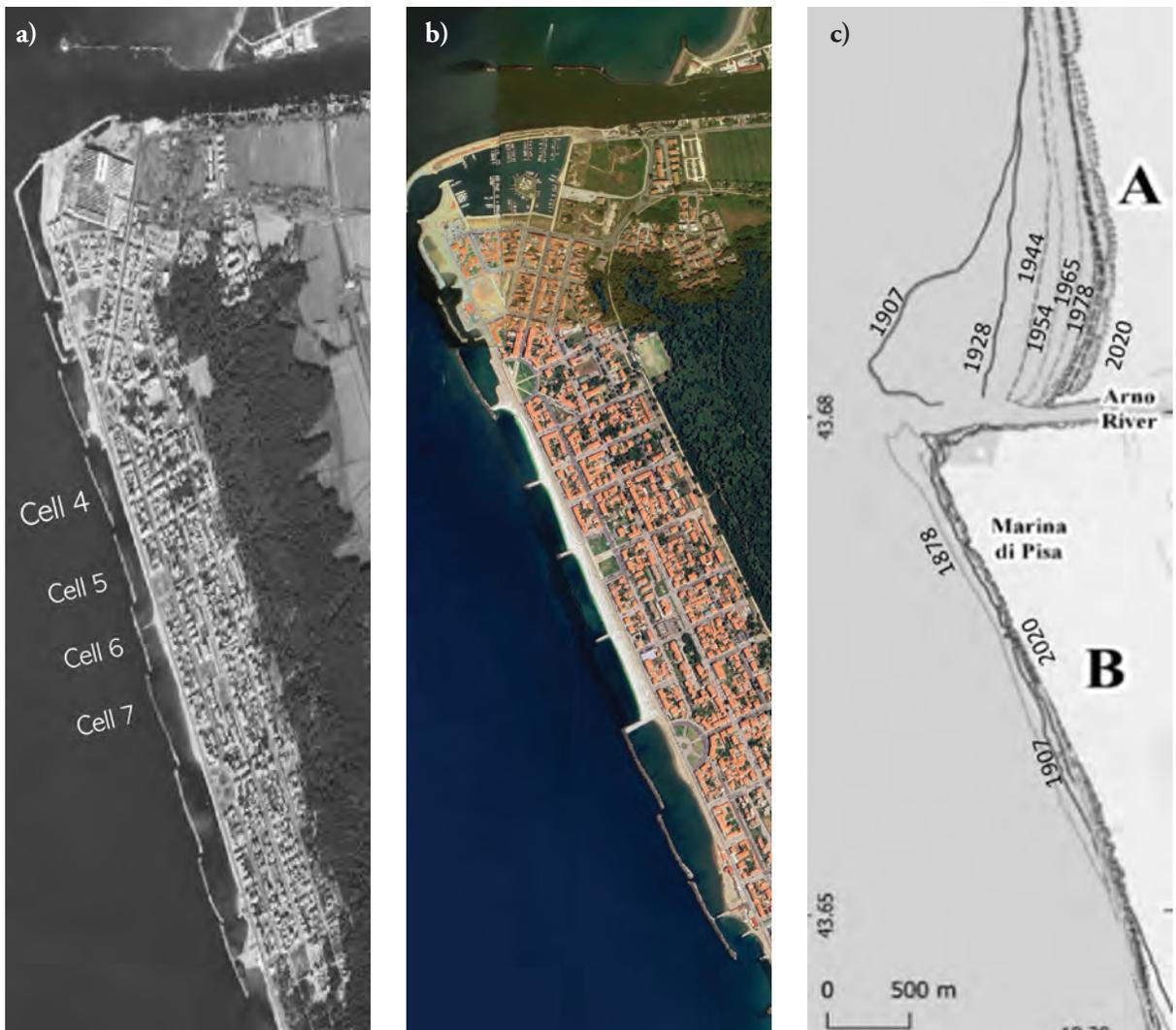
**Keywords:** *Submerged Breakwater, Gravel Beaches, Marina di Pisa, Experimental Modelling.*

## **Introduzione e Area di studio**

Marina di Pisa è una località costiera situata sulla costa settentrionale della Toscana a Sud della foce del fiume Arno. Questo tratto di costa ha subito una lunga storia di erosione fino alla completa sparizione delle spiagge di sabbia e al conseguente aumento del rischio di inondazione e distruzione dell'abitato. I primi fenomeni di erosione sono emersi immediatamente dopo la fondazione di Marina di Pisa nel 1872, quando ancora esisteva una vasta spiaggia di sabbia tra la città e il mare. A certificare l'arretramento del delta dell'Arno già nel 1878 è il regio Istituto Geografico Militare (I.G.M.) con misurazioni in loco. Cartoline del 1915 mostrano alcuni primi interventi di protezione del litorale eseguiti con materiale ligneo, come palizzate e pennelli permeabili (Pranzini et al., 2018). In seguito con l'aggravarsi dei fenomeni di erosione e con le prime inondazioni dell'abitato fu necessario intervenire con opere a scogliera, costruendo prima un muro radente la strada litoranea e poi raddoppiando il sistema di difesa con antistanti frangiflutti a scogliera.

Nel 2000 Marina di Pisa risultava protetta per circa 2.3 km di costa da: i) un muro a scogliera radente la strada litoranea progettato con altezza di 4.0m s.l.m.m. la cui costruzione iniziò fin dal 1928; ii) 10 frangiflutti a scogliera emersi progettati con cresta a 4.0 m s.l.m.m. e costruiti a Nord nel periodo 1935-1940 e più a Sud nel 1965-1975, lunghi da 200 a 270 metri, separati da varchi con ampiezza di circa 15 m e distanti del muro radente circa 50-100 metri (Figura 1°). Questo complesso e costoso sistema di difesa basato su opere a scogliera si è rivelato determinante per la sopravvivenza stessa di Marina di Pisa. Nella Figura 1b, infatti, la mappa della linea di costa ricreata da Bini et al. (2021) e l'immagine satellitare di Marina di Pisa del 1988 (Figura 1a) mostrano la differenza nell'evoluzione a Nord e a Sud del delta del fiume Arno. È evidente una netta differenza nell'erosione ai due lati del fiume, poiché il confine meridionale è stato fortemente protetto, mentre il lato settentrionale è stato lasciato libero di erodere fino al 2000, perdendo oltre 1 km di territorio. D'altra parte, se tale sistema di difesa è stato efficace nel non far arretrare la linea di costa e quindi nel permettere la sopravvivenza dell'abitato di Marina di Pisa, il fenomeno erosivo è continuato sui fondali marini che si sono fortemente abbassati passando da circa 4m a circa 7-8m immediatamente al largo delle scogliere perdendo un ordine di grandezza del milione di metri cubi di sabbia. Le maggiori profondità dei fondali all'esterno dei frangiflutti hanno permesso la propagazione di onde più alte che a loro volta hanno causato cedimenti delle scogliere e imposto le necessarie operazioni di ricarica con massi di dimensioni maggiori per garantirne la stabilità sotto le incrementate condizioni di moto ondoso. Inoltre, l'azione dei moti ondosi incidenti più energetici ha causato un aumento del flusso d'acqua attraverso e sopra i frangiflutti, aumentando così, durante le mareggiate, il livello del mare tra essi e il muro radente, fenomeno noto come *wave piling-up* (Cappietti et al. 2013). Ciò ha favorito le frequenti tracimazioni del muro radente adiacente alla strada litoranea, causando allagamenti di strade e edifici e portando spesso alla chiusura della strada litoranea. Negli anni 2003-2009, si intervenne con un intervento sperimentale ideato e studiato presso l'Università di Firenze, ipotizzando che parte delle ragioni che hanno portato al forte approfondimento dei fondali esterni alle scogliere siano da ricercarsi, oltre nel ridotto apporto solido dell'Arno, anche nell'elevata agitazione ondosa che si forma a causa delle forti riflessioni ondose indotte dai frangiflutti emersi e che gli stessi causassero anche l'anomalo incremento del livello del medio del mare durante le mareggiate. L'intervento è consistito nella realizzazione di un ripascimento in ghiaia con il compito di assorbire l'incremento dell'energia ondosa a costa che si determina per effetto della trasformazione dei frangiflutti emersi in frangiflutti sommersi che sono molto meno riflettenti dei primi e permettono ai flussi di acqua di riguadagnare il largo senza accumularsi a costa. Aminti & Pranzini,

(2000) condussero un primo studio su modello fisico dell'intervento sperimentale da realizzarsi alle celle 7 e 6 (Figura 1a). I test sperimentali evidenziarono che, per evitare le tracimazioni di acqua e ghiaia sulla strada litoranea in presenza di onde incidenti con altezza significativa  $H_{1/3}=3.69$  m e un periodo  $T_{1/3}=9.95$  s (misurati a una profondità di 7 m al piede della scogliera lato mare), doveva essere implementata la seguente configurazione: i) ripascimento da  $100\text{ m}^3/\text{m}$  con ghiaia da 16 mm, finalizzato a creare una spiaggia con berma orizzontale larga 49 m con e a quota 2 m sopra il livello del medio mare; ii) abbassamento della cresta del frangiflutti emerso fino al livello del medio mare, creando così un frangiflutti con cresta larga 10 m. Nel 2003 fu realizzato un ripascimento in ghiaia con circa  $50\text{ m}^3/\text{m}$  e di diametro 3-7 mm lasciando invariato il frangiflutti (i.e., ancora emerso con cresta a 1.5 m sopra il m.s.l.). Una violenta mareggiata avvenuta nell'ottobre del 2003 ( $H_s=6.6$  m,  $H_{\max}=11.5$  m,  $T_p=10.5$  s, secondo i parametri misurati dall'ondametro installato presso La Spezia) provocò la tracimazione di una notevole quantità di acqua e ghiaia sulla strada, mettendo in evidenza l'inadeguatezza del ripascimento in ghiaia realizzato (Cappietti et al. 2013). La trasmissione del moto ondoso oltre il frangiflutti emerso e il correlato aumento dei livelli del mare dietro allo stesso (*piling-up*) erano ancora troppo elevati, mentre il volume di ripascimento con ghiaia era ancora troppo poco e la dimensione della ghiaia troppo piccola per evitare la tracimazione sulla strada (Ellis e Cappietti 2013). L'esperienza della mareggiata del 2003 dette modo di acquisire ulteriori



**Figura 1.** a) Marina di Pisa nel 1988 (I.G.M., s.d.); b) Marina di Pisa nel 2021, con una convenzione di denominazione per le celle (Google Earth); c) Evoluzione storica della posizione della linea di costa presso il fiume Arno dal 1878 al 2020 con evidenziate le date più importanti (Bini et al., 2021, modificato).

elementi conoscitivi sul campo e portò ad un nuovo approfondimento degli studi con il quale si pervenne ad una ricalibrazione dei parametri progettuali dell'intervento sperimentale. I lavori ripresero nel 2006 per concludersi nel 2007 e fu versato un volume maggiore di ghiaia e dalla pezzatura più grande (40-80 mm) ed inoltre, il frangiflutti emerso fu convertito in un frangiflutti sommerso la cui cresta fu allargata a circa 20m per aumentare la dissipazione dell'energia delle onde incidenti (Cappiotti, 2011). Nei successivi 16 anni (2007-2023) il sistema di difesa sperimentale implementato alla cella 6 e 7 non ha mai registrato ulteriori casi di tracimazione di acqua o ghiaia sulla strada e non ha avuto necessità di alcuna ricarica del materiale.

La morfodinamica del ripascimento con ghiaia sotto l'azione delle onde differisce notevolmente da quella della sabbia per numerosi fattori rilevanti, tra i quali: l'alta permeabilità, la porosità e l'inerzia maggiore di ciascun granulo. La velocità di risalita delle onde frangenti è superiore alla velocità di sedimentazione della ghiaia (Lorang, 2002), il che consente il trasporto di una grande quantità di materiale verso terra e al contempo l'alta permeabilità della spiaggia consente l'infiltrazione dell'acqua, riducendo la capacità di trasporto solido del flusso d'acqua di ritorno (Austin & Buscombe, 2008; Buscombe & Masselink, 2006; Nordstrom et al., 2008). Questa asimmetria determina un progressivo trasporto e accumulo della ghiaia verso costa che porta alla formazione di una cresta in risposta all'azione dei moti ondosi e che agisce come una barriera di protezione per la costa. La capacità delle spiagge di ghiaia di formare naturalmente una barriera di protezione contro le inondazioni costiere, a differenza della sabbia che si erode facilmente, costituisce il tratto distintivo che permette al ripascimento di essere una valida opzione per la protezione costiera dalle inondazioni, se ben progettato.

Lo schema di difesa sperimentale testato alle celle 6 e 7 fu successivamente impiegato anche per le due celle immediatamente a Nord, i.e. le celle 5 e 4 con lavori conclusi nel 2018. Il livello di protezione della cella 4 è risultato ancora inaccettabile a causa della persistenza di grandi quantità di ghiaia e di acqua tracimanti sulla strada litoranea durante le mareggiate più intense, nonostante le numerose operazioni di rimodellamento effettuate fino alla fine del 2021. Tale problema della cella 4 può essere principalmente correlato alle seguenti differenze rispetto alle celle 6 e 7 dove il sistema di protezione ha ottime prestazioni: i) una minore quota dell'estradosso del muro radente la strada litoranea, ii) la maggiore profondità dei fondali al piede del frangiflutti, sia lato mare che dal lato della costa; iii) la minore distanza del frangiflutti sommerso rispetto al muro radente; iv) un sommergezza maggiore del frangiflutto sommerso. L'obiettivo di questo articolo è di analizzare, a partire dai risultati ottenuti dai test sperimentali condotti su un modello fisico in scala ridotta, l'influenza che hanno i principali parametri progettuali delle due principali componenti del sistema di difesa costiera alla cella 4, i.e. il frangiflutti sommerso e il ripascimento con ghiaia, sul grado di protezione in termini del controllo della tracimazione di acqua e ghiaia sulla strada litoranea.

## Metodi

Lo studio sperimentale su modello fisico, commissionato dalla Regione Toscana, è stato condotto nel canale per onde e correnti (WCF1) del Laboratorio di Ingegneria Marittima (LABIMA) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze ([www.labima.unifi.it](http://www.labima.unifi.it)). Il canale utilizzato è lungo 37 m, largo 0.80 m e profondo 0.80 m. Può generare altezze d'onda massime di 0.35 m, con periodi che vanno da 0.8 a 2.5 secondi (LABIMA, 2020), tramite un generatore d'onda di tipo a pistone. Il modello di costa è stato riprodotto in scala 1:36, utilizzando la similitudine di Froude utilizzando una sezione del rilievo batimetrico della cella 4 effettuato nel maggio 2022 (Figura 2).

La configurazione attuale (2022) nella cella 4 è composta da un ripascimento con ghiaia/ciottoli di dimensione nel fuso 40-80 mm e largo circa 11,5 m. Nel modello è stata utilizzata ghiaia di 1-2 mm. Il muro radente ha estradosso a circa 3.1 m sopra il livello del medio mare, con una larghezza della cresta di circa 5 m e massi da 1-4 tonnellate. Nel modello è stato costruito con ciottoli da 21-84 g ma la quota di estradosso è stata simulata a 4.1 m s.l.m.m, come alla cella 7, perché questa è ritenuta una condizione imprescindibile per sviluppare anche alla cella 4 un'efficace sistema di difesa dalle inondazioni. Il frangiflutti sommerso ha una cresta larga 20 m, situata 1 m sotto il livello del medio mare, costituito da massi da 5-10 tonnellate (105-210 g in scala modello). I fondali tra il frangiflutti e il muro radente sono stati realizzati in sabbia di 0,1mm. Sono stati testate 15 differenti configurazioni del modello del sistema di difesa variando i tre seguenti parametri principali:

- 1) l'estensione del frangiflutti sommerso:  $BWW = 30 \text{ m}, 40 \text{ m e } 50 \text{ m}$ ;
- 2) la larghezza del ripascimento con ghiaia:  $BW = 40 \text{ m}, 50 \text{ m}, 60 \text{ m}, 70 \text{ m}$ ;
- 3) l'altezza del ripascimento con ghiaia  $BH = 2 \text{ m e } 3 \text{ m}$ ,



**Figura 2.** Fotografia aerea della cella 4 nel 2021 (a sinistra, fonte Google Earth); parametri di progetto del frangiflutti e del ripascimento in ghiaia indagati nel presente lavoro (in basso).



come illustrato in Figura 2. Le combinazioni testate di tali parametri sono riportati in Tabella 1. Le configurazioni sono state testate sotto lo stesso moto ondoso, rappresentativo delle peggiori condizioni fisicamente compatibili con la profondità d'acqua di 7 m al piede esterno del frangiflutti sommerso: i.e.  $H_s = 4.3$  m e periodo di picco  $T_p = 12$  s e un innalzamento di tempesta del livello del mare pari a 0,8 m con una durata di 6 ore. È importante sottolineare che i test sono stati condotti con il profilo iniziale del ripascimento in ghiaia costituito da una berma emersa piana ed orizzontale e che questa configurazione iniziale si è rivelata la peggiore perché, per alcune larghezze e altezze del ripascimento, le prime onde riescono a causare tracimazioni sulla strada che poi diminuiscono quando il processo morfodinamico porta alla costruzione della cresta di ghiaia. Durante i test, è stato effettuato il rilievo iniziale del profilo riprodotto e il rilievo finale dopo l'azione del moto ondoso di prova. Sono state misurate le tracimazioni di ghiaia (in kg/s/m) e di acqua (in l/s/m), come riportato in Tabella 1.

**Tabella 1. Parametri e risultati del test nel Prototipo.**

Codice del Laboratorio	Larghezza Cresta del Frangiflutti [m]	Larghezza Ripascimento [m]	Altezza Ripascimento [m]	Tracimazione di Ghiaia (kg/s/m)	Tracimazione di acqua (l/s/m)
C1	20	40	2	2.2	3.2
C2	20	70	2	0.3	0.1
C3	20	40	3	0.8	1.4
C4	20	50	3	0.3	0.7
C5	20	60	3	0	0.1
C6	30	40	2	0.3	1.4
C7	30	50	2	0.5	0.8
C8	30	60	2	0.3	0.1
C9	30	70	2	0	0.1
C10	30	40	3	0	0.2
C11	30	50	3	0	0.2
C12	40	60	2	0.3	0.2
C13	50	40	2	0.5	0.2
C14	50	50	2	0.3	0.2
C15	50	60	2	0	0

## Risultati e discussione

### *Gli effetti sulla tracimazione*

L'analisi di sensitività ha dimostrato che un aumento della larghezza e dell'altezza del ripascimento con ghiaia e un aumento della larghezza del frangiflutti sommerso comportano una diminuzione sia delle tracimazioni di acqua sia delle tracimazioni di ghiaia. Inoltre, i valori di tracimazione suggeriscono che l'effetto di riduzione dovuto all'aumento della larghezza del ripascimento con ghiaia è maggiore rispetto all'aumento dell'estensione del frangiflutti. È emerso anche che, se da un lato il frangiflutti sommerso e il ripascimento con ghiaia risultano entrambi efficaci per diminuire la quantità di ghiaia e acqua tracimante, dall'altro lato l'aumento in uno dei parametri riduce l'efficacia relativa dell'aumento dell'altro. A titolo esemplificativo, la Figura 3 mostra la diminuzione dell'efficacia dell'aumento della larghezza del frangiflutti all'aumentare della larghezza del ripascimento con ghiaia (BW).

Pertanto, quando si lavora con questo approccio di protezione costiera, è imperativo adottare una configurazione che massimizzi l'efficacia congiunta di entrambe le componenti.

### *Effetti sul profilo finale*

La quantità di materiale utilizzato per il ripascimento con ghiaia e la larghezza del frangiflutti sommerso mostrano un impatto diretto sulla posizione della cresta nel profilo finale, il che a sua volta ha grande importanza sul controllo delle tracimazioni di ghiaia sul lungomare (si veda ad esempio Figura 4).

Se il volume del ripascimento con ghiaia non è adeguato a creare una spiaggia sufficientemente ampia, allora la morfodinamica porta alla formazione della cresta in posizione più arretrata in corrispondenza della strada litoranea. Il parametro che maggiormente influenza la posizione della cresta, tra quelli studiati, è la larghezza del ripascimento con ghiaia: all'aumentare di questo, la cresta si allontana dalla strada litoranea.

L'allargamento del frangiflutti sommerso ha mostrato di avere un effetto simile ma con una efficacia molto inferiore rispetto all'allargamento del ripascimento a mantenere la posizione di cresta più lontana possibile

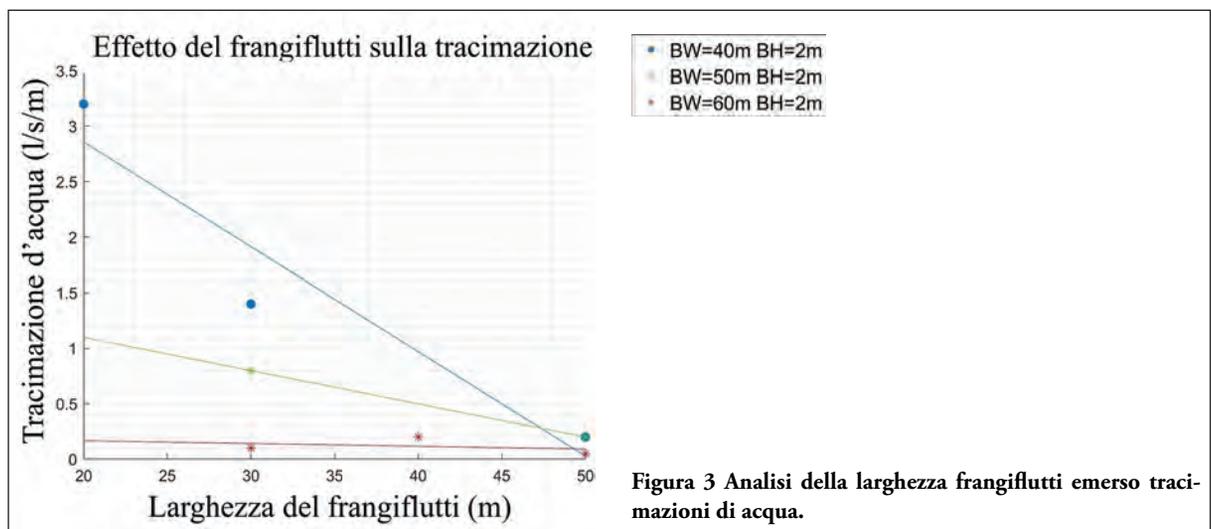
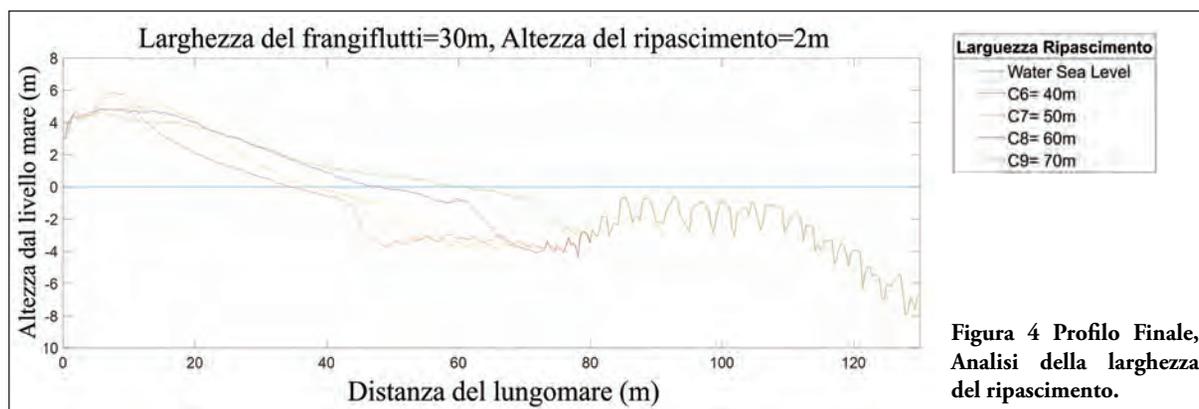


Figura 3 Analisi della larghezza frangiflutti emerso tracimazioni di acqua.

dalla strada litoranea. Inoltre, le configurazioni che includevano un valore elevato della larghezza del ripascimento (BW), in combinazione con un'elevata larghezza della cesta del frangiflutti (BWW) non hanno mostrato la formazione di alcuna cresta. Questo fenomeno può essere dovuto alla grande dissipazione di energia sul frangiflutto ma anche alla mancanza di spazio e di profondità d'acqua tra il frangiflutti e il ripascimento che non consente alle onde interagire con la ghiaia in maniera efficace ai fini della formazione della cresta.

## Conclusioni

Marina di Pisa subisce da più di un centennio forti fenomeni di erosione costiera. Numerose strategie di protezione sono state messe in atto per tutto il XX secolo fino alla costruzione di un muro a scogliera radente la



strada litoranea per circa 2300 m, con estradosso alto circa 4 metri sul livello del medio mare davanti al quale, a distanza di 50-100 m sono stati costruiti 10 frangiflutti emersi a scogliera di lunghezza variabile tra 200 m e 270 m, oggi alti circa 2.0-3.0m e distaccati da varchi di circa 15m. Nel periodo 2003-2007 un primo intervento sperimentale è stato realizzato alle celle 7 e 6 e dopo alcuni anni di monitoraggio è stato esteso anche alle celle 5 e 4. In queste celle (7, 6, 5, 4) i frangiflutti emersi sono stati trasformati in frangiflutti sommersi (circa 0.0-1.0 m sotto il livello del medio mare) e utilizzati in combinazione con un ripascimento in ghiaia 40mm-80mm. Sebbene l'intervento sperimentale alle celle 7, 6 dopo la ricalibrazione del 2006-2007 abbia sempre garantito la protezione delle inondazioni per 16 anni senza nessuna ricarica di materiale, la stessa tipologia di intervento estesa alle celle 5 e 4, con lavori terminati nel 2018, ha mostrato differenti prestazioni. Alla cella 5 il grado di protezione è sostanzialmente confrontabile con quello delle celle 6 e 7 mentre la cella 4 soffre ancora di importanti fenomeni di tracimazione di acqua e ghiaia durante le mareggiate. Per tale cella, l'effetto dei parametri progettuali dei due principali componenti del sistema di protezione (i.e. frangiflutti e ripascimento in ghiaia) sull'attenuazione delle tracimazioni di acqua e ghiaia è stato studiato su un modello fisico in scala ridotta testando in canale marittimo numerose alternative al variare della larghezza e altezza del ripascimento di ghiaia e della larghezza della cresta del frangiflutti sommerso. Le misure sperimentali hanno permesso di quantificare quanto l'aumento dell'estensione sia del ripascimento che del frangiflutti determini minori tracimazioni di acqua e ghiaia sulla strada litoranea. È interessante notare come l'aumento dell'estensione di uno dei componenti sia associabile ad una riduzione della necessità di aumentare anche l'altro componente e pertanto, è possibile sviluppare una configurazione ottimizzata anche sotto il profilo economico. Un'altra evidenza sperimentale interessante è che nel caso di un'ampia estensione sia del frangiflutti che del ripascimento in ghiaia con quest'ultimo che arriva in prossimità del frangiflutti la morfodinamica sotto l'azione dei moti ondosi non porta alla formazione di una evidente cresta di ghiaia post mareggiata. È importante notare che, sebbene l'obiettivo della protezione dalle inondazioni possa essere certamente raggiunto con questo schema di protezione caratterizzato da ripascimento in ghiaia e frangiflutti sommerso, è necessario informare e condividere con la comunità locale l'accettabilità degli effetti caratteristici di questa tipologia di opera di protezione. Per esempio, va accettata la formazione di creste molto alte al termine delle mareggiate più intense e degli oneri connessi con la relativa manutenzione là dove si volesse operare con mezzi di cantiere per abbassare la cresta nei mesi estivi. Infine, deve essere evidenziato che il complesso di ripascimento in ghiaia e frangiflutti sommerso costituisce un'opera finalizzata all'esclusiva difesa idraulica dalle inondazioni dell'abitato di Marina di Pisa.

## Bibliografia

- Aminti L.P., Pranzini E., 2000. *Indagine sperimentale per la ristrutturazione delle difese di Marina di Pisa*. Studi Costieri, 3: 57-70.
- Austin M. J., Buscombe D., 2008. *Morphological change and sediment dynamics of the beach step on macrotidal gravel beach*. Marine Geology, 249(3-4): 167-183.
- Bini M., Casarosa, N., Luppichini, M., 2021. *Exploring the relationship between river discharge and coastal erosion: An integrated approach applied to the Pisa coastal plain (Italy)*. Remote Sensing, 13(2):1-22.
- Buscombe, D., Masselink G., 2006. *Concepts in gravel beach dynamics*. Earth-Science Reviews, 79(1-2): 33-52.

- Cammelli C., Jackson N. L., Nordstrom, K.F., Pranzini, E., 2006. *Assessment of a Gravel Nourishment Project Fronting a Seawall at Marina di Pisa, Italy*. Journal of Coastal Research, II:770–775.
- Cappiotti L., 2011. *Converting emergent breakwaters into submerged breakwaters*. Journal of Coastal Research: 479-483.
- Cappiotti L., Sherman D. J., Ellis J.T., 2013. *Wave transmission and water setup behind an emergent rubble-mound breakwater*. Journal of Coastal Research, 29(3): 694-705.
- Ellis, J.T., Cappiotti L., 2013. *Storm-driven hydrodynamic and sedimentological impacts to an engineered coast*. Journal of Coastal Research, 65 (10065): 1461-1466.
- I.G.M., (n.d.) Geoprodotti. Retrieved October 10, 2022, from [https://igmi.org/it/geoprodotti#b\\_start=0&c4=1145906.03%2C5404546.12%2C1146606.03%2C5405246.12&c4=intersects&c2=%2Ffoto-aeree%2F1942%2Fpdf\\_2400\\_dpi\\_autenticato](https://igmi.org/it/geoprodotti#b_start=0&c4=1145906.03%2C5404546.12%2C1146606.03%2C5405246.12&c4=intersects&c2=%2Ffoto-aeree%2F1942%2Fpdf_2400_dpi_autenticato).
- LABIMA, 2020, August 27. Wave-Current Flume One, [www.labima.unifi.it](http://www.labima.unifi.it).
- Lorang M.S., 2002. *Predicting the crest height of a gravel beach*. Geomorphology, 48(1-3) :87-101.
- Nordstrom K. F., Pranzini E., Jackson N. L., Coli M., 2008. *The marble beaches of Tuscany*. Geographical Review, 98(2): 280–300.
- Pranzini E., Anfuso G., Cinelli I., Piccardi M., Vitale, G., 2018. *Shore protection structures increase and evolution on the Northern Tuscany Coast (Italy): Influence of tourism industry*. Water, 10(11).

**Ricevuto il 23/05/2023, accettato il 28/02/2024**