



CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI

GCC

GIORNALE DEL GENIO CIVILE

VIE D'ACQUA

02

LUGLIO 2026





Giornale del Genio Civile

Rivista registrata presso il Tribunale di Roma n. 55/2026 del 28 maggio 2026
Iscrizione ROC n. 44820 del 02.07.2026
Periodicità quadrimestrale
Anno di pubblicazione: 2026 | Numero 02
Finito di stampare nel mese di luglio 2026

Segreteria

T. +39 06 44123480 | +39 06 44124490
segreteria-gc.cslp@mit.gov.it | consiglio.superiore@pec.mit.gov.it

Editore e proprietario della testata

Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici

Direttore responsabile

Massimo Sessa

Caporedattore

Andrea Ferrante

Coordinatore editoriale e responsabile di progetto

Marina Capocelli

Comitato scientifico

Pietro Ciaravola
Gennaro De Vivo
Alessandro Greco
Marcello Paolucci
Andrea Ferrante

Comitato editoriale

Simone Rossi
Lorenzo R.S. Sanchez
Marco Michelli
Laura Rossini
Azzurra Cappelli
Alessio Salvadori
Maximilian Lombardi
Matteo Bracciale
Maria Chiara De Falco
Claudia Calabretta
Giuseppe Silvestri
Pasquale Cialdini
Marco Del Monte

Segreteria di redazione

Michele Esposito
Aloisia Varvarà
Micol M. Vella
Sara Zangrilli

Grafica e impaginazione

Daria Azzurra Bordin di Daridea

Tipografia

Graphicscalve SpA





	EDITORIALE
4.	La portualità del futuro tra resilienza, territorio e cambiamenti climatici Massimo Sessa
	PREFAZIONE
6.	I porti non possono più aspettare Edoardo Rixi
	ARTICOLO 01
9.	Il contributo culturale dei rapporti tecnici PIANC nel settore dell'ingegneria portuale Maria Chiara De Falco, Andrea Ferrante
	RUBRICA
18.	Osservatorio dei sistemi portuali Assoporti - Associazione Porti Italiani
	ARTICOLO 02
21.	Effetti dei cambiamenti climatici sulle opere marittime: eustatismo e implicazioni progettuali e funzionali Paolo Sammarco, Marco Del Bianco, Piera Fischione, Valerio Trulli
	RUBRICA
32.	Visioni del costruire sostenibile ANCE - Associazione Nazionale Costruttori Edili
	ARTICOLO 03
35.	Il porto virtuale come guida per la pianificazione di efficientamento energetico e competitività Giuseppe Parise
	RUBRICA
46.	Sguardi sul governo del territorio ANCI - Associazione Nazionale Comuni Italiani

	ARTICOLO 04
49.	Strategie di adattamento climatico per la resilienza delle infrastrutture portuali italiane Gianmaria Sannino
	RUBRICA
60.	La parola dell'ingegneria del suo tempo CNI - Consiglio Nazionale degli Ingegneri
	ARTICOLO 05
63.	Porti e aumento del livello marino al 2150: casi di studio in Italia Marco Anzidei, Tommaso Alberti
	RUBRICA
76.	Orizzonti sulle geoscienze delle infrastrutture CNG - Consiglio Nazionale dei Geologi
	ARTICOLO 06
79.	Eventi meteomarini estremi nel Mediterraneo: il ciclone Harry Valentina Laface, Felice Arena
	RUBRICA
88.	La voce della rete infrastrutturale Anas - Gruppo Ferrovie dello Stato
	ARTICOLO 07
91.	Il bacino di carenaggio nel porto di Genova Pasquale Cialdini
	POSTFAZIONE
105.	Il ruolo del Genio Civile tra passato, presente e futuro Federico Cempella
111.	Ringraziamenti



La portualità del futuro tra resilienza, territorio e cambiamenti climatici



Massimo Sessa
Presidente del Consiglio Superiore
dei Lavori Pubblici

Oggi più che mai, in un contesto successivo alla pandemia segnato da scenari in continua trasformazione e da tensioni internazionali, appare evidente il ruolo centrale e strategico dei porti e del trasporto marittimo nel preservare i delicati equilibri globali, anche attraverso la definizione di nuove catene logistiche per l'approvvigionamento di energia e merci.

In Italia, il sistema portuale nazionale si è affermato come un comparto in crescita dell'economia nazionale e i porti rappresentano risorse strategiche di primaria importanza.

Tuttavia, diversamente da quanto avviene in altre realtà europee, nel nostro Paese i porti sono spesso rimasti inglobati nel tessuto urbano, diventando parte integrante della città e, in alcuni casi, collocandosi a diretto contatto con i centri storici. La stretta integrazione di tali infrastrutture nel tessuto urbanizzato rende indispensabile trovare un equilibrio tra le esigenze di autonomia del porto operativo e quelle della città.

Questa situazione è all'origine del complesso rapporto tra pianificazione portuale e pianificazione urbanistica. L'integrazione tra il sistema portuale e quello urbano è, infatti, un obiettivo complesso da raggiungere, in quanto richiede il coordinamento di molteplici fattori: le strategie di sviluppo del porto operativo, le politiche di riqualificazione urbana, le misure per la gestione delle coste, la tutela ambientale (qualità dell'aria e delle acque, smaltimento dei rifiuti, isole di calore e inquinamento acustico) e l'adattamento al cambiamento climatico.

L'aggiornamento delle Linee Guida per la redazione dei Piani Regolatori Portuali, ad opera del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici e licenziato nel maggio 2025, si colloca in questo quadro normativo particolarmente articolato, che ha subito – nello spazio di 20 anni dall'introduzione delle prime Linee Guida (2004) – significativi cambiamenti sia nel processo di pianificazione sia nelle modalità di approvazione dei Piani.

Nel tempo, la normativa ha ampliato gli strumenti della pianificazione portuale: al Piano Regolatore Portuale (PRP) si sono affiancati il Documento di Programmazione Strategica di Sistema (DPSS), la Variante Stralcio (VS) e l'Adeguamento Tecnico Funzionale (ATF). Per il pianificatore portuale, il punto di partenza è la definizione della vocazione e degli obiettivi del sistema portuale, inteso sia nella sua globalità che rispetto al singolo porto che ne costituisce la galassia e degli indirizzi strategici per lo sviluppo sostenibile, nel contesto dello sviluppo regionale, nazionale e internazionale.

Siamo quindi di fronte a un processo che deve tenere in considerazione non solo la ripartizione e la delimitazione delle aree destinate a funzioni strettamente portuali e retro-portuali, ma anche l'interazione tra porto e città e, altresì, i cosiddetti collegamenti infrastrutturali di "ultimo miglio", quelli cioè relativi alle zone circostanti ai porti. Infine, un altro fattore di cui tenere conto, caratterizzante il sistema portuale italiano, è il ruolo centrale che assume il patrimonio storico, archeologico e architettonico proprio delle nostre città portuali, dal momento che tale elemento può essere considerato come un volano in grado di promuovere innovazione e nuove funzioni per la città portuale stessa.

Un approccio multifattoriale consente, quindi, di definire la configurazione di Piano più idonea, sia sotto il profilo tecnico-economico sia sotto quello ambientale, architettonico e archeologico, contemplando gli esiti dello studio dei traffici, capaci di considerare l'evoluzione dei volumi, le tipologie di navi di riferimento, nonché gli effetti sulla terraferma.

La capacità di adattamento delle infrastrutture portuali di fronte agli eventi legati sia ai cambiamenti climatici sia ad altri possibili rischi (tra cui l'invecchiamento infrastrutturale, le calamità naturali, gli eventi di origine antropica e le minacce alla cybersicurezza) si fonda su un processo di analisi virtuoso volto a stabilire la sostenibilità ambientale dell'intervento, in quanto la mitigazione dei cambiamenti climatici e il susseguente adattamento passa attraverso un uso sostenibile delle acque e delle risorse marine, favorendo

un'economia circolare che mira a prevenire e a ridurre l'inquinamento e che protegge e ripristina la biodiversità degli ecosistemi.

Per approfondire la tematica, a nostro avviso tra le più importanti per una pianificazione politica di medio-lungo periodo, non abbiamo solamente cercato di raccogliere i contributi di chi ogni giorno vive e lavora di portualità conoscendone ogni aspetto, ma anche deciso di coinvolgere tutte le associazioni professionali che interagiscono nel settore e, a diverso titolo, ne sono componenti essenziali.

Il proposito è quello di contribuire a far sì che il sistema portuale, per essere competitivo e resiliente, sia capace di assicurare elevati livelli di efficienza e sicurezza, favorendo un'adeguata innovazione e avendo cura della sostenibilità energetica e ambientale.

Buona lettura a tutti!

I porti non possono più aspettare



On. Edoardo Rixi

Viceministro delle Infrastrutture
e dei Trasporti

C'è una domanda che dovremmo porci con maggiore frequenza: come può un Paese al centro del Mediterraneo, seconda manifattura d'Europa e naturale piattaforma logistica tra Oriente e Occidente, non sfruttare pienamente il potenziale dei propri porti?

La risposta non riguarda la geografia. Riguarda l'organizzazione.

Negli ultimi anni i porti italiani hanno dimostrato capacità di crescita, resilienza e adattamento. Hanno affrontato crisi geopolitiche, trasformazioni delle catene di approvvigionamento e una competizione internazionale sempre più aggressiva. Eppure, proprio mentre il mare torna a essere uno dei principali terreni di confronto economico globale, emerge la necessità di compiere un ulteriore salto di qualità.

Da questa consapevolezza nasce la riforma della *governance* portuale che il Governo sta avanzando: non una mera revisione degli assetti esistenti, ma un intervento che punta a rendere il sistema più efficace, moderno e competitivo.

La sfida è semplice da descrivere e complessa da realizzare: far funzionare i porti italiani come un vero sistema nazionale.

Oggi disponiamo di eccellenze riconosciute a livello internazionale. Ma spesso continuiamo a ragionare per singoli scali, mentre i nostri concorrenti si muovono con strategie integrate, coordinando politiche commerciali e sviluppo infrastrutturale. In un mercato globale non vince il porto migliore. Vince il sistema che garantisce efficienza, tempi certi e una visione coerente.

Per questo la riforma punta a rafforzare il coordinamento strategico nazionale senza indebolire il ruolo dei territori. L'obiettivo è quello di mettere in rete competenze, investimenti e progettualità. Serve una cabina di regia per

programmare il futuro della portualità guardando ai prossimi 20 anni, non alle prossime scadenze amministrative.

Per il mondo dell'ingegneria e delle infrastrutture questo passaggio ha un valore particolare: la competitività dei porti si misura innanzitutto nella capacità di trasformare le esigenze del mercato in opere concrete.

Significa realizzare nuovi collegamenti ferroviari, adeguare fondali e banchine alle navi di nuova generazione, sviluppare terminal sempre più efficienti e integrare porto e retroporto in un'unica piattaforma logistica. Significa accelerare la realizzazione di opere strategiche la burocrazia e facendo programmazione di qualità.

Non solo cemento e acciaio: la transizione energetica sta ridefinendo il ruolo degli scali marittimi. L'elettrificazione delle banchine, i nuovi carburanti per il trasporto navale, le infrastrutture per la decarbonizzazione e la produzione energetica renderanno i porti nodi sempre più rilevanti per la sicurezza energetica nazionale.

Allo stesso tempo, la digitalizzazione sta cambiando radicalmente il modo di gestire merci, traffici e procedure. La competitività si gioca sempre di più sulla capacità di condividere dati, integrare sistemi, semplificare processi.

La riforma nasce anche per accompagnare questa trasformazione. Abbiamo scelto di costruirla attraverso il confronto con le Autorità di Sistema Portuale, con gli operatori del *cluster* marittimo, con il mondo produttivo e con le rappresentanze territoriali.

Perché una riforma destinata a durare deve essere una riforma condivisa. Il Parlamento avrà un ruolo centrale nel perfezionarla e rafforzarla.

Non è più rinviabile il cambio di prospettiva. Per troppo tempo abbiamo considerato i porti come infrastrutture importanti soprattutto per gli addetti ai lavori. Non è così:

poiché dai porti passa una parte decisiva della competitività italiana.

La riforma nasce da qui, cioè dalla convinzione che il mare non sia un settore come altri, ma una delle grandi leve strategiche del Paese.

Se l'Italia vuole tornare a crescere sfruttando pienamente la propria posizione nel Mediterraneo deve dotarsi di una portualità all'altezza delle sfide globali. Le rotte che attraversano i nostri mari non aspettano nessuno. E il futuro, come le navi, attracca soltanto nei porti che sono pronti ad accoglierlo.



ARTICOLO 01

IL CONTRIBUTO CULTURALE DEI RAPPORTI TECNICI PIANC NEL SETTORE DELL'INGEGNERIA PORTUALE

Autori

Maria Chiara De Falco

Segretario di PIANC Italia

Andrea Ferrante

Presidente della Sezione Speciale
del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici

Le infrastrutture portuali rappresentano sistemi complessi nei quali si intrecciano esigenze di sicurezza, efficienza operativa, sostenibilità ambientale, intermodalità e integrazione con il territorio.

In questo scenario, i documenti tecnici elaborati da PIANC - The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, offrono alla comunità internazionale indirizzi di buona pratica fondati sul confronto tra esperti, progettisti, gestori e operatori del settore. L'articolo illustra il contributo di PIANC alla cultura tecnica delle infrastrutture marittime, soffermandosi su due recenti "report" della Maritime Navigation Commission: il report del Working Group 167, dedicato alla progettazione dei terminali Ro-Ro e Ro-Pax, e il report del Working Group 211, relativo alla progettazione, alla produzione e alla prova dei sistemi di parabordi.

I due documenti, pur riferendosi a ben diverse tematiche progettuali, condividono una medesima impostazione: considerare l'interfaccia nave-terra come luogo critico nel quale la qualità della progettazione incide direttamente sulla sicurezza, sull'affidabilità e sulla funzionalità dell'opera portuale.

PIANC e la promozione della cultura tecnica nel settore di competenza

PIANC, *The World Association for Waterborne Transport Infrastructure*, costituisce uno dei principali centri internazionali di confronto tecnico nel campo delle infrastrutture marittime, portuali e della navigazione interna. La sua attività si fonda sul contributo di amministrazioni, autorità portuali, gestori, progettisti, università, imprese e specialisti che operano, nei diversi Paesi, nella progettazione, nella gestione e nell'evoluzione delle opere al servizio del trasporto per vie d'acqua. Ne deriva una conoscenza fortemente radicata nell'esperienza applicativa e, proprio per questo, capace di tradurre problemi tecnici complessi in indirizzi operativi utili alla comunità professionale. La produzione tecnica di PIANC si sviluppa attraverso commissioni permanenti e gruppi di lavoro internazionali: le commissioni coprono navigazione marittima (MarCom), navigazione interna (InCom), ambiente (EnviCom) e navigazione da diporto (RecCom); i Working Group (di seguito WG) riuniscono esperti di

Paesi diversi e producono *technical report* dedicati a temi specifici, nei quali lo stato dell'arte, il confronto tra pratiche operative, le criticità ricorrenti e i criteri di buona progettazione vengono organizzati in forma sistematica.

Questi documenti si collocano in uno spazio intermedio tra esperienza professionale, ricerca applicata e pratica tecnico-amministrativa: essi rappresentano riferimenti autorevoli costruiti dal basso, attraverso il contributo di chi opera quotidianamente nella progettazione e nella gestione delle infrastrutture.

PIANC Italia si colloca in questa rete come riferimento nazionale per la partecipazione italiana alle attività dell'associazione e per la diffusione dei risultati prodotti a livello internazionale, in un Paese nel quale porti, coste, lagune e città portuali costituiscono un patrimonio tecnico e territoriale di primaria importanza.

LA CRESCENTE COMPLESSITÀ DELLE INFRASTRUTTURE PORTUALI

Il porto contemporaneo è un nodo infrastrutturale complesso, nel quale convergono reti marittime, stradali e ferroviarie, flussi logistici internazionali, esigenze di sicurezza, aspetti ambientali e relazioni sempre più strette con la città e con il territorio. In questo quadro, la progettazione delle opere portuali richiede una visione integrata: le banchine, i piazzali, gli edifici di servizio e le connessioni con l'hinterland non possono essere considerati elementi indipendenti. Questa complessità è particolarmente evidente nelle infrastrutture poste all'interfaccia tra nave e terra.

È in questo spazio, fisico e funzionale al tempo stesso che si concentrano alcune delle azioni più delicate: l'accosto della nave, l'imbarco e lo sbarco di merci, veicoli e passeggeri, la gestione dei flussi, la sicurezza delle persone e la continuità dell'esercizio. Progettare correttamente tale interfaccia significa governare un insieme di fenomeni che non sono soltanto strutturali, ma anche operativi, gestionali e ambientali. È proprio in questo ambito che si colloca in modo particolarmente significativo il contributo dei due "report" PIANC qui presentati.

Il terminale Ro-Ro/Ro-Pax come sistema integrato: il report WG 167

Il MarCom WG Report n. 167, *"The Design of Terminals for Ro-Ro and Ro-Pax Vessels"* [1], pubblicato da PIANC nel settembre 2023, è il frutto di un lavoro decennale avviato nel 2013 da un gruppo internazionale di 15 esperti, tra cui ingegneri, operatori portuali e ricercatori provenienti da diverse nazioni. Sostituisce integralmente il precedente WG 11 del 1995 e si propone come riferimento aggiornato per progettisti e gestori di terminali Ro-Ro e Ro-Pax nel mondo.

Il traffico Ro-Ro, acronimo di *"Roll-on/Roll-off"*, identifica una modalità di trasporto marittimo nella quale le unità di carico vengono imbarcate e sbarcate mediante movimenti essenzialmente orizzontali, muovendosi sulle proprie ruote

oppure tramite sistemi mobili temporanei. Il traffico Ro-Pax rappresenta, invece, la combinazione tra modalità Ro-Ro e trasporto passeggeri, tipica di molti servizi traghetto e fast ferry. Nella sua accezione più ampia, il traffico Ro-Ro/Ro-Pax, comprende quindi traghetti con passeggeri e auto al seguito, servizi merci su brevi rotte marittime, trasporti di veicoli commerciali, servizi integrati nelle cosiddette "autostrade del mare". In Italia, tale modalità svolge una funzione strutturale per l'economia e per la coesione territoriale grazie alla flessibilità operativa, alla capacità di adattarsi rapidamente all'evoluzione dei traffici e al ruolo di connessione tra rete stradale, porti e collegamenti marittimi.

LA “NAVE DI PROGETTO”

Uno dei contributi più significativi del WG 167 riguarda l'analisi dell'evoluzione delle navi negli ultimi 60 anni, con implicazioni dirette e concrete sulla progettazione del terminale. I dati raccolti dal gruppo di lavoro, elaborati su un campione di oltre 2.700 navi tratto dal database IHS SeaWeb, mostrano che tra gli anni Sessanta e il 2020 la lunghezza media dei cargo Ro-Ro è cresciuta di oltre il 60% e il dislocamento medio è aumentato di circa il 220%.

Queste cifre traducono conseguenze progettuali immediate. La lunghezza della banchina dipende direttamente dalla lunghezza della nave, poiché la prua o la poppa della nave devono essere allineate con il “linkspan” (ponte di collegamento) o con la rampa di

accesso. Il dislocamento della nave influenza direttamente la progettazione dei parabordi.

Le statistiche disponibili mostrano chiaramente che, negli ultimi decenni, tali sistemi hanno dovuto essere profondamente adeguati, per assorbire le maggiori sollecitazioni associate al forte aumento del dislocamento delle navi. Il pescaggio della nave influisce direttamente sulla profondità da garantire in corrispondenza della banchina. La geometria del linkspan dipende dalla larghezza e dall'altezza del bordo libero: pertanto, la scelta del “design vessel”, la nave di riferimento per il progetto, è il primo e più importante passo nella progettazione di un terminale Ro-Ro.

PARAMETRO	1965-1980	2000-2020	VARIAZIONE INDICATIVA	IMPLICAZIONE PROGETTUALE
Lunghezza fuori tutto	113,0 m	181,5 m	+ 61%	Maggiori lunghezze di accosto; verifica dell'allineamento con rampe e linkspan
Larghezza massima	17,9 m	26,6 m	+ 49%	Maggiori ingombri in accosto; verifica di distanze, fender e geometria dell'accosto
Pescaggio	5,2 m	7,3 m	+ 40%	Adeguamento delle profondità operative richieste nelle aree di accosto e avvicinamento
Dislocamento	7.694 t	24.617 t	+ 220%	Maggiori energie di accosto; verifica di parabordi, ormeggi e struttura di banchina

TAB. 1. SINTESI DELL'EVOLUZIONE MEDIA DELLE NAVI RO-RO MERCI TRA 1965-1980 E 2000-2020 E RELATIVE IMPLICAZIONI PROGETTUALI (ELABORAZIONE SU DATI PIANC MARCOM WG 167, TABELLA 4-1)

Il WG 167 evidenzia anche un'ulteriore complessità nella definizione della nave di progetto. Le navi Ro-Ro e Ro-Pax non possono essere classificate in modo efficace sulla base della sola portata lorda, o “deadweight tonnage” (DWT), parametro più rappresentativo per molte navi da carico convenzionali, ma poco adatto a unità che trasportano veicoli, il cui peso è relativamente basso rispetto al volume occupato. Per queste navi risultano più significative metriche operative quali i “lane metre”, cioè

la lunghezza complessiva delle corsie disponibili a bordo per lo stivaggio dei veicoli, oppure il numero di unità Ro-Ro trasportabili, ad esempio camion, trailer o autovetture. Una valutazione basata prevalentemente sul DWT può, quindi, portare a sottostimare lunghezza, larghezza, dislocamento e requisiti di interfaccia nave-terra, con il rischio di progettare banchine, rampe, linkspan, parabordi e sistemi di ormeggio non adeguati alla flotta attesa e alla sua evoluzione.

IL LINKSPAN

Nei terminali Ro-Ro e Ro-Pax, il linkspan, ovvero la struttura articolata che collega la nave alla banchina, è il cuore funzionale dell'infrastruttura, poiché deve risolvere simultaneamente problemi di natura molto diversa: compensare le variazioni di marea, assorbire i movimenti della nave ormeggiata, garantire le pendenze ammissibili per il transito di veicoli pesanti, sopportare i carichi dinamici del traffico, rispettare i requisiti di sicurezza per i passeggeri.

Il report segnala un fatto tecnico-storico di rilievo: fino alla fine del Novecento, non esistevano standard internazionali per la progettazione dei linkspan.

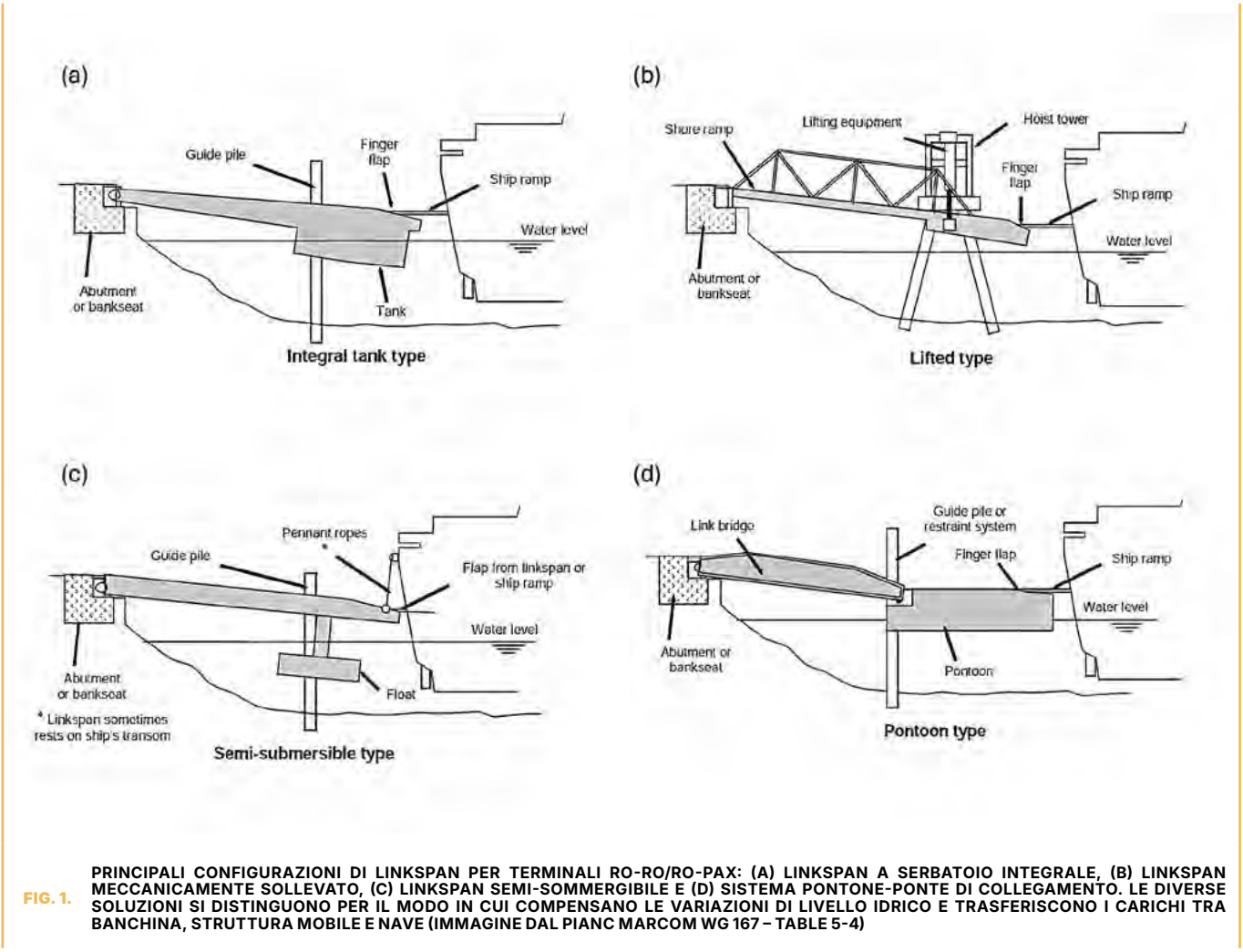
Questa lacuna è stata colmata solo gradualmente, spesso in seguito a incidenti: emblematico è il caso di Ramsgate (1994), dove il cedimento di un linkspan causò la morte di sei passeggeri e numerosi feriti [2 e 3].

I linkspan più grandi sono strutture ingegneristiche di assoluto rilievo, con luci fino a 85 m e pontoni galleggianti di oltre 70 m di lunghezza. Il report descrive le diverse tipologie, come i linkspan sollevati meccanicamente, i linkspan galleggianti, le rampe fisse e le condizioni ambientali e operative che determinano la scelta.

Nei terminali Ro-Ro e Ro-Pax, infatti, l'operatività dell'accosto dipende soprattutto dalla capacità del sistema di accesso nave-terra di mantenere un collegamento funzionale entro le condizioni meteomarine e di livello idrico assunte a base del progetto. Tale intervallo deve essere definito considerando i livelli idrici di progetto, l'escursione di marea, le quote dei ponti veicoli o delle porte passeggeri e le variazioni indotte dalle operazioni di carico, scarico e di zavorramento. In presenza di escursioni di marea significative, la funzionalità

dell'accosto richiede normalmente l'impiego di sistemi regolabili, quali linkspan appunto, o rampe mobili, in grado di mantenere le pendenze e i raccordi entro limiti compatibili con il transito dei veicoli e dei passeggeri. Una rampa fissa può risultare idonea solo quando la variazione dei livelli idrici di progetto è contenuta; in caso contrario, il suo impiego potrebbe comportare la necessità di introdurre specifiche limitazioni operative.

Un aspetto che il WG 167 sottolinea con forza è la criticità della manutenzione: se un linkspan si guasta, l'intera banchina cessa di funzionare. Non esiste ridondanza come nelle gru di un terminal container: questa asimmetria rende la manutenzione programmata, con le relative forniture di ricambi, i manuali operativi, la formazione del personale, una componente strutturale del progetto.



LA DOMANDA DI SISTEMA E LA PIANIFICAZIONE DEL TERMINALE

L'approccio progettuale di un terminale Ro-Ro/Ro-Pax varia in modo sostanziale in funzione del modello operativo che il terminale è chiamato a servire. Nei terminali assimilabili a un collegamento di tipo "Marine Bridge", tipici delle rotte ad alta frequenza e a breve percorrenza, la nave carica e scarica interamente in ogni scalo, i tempi di sosta sono brevissimi, il dimensionamento delle aree dipende direttamente dalla capacità della nave e il progetto ruota intorno alla rapidità del "turnaround". Diversa è la logica dei terminali di tipo "Port Visit", nei quali la nave effettua uno scalo all'interno di una sequenza

più ampia di porti e movimenta solo una parte del carico complessivo. In questo caso i tempi di sosta sono generalmente più lunghi, i flussi risultano meno concentrati e la pianificazione delle aree di attesa, stoccaggio, controllo e circolazione risponde a criteri differenti rispetto ai terminali ad alta rotazione.

La corretta identificazione del modello operativo è, pertanto, essenziale per evitare errori nel dimensionamento dei piazzali, degli accessi, delle aree di accumulo e dei sistemi di gestione dei flussi.

SOSTENIBILITÀ E RAPPORTO PORTO-CITTÀ

Il WG 167 dedica un intero capitolo al rapporto tra il terminale Ro-Pax e la città, riconoscendo che questi impianti, spesso situati in prossimità dei centri storici, operano in un contesto nel quale le dimensioni spaziale, economica, urbanistica, sociale e ambientale si intrecciano con quella infrastrutturale. Il terminale passeggeri può essere una porta d'accesso alla città o un elemento di conflitto con il tessuto urbano: la qualità delle scelte progettuali di localizzazione, di architettura, di connessione con il trasporto pubblico, ha conseguenze che vanno ben oltre la funzionalità portuale.

Nella stessa prospettiva, il report colloca la sostenibilità tra i requisiti evolutivi dei terminali Ro-Ro/Ro-Pax. Intermodalità ferro-mare, elettrificazione dei servizi portuali, adattamento climatico e transizione verso combustibili e sistemi di propulsione a minore impatto emissivo richiedono soluzioni flessibili e orientate al ciclo di vita. La riduzione degli impatti del traffico Ro-Ro deve, quindi, essere affrontata a scala di sistema, includendo le connessioni con l'hinterland e l'organizzazione complessiva della mobilità terrestre [4 e 5].

I parabordi come dispositivi di sicurezza dell'accosto: il report WG 211

Il report MarCom WG 211, "Guidelines for the Design, Manufacturing and Testing of Fender Systems 2024" [6], pubblicato da PIANC nel marzo 2024, affronta la progettazione, la produzione e il collaudo dei sistemi di parabordi, indicati nella terminologia internazionale come "fender system" e costituisce una linea guida completamente nuova. Il documento sostituisce integralmente il precedente WG 33 del 2002 e aggiorna, di conseguenza, le indicazioni in materia di parabordi contenute negli altri report PIANC che a quel documento facevano riferimento [7].

UN MODELLO PIÙ REALISTICO DEL PROCESSO DI ACCOSTO

La principale innovazione concettuale del WG 211 riguarda la rappresentazione del processo fisico dell'accosto. Il documento abbandona il sistema di fattori globali di sicurezza del WG 33, nel quale i margini di incertezza erano incorporati in un unico coefficiente e adotta un approccio a fattori parziali di sicurezza, coerente con gli Eurocodici e con i moderni standard strutturali internazionali. Questo permette di trattare separatamente le diverse sorgenti di incertezza, nella velocità, nel dislocamento, nell'angolo di

La ragione di questo cambiamento radicale è tecnica: il WG 211 adotta una rappresentazione più realistica del processo di accosto rispetto al WG 33, tenendo conto in modo più esplicito della variabilità della velocità di accosto, degli angoli di impatto, del possibile contatto su più parabordi e delle condizioni sito-specifiche. Ne deriva un approccio progettuale diverso, nel quale le incertezze vengono trattate in modo più articolato e il dimensionamento del sistema di parabordi può risultare sensibilmente diverso rispetto a quello ottenuto con le impostazioni precedenti.

impatto, nel comportamento del materiale, e di calibrare i margini di sicurezza in modo più preciso e trasparente. Due fattori del vecchio WG 33 sono stati eliminati sulla base di nuove evidenze sperimentali. Il "Softness factor" (Cs), che nella prassi precedente teneva conto dell'assorbimento elastico dello scafo della nave, è stato rimosso perché ricerche recenti dimostrano che il contributo della nave all'assorbimento dell'energia è inferiore all'1% e, dunque, trascurabile. Il "Berth configuration factor" (Cc) è stato

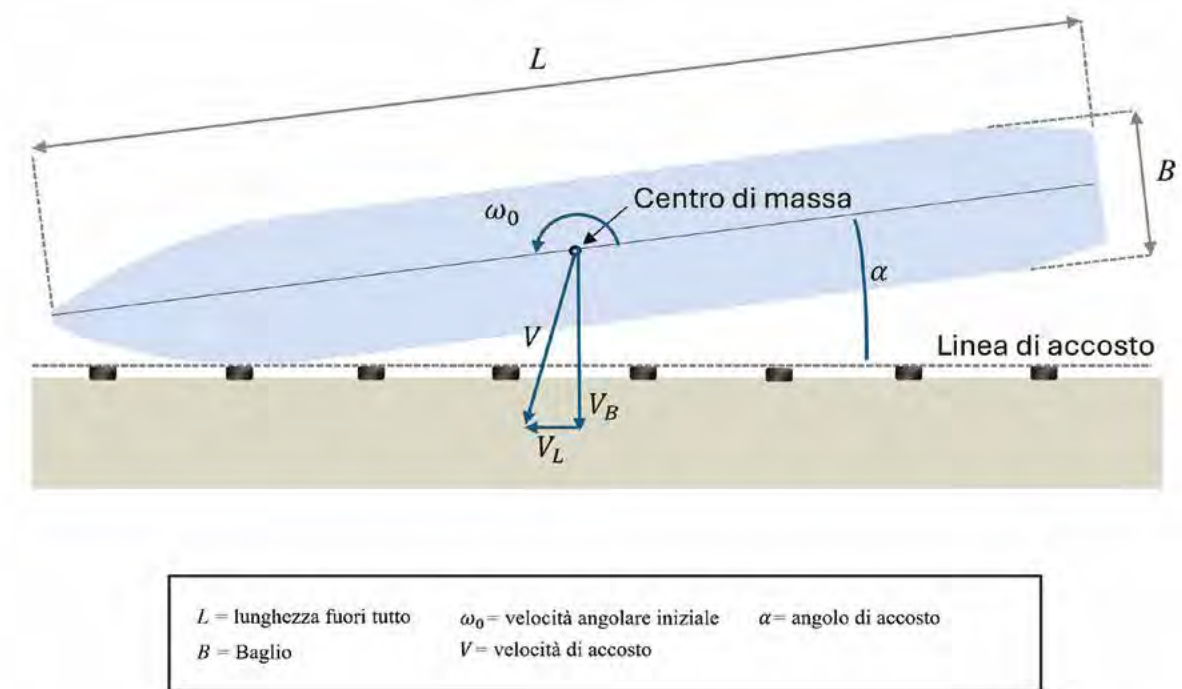


FIG. 2. LO SCHEMA CONCETTUALE DEL PROCESSO DI ACCOSTO DI UNA NAVE VERSO LA BANCHINA (RIELABORATO SULLA BASE DELLA FIGURA 5.1 DEL REPORT MARCOM WG 211)

soppresso perché il suo effetto è già incorporato nei dati di velocità misurati in sito. La rimozione di questi fattori, combinata con la nuova modellazione della velocità, produce

LA VELOCITÀ DI ACCOSTO

La velocità di accosto, per la sua intrinseca variabilità, è il fattore dominante nel dimensionamento del sistema di parabordi più di quanto lo siano il dislocamento della nave, l'angolo di impatto o le caratteristiche del materiale elastomerico. In presenza di dati sito-specifici, la velocità caratteristica di progetto dovrebbe essere determinata statisticamente, come quella corrispondente a una probabilità di superamento dello 0,02% per singola manovra di accosto, il che equivale alla velocità che statisticamente viene superata una volta ogni 5.000 accosti.

Il WG 211 fornisce tabelle di velocità di riferimento per condizioni di navigazione favorevoli, moderate e sfavorevoli, suddivise per categorie di navi, ma chiarisce che questi valori devono essere usati solo in assenza di informazioni locali. Quando dati di misura, registrazioni di accosto

dimensionamenti che, quando si dispone di informazioni locali, risultano mediamente più contenuti rispetto a quelli del WG 33, a parità di livello di sicurezza.

o esperienza operativa documentata sono disponibili, devono prevalere sui valori tabellari, i quali – basandosi su un *dataset* globale – tendono per definizione a essere conservativi rispetto alle condizioni di un porto specifico. La conoscenza locale non è un'integrazione facoltativa al processo progettuale: il report la identifica come il suo nucleo. Il dialogo con piloti, comandanti, ormeggiatori e capitanerie di porto non è descritto come una buona pratica, ma come una condizione necessaria per un dimensionamento affidabile. Un parabordo progettato ignorando le condizioni operative reali di uno specifico ormeggio può risultare sia pericolosamente sottodimensionato, se le velocità effettive sono più alte delle tabelle, sia inutilmente sovradimensionato, con un conseguente aumento dei costi e delle forze trasmesse alla struttura.

LE CLASSI DI CONSEGUENZA: CALIBRARE L'AFFIDABILITÀ AL RISCHIO REALE

Una delle innovazioni più sostanziali del WG 211 rispetto al WG 33 è l'introduzione di un sistema di classi di conseguenza (A→E) che lega il livello di affidabilità richiesto al progetto alle conseguenze che il guasto del sistema di parabordi può produrre.

La classe A riguarda ormeggi con ridondanza funzionale, nei quali il guasto di un parabordo non compromette l'operatività complessiva. La classe B si applica a ormeggi singoli senza alternative: se il sistema di parabordi non funziona, la banchina è fuori servizio. Le classi C-D-E individuano scenari progressivamente più critici, nei quali il guasto può determinare conseguenze dirette sulla

sicurezza delle persone e, nei livelli più severi, danni socio-economici rilevanti.

Questo sistema permette di calibrare i fattori parziali di sicurezza non in modo uniforme, ma in relazione alla posta in gioco reale. Un parabordo su un molo industriale con più banchine disponibili non richiede lo stesso livello di affidabilità di un parabordo sull'ormeggio unico di un porto traghetti. Rendere esplicita questa calibrazione significa trasferire all'autorità portuale o al gestore del terminale la responsabilità di definire la classe di conseguenza appropriata, prima che il progettista avvii il dimensionamento.

DAL COMPONENTE AL SISTEMA: CICLO DI VITA E SOSTENIBILITÀ

Il WG 211 adotta una visione di ciclo di vita del sistema di parabordi che va dalla specifica tecnica in fase di progetto fino alla dismissione. Il comportamento in esercizio non dipende soltanto dalle prestazioni nominali dell'elemento elastomerico, ma dall'interazione corretta tra gomma, pannello frontale, catene, ancoraggi, rivestimenti a basso attrito, connessioni e struttura di supporto. Il report fornisce indicazioni specifiche per ciascuno di questi componenti, incluse le modalità di prova, le tolleranze ammissibili, le procedure di collaudo in fabbrica e i protocolli di ispezione periodica in esercizio.

La durabilità è trattata con attenzione particolare: la gomma indurisce nel tempo, aumentando la rigidità e, quindi, le forze trasmesse alla struttura. Un sistema di parabordi che supera la propria vita di progetto può apparire integro, ma trasferire forze superiori a quelle per cui la struttura è stata calcolata. Il report raccomanda ispezioni visive annuali e, nei casi critici, la verifica della durezza mediante durometro per rilevare l'invecchiamento del materiale. Il tema della sostenibilità entra esplicitamente nel documento, in coerenza agli



FIG. 3. UNA SUGGESTIVA VEDUTA DEL PORTO DI LIVORNO

obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite. La gomma è un materiale difficile da riciclare; per questo, una corretta progettazione dei sistemi di parabordi deve assumere fin dall'inizio una prospettiva di ciclo di vita. Ciò implica estendere, per quanto possibile, la vita utile del sistema, privilegiare materiali durevoli, progettare i componenti metallici in modo da facilitarne la sostituzione e il recupero e considerare l'impronta di carbonio già nella fase di scelta tra alternative. Il documento segnala anche la frontiera emergente del monitoraggio in tempo reale: sensori installati sui parabordi sono oggi in grado di misurare la velocità di accosto, la deflessione, la durata e l'angolo di impatto, trasmettendo i dati al *Cloud* per la gestione remota e l'analisi storica, una prospettiva che trasforma il parabordo da elemento passivo a componente attivo dell'infrastruttura portuale intelligente.

La promozione della cultura tecnica per assumere decisioni più consapevoli

Nel settore delle infrastrutture marittime, la normativa nazionale non può disciplinare in modo esaustivo ogni configurazione progettuale. La varietà dei traffici, delle navi, delle condizioni meteomarine e delle soluzioni operative rende necessario il ricorso a riferimenti tecnici specialistici, riconosciuti e aggiornati. In questo spazio si collocano i report PIANC. Essi non sostituiscono le norme né riducono la responsabilità del progettista. Piuttosto, la supportano, perché offrono una base conoscitiva autorevole sulla quale fondare scelte motivate e verificabili.

Il valore di questi documenti è duplice: da un lato, forniscono indicazioni operative su aspetti molto concreti: il "layout" di un terminale, la geometria di una rampa, il dimensionamento di un sistema di parabordi, l'organizzazione dei flussi, la manutenzione dei componenti. Dall'altro, promuovono una cultura tecnica nella quale l'opera portuale è vista come sistema dinamico, destinato a evolvere nel tempo e a confrontarsi con nuove esigenze di sicurezza, sostenibilità e resilienza.

È questa, in definitiva, la ragione per cui l'attività di PIANC rappresenta un riferimento essenziale per la comunità tecnica. Non perché fornisce soluzioni progettuali predefinite, ma perché aiuta a formulare le domande corrette per la progettazione, indirizzandola. E nelle opere marittime, dove ogni infrastruttura è il risultato di una relazione specifica tra mare, nave, struttura e territorio, la qualità delle domande progettuali è spesso il primo presupposto della sicurezza e della funzionalità.

[1]. PIANC – "The design of terminals for RoRo and RoPax vessels", MarCom Working Group Report no. 167, Brussels, settembre 2023, ISBN 978-2-87223-031-0.

[2]. Health and Safety Executive – "Walkway collapse at port ramsgate: a report on the investigation into the walkway collapse at port ramsgate on 14 September 1994", HMSO, 2000.

[3]. BSI – BS 6349-8:2007 – "Maritime structures – Part 8: Code of practice for the design of Ro-Ro ramps, linkspans and walkways" (2007).

[4]. PIANC – "Guidelines for cruise terminals", MarCom WG 152, Brussels, 2016.

[5]. PIANC – "Sustainable ports, a guide for port authorities" MarCom WG 150, Brussels, 2014.

[6]. PIANC – "Guidelines for the design, manufacturing and testing of fender systems 2024", MarCom Working Group Report no. 211, Brussels, aprile 2024 (Erratum: gennaio 2025), ISBN 978-2-87223-036-5.

[7]. PIANC – "Guidelines for the design of fender systems", MarCom WG 33, Brussels, 2002 (superseded by WG 211).

ASSOPORTI - ASSOCIAZIONE
PORTI ITALIANI

OSSERVATORIO DEI SISTEMI PORTUALI

Questa rubrica è concepita per offrire uno spazio di analisi sull'evoluzione del sistema portuale italiano, esaminandone dinamiche, criticità e prospettive in un quadro in rapido mutamento. In un contesto in cui i porti assumono un ruolo sempre più centrale per la competitività del Paese, tale approfondimento intende fornire una lettura strutturata dei processi in atto, mettendo in relazione infrastrutture, *governance*, innovazione e scenari strategici.

La portualità italiana tra transizione energetica, logistica e competitività globale

Il sistema portuale italiano costituisce uno degli elementi centrali della competitività economica nazionale e della proiezione internazionale del Paese nel Mediterraneo. La posizione geografica dell'Italia, al centro delle principali direttrici commerciali marittime tra Europa, Asia e Africa, assegna infatti ai porti una funzione strategica che supera la dimensione del trasporto merci e passeggeri, incidendo direttamente sulle politiche industriali, energetiche, infrastrutturali e ambientali. Nel 2025, il traffico marittimo globale ha raggiunto circa 13 miliardi di t movimentate, confermando la centralità dello *shipping* nell'economia internazionale. In tale scenario, il Mediterraneo continua a rappresentare uno snodo strategico delle principali rotte commerciali ed energetiche globali.

Negli ultimi anni, il settore ha attraversato una profonda trasformazione: la crescente instabilità geopolitica internazionale, le tensioni nelle catene logistiche globali, la necessità di accelerare i processi di decarbonizzazione e l'evoluzione tecnologica hanno modificato radicalmente il ruolo dei porti, trasformandoli da semplici nodi di transito a piattaforme integrate di servizi logistici, digitali ed energetici.

In questo contesto, il sistema delle Autorità di Sistema Portuale ha assunto un ruolo sempre più rilevante nella pianificazione e nel coordinamento dello sviluppo infrastrutturale dei territori portuali.

La competitività dei porti italiani dipende oggi dalla capacità di affrontare simultaneamente diverse sfide. La prima riguarda il potenziamento infrastrutturale: i porti necessitano di continui interventi di adeguamento dei fondali, ammodernamento delle banchine, efficientamento dei collegamenti ferroviari e stradali, sviluppo dell'intermodalità e realizzazione di infrastrutture digitali avanzate. La qualità delle connessioni retroportuali rappresenta, infatti, uno degli elementi determinanti per la competitività complessiva del sistema logistico nazionale.

In tale prospettiva, il PNRR ha rappresentato un'importante occasione per accelerare investimenti strategici in numerosi scali italiani, con interventi finanziati sia per opere materiali sia per processi di digitalizzazione e semplificazione amministrativa, con l'obiettivo di ridurre i tempi operativi e aumentare l'efficienza complessiva delle catene logistiche. I dati più recenti confermano, inoltre, la resilienza del sistema portuale nazionale: nel 2025, i porti italiani hanno movimentato oltre 510 milioni di t di merci e circa 75 milioni di passeggeri.

Un secondo elemento riguarda la sostenibilità ambientale e la transizione energetica: i porti sono chiamati a svolgere un ruolo fondamentale nel raggiungimento degli obiettivi europei di decarbonizzazione. Ciò comporta la necessità di sviluppare infrastrutture per l'elettificazione delle banchine, favorire l'utilizzo di combustibili alternativi, promuovere l'efficienza energetica e sostenere l'economia circolare nelle aree portuali. L'introduzione del *cold ironing*, ovvero l'alimentazione elettrica delle navi durante la sosta in porto, costituisce uno dei principali strumenti per ridurre le emissioni atmosferiche.

Parallelamente, stanno assumendo crescente rilevanza i progetti legati all'idrogeno, ai biocarburanti, al GNL e ad altre soluzioni energetiche innovative che potranno contribuire alla progressiva decarbonizzazione del trasporto marittimo.

La sostenibilità deve, tuttavia, essere accompagnata da un equilibrio tra esigenze ambientali e competitività economica. È necessario evitare che l'introduzione di nuovi obblighi normativi possa generare squilibri concorrenziali rispetto ai porti extraeuropei, soprattutto nel Mediterraneo, dove il confronto competitivo è particolarmente intenso. In questo senso, la norma c.d. ETS, così come è stata promulgata, risulta dannosa per i porti europei e, in particolare, per quelli del Sud Europa. Per tale motivo è necessario vigilare e seguire con attenzione tutte le proposte normative in Europa, cosa su cui si sta lavorando in associazione.

Le rinfuse liquide e solide continuano, inoltre, a rappresentare una componente essenziale dei traffici marittimi internazionali: secondo le elaborazioni SRM e Assoporti, circa il 74% delle merci trasportate via mare nel mondo è costituito da rinfuse, a conferma della centralità delle materie prime nelle catene logistiche globali. Su tale tipologia di merci occorre tener presente le potenziali implicazioni di una prosecuzione della situazione geopolitica, con particolare attenzione allo Stretto di Hormuz, che potrebbe nuocere all'area adriatica e che rappresenta un hub strategico per lo stoccaggio di terre rare e materie prime critiche. Anche il comparto Ro-Ro e quello crocieristico continuano a mostrare dinamiche positive.

Un ulteriore fattore strategico è la digitalizzazione: i porti del futuro saranno sempre più caratterizzati dall'integrazione dei dati, dall'automazione dei processi e dall'utilizzo di piattaforme digitali interoperabili. La digitalizzazione consente, infatti, di migliorare la gestione dei flussi logistici, aumentare la sicurezza, ridurre i tempi di attesa e rendere più efficiente l'intera catena del trasporto.

In questo quadro, il tema della *cybersecurity* assume un'importanza crescente, poiché i porti costituiscono delle infrastrutture critiche e strategiche per il funzionamento del sistema economico nazionale e necessitano, quindi, di elevati standard di protezione dei dati e delle reti informatiche.

L'Italia si conferma anche tra le principali destinazioni crocieristiche del Mediterraneo e il comparto genera importanti ricadute economiche, occupazionali e turistiche sui territori.

In prospettiva, il rafforzamento della competitività del sistema portuale italiano richiederà una visione strategica di lungo periodo fondata su programmazione, innovazione e cooperazione istituzionale. Sarà fondamentale consolidare il dialogo tra amministrazioni pubbliche, operatori logistici, imprese terminalistiche, comunità territoriali e mondo della ricerca.

I porti italiani si caratterizzano, infatti, non soltanto come infrastrutture di trasporto, ma come veri e propri motori di sviluppo economico, occupazionale e industriale. Investire nella portualità significa investire nella capacità del Paese di affrontare le grandi trasformazioni globali, rafforzando il ruolo dell'Italia nei corridoi logistici internazionali e nella nuova geografia economica del Mediterraneo.



© Consorzio Venezia Nuova

ARTICOLO 02

EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLE OPERE MARITTIME: EUSTATISMO E IMPLICAZIONI PROGETTUALI E FUNZIONALI

Autori

Paolo Sammarco

Ordinario di Idraulica dell'Università degli Studi di Roma Tor Vergata

Marco Del Bianco

Senior Engineer della ModPro Srl

Piera Fischione

Ricercatore RTD di Costruzioni idrauliche dell'Università degli Studi dell'Aquila

Valerio Trulli

Junior Engineer della ModPro Srl

Negli ultimi anni, l'innalzamento del livello del mare o eustatismo (Sea Level Rise – SLR nel prosieguo), dovuto in prevalenza ai cambiamenti climatici, ha assunto una consistenza attuale e previsionale tale da dover esaminarne con urgenza gli effetti sulle fasce costiere.

All'interno delle fasce costiere ricadono le infrastrutture marittime, asset critici per l'economia nazionale e globale. L'aspetto centrale nella progettazione di opere marittime rimane invariato: determinare i livelli del mare di progetto e analizzare, quindi, le forzanti meteomarine che concorrono a dimensionare le opere, valutandone correttamente la geometria e le prestazioni idrauliche e di resistenza.

Mentre ad oggi le strutture in progetto, o recentemente realizzate, già tengono debitamente in conto gli effetti dell'eustatismo, una particolare attenzione va posta al patrimonio delle infrastrutture portuali esistenti.

A questo secondo aspetto sono dedicate le considerazioni di sintesi riportate nel presente articolo.

Il livello medio mare e gli incrementi da valutare nel progetto delle opere marittime

Il livello del mare di progetto è determinato principalmente da due componenti concomitanti: la marea astronomica di natura deterministica e la marea meteorologica a variabilità statistica.

Lo studio della marea astronomica – regolata dalla posizione relativa di terra, luna e sole e da altri fattori specifici della posizione geografica del sito – permette di definire il livello medio del mare (l.m.m.), calcolato come media delle oscillazioni di marea su un periodo di 18,6 anni, nonché i valori massimi di alta marea (A.M.) e bassa marea (B.M.).

Per contro, la marea meteorologica presenta una variabilità statistica in quanto forzata dal campo di pressione atmosferica (sovrizzo barico) e dall'azione del vento (*wind setup*). Questo fenomeno assume un'importanza crescente in occasione delle tempeste, contesto in cui si può

sommare – in acque cosiddette intermedie e basse – l'effetto del sovrizzo dovuto al moto ondoso frangente (*wave setup*). L'insieme di tali contributi determina il sovrizzo di tempesta (*storm surge*), la cui caratterizzazione in fase di progetto è fondamentale ai fini della funzionalità e dell'integrità dell'opera e, quindi, anche alla sua vulnerabilità.

A queste due componenti, oggi si sovrappone il fenomeno del Sea Level Rise (SLR). Come mostra lo schema di Fig. 1, il SLR determina un innalzamento permanente del livello medio mare e, pertanto, a parità di sovrizzo di tempesta, contribuirà a generare in futuro un livello estremo di progetto più elevato.

Diventa, dunque, essenziale prendere in esame queste proiezioni per verificare la vulnerabilità delle opere esistenti, che sono state progettate senza tenere conto degli effetti del SLR.

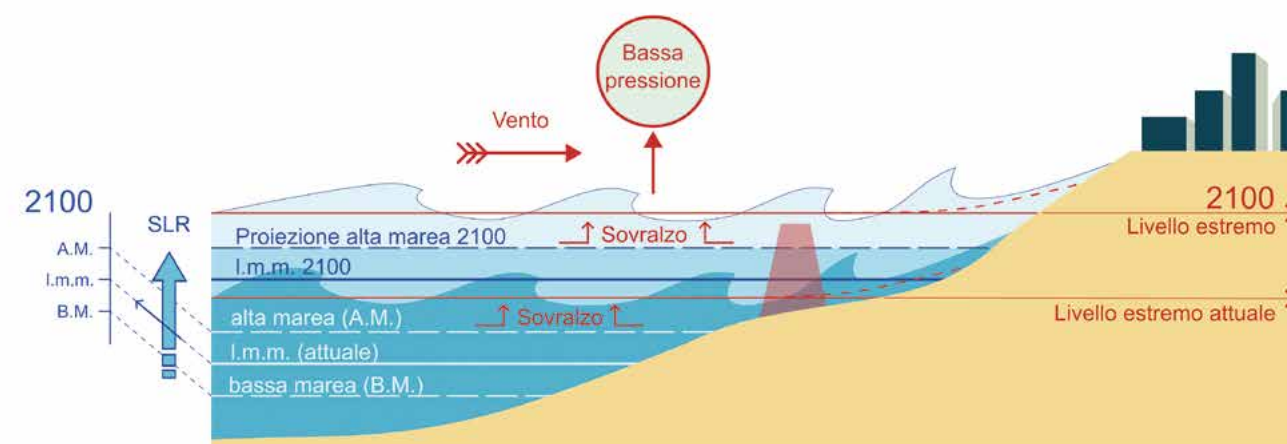


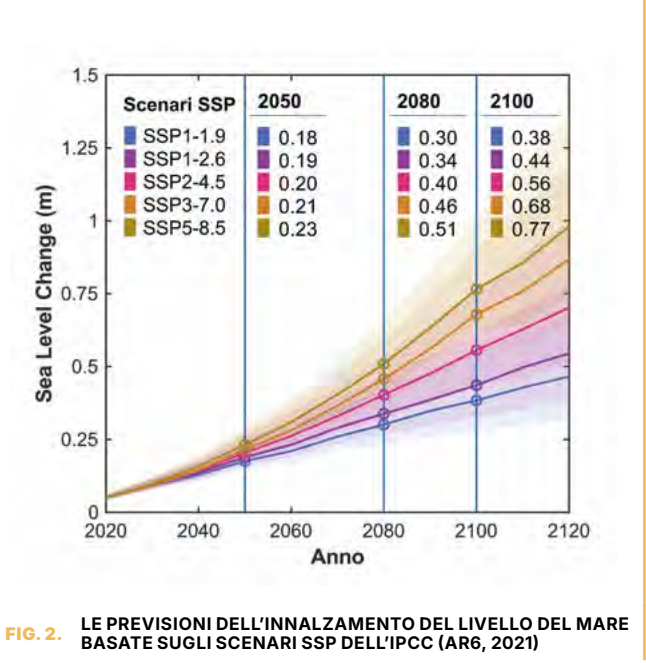
FIG. 1. LE COMPONENTI DEL LIVELLO MARINO E L'EFFETTO DEL SLR SUI LIVELLI ESTREMI DI PROGETTO

Sea Level Rise (SLR): previsioni e scenari

Le proiezioni IPCC [1] indicano, a livello globale, un possibile innalzamento medio del mare nei prossimi 50 anni compreso tra un minimo di +0,3 m (0,23-0,42 m) per lo scenario a basse emissioni di gas serra (SSP1-1,9) e un massimo di +0,5 m (0,42-0,66 m) per lo scenario ad alte emissioni SSP5-8,5 (Fig. 2). Tale orizzonte temporale coincide con la vita utile di progetto tipica della maggior parte delle opere marittime (Tv = 50-100 anni).

Questo incremento, apparentemente modesto, comporta conseguenze significative sulla stabilità, sulla funzionalità e sull'operatività delle infrastrutture esistenti, in particolare per quelle localizzate in specchi d'acqua classificabili come acque basse o medie.

Il SLR dipende da molteplici fattori che concorrono alla complessità del fenomeno: l'espansione termica dell'acqua marina dovuta all'aumento della temperatura globale, lo scioglimento dei ghiacci continentali (Groenlandia e Antartide, cioè di ghiacciai sovrastanti la terraferma), l'assestamento isostatico e i cambiamenti idrologici locali. Di conseguenza, esso si manifesta in modo geograficamente non uniforme, richiedendo valutazioni specifiche per ogni sito di progetto.



Gli effetti del SLR sulle opere marittime in progetto: la continuità con strutture esistenti

La realizzazione di ampliamenti portuali in continuità con opere preesistenti presenta sfide progettuali specifiche. Nel caso in cui la struttura contigua mostri una manifesta sensibilità nel lungo periodo al SLR, la nuova non dovrà uniformarsi all'esistente, ma tenere conto già dei maggiori livelli. L'adeguamento della struttura esistente potrà essere poi affrontato con gradualità, sulla base degli esiti del monitoraggio dei livelli nel medio-lungo periodo.

L'ammodernamento di una banchina esistente evidenzia come il SLR possa generare conflitti tra i requisiti di funzionalità strutturale e quelli di operatività. Ciò richiede un'attenta valutazione del compromesso ottimale tra proiezione futura e utilizzo presente della struttura in funzione della "nave di progetto": infatti, se da un lato la banchina potrebbe risultare non sufficientemente alta nel medio-lungo periodo a causa del SLR, richiedendo un innalzamento rispetto allo stato attuale, dall'altro l'adozione immediata di una quota maggiore complicherebbe la fruizione da parte di natanti più piccoli nel breve periodo, specialmente laddove i requisiti di funzionalità e rapidità di accosto siano di tipo *mission critical*.

Un esempio semplice ma significativo è offerto dal recente progetto di ammodernamento della "darsenetta" servizi del porto di Gaeta, destinata alle unità della Guardia di Finanza, di lunghezza fuori tutto (LOA) di 25 m. La determinazione originaria della quota di banchina di progetto (+1,50 m s.l.m.m.) non aveva contemplato il SLR ed era correttamente dimensionata sui livelli massimi di marea e *storm surge*.

Le raccomandazioni attuali suggeriscono di considerare un incremento di SLR compreso tra +0,30 e +0,50 m su un orizzonte temporale di 50 anni. Tuttavia, l'adeguamento della banchina alla nuova maggiore quota (+1,80/+2,00 m s.l.m.m.), sebbene necessario per contrastare il SLR, comporterebbe l'incompatibilità con le vedette veloci e velocissime della Guardia di Finanza, le quali necessitano di quote di banchina centrate attorno a +1,20 m s.l.m.m. In questo caso, come in contesti simili, la progettazione deve, quindi, arricchirsi di fronti di accosto e aree di accesso diversificate per tipologia di imbarcazione; un approccio che incrementa la complessità sia tecnica sia gestionale, determinando un'inevitabile perdita di flessibilità nell'allocazione degli spazi portuali.

Gli effetti dell'SLR sulle banchine e pontili esistenti (opere interne): la funzionalità di opere portuali

Le opere portuali esistenti presentano differenti sensibilità al SLR in relazione alla loro tipologia e alle modalità operative. Le banchine per navi Ro-Ro risultano significativamente sensibili, operando generalmente a quote comprese tra +2,0 m e +3,0 m s.l.m.m. Un innalzamento del livello medio mare di 0,5 m riduce la distanza verticale disponibile per le operazioni di carico/scarico, rischiando di compromettere l'accesso dei mezzi rotabili.

Al contrario, i terminal contenitori, caratterizzati da quote di banchina più elevate – da +3,0 m a +5,0 m s.l.m.m. (Fig. 3) –, risentono meno del SLR; tuttavia, i limiti di operatività delle gru di banchina – già spesso al limite di tolleranza per le grandi navi (Ultra Large Container Vessels – ULCV) – in alcuni porti potrebbero imporre la necessità di uno scarico preventivo delle file superiori di container in altri porti dotati di infrastrutture adeguate. I pontili a giorno dei porti commerciali (+2,0÷2,5 m s.l.m.m.) manifestano sensibilità comparabile a quelle delle strutture Ro-Ro, mentre le infrastrutture per le rinfusiere (+3,0÷4,5 m s.l.m.m.) risultano poco o per nulla sensibili.

I porti turistici con pontili fissi rappresentano invece la categoria in assoluto più vulnerabile al SLR. Operando a quote molto basse (+1,0/+1,5 m s.l.m.m.), anche incrementi modesti del livello marino, se combinati con lo *storm surge* ne riducono drasticamente la funzionalità operativa, prospettando scenari non distanti dalla completa sommergenza delle strutture stesse.



FIG. 3. UNA ULCV DA 18.200 TEU ORMEGGIATA IN BANCHINA

PORTI COMMERCIALI		
TIPOLOGIA	QUOTA BANCHINE (m s.l.m.m)	SENSIBILITÀ AL SLR
Ro-Ro	+ 2,0 ÷ 3,0	Sensibili
Contenitori	+ 3,0 ÷ 5,0	Poco sensibili
Pontili a giorno	+ 2,0 ÷ 2,5	Sensibili
Rinfuse	+ 3,0 ÷ 4,5	Poco/nulla sensibili
Navi m.m.	+ 2,0 ÷ 3,0	Sensibili/poco sensibili
PORTI TURISTICI		
TIPOLOGIA	QUOTA BANCHINE (m s.l.m.m)	SENSIBILITÀ AL SLR
Banchine	+ 1,3 ÷ 2,0	Molto sensibili
Pontili	+ 1,0 ÷ 1,5	Molto sensibili (p. fissi)

TAB. 1. LE INDICAZIONI DI MASSIMA SULLA SENSIBILITÀ OPERATIVA DELLE BANCHINE PORTUALI E PONTILI AL SEA LEVEL RISE (SLR)

In Tab. 1 sono riassunte le condizioni di attenzione nel medio-lungo periodo delle diverse tipologie di banchine portuali in funzione della loro destinazione d'uso.

Un cenno sintetico al sistema di protezione della laguna di Venezia (anche detto MoSE, da Modulo Sperimentale Elettromeccanico), una delle infrastrutture più complesse e avanzate per la protezione dalle acque alte nel mondo.

Le paratoie furono già progettate per contenere, oltre al sovrizzo di tempesta, un SLR di +0,6 m e un'onda millenaria quasi statica di ampiezza di 0,7 m (per un totale di +1,3 m rispetto al massimo sovrizzo di progetto), cosicché le paratoie contengano fino a +3,58 m rispetto allo Zero di Punta della Salute (ZPDS), corrispondente a un dislivello massimo mare-laguna a lungo termine di 2,70 m.

In questo scenario, si mantiene comunque un ulteriore franco geometrico del vertice delle paratoie delle diverse schiere variabile tra 2,0 m e 3,4 m (Fig. 4), senza contare l'ulteriore importante riserva ottenibile con angoli di lavoro maggiori, già contemplati nella progettazione.

Mentre quindi il sistema è assolutamente resiliente in termini di contenimento dei livelli massimi raggiungibili, desta interesse e ampio dibattito l'incremento della numerosità dei sollevamenti annuali che dovranno eseguirsi a causa del SLR che incrementerà (a parità di *storm surge*) i giorni di superamento dei livelli di guardia.

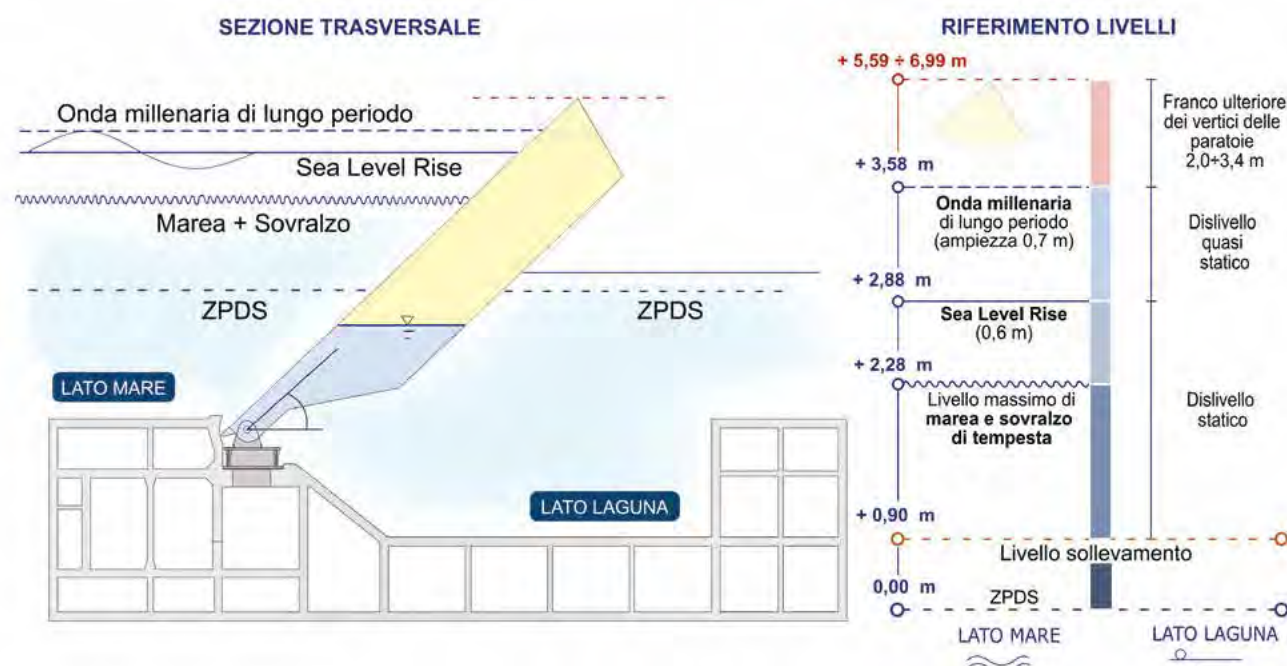


FIG. 4. I LIVELLI DI RIFERIMENTO DELLE BARRIERE MOBILI PER LA SALVAGUARDIA DELLA LAGUNA VENETA: IL SISTEMA È STATO GIÀ PROGETTATO PER CONTENERE ANCHE L'EUSTATISMO (SLR) CON AMPIO MARGINE

Gli effetti del SLR sulle opere esterne a parete verticale

Le dighe a parete verticale sono opere di difesa esterne che ricadono generalmente su fondali a profondità elevate, dove il moto ondoso è non frangente e conserva quindi gran parte della sua energia.

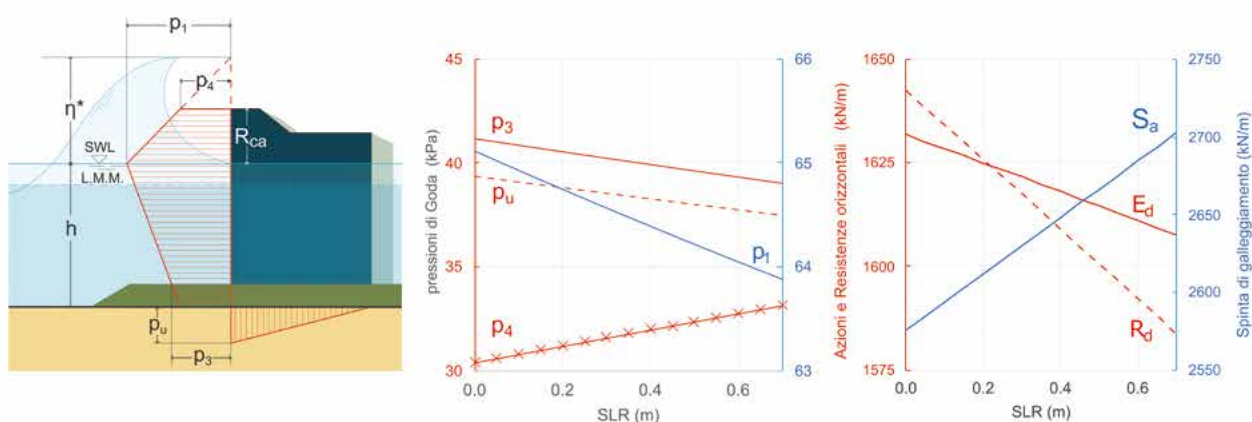


FIG. 5. L'EFFETTO DEL SLR SUI DIAGRAMMI DI SPINTA AGENTI SU UN'OPERA A PARETE VERTICALE E SULLA SUA STABILITÀ A SCORRIMENTO

L'AZIONE DEL MOTO ONDOSO

Le formulazioni di Goda [2] forniscono la distribuzione (trapezoidale) delle pressioni dinamiche generate dal moto ondoso in funzione della profondità al piede, del livello del mare, della geometria dell'opera e delle caratteristiche dello spettro del moto ondoso.

Con l'aumento del livello marino dovuto al SLR, a parità di altre condizioni si verifica una progressiva diminuzione dei valori delle pressioni agenti sulla parete verticale al di sotto del livello di progetto (p_1 , p_3 , p_u) e un incremento della pressione agente in sommità (p_4). La distribuzione delle pressioni di Goda "trasla" così verso l'alto, determinando un calo della spinta orizzontale complessiva (Fig. 5). Questo fenomeno, apparentemente favorevole, è tuttavia accompagnato da un sensibile incremento della spinta di galleggiamento (S_g): l'aumento di S_g riduce il peso efficace

della struttura e, di conseguenza, può compromettere la resistenza allo scorrimento (R_d).

Ad esempio, per un'opera a parete verticale su profondità $h = 17,2$ m con onda di progetto $H_s = 5,0$ m e sovrizzo SWL = +0,80 m, al crescere del SLR la riduzione della resistenza (R_d) è superiore a quella delle azioni orizzontali dovute al moto ondoso (E_d).

Di conseguenza, l'incrocio critico tra le due curve si verifica già in corrispondenza di un modesto valore di SLR pari a +0,20 m: oltre questa soglia, l'azione destabilizzante potrebbe superare quella stabilizzante ($E_d > R_d$), rendendo critica la verifica allo scorrimento e riducendo i necessari margini di sicurezza dell'opera (Fig. 5).

FUNZIONALITÀ: LA PROTEZIONE DAL SORMONTO DEL MOTO ONDOSO

La funzionalità di un'opera a parete verticale è determinata anche dalla limitazione del fenomeno del sormonto del moto ondoso (noto anche come tracimazione o *overtopping*). Assumendo come riferimento le consolidate formulazioni dell'EurOtop Manual [3], le formule mostrano, in estrema sintesi, che le portate di sormonto q (in l/s/m) crescono in modo esponenziale non appena si riduce il rapporto R_{ca}/H_s tra il franco dell'opera R_{ca} (ovvero l'altezza del coronamento rispetto al livello del mare) e l'altezza dell'onda incidente H_s . Ne consegue che il SLR, comportando appunto una riduzione di R_{ca} dovuta all'innalzamento del livello marino di progetto (SWL + SLR), causa un significativo aumento della

portata di sormonto. Questo fenomeno può compromettere la sicurezza e l'operatività delle aree retrostanti (spazi portuali, viabilità, insediamenti), richiedendo di conseguenza interventi adattativi di protezione. Ad esempio, in Fig. 6 si vede l'effetto del SLR sull'opera a parete verticale precedentemente descritta, con quota del coronamento a +8,0 m sul l.m.m., dove il punto A rappresenta la condizione attuale senza SLR e il punto B quella futura con un SLR pari a 0,7 m. L'esame del grafico mostra che già con un SLR di soli +0,2 m l'incremento della portata di sormonto è di circa il 20%, per poi salire al 50% in corrispondenza di un innalzamento del livello medio pari a 0,5 m.

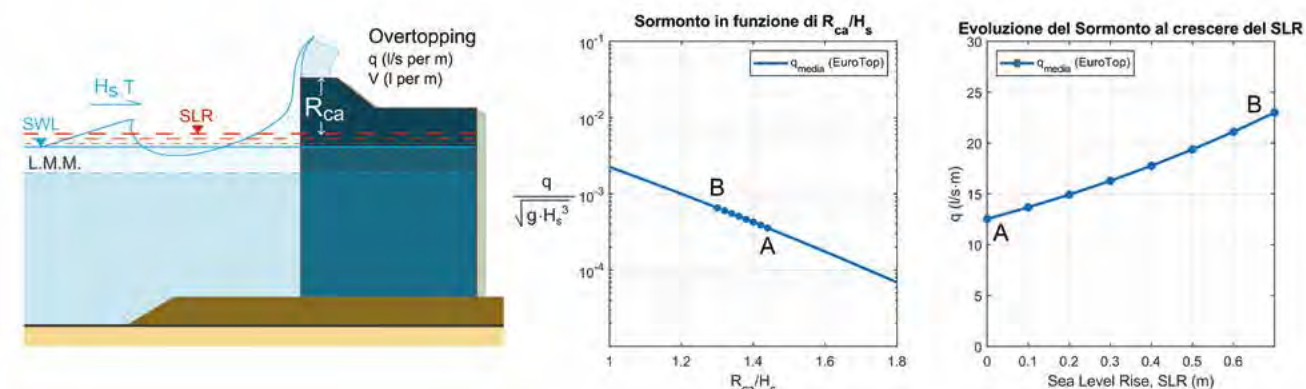


FIG. 6. L'EFFETTO DEL SLR SULLE PORTATE DI SORMONTO PER UN'OPERA A PARETE VERTICALE

Gli effetti del SLR sulle opere esterne a scogliera

L'AZIONE DEL MOTO ONDOSO

Le dighe frangiflutti in massi naturali o artificiali proteggono lo specchio portuale dissipando l'energia del moto ondoso per frangimento sul paramento lato mare.

La formula di Van der Meer [4] fornisce il numero di stabilità $N_s = H_s / (\Delta D_n)$, dove H_s è l'altezza dell'onda di progetto, D_n è il diametro nominale dei massi della mantellata e Δ è la densità relativa sommersa dei massi. Il valore di N_s varia in funzione del parametro di frangimento, della permeabilità della scogliera, del numero di onde della mareggiata e del grado di danneggiamento accettato S_d (inteso come frazione della sezione erosa in occasione dell'evento). Per strutture standard, i valori accettabili di N_s sono compresi tra 1 e 4.

Senza entrare nel dettaglio analitico, si vuole evidenziare che, a parità di condizioni geometriche e meteomarine, se una diga è stata progettata per un'altezza d'onda limitata dal fondale, l'azione del moto ondoso è strettamente legata all'altezza d'onda frangente al piede dell'opera H_{sb} , la quale è funzione della profondità locale h . L'effetto del SLR sarà quello di aumentare nel tempo la profondità al piede h .

Questo incremento determinerà, a parità di onda di progetto al largo, valori di H_{sb} più elevati in corrispondenza della struttura. In altre parole, mentre in assenza di SLR l'onda dissipa la sua energia già prima di giungere sulla scogliera,

il SLR fa sì che la stessa onda dissipi la sua energia in maggiore quota sulla scogliera, con l'effetto di aumentare le sollecitazioni sulla mantellata.

Ciò comporta che le dighe a scogliera esistenti saranno soggette ad un potenziale incremento del grado di danneggiamento S_d . Alcune simulazioni effettuate indicano che già un SLR di +0,20 m comporta un incremento del danno S_d di circa il 15% (Fig. 7), fenomeno che a sua volta amplifica i danni progressivi nel tempo.

Molte dighe a scogliera sono dotate sulla berma di sommità del cosiddetto massiccio di coronamento, su cui si erge sovente anche un muro verticale detto muro paraonde.

Il massiccio e il muro devono essere dimensionati per resistere alle azioni del moto ondoso; in particolare, devono soddisfare le verifiche di stabilità a scorrimento e ribaltamento.

Le formulazioni di letteratura per il calcolo delle azioni [5, 6, 7 e 8] nella loro complessità e articolazione in estrema sintesi relazionano l'entità dei diagrammi di spinta orizzontale e verticale al crescere del rapporto H_s/R_{ca} , cioè tra l'altezza dell'onda incidente di progetto H_s e la quota del coronamento della scogliera R_{ca} rispetto al livello del mare di progetto.

L'effetto del SLR su una diga esistente sarà, quindi, quello di diminuire R_{ca} e di aumentare il rapporto H_s/R_{ca} , cioè di aumentare le azioni dello stesso moto ondoso di progetto, con il rischio di compromettere la stabilità del massiccio o del muro.

Ad esempio, nella Fig. 8 è riportato il caso di un massiccio di coronamento di altezza di 3,0 m (comprensiva del muro paraonde) e base di 4,0 m, con una quota della scogliera di protezione, in assenza di SLR, pari a $R_{ca} = 1,5$ m.

Utilizzando la formulazione di Jensen and Bradbury [5 e 6] si evince che i valori delle spinte orizzontale F_h e verticale F_v si incrementano significativamente rispetto al valore in assenza di SLR (rispettivamente F_{h0} e F_{v0}), registrando un aumento fino al 70% per innalzamento del livello pari a +0,5 m.

Tale aspetto richiede particolare attenzione, soprattutto per strutture datate che talvolta possono essere anche prive di armatura di rinforzo.

FUNZIONALITÀ: LA PROTEZIONE DAL SORMONTO DEL MOTO ONDOSO

Anche per il caso delle dighe a scogliera, le formulazioni dell'EurOtop Manual [3] mostrano che il sormonto aumenta in modo esponenziale al diminuire del rapporto R_{ca}/H_s . Similmente a quanto previsto per le azioni del moto ondoso sulla mantellata, si possono verificare due scenari, a seconda che l'onda sia limitata o meno dal fondale. Già nel caso di onda non limitata dal fondale l'effetto del SLR è sensibile (ad esempio, un SLR di +0,20 m comporta un aumento della

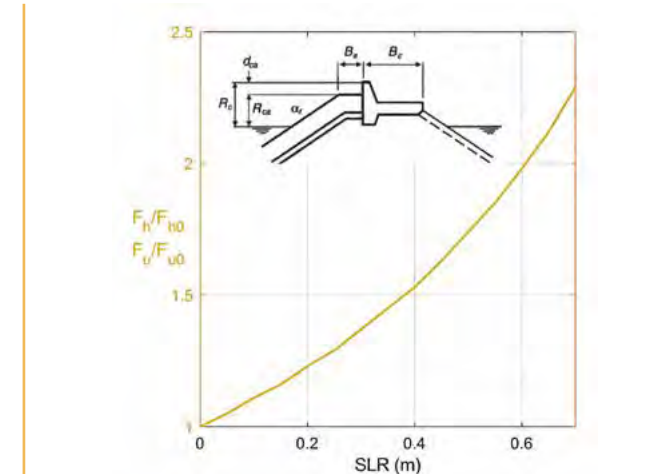


FIG. 8. L'EFFETTO DEL SLR SULLE AZIONI DEL MOTO ONDOSO SUI MASSICCI DI CORONAMENTO DELLE OPERE ESTERNE A SCOGLIERA

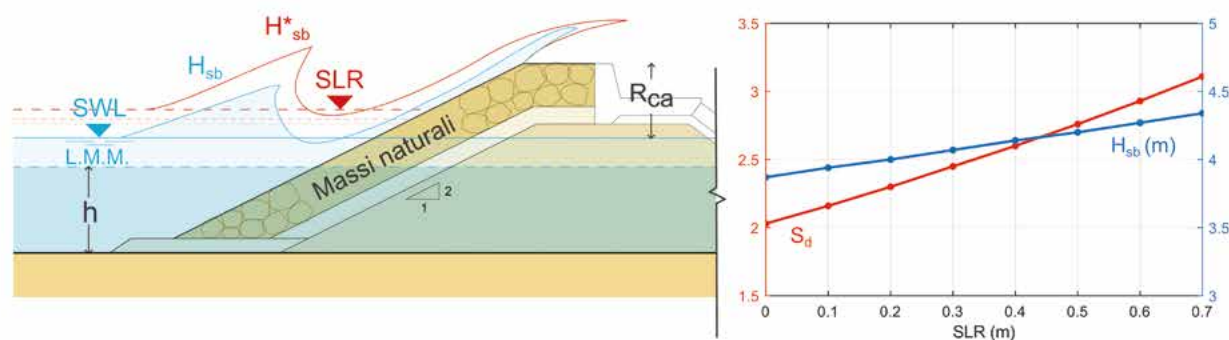


FIG. 7. L'EFFETTO DEL SLR SULLA STABILITÀ DI UNA SCOGLIERA CON ONDA LIMITATA DAL FONDALE: AL CRESCERE DEL SLR AUMENTA L'AZIONE SULLA SCOGLIERA ED IL RELATIVO GRADO DI DANNEGGIAMENTO



FIG. 9. IL CASSONE DI TESTATA DEL PORTO TURISTICO DI MARINA DI PISA (PI)

Le strategie di adattamento per le infrastrutture esistenti

La resilienza delle infrastrutture marittime rispetto al SLR richiede interventi specifici, differenziati per tipologia di diga (a parete verticale o a gettata) e localizzazione geografica.

Per le dighe frangiflutti a gettata gli interventi principali, volti ad un aggiornamento delle prestazioni dell'opera in termini sia di funzionalità che di stabilità, includono

(Fig. 10): l'aggiunta di strati di mantellata più robusti e pesanti e l'aumento della quota R_c (interventi di tipo a e b), la diminuzione delle pendenze per aumentare i fenomeni di dissipazione dell'onda sulla scogliera stessa (tipo c), la costruzione di berme protettive soffolte al piede (tipo d) fino alla realizzazione di dighe sommerse distaccate che riducono l'energia del moto ondoso incidente (tipo e).

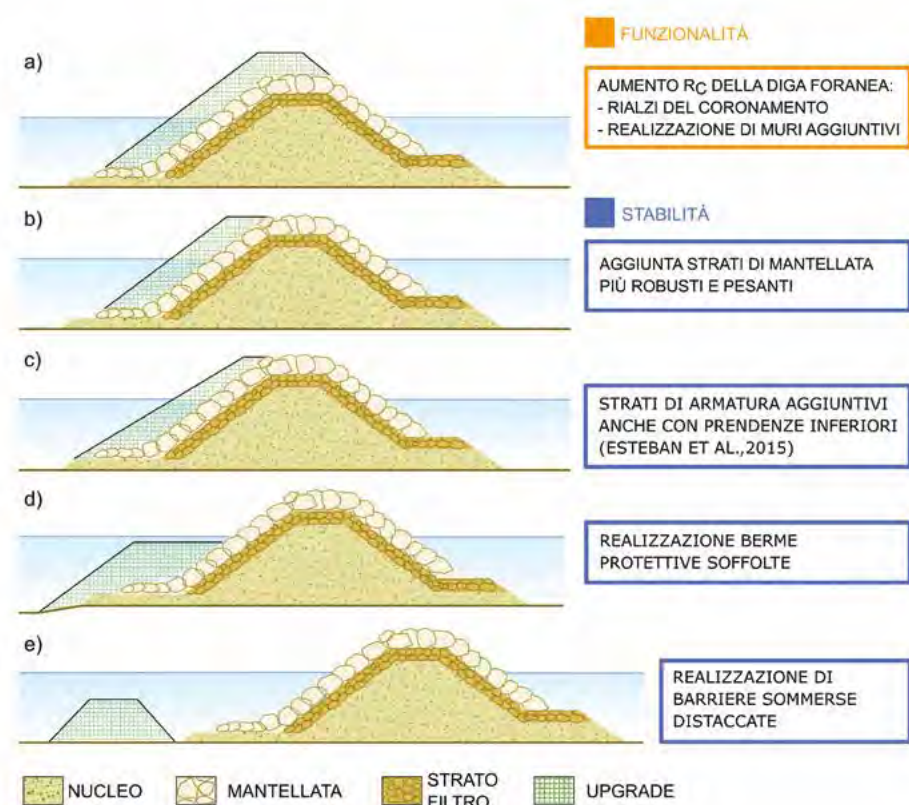


FIG. 10. LE TIPOLOGIE DI INTERVENTI SULLE OPERE A SCOGLIERA PER ADEGUARSI AL SLR SIA IN TERMINI DI STABILITÀ (TEMATISMO CELESTE) CHE DI FUNZIONALITÀ (TEMATISMO ARANCIONE). RIADATTAMENTO DA [9, 10, 11 E 12]

Conclusioni e prospettive future

L'analisi degli effetti del SLR sulle opere marittime esistenti evidenzia una realtà complessa e differenziata, dove l'importanza del fenomeno dipende dalla tipologia, dalla localizzazione geografica, dalla profondità al piede dell'opera e dai requisiti funzionali richiesti.

Le infrastrutture portuali interne (banchine e pontili) esistenti mostrano una sensibilità variabile: i porti turistici, con strutture fisse, potranno risultare criticamente vulnerabili dal punto di vista della funzionalità e dovranno essere oggetto di adeguamenti strutturali in termini di quote,

che potranno essere attuate con gradualità nel medio-lungo periodo. Per i porti commerciali, sono state individuate differenti sensibilità che vanno da "molto bassa" per terminali per rinfuse a una "bassa" sensibilità per i pontili fissi per navi minori e per alcuni approdi per navi militari, fino ad arrivare ad una "significativa" sensibilità per terminal container in relazione alle altezze delle gru e del fenomeno del gigantismo navale.

Per le dighe frangiflutti a parete verticale, il SLR può ridurre – seppur difficilmente compromettere – la stabilità allo scorrimento, ma incrementa progressivamente il fenomeno di *overtopping*. Per le dighe a gettata con onda limitata dal fondale, l'incremento dell'altezza d'onda potrà causare un aumento del grado di danneggiamento (+15% per SLR di +0,20 m) e incrementi esponenziali della tracimazione (+35÷100% a seconda della tipologia), che richiederanno interventi adattativi *ad hoc* ma sempre fattibili. La resilienza complessiva delle infrastrutture marittime è ottima, specie se associata ad una progettazione lungimirante o *forward-looking* che consideri esplicitamente gli scenari futuri di SLR, combinata con strategie di manutenzione proattiva e interventi adattativi graduali e ponderati.

Di fatto, la gestione del fenomeno richiede non solo competenze tecniche di ingegneria e idraulica marittima, ma anche capacità di sintesi, pensiero razionale e deduttivo per valutare compromessi tra diverse esigenze progettuali. L'ingegnere marittimo moderno deve come sempre – e ancor di più in futuro – operare contemporaneamente quale "tattico di regata" e "timoniere", mantenendo flessibilità nelle soluzioni tecniche pur operando in un contesto di vincoli fisici che si preannunciano permanenti.

[1]. IPCC (AR6) – "Climate Change 2021: the physical science basis. contribution of Working Group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change", Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2391 pp., 2021.

[2]. Y. Goda – "New wave pressure formulae for composite breakwaters", Coastal Engineering Proceedings 1 (14): 100, 1974.

[3]. EurOtop – "Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application", J.W. Van der Meer, N.W.H. Allsop, T. Bruce, J. De Rouck, A. Kortenhaus, T. Pullen, H. Schüttrumpf, P. Troch, B. Zanuttigh, <https://www.overtopping-manual.com/>, 2018.

[4]. J.W. Van der Meer – "Rock slopes and gravel beaches under wave attack", Doctoral dissertation, Delft University of Technology, Delft Hydraulics Communication No. 396, 1988.

[5]. O.J. Jensen – "A monograph on rubble mound breakwaters", Danish Hydraulic Institute, 1984.

[6]. A. Bradbury, W. Allsop, R. Stephens – "Hydraulic performance of breakwater crown walls", Report No SR 146, HR Wallingford, 1988.

[7]. F.L. Martin, M.A. Losada, R. Medina – "Wave loads on rubble mound breakwater crown walls", Coastal Engineering, 37(2), 149-174, 1999.

[8]. J. Pedersen – "Wave forces and overtopping on crown walls of rubble mound breakwaters: an experimental study", Aalborg Universitetsforlag, 1996.

[9]. T. Koftis, P. Prinos, P. Galiatsatou, T. Karambas – "An integrated methodological approach for the upgrading of coastal structures due to climate change effects", in Proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, The Netherlands (vol. 28), 2015.

[10]. M. Esteban, H. Takagi, N.D. Thao, L. Yamamoto – "Stability of shallow rubble mound breakwaters under climate change induced Sea Level Rise", in Handbook of Coastal Disaster Mitigation for Engineers and Planners (pp. 675-696), Butterworth-Heinemann, 2015.

[11]. N. Chini, P.K. Stansby – "Extreme values of coastal wave overtopping accounting for climate change and Sea Level Rise", Coastal Engineering, 65, 27-37, 2012.

[12]. P. Galiatsatou, C. Makris, P. Prinos – "Optimized reliability based upgrading of rubble mound breakwaters in a changing climate", Journal of Marine Science and Engineering, 6(3), 92, 2018.

A cura di

Piero Petrucco

Con questa rubrica approfondiamo e analizziamo il rapporto operativo tra cantiere e territorio, esaminando i processi costruttivi, la gestione delle interferenze, l'innovazione tecnica e gli impatti sulle trasformazioni urbane e infrastrutturali, includendo aspetti di pianificazione, sostenibilità e coordinamento tra attori pubblici e privati: un osservatorio sulle pratiche che guidano l'evoluzione del costruire in Italia.

ANCE - ASSOCIAZIONE NAZIONALE
COSTRUTTORI EDILI

VISIONI DEL COSTRUIRE SOSTENIBILE

I porti come infrastrutture strategiche per la crescita del Paese

Suona ormai banale affermare che l'Italia è una nazione profondamente legata al mare: 8.000 km di coste, una posizione strategica al centro del Mediterraneo la rendono uno dei principali snodi naturali dei traffici tra Europa, Asia e Africa. Una ricchezza su cui fare leva sempre di più nelle politiche di sviluppo del Paese per rafforzare le opportunità di crescita economica e la capacità competitiva del sistema Italia nel confronto con i partner europei. In un quadro di enormi potenzialità, infatti, i porti non sono soltanto infrastrutture di trasporto, ma asset strategici fondamentali per la competitività industriale, logistica ed economica dell'Italia. Per il settore delle costruzioni, rappresentano uno degli ambiti più rilevanti in cui si misurano capacità progettuale, qualità realizzativa e di innovazione infrastrutturale.

Il sistema portuale italiano assicura ogni anno la movimentazione di una quota importante del commercio internazionale e l'accesso a oltre 70 milioni di passeggeri. Attorno ai porti si sviluppano filiere produttive, poli logistici, cantieri, attività industriali e servizi avanzati che generano occupazione, investimenti e valore aggiunto per

interi territori. La qualità delle infrastrutture portuali incide, dunque, in modo diretto sulla competitività del sistema economico nazionale e sulla capacità delle imprese di competere nei mercati globali.

Il trasporto marittimo movimentava oltre l'80% del commercio mondiale e una parte rilevante dell'interscambio italiano transita attraverso i porti: ne deriva che l'efficienza del sistema portuale non è una variabile settoriale, ma un fattore strutturale di competitività per l'intero sistema produttivo. Infrastrutture adeguate, moderne e ben connesse rappresentano un moltiplicatore di crescita, mentre inefficienze logistiche si traducono immediatamente in maggiori costi per le imprese e perdita di competitività internazionale. Eppure, nonostante l'importanza del sistema portuale italiano, la sua centralità nel modello trasportistico europeo non è ancora all'altezza delle sue potenzialità. I porti del Nord Europa restano ancora il baricentro dei traffici marittimi europei, anche in virtù dell'integrazione con grandi corridoi ferroviari transeuropei e di uno straordinario sistema di retroporti industriali.

Per questa ragione, la modernizzazione dei porti è una priorità strategica delle politiche infrastrutturali del Paese. Il tema non riguarda soltanto il potenziamento delle banchine o dei terminali, ma una visione sistemica che integri reti ferroviarie, collegamenti stradali, interporti, logistica avanzata e rigenerazione delle aree produttive e urbane connesse agli scali marittimi. La sfida è trasformare i porti italiani da terminali "di arrivo" a piattaforme logistiche europee, rafforzando l'intermodalità, la digitalizzazione e le connessioni.

Negli ultimi anni, anche grazie al PNRR, il comparto delle costruzioni ha dimostrato di essere un attore centrale nella stagione della trasformazione infrastrutturale del Paese, contribuendo alla realizzazione di opere complesse e strategiche. Tuttavia, per consolidare questo ruolo, è indispensabile garantire continuità nella programmazione degli investimenti e stabilità del quadro regolatorio, evitando discontinuità che rischiano di rallentare la capacità realizzativa del sistema. L'attuale modello portuale italiano, fondato sulla collaborazione tra pubblico e privato, rappresenta una base solida per lo sviluppo del settore: tuttavia, per esprimere pienamente il proprio potenziale, richiede un rafforzamento della *governance*, una maggiore semplificazione procedurale e un incremento della certezza normativa. La velocità di attuazione degli interventi infrastrutturali è oggi un fattore competitivo decisivo.

In questa prospettiva il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza e il Piano Nazionale Complementare hanno rappresentato un passaggio fondamentale, dove le risorse destinate alla portualità, alla logistica e alla transizione

ecologica hanno avviato un processo di modernizzazione del sistema infrastrutturale.

Gli investimenti per il potenziamento dei collegamenti ferroviari, la digitalizzazione dei processi logistici e l'elettrificazione delle infrastrutture portuali costituiscono interventi strategici che richiedono un elevato livello di competenza tecnica e una forte capacità esecutiva da parte del settore delle costruzioni. Tra questi, il *cold ironing*, che consente alle navi in banchina di spegnere i motori collegandosi alla rete elettrica, si caratterizza come una delle innovazioni più significative in termini di riduzione delle emissioni e miglioramento della qualità ambientale delle aree portuali.

Parallelamente, gli interventi legati ai cosiddetti *Green Ports* stanno trasformando profondamente il sistema portuale italiano. Attraverso il PNRR sono stati attivati numerosi progetti tra Autorità di Sistema Portuale e operatori terminalistici, finalizzati allo sviluppo delle energie rinnovabili, all'efficientamento energetico e all'elettrificazione delle banchine. Si tratta di investimenti che stanno generando un impatto concreto sul processo di decarbonizzazione e che rappresentano anche un'importante leva di crescita per il settore delle costruzioni. A ciò si aggiunge la necessità di sviluppare nuove infrastrutture dedicate ai combustibili alternativi, come GNL, idrogeno e biocarburanti. La transizione energetica del trasporto marittimo richiede, infatti, un profondo adeguamento degli impianti portuali e nuove competenze progettuali e realizzative, in cui il settore delle costruzioni è destinato a svolgere un ruolo sempre più centrale.

Accanto alla transizione energetica, la digitalizzazione rappresenta un ulteriore asse strategico di sviluppo. La gestione dei flussi logistici richiede oggi sistemi avanzati di raccolta e analisi dei dati, tecnologie predittive e strumenti di monitoraggio in grado di migliorare efficienza, sicurezza e resilienza delle infrastrutture. L'integrazione di modelli digitali avanzati e sistemi basati su intelligenza artificiale consente di ottimizzare la gestione portuale e ridurre i rischi operativi. Insieme alla portualità commerciale e industriale, anche la portualità turistica merita attenzione. Il turismo nautico va ritenuto un settore con importanti potenzialità di crescita e con significative ricadute economiche sui territori costieri: l'ammodernamento dei porti turistici e il miglioramento dei servizi rappresentano un'opportunità concreta di sviluppo per molte economie locali.

Per il settore delle costruzioni questo ambito diviene una sfida industriale importante: investire nei porti significa rafforzare la competitività del Paese, modernizzare le infrastrutture e contribuire alla costruzione di un sistema logistico più efficiente, sostenibile e integrato.



© Daniel Kružík da Pexels

ARTICOLO 03

IL PORTO VIRTUALE COME GUIDA PER LA PIANIFICAZIONE DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO E COMPETITIVITÀ

Autori

Giuseppe Parise

Professore Ordinario di Impianti Elettrici di Distribuzione
e Utilizzazione della Sapienza Università di Roma

Funzionalità, sicurezza, efficienza energetica e continuità del servizio sono elementi caratterizzanti la competitività di un sistema portuale. Tali requisiti, indispensabili da conseguire, identificano il porto virtuale di riferimento per la pianificazione del porto reale, mirata a migliorare la sua competitività ed efficienza energetica e finalizzata a sviluppare adeguate strategie e misure specifiche di attuazione.

Il Piano Regolatore portuale e il Documento di pianificazione energetica e ambientale devono promuovere soluzioni innovative e la riqualificazione continua dello sviluppo effettivo del porto, nel conseguimento di tutti i requisiti minimi del porto virtuale, favorendo un'evoluzione progressiva e coerente con gli obiettivi di medio e lungo periodo. I criteri di sostenibilità devono mirare alla conversione di tutte le infrastrutture portuali a emissioni minime, promuovendo l'utilizzo razionale e coordinato dell'energia e prevedendo anche l'integrazione delle fonti rinnovabili e delle tecnologie emergenti.

L'utilizzo del fabbisogno energetico complessivo e l'intera distribuzione elettrica nell'area portuale devono essere gestiti in un'unica visione integrata, capace di garantire stabilità operativa e un miglioramento continuo delle prestazioni.

Efficienza energetica e sostenibilità nei sistemi portuali

Un sistema portuale competitivo deve garantire elevate prestazioni in termini di funzionalità, sicurezza e qualità dell'energia elettrica, nonché continuità del servizio (*business continuity*). Deve, inoltre, promuovere un'adeguata innovazione nel rispetto della sostenibilità energetica e ambientale.

Il sistema portuale è generalmente caratterizzato da una serie di attività molto diverse tra loro, legate alla tipologia di servizio erogato, con distinti terminal per passeggeri, attività logistiche-commerciali e cantieristiche-industriali. Ciascun complesso di attività richiede principalmente energia elettrica, con alcuni usi ad alta intensità energetica: tali usi richiedono un'accurata previsione dei fabbisogni (a breve e medio termine) e l'adattamento delle infrastrutture interne del porto come sistema di hub di produzione/consumo (*prosumer*).

Si delinea, quindi, una nuova funzione di coordinamento per l'Autorità Portuale, in collaborazione con le diverse parti coinvolte. In tale contesto vengono individuate alcune misure e soluzioni essenziali da adottare in relazione alle tempistiche previste in funzione del tipo di pianificazione o implementazione, quali strategie generali per lo sviluppo di un sistema portuale: una gestione efficiente dei porti a livello energetico-ambientale può, infatti, consentire di perseguire risultati importanti nella riduzione delle emissioni di gas serra, i cui costi per il raggiungimento devono essere incentivati (a tal fine è evidente che, in via preliminare, è

necessario effettuare un inventario delle emissioni di CO₂ del porto, monitorandone l'andamento annuale [1, 2, 3 e 4]).

In ambito energetico, appare indispensabile proporre obiettivi e orientamenti generali da perseguire, nonché le strategie di implementazione e gestione previste.

Con tale obiettivo, la definizione del sistema portuale virtuale deve identificare tutti i requisiti minimi caratterizzanti dal punto di vista energetico e ambientale, per cui può essere assunto come riferimento per confrontare lo sviluppo effettivo del porto [5].

La gestione degli impianti elettrici per sistemi portuali competitivi deve applicare soluzioni avanzate in termini di funzionalità e qualità quali:

- la continuità di esercizio del sistema elettrico;
- l'utilizzo coordinato di tutte le utenze elettriche del porto;
- un'adeguata integrazione della generazione distribuita (come parchi eolici *offshore*, impianti fotovoltaici, sistemi di accumulo, stoccaggio di idrogeno);
- una maggiore automazione delle banchine per promuovere un elevato livello di produttività;
- la disponibilità di personale tecnico qualificato indipendentemente dal livello di automazione dei servizi;
- la previsione di attrezzature innovative (come gru e veicoli di ultima generazione, container refrigerati avanzati, volani, supercondensatori [6, 7 e 8]) e l'adozione delle tecnologie emergenti dell'informazione e dell'energia.

Elementi di base per la pianificazione energetica

Come riferimento virtuale per la pianificazione energetica, si può definire un modello di sistema portuale che presenti le caratteristiche minime di seguito sintetizzate:

- una gestione unica della infrastruttura di rete portuale, coordinata dall'Autorità Portuale;
- l'utilizzo dell'automazione e il controllo di gestione degli edifici, della rete elettrica, dell'illuminazione, degli accessi, della mobilità e dei parcheggi;
- un programma di razionalizzazione dell'uso dell'energia (apparecchi e componenti a basse perdite come trasformatori e illuminazione a LED delle aree portuali, container frigoriferi ad alta efficienza, sistemi di accumulo locali e inverter speciali per gru, ecc.);
- la produzione di energia rinnovabile, con un impatto positivo sull'area urbana (parchi eolici *offshore* e stoccaggio di idrogeno, impianti fotovoltaici su pensiline di parcheggio, sfruttamento del moto ondoso per generare elettricità e bacini di riserva idrica ed energetica);

- la riduzione delle emissioni di CO₂ (*cold ironing*, mobilità sostenibile con sistemi di trasporto elettrico interni per navi da crociera, per veicoli leggeri ad uso turistico, per veicoli di servizio presso terminal commerciali, ecc.).

Quindi, si riportano di seguito attività e studi di interventi da considerarsi essenziali per la pianificazione portuale.

Un'analisi dell'intero fabbisogno energetico del porto, di tutti gli operatori portuali e delle previsioni di aumento del traffico merci movimentato è necessaria in relazione agli obiettivi da perseguire nel periodo di riferimento per la pianificazione. Per lo sviluppo delle funzioni previste per il porto, è fondamentale raccogliere dati sullo stato attuale aggiornato dell'infrastruttura elettrica, sulle caratteristiche della potenza massima utilizzata e sui consumi energetici [9]. In generale, le utenze energivore portuali sono le banchine del *cold ironing* e dei terminal container, così come i parcheggi per container refrigerati.

Pertanto, è necessario prendere in considerazione i progetti previsti per il *cold ironing*, la mobilità elettrica e l'accumulo e stoccaggio di energia. È ipotizzabile un aumento della domanda di elettricità in considerazione dell'elettrificazione dei terminal per la movimentazione dei container: perciò, è indispensabile pianificare l'adeguamento e/o la ristrutturazione dell'infrastruttura elettrica dell'area portuale e il

suo impatto sulla rete di trasmissione elettrica a monte del punto di erogazione dell'energia [9]. La configurazione proposta per la rete di distribuzione portuale deve essere articolata con più sezioni attive alimentate con anelli, gestiti in modo indipendente ma interconnessi a ogni livello di distribuzione e in grado di ripristinare localmente il servizio del sistema rendendolo tollerante ai guasti [10].

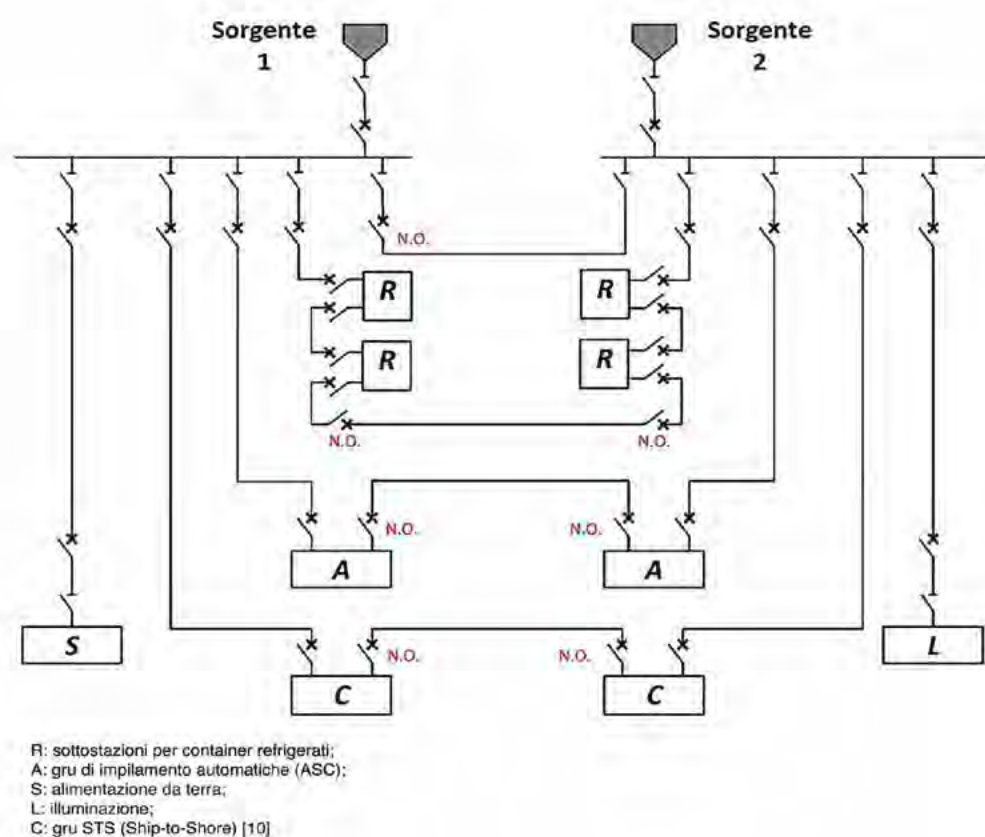


FIG. 1. IL SISTEMA DI DISTRIBUZIONE PER LE AREE PORTUALI DI CARICO

I criteri di progettazione devono, di conseguenza, promuovere una notevole flessibilità per ampliamenti e modifiche di layout, nonché lo studio e lo sviluppo di nuovi componenti adatti a migliorare le prestazioni e l'efficienza.

L'architettura del sistema di distribuzione dell'energia elettrica deve essere strutturata con una complessità crescente che consenta di soddisfare le esigenze di alimentazione del sistema intervenendo sia sulle fonti di energia sia sulla configurazione della rete con configurazioni ad anello e interconnessioni.

In pratica, la distribuzione elettrica interna di un porto può essere suddivisa in tre reti:

- una rete di distribuzione in media tensione con un anello primario;
- una rete con anelli secondari in tutti i settori;
- la rete terziaria di sistemi locali con livelli di tensione media speciali (come 3, 6, 11, 27 kV) e livelli di bassa tensione (400 V, 1 kV).

La configurazione delle tre reti consente di superare situazioni di guasto, di limitare e recuperare il degrado/la riduzione

dell'"integrità" e di effettuare interventi di manutenzione durante il normale funzionamento.

Tale sistema di distribuzione partizionato facilita la previsione di piani operativi stagionali/giornalieri con molteplici scenari di utilizzo, ottenendo i migliori risultati grazie allo sviluppo delle ICT (Information and Communication Technologies – Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione) [11].

Per razionalizzare e promuovere il coordinamento degli interventi per la realizzazione delle opere, nella mappatura delle infrastrutture, è indispensabile prevedere le aree di installazione essenziali, gli alloggiamenti e le ubicazioni dei vari servizi. Infatti, a titolo di esempio, è importante definire gli alloggiamenti per le linee elettriche in cavo necessari per la distribuzione alle varie aree di attività, per l'alimentazione di servizi comuni come l'illuminazione e per le reti di telecomunicazione.

Occorre, pertanto, prevedere aree idonee per l'ubicazione delle sottostazioni di distribuzione dell'energia elettrica e spazi adeguati per i servizi tecnologici. È sostanziale poi considerare i problemi di connessione con la rete di trasmissione principale, generalmente non situata nelle immediate vicinanze: occorre così prevedere la disponibilità di aree per la costruzione di sottostazioni primarie dedicate e la possibilità della loro interconnessione.

La necessità di uno standard internazionale per il *cold ironing* come l'IEC/ISO/IEEE 80005-1 [12] deriva dal fatto che la circolazione navale è globalizzata e un porto deve essere in grado di alimentare le navi a 60 Hz e 50 Hz.

La Fig. 2 mostra un sistema di alimentazione da terra a nave che in Europa consente di alimentare le navi tramite un convertitore a una frequenza di 60 Hz o direttamente a 50 Hz dalla rete elettrica [13].

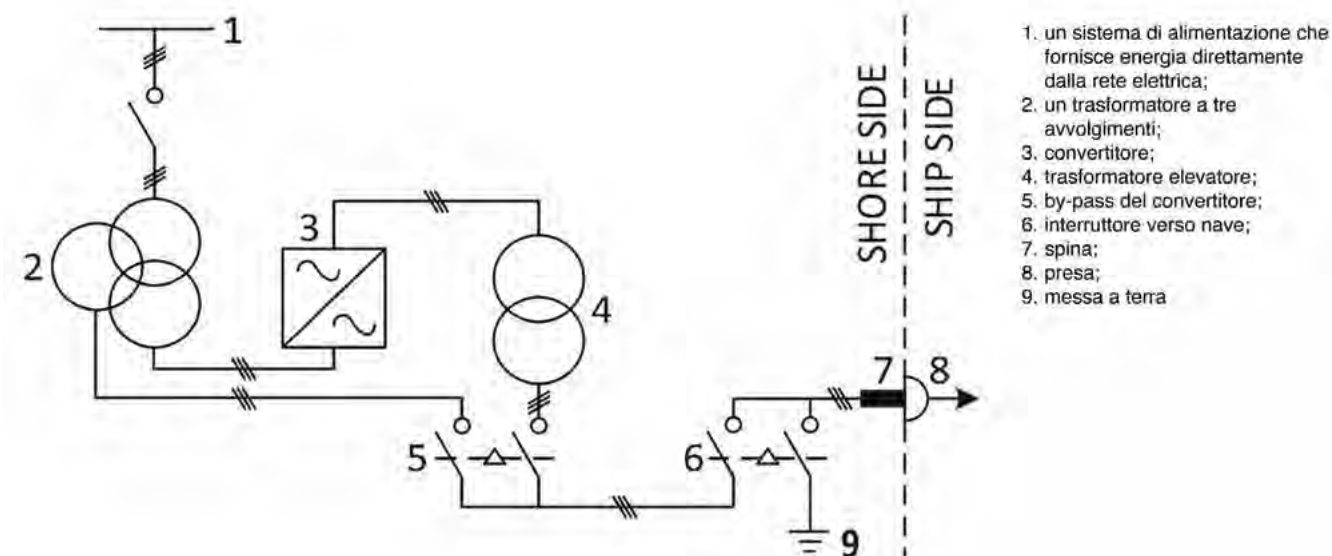


FIG. 2. UN SISTEMA DI ALIMENTAZIONE DA TERRA A NAVE CHE CONSENTE DI ALIMENTARE LE NAVI TRAMITE UN CONVERTITORE A UNA FREQUENZA DI 60 HZ O DIRETTAMENTE A 50 HZ DALLA RETE ELETTRICA [13]

Un problema attuale è l'indisponibilità di convertitori capaci di alimentare direttamente alla tensione di bordo, che richiedono, quindi, la necessità di un abbassamento della tensione all'ingresso del convertitore e all'uscita un suo innalzamento al valore della nave alimentata. Va notato che la tecnica del *cold ironing* può essere resa efficace se imposta per legge o se il costo dell'energia fornita da terra è paragonabile al costo dell'energia prodotta a bordo.

I parcheggi per container refrigerati [14] e i parcheggi per veicoli di ricarica si presentano come carichi uniformemente distribuiti e richiedono un'architettura "modulare". Questo perché la modularità dei sistemi di distribuzione facilita, di fatto, le operazioni di installazione e manutenzione. La ripetibilità dei componenti, combinata con l'unificazione degli standard, può ridurre i costi di sostituzione e stoccaggio.

Nella gestione del sistema elettrico, si rende obbligatorio creare un protocollo di archiviazione dati e una gestione informatizzata dei dati derivanti dalle attività di manutenzione.

L'assistenza tecnica qualificata per gli interventi ordinari e di emergenza deve integrarsi, perciò, con le prestazioni del complesso sistema elettrico al fine di garantire la continuità del servizio. Dunque, è necessario personale tecnico qualificato da prevedere in numero adeguato e con le diverse competenze necessarie anche per un uso razionale dell'energia e una gestione ambientale, capace di organizzare e coordinare personale tecnico esterno.

Efficienza energetica e uso razionale dell'energia

Per gli aspetti relativi al contenimento del consumo energetico e all'ottimizzazione dell'efficienza energetica, un obiettivo fondamentale è quello di specializzare, come una rete portuale, le apparecchiature infrastrutturali in ciascun porto.

L'architettura del sistema di distribuzione dell'energia elettrica deve integrare funzionalmente sistemi di generazione locale, sistemi di accumulo-stoccaggio e sistemi di ricarica per veicoli elettrici (Porti Verdi). Deve essere previsto un sistema integrato di supervisione, monitoraggio e controllo con l'obiettivo di ridurre l'energia prelevata dalla rete esterna e autoprodurre parte dell'energia consumata, se i costi e gli oneri complessivi sono proporzionati.

Le linee d'azione includono:

- automazione dei processi;

Di seguito si sintetizzano alcuni requisiti caratteristici fondamentali:

- l'utilizzo di almeno due punti di connessione dalla rete per l'area portuale (per fabbisogni energetici superiori a 10 MW si raccomandano le consegne da sottostazioni primarie in alta tensione);
- l'implementazione di architetture avanzate e variabili, con ridondanza nei componenti e configurazioni dedicate anche nella finalità di garantire l'immunità ai disturbi da carichi distortenti;
- sistemi flessibili e modulari, con strutture che consentono molteplici scenari per la predisposizione di piani operativi;
- una pianificazione della destinazione delle aree portuali per una efficiente distribuzione dei servizi;
- la possibilità di integrare la generazione locale, come la cogenerazione, i parchi eolici *offshore* e i parchi fotovoltaici, e il recupero di energia dal moto ondoso;
- sistemi elettrici convenzionali e non convenzionali (livelli di tensione speciali destinati all'uso portuale, possibili porzioni della rete in corrente continua), un'architettura "modulare" per i sistemi di ricarica per veicoli elettrici, sistemi di accumulo, parchi energetici per container refrigerati [10 e 14];
- una struttura di sistema elettrico compatibile e idonea anche alla tecnologia del *cold ironing* per l'alimentazione di navi ormeggiate in banchina, ma anche da generazione a bordo di una nave dotata di sistema nave-banchina-nave;
- un sistema di monitoraggio e controllo remoto;
- disponibilità di personale qualificato in numero adeguato e con le diverse competenze necessarie.

- riduzione dei picchi di domanda di energia elettrica [15] (Fig. 3);
- gestione energetica ottimizzata;
- rafforzamento della continuità del servizio.

Proprio per la natura ciclica delle operazioni, le gru di un terminal container costituiscono un settore interessante per conseguire significativi risparmi energetici e tariffari attraverso l'utilizzo di sistemi di accumulo con prestazioni adeguate alle apparecchiature (come sistemi di azionamento avanzati per gru portuali, volani, supercondensatori).

Ad esempio, il profilo ciclico della domanda di gru STS, senza misure idonee al suo controllo, mostra un basso fattore di carico per il quale gli oneri relativi all'impegno di potenza, in alcuni casi esaminati, hanno raggiunto un impatto pari a circa l'82% della bolletta elettrica [15] (Fig. 4).

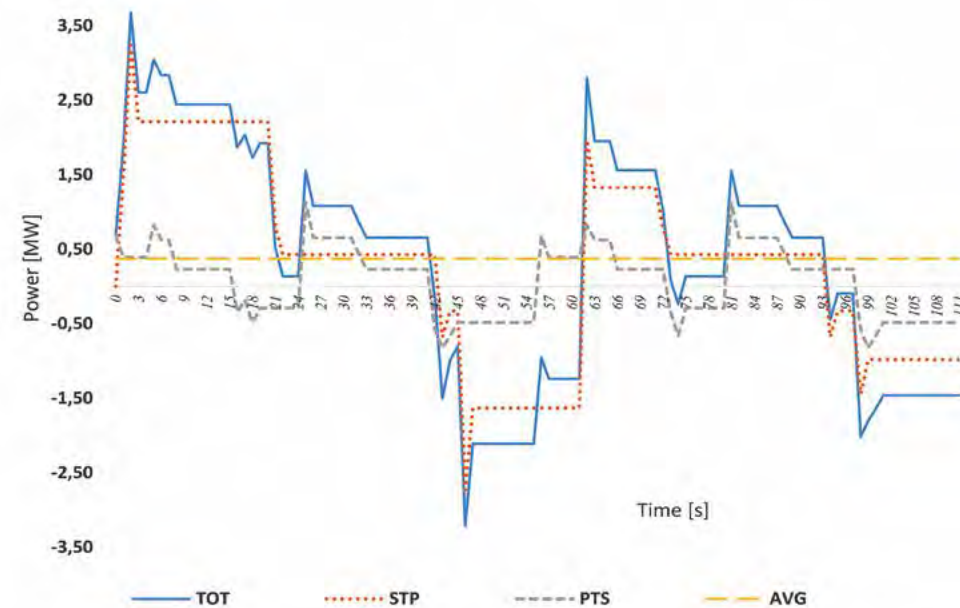


FIG. 3. LA DOMANDA DI POTENZA DELLE GRU STS DA NAVE A TERRA È COMPOSTA DA DUE DOMANDE INDIVIDUALI: GRU SECONDARIA DA NAVE A PIATTAFORMA (DOMANDA PIÙ ALTA) STP E GRU SECONDARIA DA PIATTAFORMA A TERRA PTS, VALORE MEDIO AVG [15]

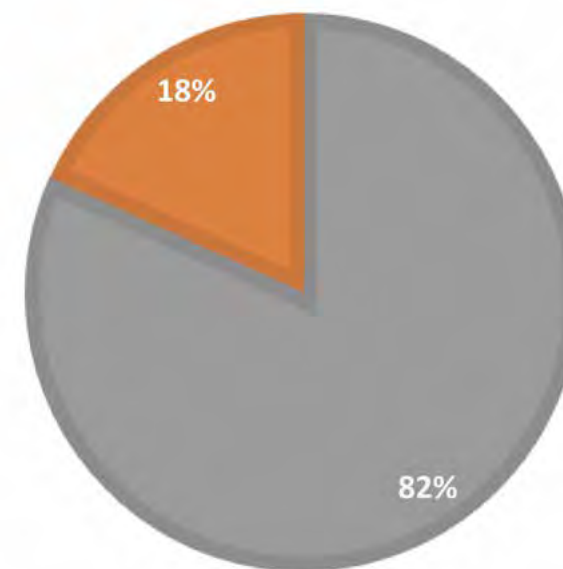


FIG. 4. L'INCIDENZA DEI COSTI ELETTRICI DI UNA GRU STS MISURATI IN UNA SETTIMANA SENZA RIDUZIONE DEI PICCHI DI CONSUMO: 18% ENERGIA E 82% POTENZA [15]



**La gestione energetica
è una leva fondamentale
per ottimizzare le
prestazioni del sistema
portuale**

Pertanto, gli interventi volti a ridurre il picco massimo di potenza con strategie di *peak shaver* possono consentire risparmi tariffari, nonché un assorbimento con un profilo più regolare (Fig. 3). I sistemi di accumulo di energia (ESS) consentono il controllo della potenza, la riduzione dei picchi e il bilanciamento del carico nei sistemi di alimentazione. Una rete portuale, intesa come area logistica industriale per ogni singolo porto, può essere organizzata per raggiungere obiettivi di qualità, continuità, risparmio energetico e tariffari in relazione alle considerevoli quantità di energia. In ogni area portuale, centinaia di operatori operano autonomamente con possibili interazioni con entità urbane e territoriali limitrofe. Gli interventi per raggiungere obiettivi di risparmio energetico e ambientali sono, quindi, facilitati se tutti i singoli sistemi elettrici sono pianificati e coordinati in un unico sistema come una rete portuale [10].

Una rete portuale consente di perseguire strategie per un'energia efficiente e sostenibile basate sui quattro criteri "L":

- consumo livellato;
- consumo limitato;
- produzione locale;
- utilizzo locale [15].

In altre parole, il consumo livellato può essere raggiunto ottimizzando la durata di utilizzo della potenza massima o del fattore di carico, definito dal rapporto tra energia consumata e potenza massima stessa. Il consumo limitato è nel senso di limitare lo spreco di energia. Il consumo energetico locale, se soddisfatto da una produzione locale, evita trasferimenti alla rete.

In conclusione, il sistema di distribuzione si comporta esclusivamente come un carico sulla rete di pubblica utilità e mira all'assorbimento minimo (isola energetica).

Conclusioni

I porti come aree industriali e commerciali richiedono un fabbisogno energetico e un consumo di energia rilevante per cui necessitano di un proprio sistema di distribuzione elettrica e di disporre di un piano energetico generale. Le loro aree devono essere considerate come un territorio unico integrato nel tessuto urbano circostante. Una buona gestione energetica, così come l'architettura della distribuzione elettrica, ha un considerevole impatto sulle prestazioni del sistema portuale. Infatti, entrambe necessitano di un sistema di gestione per migliorare l'efficienza operativa e riorganizzare l'architettura di distribuzione elettrica al fine di unificare tutti gli utenti e implementare innovazioni.

Un'unica gestione può coordinare le diverse funzioni, utilizzando un apposito sistema integrato di supervisione e controllo remoto [11].

Di fatto, si può affermare che il personale tecnico e la struttura elettrica portuale possano anche avere una conduzione ibrida e non necessariamente proprietaria da parte della realtà portuale. Fondamentale è però che la regia di gestione, pianificazione e manutenzione degli impianti portuali sia di competenza dell'Autorità Portuale, nella funzione di gestore generale e per le responsabilità connesse con la conduzione dei singoli impianti. Diversamente, la responsabilità della programmazione e dell'organizzazione di singoli lavori e quella della gestione delle attività di realizzazione possono essere affidate a terzi e/o agli enti della distribuzione elettrica locali.

Una rete portuale con un'unica gestione di tutti gli utenti del porto consente, tra l'altro, di:

- pianificare il comportamento dei carichi e controllarli nella gestione delle reti (ad esempio implementando azioni di distacco del carico, controllo della ricarica dei veicoli con gestione dello stoccaggio, utilizzo di sistemi di azionamento avanzati per le gru portuali al fine di ottimizzare l'assorbimento di energia, ecc.);
- fornire un livello di qualità dell'energia elettrica adeguato alle reali esigenze dell'utente e mitigare le distorsioni armoniche, i cali di tensione e i transitori dovuti all'elevata densità di carichi non lineari;
- incentivare l'utilizzo di diverse tecnologie di generazione locale;
- promuovere un migliore sfruttamento delle opportunità del mercato elettrico, consentendo di ottenere tariffe più vantaggiose in base al volume complessivo dei consumi;
- organizzare servizi comuni di produzione, distribuzione, gestione e manutenzione, così come per la sicurezza installando un sistema di messa a terra globale.

Criteri innovativi di progettazione delle infrastrutture elettriche costituiranno la base del piano energetico generale di ciascun porto, così da promuovere e agevolare la costituzione di un coordinamento generale dell'intero sistema elettrico [16]:

- adeguato e appropriato alle esigenze di tutti gli utenti, tenendo conto anche delle stime della domanda e auto produzione di energia,
- mirato ad eliminare ridondanze inutili e sprechi energetici, di promuovere servizi comuni aperti per la sicurezza, l'amministrazione, le operazioni ordinarie e di emergenza, di limitare le emissioni di tutte le apparecchiature a partire da quelle per la movimentazione delle merci.

L'introduzione delle innovazioni mirate alla efficienza energetica e alle energie rinnovabili richiedono un approccio assolutamente nuovo per l'utilizzo dell'energia elettrica, poiché è impossibile innovare senza modifiche normative. In ogni caso, la garanzia di conseguire tutti i requisiti minimi per adeguare il sistema portuale al modello virtuale deve basarsi su una gestione competente e autorevole fondata sulla qualificazione del personale incaricato.

[1]. S. Fang, Y. Wang, B. Gou, Y. Xu – "Toward future green maritime transportation: an overview of seaport microgrids and all-electric ships", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 69, no. 1, pp. 207-219, jan. 2020.

[2]. M. Sadiq et al. – "Future greener seaports: a review of new infrastructure, challenges, and energy efficiency measures", IEEE Access, vol. 9, pp. 75568-75587, 2021.

[3]. F.D. Kanellos, E.S.M. Volanis, N.D. Hatzigargyriou – "Power management method for large ports with multi-agent systems", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 2, pp. 1259,1268, mar. 2019.

[4]. J. Prousalidis et al. – "Optimizing the operation of port energy systems", Proc. 2019 IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2019 IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. IEEEIC/I CPS Eur. 2019, 2019.

[5]. G. Parise, C. Lien Su, K. Sayler, P. Baraton – "An electro-energetic guide for planning & operating of port systems", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 61, no. 2, pp. 2070-2076, march-april 2025, doi: 10.1109/TIA.2024.3522215.

[6]. N.B.B. Ahamad, C.L. Su, X. Zhaoxia, J.C. Vasquez, J.M. Guerrero, C.H. Liao – "Energy harvesting from harbor cranes with flywheel energy storage systems", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 55, no. 4, pp. 3354-3364, 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2910495.

[7]. Z.J. Li, G.Q. Wang, K.Y. Shen, T.F. Zhao, X.G. Ni – "Research of the crane system based on technology of storing-energy with super-capacitor", in Proc. IEEE Int. Conf. Elect. Control Eng., jun. 2010, pp. 4046-4049.

[8]. M. Kermani, G. Parise, L. Martirano, L. Parise, B. Chavdarian – "Utilization of regenerative energy by ultracapacitor sizing for peak shaving in STS crane", in Proc. IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEE Ind. Commercial Power Syst. Eur., jun. 2019, pp. 1-5.

[9]. G. Parise, L. Parise, L. Martirano, P.B. Chavdarian, C. Su, A. Ferrante – "Wise port and business energy management: port facilities, electrical power distribution", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 52, no. 1, pp. 18-24, jan./feb. 2016.

[10]. G. Parise, L. Parise, F. M. Pepe, S. Ricci, Chun Lien Su, P. Chavdarian – "Innovations in a container terminal area and electrical power distribution for the service continuity", 2016 IEEE/IAS 52nd IEEE IAS I&CPS, Detroit, MI, USA, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPS.2016.7490238.

[11]. K.L.A. Yau, S. Peng, J. Qadir, Y.C. Low, M.H. Ling – "Towards smart port infrastructures: enhancing port activities using ICT", IEEE Access, vol. 8, pp. 83387-83404, 2020.

[12]. IEC/IEEE International Standard – Utility connections in port - Part 1: high voltage shore connection (HVSC) systems - General requirements", IEC/IEEE 80005-1:2019, vol., no., pp.1-78, 18 march 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8666180.

[13]. G. Parise, R. Lamedica, L. Martirano, L. Parise, A. Ruvio, B. Chavdarian, C. Su – "TN-grounding systems for the emerging cold ironing: multiple grounded system vs island system, IEEEIC / I&CPS Europe, 12-15 june 2018, Palermo, Italy.

[14]. G. Parise et al. – "Systems design criteria for refrigerated container parks", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 3, pp. 2320-2326, may-june 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2891612.

[15]. G. Parise, L. Parise, A. Malerba, F. M. Pepe, A. Honorati, P.B. Chavdarian – "Comprehensive peak-shaving solutions for port cranes", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 53, no. 3, pp. 1799-1806, may/june 2017.

[16]. "Linee guida per la redazione dei Piani Regolatori di Sistema Portuale", marzo 2017, www.mit.gov.it/node/5632.

SGUARDI SUL GOVERNO DEL TERRITORIO

A cura di

Area Infrastrutture, Strade, Porti, Aeroporti e Demanio Marittimo

Con la sua rubrica, ANCI porta la prospettiva del territorio: quella di chi amministra da vicino, conosce le complessità locali e sa che nessuna strategia di sviluppo regge senza il coinvolgimento attivo di chi il territorio lo governa ogni giorno. I Comuni sono l'interfaccia più diretta tra le grandi politiche nazionali e la vita concreta delle comunità: una voce che viene dal basso e guarda lontano.

La governance della portualità tra efficientamento infrastrutturale, interazione urbana e resilienza climatica

La *Blue Economy* rappresenta un pilastro fondamentale del sistema socio-economico italiano, capace di generare oltre un milione di occupati e un valore attivato complessivo stimato in 216,7 miliardi di euro, pari all'11,3% del PIL nazionale.

I dati analitici dimostrano che gli investimenti nelle infrastrutture marittime generano un ritorno economico e sociale eccezionale sul territorio. A fronte di un moltiplicatore complessivo medio della *Blue Economy* pari a 1,8, il coefficiente sale a 2,7 per la movimentazione marittima di merci e passeggeri e a 2,5 per la cantieristica. Potenziare l'efficienza dei porti significa digitalizzare i processi e, soprattutto, investire nell'infrastrutturazione energetica.

In questo scenario, i porti non possono più essere considerati mere infrastrutture di transito logistico o nodi industriali isolati, bensì elementi organici e motori di crescita sostenibile per le comunità ospitanti.

L'Associazione Nazionale Comuni Italiani (ANCI), attraverso l'azione della Commissione "Politiche del Mare, Demanio Marittimo e Porti", promuove una visione integrata in cui l'ingegneria marittima e la pianificazione urbana cooperino strettamente per rispondere alle pressanti sfide globali dell'efficientamento e della transizione ecologica.

L'INTERAZIONE PORTO-CITTÀ E LA SOSTENIBILITÀ DEI SERVIZI URBANI

Nell'ambito della riforma della portualità occorre tener presente che il porto convive quotidianamente con il tessuto urbano circostante, generando relazioni complesse in termini di viabilità, impatto acustico, ambientale e gestione dei servizi locali. Tutta la discussione giurisprudenziale e politica che riguarda la compartecipazione istituzionale nella definizione urbanistica e di pianificazione del water front ha dimostrato la necessità improcrastinabile di definire in termini chiari i ruoli di tutti gli attori del processo amministrativo.

In particolare, il ruolo dei Comuni e l'importanza che questi hanno nel disegnare la geografia organizzativa dei porti sono stati già evidenziati dalla Corte Costituzionale nel 2023 con la sentenza n. 6. In tale pronuncia, che rappresenta un pilastro e una indicazione fondamentale nella futura prospettazione della normativa in materia portuale, i giudici supremi hanno precisato che ogni intesa tra Regione, Comuni e Autorità di Sistema Portuale debba essere intesa come "accordo in senso forte".

Ciò significa che le indicazioni date dai Comuni non possono limitarsi ad essere considerate come semplici pareri, ma assurgono al rango di vere e proprie indicazioni funzionali che provengono dal territorio, attore protagonista e soggetto investito in base alle regole democratiche dell'autorità popolare. In questo senso, ANCI crede fermamente che i Comuni debbano camminare al fianco di tutte le autorità preposte alla definizione di tutti i piani di investimento e delle prospettive di sviluppo delle aree portuali e retroportuali, intese come appartenenti ad un concetto di "area vasta".

Per fare questo è necessario investire in riforme condivise, che definiscano in modo chiaro le forme di interazione tra i diversi livelli normativi che attengono sia ad aspetti urbanistici che demaniali.

In particolare, per garantire un'armonica interazione porto-città, all'interno del Documento di Programmazione Strategica di Sistema (DPSS) si dovrà tener conto necessariamente di tre aspetti fondamentali: pianificazione urbanistica, titoli edilizi e ciclo ambientale e delle risorse.

In questa ottica di coordinamento, il dialogo istituzionale deve orientarsi anche verso la definizione di misure concordate di mitigazione ambientale e infrastrutturale per compensare l'appesantimento dei servizi pubblici e l'usura delle infrastrutture viarie locali causati dai crescenti flussi commerciali e crocieristici.

Non si può inoltre trascurare che i cambiamenti climatici espongono i sistemi costieri e portuali a rischi crescenti: innalzamento del livello del mare, erosione costiera e mareggiate intense: in assenza di adeguate strategie di adattamento strutturale, le stime europee quantificano i potenziali danni da alluvioni costiere in una forbice compresa tra i 137 e gli 814 miliardi di euro entro il 2100.

La resilienza delle coste è, a tutti gli effetti, una componente economica e strutturale primaria. Dall'angolo visuale dell'ingegneria civile, la resilienza deve combinare difese costiere rigide con soluzioni basate sulla natura (*Nature-based Solutions*). Sotto il profilo gestionale, assume un ruolo chiave la valorizzazione dei sedimenti: le attività di dragaggio dei porti devono essere integrate stabilmente con le necessità di ripascimento delle coste soggette a erosione, trasformando un onere procedurale in risorsa.

In questa ottica, si inserisce il Protocollo d'Intesa siglato tra ANCI e il Comando Generale del Corpo delle Capitanerie di Porto - Guardia Costiera; una collaborazione finalizzata a promuovere la cultura della sicurezza in mare, lo scambio sistematico di dati, la vigilanza nelle aree marine protette e il coordinamento tra la disciplina balneare di competenza dei Comuni e la sicurezza balneare in capo alle Capitanerie. Attraverso l'istituzione di un Comitato paritetico e lo sviluppo di campagne congiunte in vista del 2027 – proclamato dall'ONU "Anno Internazionale del Turismo Sostenibile e Resiliente" – il sistema dei Comuni e l'Amministrazione marittima opereranno in piena sinergia.

La centralizzazione delle grandi strategie nazionali deve correre veloce, ma può farlo efficacemente solo se cammina al fianco dei territori, garantendo la sicurezza delle nostre coste e la sostenibilità delle città portuali.



© Kelly da Pexels

ARTICOLO 04

STRATEGIE DI ADATTAMENTO CLIMATICO PER LA RESILIENZA DELLE INFRASTRUTTURE PORTUALI ITALIANE

Autori

Gianmaria Sannino
Direttore della Divisione CLIMAR
presso il Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA

L'innalzamento del livello medio del mare e l'aumento della frequenza e intensità degli eventi meteo-marini estremi costituiscono fattori critici per la stabilità strutturale e la continuità operativa dei porti italiani ed euro-mediterranei.

Il presente contributo analizza questi fenomeni, integrando la modellistica numerica climatica regionalizzata con i principi avanzati dell'ingegneria marittima e costiera. Attraverso una distinzione rigorosa tra pericolosità, esposizione e vulnerabilità, viene esaminato l'impatto dei cambiamenti climatici sulle diverse componenti del sistema porto: dalle opere di difesa esterne alle banchine dei terminal fino ai nodi di interconnessione logistica con il retroporto.

L'analisi evidenzia l'eterogeneità dei profili di rischio lungo le coste italiane, condizionati da fattori locali quali la subsidenza e la morfologia costiera. Infine, si propone una strategia di adattamento strutturata su misure conoscitive, gestionali, infrastrutturali e di pianificazione, evidenziando la necessità di superare l'approccio emergenziale per integrare il rischio climatico nei criteri di progettazione e nei Piani Regolatori di Sistema Portuale.

Porti mediterranei e italiani: infrastrutture critiche in un clima che cambia

I porti rappresentano i nodi fondamentali dell'economia globale, gestendo oltre l'80% del commercio mondiale in volume. Nel contesto europeo e, in particolare nel bacino del Mediterraneo, il sistema portuale italiano riveste un ruolo strategico insostituibile per la logistica, l'approvvigionamento energetico e le catene di fornitura manifatturiere.

Secondo i dati storici e consuntivi di Assoporti, i porti italiani movimentano annualmente circa 480 milioni di tonnellate di merci e decine di milioni di passeggeri, ponendo l'Italia ai vertici dello shipping mediterraneo [1]. Questa centralità economica si traduce in una forte interdipendenza territoriale: un porto non è un'entità isolata, ma il nucleo di un ecosistema logistico complesso che comprende interporti, reti ferroviarie, assi stradali di grande comunicazione e poli industriali di retroporto [2].

Ciò significa che la vulnerabilità di un'infrastruttura marittima si riflette immediatamente sull'intera catena del valore continentale: l'interruzione operativa di un terminal container o il danneggiamento di una banchina petrolifera generano un effetto domino che si propaga rapidamente verso l'interno, determinando colli di bottiglia logistici, incrementi dei costi di trasporto e blocchi produttivi nelle aree industriali servite [1 e 2]. Fino a oggi, i criteri di progettazione delle opere portuali si sono basati sull'ipotesi di stazionarietà climatica, assumendo che le serie storiche dei dati meteo-marini fossero sufficienti a prevedere le sollecitazioni future [3].

Il cambiamento climatico rompe questo paradigma, imponendo una profonda revisione metodologica. Le infrastrutture portuali sono strutturalmente esposte alle dinamiche dell'interfaccia terra-mare; pertanto, le variazioni nei regimi climatici non rappresentano più una remota externalità ambientale, ma un nuovo e stringente parametro di calcolo per l'ingegnere civile e un vincolo imprescindibile per le Autorità di Sistema Portuale (AdSP).

Per impostare una corretta *governance* del rischio, è essenziale definire rigorosamente la terminologia scientifica adottata dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) [4], in cui:

- la pericolosità (*hazard*) indica il potenziale accadimento di un fenomeno fisico dannoso, come un'alluvione costiera o un'ondata di calore;
- l'esposizione si riferisce alla presenza di beni materiali, infrastrutture o persone in zone interessate dalla pericolosità;
- la vulnerabilità esprime la predisposizione intrinseca del sistema a subire danni a causa della propria fragilità strutturale, gestionale o funzionale;
- il rischio climatico emerge dalla combinazione di questi tre fattori.

Ridurre il rischio nei porti italiani significa agire sulla vulnerabilità strutturale e sull'ottimizzazione gestionale, poiché l'esposizione è geometricamente fissa e la pericolosità è guidata da dinamiche macro-climatiche globali.



FIG. 1. VEDUTA PORTUALE

Il Mediterraneo come area climatica particolarmente sensibile

Il bacino del Mediterraneo è ampiamente riconosciuto dalla comunità scientifica internazionale come un hotspot del cambiamento climatico, ovvero un'area in cui gli impatti del riscaldamento globale si manifestano in modo più rapido e intenso rispetto alle medie planetarie [4].

Le proiezioni fornite dal Copernicus Climate Change Service e i rapporti dell'ISPRA evidenziano che la temperatura dell'aria nella regione mediterranea aumenta a un ritmo superiore di circa il 20% rispetto alla media globale [5 e 6]. Questo riscaldamento atmosferico si riflette direttamente sulle proprietà fisiche delle masse d'acqua, provocando un aumento sistematico della temperatura superficiale del mare (*Sea Surface Temperature*, SST) e un conseguente incremento del contenuto termico oceanico [6].

L'innalzamento del livello medio del mare si delinea come la manifestazione più lineare e inesorabile di questo accumulo di energia [4]. I meccanismi fisici principali sono due: l'espansione termica dell'acqua (effetto sterico) e l'apporto di massa dovuto alla fusione dei ghiacci continentali [4]. Tuttavia, per comprendere l'effettivo impatto sulle infrastrutture costiere, è cruciale distinguere tra l'innalzamento assoluto del livello marino (misurato

dai sistemi satellitari rispetto al centro della Terra) e l'innalzamento relativo (misurato dai mareografi rispetto alla costa) [5]. Il livello relativo è quello che determina la reale sommersione delle banchine ed è influenzato in modo determinante dai movimenti verticali del suolo, quali la subsidenza naturale o antropica e i movimenti tettonici [5].

I dati storici della Rete Mareografica Nazionale di ISPRA indicano che nel corso dell'ultimo secolo il livello relativo del mare in Italia è cresciuto con tassi medi differenziati, ma in netta accelerazione negli ultimi tre decenni, allineandosi a valori compresi tra 2,5 e 4,5 mm all'anno [5]. Le proiezioni future per il medio (2050) e lungo periodo (2100), basate sugli scenari emissivi dell'IPCC (dallo scenario di forte mitigazione SSP1-2.6 a quello ad alte emissioni SSP5-8.5), indicano un innalzamento medio assoluto del Mediterraneo compreso tra i 30 e gli 80 cm entro la fine del secolo, con ampi margini di incertezza legati alla dinamica delle calotte glaciali [4 e 6]. Nelle aree soggette a forte subsidenza, come l'Alto Adriatico, l'innalzamento relativo potrà superare il metro, modificando permanentemente la linea di costa e riducendo drasticamente il franco idraulico delle opere portuali esistenti [5 e 7].

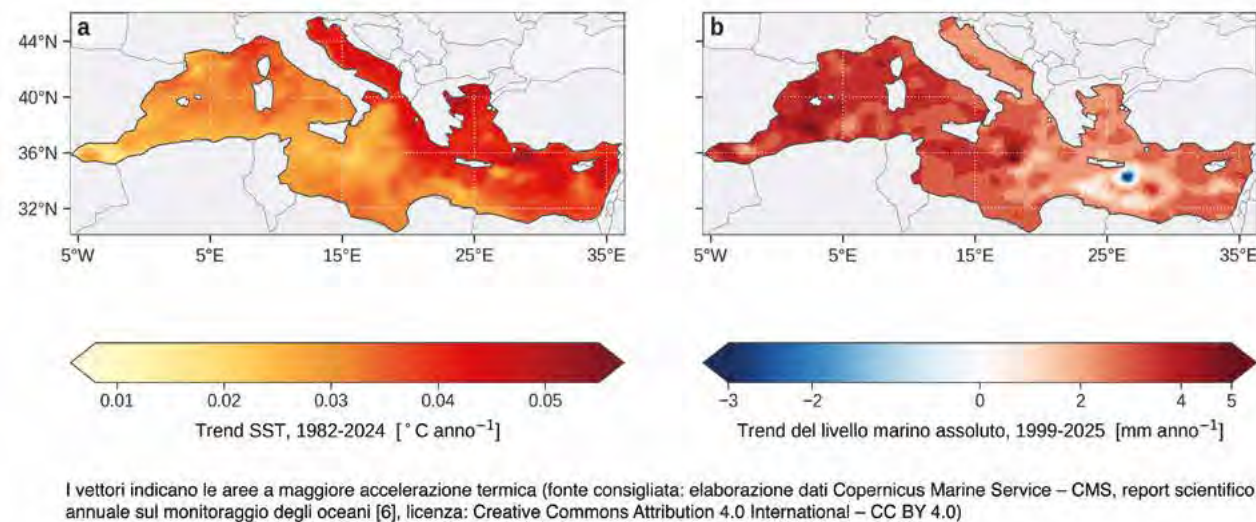


FIG. 2. L'ANALISI SPAZIALE DEL TREND DI RISCALDAMENTO SUPERFICIALE E DI INNALZAMENTO DEL LIVELLO MARINO ASSOLUTO NEL BACINO DEL MEDITERRANEO

Livello del mare, mareggiate ed eventi composti

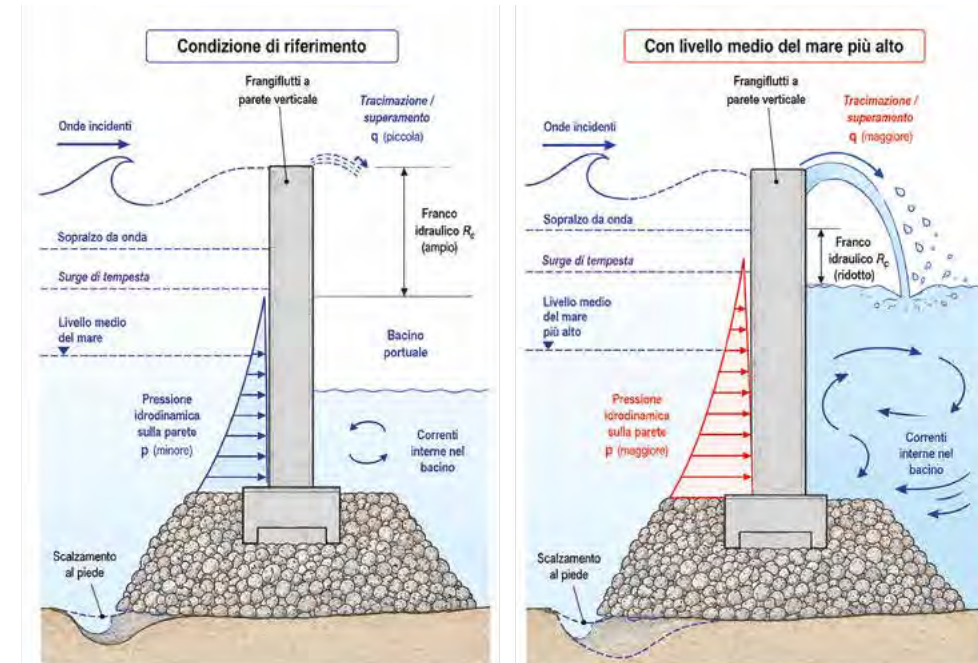
L'innalzamento del livello medio del mare non agisce soltanto come un fenomeno di sommersione statica e graduale, ma opera come un potente amplificatore degli eventi estremi transitori [3 e 4]. Il livello idrico totale che si registra durante una tempesta è il risultato della sovrapposizione non lineare di diverse componenti fisiche: il livello medio del mare di lungo periodo, la marea astronomica, lo *storm surge* (l'innalzamento meteorologico dovuto alla bassa pressione atmosferica e all'azione del vento che spinge l'acqua verso la costa) e il *wave setup* (l'innalzamento del livello idrico medio indotto dal collasso e dalla dissipazione delle onde nella zona di riva) [3].

Quando il livello medio del mare si eleva, la "base energetica" di partenza si innalza. Di conseguenza, uno *storm surge* di moderata intensità, che in passato non avrebbe causato danni, può oggi trasformarsi in un evento di allagamento severo [2 e 3]. Le dighe, foranee a scogliera o a parete verticale, sono calcolate per resistere a specifiche combinazioni di altezza d'onda e livello idrico [3]. L'aumento della quota del livello idrico di riferimento riduce il franco idraulico dell'opera, ovvero l'altezza della cresta del muro di guardia rispetto al livello del mare.

Questo fenomeno incrementa in modo esponenziale la probabilità di *overtopping* (tracimazione ondosa), permettendo a grandi volumi d'acqua di riversarsi all'interno del bacino portuale, generando correnti interne pericolose e sollecitando le strutture retrostanti non progettate per tali carichi idrodinamici [3].

A questo quadro si aggiunge la criticità degli eventi composti (*compound events*), definiti come la combinazione simultanea o sequenziale di più pericolosità climatiche che determinano un impatto significativamente maggiore rispetto alla somma dei singoli eventi isolati [4]. Nei nodi portuali, l'evento composto tipico si verifica quando una forte mareggiata costiera coincide con precipitazioni meteoriche intense sul bacino idrografico contiguo [2 e 7].

L'elevato livello del mare impedisce il regolare deflusso delle acque piovane e dei canali di drenaggio portuali verso l'esterno, provocando un fenomeno di rigurgito nelle reti fognarie portuali e causando l'allagamento immediato dei piazzali operativi, dei magazzini e delle viabilità di collegamento, paralizzando i terminal anche in assenza di danni strutturali diretti alle opere di difesa [3].



Fonte consigliata: disegno tecnico originale degli autori basato su modellistica idraulica costiera, modello SWASH/XBeach [3], licenza: libera da copyright, prodotta dagli autori per il "Giornale del Genio Civile"

FIG. 3. LO SCHEMA CONCETTUALE DELLE MODIFICAZIONI DELLE SOLLECITAZIONI IDRODINAMICHE SU OPERE DI DIFESA VERTICALI CAUSATE DALLA RIDUZIONE DEL FRANCO ARGINALE DOVUTO ALL'INNALZAMENTO DEL LIVELLO MEDIO DEL MARE

Gli impatti sulle infrastrutture e sulla continuità operativa

Gli impatti del cambiamento climatico sulle infrastrutture portuali si articolano in danni strutturali e interruzioni funzionali, interessando ogni componente dello spazio portuale [3 e 8]. Le banchine d'ormeggio e i terminal portuali sono i primi elementi a subire le conseguenze della riduzione del franco operativo [3]. Quando il livello relativo del mare riduce la distanza verticale tra il pelo dell'acqua e la quota di calpestio della banchina, si verificano frequenti bagnamenti e allagamenti temporanei durante le alte maree sizigiali [3 e 5]. Questo ostacola o impedisce del tutto le operazioni di carico e scarico delle merci dalle navi, riduce la sicurezza dei lavoratori e danneggia i sistemi impiantistici interrati, come i cunicoli portacavi, le reti di alimentazione elettrica e le tubazioni di bunkeraggio [8].

Le pavimentazioni dei piazzali portuali, soggette a carichi d'uso eccezionali dovuti allo stoccaggio dei container e al transito di mezzi pesanti (quali gru a portale e reach stacker), subiscono un accelerato degrado a causa dell'innalzamento della falda acquifera costiera, indotto a sua volta dall'innalzamento del livello marino [3]. L'intrusione salina e la saturazione d'acqua degli strati di fondazione stradale riducono la capacità portante dei terreni, provocando cedimenti differenziali, fessurazioni e buche che compromettono la sicurezza logistica interna [2 e 3].

Inoltre, l'ambiente salino altamente aggressivo accelera i fenomeni di corrosione delle armature metalliche nelle strutture in cemento armato (banchine su pali, pontili) e riduce la vita utile dei sistemi di ormeggio e delle difese elastiche (parabordi) [3].

Un altro vettore di rischio è rappresentato dall'incremento termico e dalle ondate di calore estive più prolungate, un fenomeno ampiamente documentato dal Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC) [7]. Le temperature estreme influiscono negativamente sulla produttività del lavoro, imponendo rimodulazioni dei turni e pause per preservare la salute degli operatori, con conseguente riduzione dell'efficienza complessiva dello scalo [7 e 8].

Dal punto di vista impiantistico, le ondate di calore sovraccaricano i sistemi di condizionamento dei magazzini refrigerati dedicati alla catena del freddo, incrementando i consumi energetici e il rischio di blackout elettrici [8]. Le alte temperature provocano, inoltre, lo snervamento termico dei binari ferroviari interni e accelerano il degrado delle pavimentazioni bituminose dei piazzali, aumentando la vulnerabilità all'ormaiamento sotto l'azione dei carichi concentrati delle merci [3 e 7].

PERICOLOSITÀ CLIMATICA	COMPONENTE PORTUALE INTERESSATA	MECCANISMO FISICO D'IMPATTO	CONSEGUENZA STRUTTURALE/OPERATIVA
Innalzamento del livello relativo del mare	Banchine, piazzali terminalistici, cunicoli impiantistici	Riduzione del franco operativo, sommersione statica durante le alte maree sizigiali, risalita della falda salina [2]	Interruzione delle operazioni di carico/scarico, corrosione accelerata delle armature, perdita di portanza dei piazzali
Incremento dello storm surge e del moto ondoso	Dighe foranee, moli di sopraflutto, opere di difesa esterne	Riduzione del franco idraulico dell'opera, aumento dei volumi di overtopping, maggiori sollecitazioni idrodinamiche sulla mantellata	Instabilità dei blocchi di protezione, scalzamento al piede delle strutture, danneggiamento delle opere interne
Precipitazioni intense e concentrate	Reti di drenaggio portuali, aree di stoccaggio merci	Fenomeno composto: rigurgito delle reti fognarie a causa dell'alto livello del mare, incapacità di smaltimento dei deflussi superficiali	Allagamento diffuso dei piazzali e dei magazzini, paralisi della viabilità interna e ferroviaria
Temperature estreme e ondate di calore	Personale operativo, impianti termici, pavimentazioni bituminose	Stress termico sui lavoratori, snervamento termico dei binari, accelerazione del degrado dei leganti bituminosi [3]	Riduzione della produttività del lavoro, rischio di interruzioni elettriche (catena del freddo), ormaiamento dei piazzali

TAB. 1. LA MATRICE DEGLI IMPATTI CLIMATICI SULLE COMPONENTI STRUTTURALI E OPERATIVE DEL PORTO [3 E 8]

Perché ogni porto presenta un profilo di rischio differente

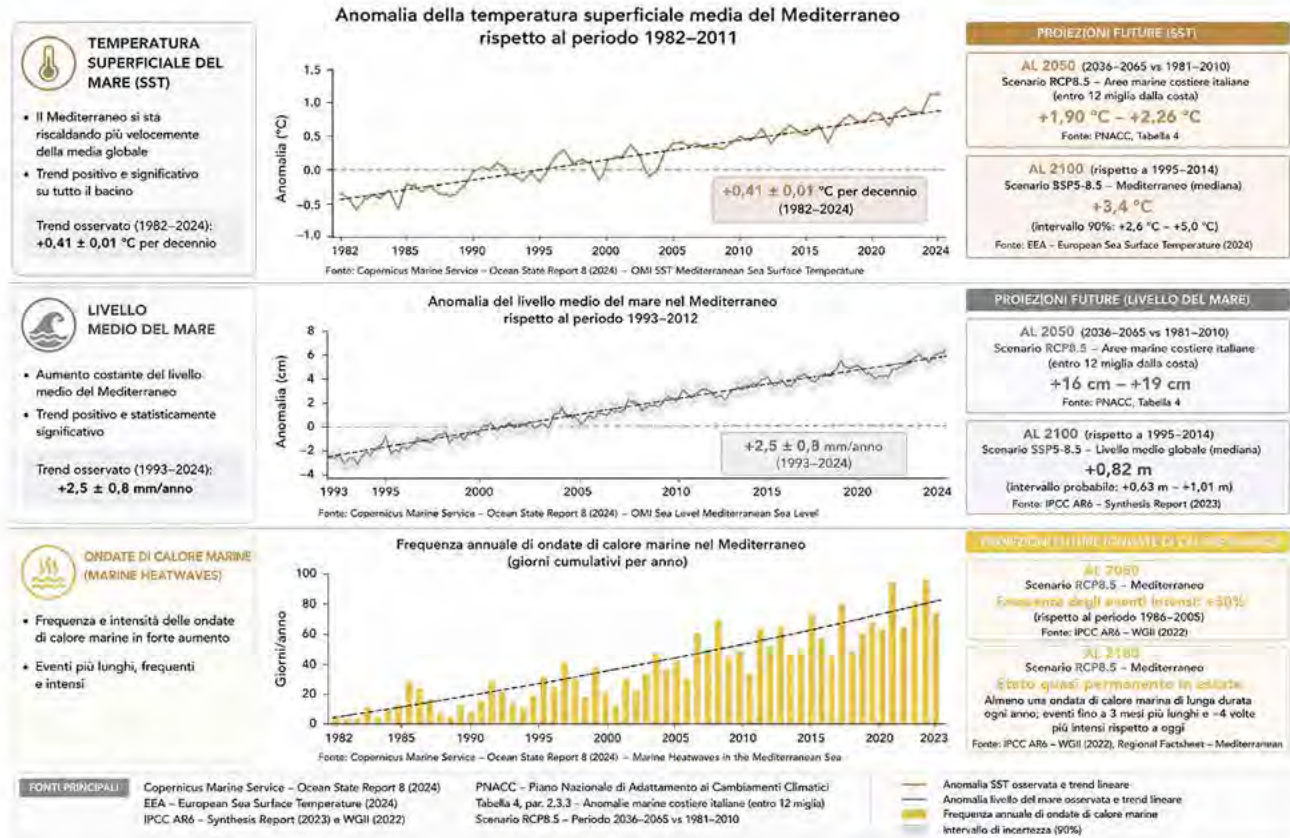


FIG. 4. IL PROFILO DI VULNERABILITÀ RELATIVA DEI PORTI ITALIANI SUDDIVISI PER MACRO-REGIONI (ALTO ADRIATICO, TIRRENO, MAR LIGURE, GRANDI ISOLE) IN RELAZIONE A SUBSIDENZA, OVERTOPPING ED EVENTI IDROGEOLOGICI

L'analisi degli impatti evidenzia chiaramente che non è possibile definire una vulnerabilità portuale standardizzata: ogni scalo presenta un proprio e peculiare profilo di rischio, derivante dall'interazione tra caratteristiche geofisiche locali, tipologia di infrastrutture esistenti e natura del traffico commerciale gestito [2 e 3]. La morfologia costiera e l'esposizione geografica sono i primi fattori discriminanti.

I porti situati in contesti di costa bassa e sabbiosa, spesso caratterizzati da fondali poco profondi, affrontano problemi stringenti legati alla sedimentazione e alla variazione del trasporto solido litoraneo [3]. I cambiamenti nei regimi dei venti e delle onde possono modificare le dinamiche di erosione e deposito all'imboccatura portuale, imponendo

campagne di dragaggio straordinarie e più frequenti per garantire le quote batimetriche di sicurezza necessarie all'accessibilità nautica delle grandi navi mercantili [3].

La subsidenza gioca un ruolo di amplificatore locale differenziato sul territorio italiano [5]. I porti dell'Alto Adriatico, come Venezia, Ravenna e Trieste, insistono su aree caratterizzate da significativi tassi di abbassamento del suolo di origine, sia naturale (compattazione dei sedimenti) sia antropica (estrazione di fluidi dal sottosuolo) [5 e 7]. In questo quadrante geografico, l'innalzamento relativo del mare mostra i valori più critici d'Italia, richiedendo soluzioni ingegneristiche complesse e precoci rispetto ai porti tirrenici o liguri [5].

Di contro, i porti della Liguria (Genova, Savona, La Spezia) presentano una morfologia completamente differente: fondali subito profondi e infrastrutture a ridosso di versanti montuosi ripidi [7]. Qui il rischio principale non è la sommersione statica dei piazzali, ma l'esposizione a mareggiate energetiche distruttive che sollecitano severamente le grandi dighe foranee a parete verticale, unitamente alla vulnerabilità rispetto a eventi idrogeologici improvvisi provenienti dai bacini idrografici retrostanti [3 e 7].

La tipologia di traffico e l'assetto del retroporto introducono ulteriori elementi di differenziazione [1 e 2]: i porti industriali ed energetici (come Sarroch, Augusta o Taranto) possiedono reti impiantistiche complesse per il trasferimento di fluidi e idrocarburi, la cui vulnerabilità all'allagamento o alla

corrosione salina comporta rischi ambientali di rilevante entità (sversamenti, inquinamento marino) [1 e 3].

I porti orientati al traffico passeggeri e crocieristico (come Civitavecchia o Napoli) mostrano, invece, un'elevata sensibilità stagionale rispetto alle ondate di calore e alla gestione dei flussi turistici in condizioni di stress termico [7 e 8].

Infine, l'età delle opere d'arte portuali influisce sulla vulnerabilità strutturale: le strutture storiche in muratura o i calcestruzzi privi di moderni additivi di resistenza chimica manifestano tassi di degrado accelerati sotto l'azione combinata dell'innalzamento marino e dell'aumento della salinità dell'acqua [3].

Adattare i porti: conoscenza, progetto e gestione

Per garantire la resilienza a lungo termine del sistema portuale italiano, è necessario superare la logica dell'intervento emergenziale *ex-post* e adottare una strategia di adattamento proattiva e multilivello [3 e 7]. Tale strategia deve articolarsi in quattro categorie d'azione strettamente integrate: misure conoscitive, gestionali, infrastrutturali e di pianificazione, in coerenza con le linee guida del PNACC e le migliori pratiche di ingegneria marittima internazionale [3 e 7].

Le misure conoscitive costituiscono il pilastro scientifico dell'intera strategia [3]. Non è possibile progettare un adattamento efficace senza un monitoraggio ad alta precisione delle variabili meteo-marine locali [3]. È prioritario potenziare la rete mareografica e ondometrica portuale, integrandola con stazioni GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) per il monitoraggio continuo della subsidenza locale [5 e 7]. L'impiego dei *Digital Twin* (gemelli digitali) delle

TIPOLOGIA DI MISURA	DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO	OBIETTIVO SPECIFICO	ORIZZONTE TEMPORALE DI ATTUAZIONE
Conoscitiva	Implementazione di <i>Digital Twin</i> basati su rilievi LiDAR e modelli idrodinamici locali	Mappatura di dettaglio delle aree portuali vulnerabili all' <i>overtopping</i> e all'allagamento	Breve periodo (1-3 anni)
Gestionale	Sviluppo di sistemi di <i>Early Warning</i> accoppiati per la previsione delle quote idriche e delle mareggiate	Pianificazione anticipata delle sospensioni operative e messa in sicurezza dei natanti	Breve-medio periodo (2-5 anni)
Infrastrutturale	Innalzamento localizzato degli impianti critici e installazione di valvole di non ritorno sulle reti di drenaggio	Protezione dei sistemi di alimentazione elettrica e prevenzione del rigurgito marino nei piazzali	Medio periodo (5-10 anni)
Infrastrutturale	Ricalibratura e irrobustimento delle mantellate delle dighe foranee con blocchi artificiali ad alta dissipazione	Garanzia della stabilità strutturale delle opere di difesa esterne a lungo termine	Lungo periodo (>10 anni)
Pianificazione	Integrazione obbligatoria del climate proofing nei Piani Regolatori di Sistema Portuale (PRSP)	Vincolo per i nuovi investimenti a soddisfare requisiti di resilienza lungo l'intero ciclo di vita [7]	Continuo/immediato

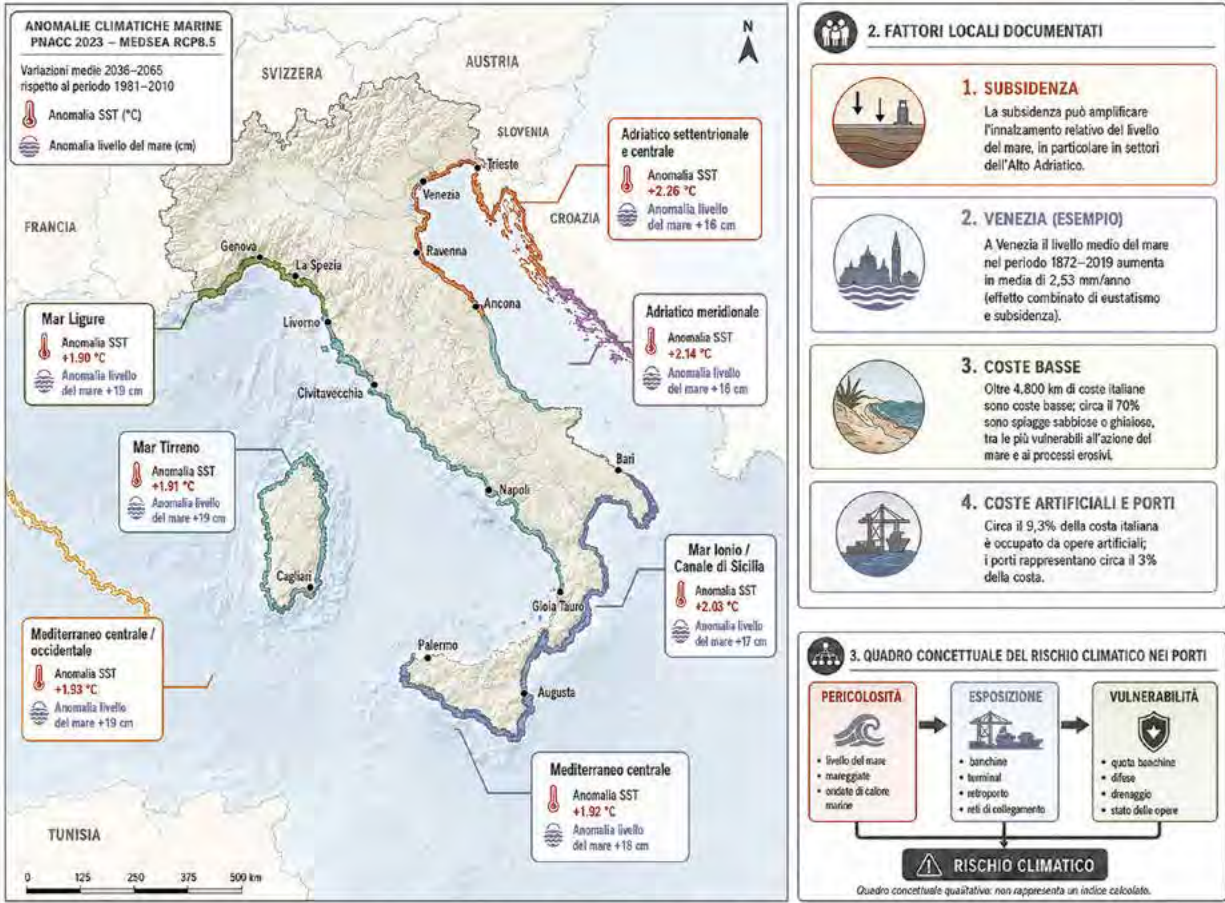
TAB. 2. ESEMPI DI MISURE DI ADATTAMENTO APPLICABILI NEI PORTI ITALIANI SUDDIVISE PER TIPOLOGIA E ORIZZONTE TEMPORALE [3 E 7]

infrastrutture portuali, alimentati da rilievi batimetrici laser scanner e modelli idrodinamici ad alta risoluzione, consente di simulare gli effetti dell'*overtopping* e dell'allagamento sotto diversi scenari climatici futuri, individuando in anticipo i punti deboli strutturali e funzionali dello scalo [2 e 3].

Le misure gestionali mirano a ottimizzare l'uso delle infrastrutture esistenti in condizioni di mutato regime climatico [3]. Questo include lo sviluppo di sistemi di *early warning* (allerta precoce) basati su modelli previsionali accoppiati atmosfera-oceano, in grado di fornire con 48-72 ore di anticipo la probabilità di allagamento delle banchine o di superamento delle soglie operative delle gru [3]. I piani di continuità operativa dei terminal devono prevedere protocolli specifici per la gestione delle ondate di calore (rimodulazione degli orari di lavoro, stazioni di raffreddamento) e procedure

di emergenza per la messa in sicurezza delle navi all'ormeggio in caso di eventi meteo-marini estremi [7 e 8].

Le misure infrastrutturali rappresentano gli interventi fisici di adeguamento delle opere d'arte [3]. Nel breve e medio periodo, gli interventi principali riguardano l'efficientamento e il potenziamento dei sistemi di drenaggio e pompaggio delle acque meteoriche, l'installazione di valvole di non ritorno per impedire il rigurgito marino e la protezione degli impianti elettrici vulnerabili mediante il loro progressivo innalzamento sopra la quota di allagamento attesa [2 e 3]. Nel lungo periodo, per le nuove opere o per i grandi rifacimenti, si deve prevedere l'adeguamento delle quote di banchina e l'irrobustimento delle mantellate delle dighe foranee, utilizzando blocchi artificiali innovativi ad alta dissipazione energetica [3].



Fonte consigliata: archivio fotografico del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Autorità di Sistema Portuale [1], licenza: uso editoriale autorizzato per pubblicazioni scientifiche e istituzionali

FIG. 5. ESEMPIO DI CEDIMENTO LOCALIZZATO DELLA PAVIMENTAZIONE RETRO-BANCHINA CAUSATO DAL FENOMENO DEL SIFONAMENTO E DALL'AZIONE EROSIONE DELLE CORRENTI DI OVERTOPPING DURANTE UN EVENTO ESTREMO



© Sunu Probo Baskoro da Pixabay

Integrare il rischio climatico nella progettazione è la condizione necessaria per garantire resilienza e competitività alle infrastrutture marittime

GGC 02 >

Le misure di pianificazione garantiscono che l'adattamento diventi una componente strutturale della *governance* portuale [7]. Il *climate proofing* (verifica di resilienza climatica) deve diventare un requisito obbligatorio per l'approvazione di ogni nuovo investimento infrastrutturale, valutando i rischi lungo l'intero ciclo di vita dell'opera attraverso analisi costi-benefici che integrino i costi dell'inazione [2].

I Piani Regolatori di Sistema Portuale (PRSP) devono incorporare il concetto di *adaptive pathways* (percorsi di adattamento flessibili), definendo soglie decisionali (*tipping points*) oltre le quali attivare specifiche varianti strutturali, garantendo così la massima flessibilità rispetto all'evoluzione degli scenari emissivi globali [3 e 7].

Conclusioni: integrare il rischio climatico nelle decisioni di oggi

Il cambiamento climatico non rappresenta una minaccia futura e incerta, ma una realtà fisica in corso che sta già modificando le condizioni al contorno entro le quali operano le infrastrutture portuali italiane e mediterranee [4 e 5]. L'approccio tradizionale dell'ingegneria civile, basato sulla stazionarietà delle serie storiche, è scientificamente superato e tecnicamente rischioso [3].

Progettare oggi un'opera portuale con una vita utile di 50 o 100 anni, senza integrare le proiezioni di innalzamento del livello del mare e l'intensificazione degli eventi estremi, significa programmare una precoce obsolescenza strutturale e un insostenibile incremento dei costi di manutenzione e gestione [2 e 3].

La sfida dell'adattamento richiede una profonda transizione culturale e metodologica: di fatto, è necessario consolidare la sinergia tra la comunità scientifica climatologica e il mondo della progettazione ingegneristica e della gestione portuale [3 e 7].

L'adattamento non deve essere visto come un costo economico isolato e penalizzante, bensì come un investimento strategico indispensabile per garantire la competitività del sistema logistico nazionale, la sicurezza degli operatori e la continuità dei servizi essenziali per il Paese [1].

Solo attraverso l'integrazione sistematica del rischio climatico nei processi decisionali, pianificatori e costruttivi di oggi sarà possibile trasformare i porti italiani in infrastrutture resilienti, capaci di resistere alle sollecitazioni del futuro e di continuare a svolgere il loro ruolo fondamentale di motori economici dello sviluppo mediterraneo [7].

[1]. Assoporti – Relazione delle attività di Assoporti 2021-2025. Attività, risultati e prospettive per il sistema portuale italiano, Associazione Porti Italiani, Roma, <https://www.assoporti.it/>, 2025.

[2]. M.I. Voudoukas, L. Mentaschi, J. Clarke, B. van de Sande, C. Reis, J.C. Ciscar, L. Feyen – "Climate change impacts on european critical infrastructure: coastal flooding and port systems", Joint Research Centre (JRC) Technical Report, Publications Office of the European Union, 2023.

[3]. PIANC – "Climate change adaptation planning for ports and navigation infrastructure", Report of WG 178, World Association for Waterborne Transport Infrastructure, Brussels, <https://www.pianc.org/>, 2018.

[4]. IPCC – "Climate Change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change", Cambridge University Press, DOI: 10.1017/9781009157896, 2021.

[5]. ISPRA – "Rapporto sugli indicatori del cambiamento climatico in Italia – Anno 2023", Stato dell'Ambiente n. 104, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma, <https://www.isprambiente.gov.it/>, 2024.

[6]. Copernicus Marine Service (CMS) – "Ocean State Report 9", Mercator Ocean International, Toulouse, <https://marine.copernicus.eu/>, 2025.

[7]. Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) – "Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC)", approvato con Decreto Ministeriale n. 434 del 21 dicembre 2023, <https://www.mase.gov.it/>, 2024.

[8]. European Environment Agency (EEA) – "European Climate Risk Assessment", EEA Report no 1/2024, Copenhagen, DOI: 10.2800/524312024, 2024.

**Bibliografia
& sitografia**

A cura di

Irene Sassetti

La presente rubrica propone un osservatorio in un quadro tecnico istituzionale sulle trasformazioni e sulle principali evoluzioni che interessano infrastrutture, territorio, sicurezza e innovazione, offrendo e approfondendo temi strategici, orientando il dibattito professionale e contribuendo alla definizione di indirizzi utili alle politiche pubbliche attraverso innovazione e sviluppo sostenibile.

CNI - CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI

LA PAROLA DELL'INGEGNERIA DEL SUO TEMPO

Il porto come sistema: la sfida ingegneristica della portualità italiana

Resilienza delle opere marittime, rapporto con la città, transizione energetica e adattamento climatico non sono temi separati, ma le dimensioni di un'unica trasformazione che chiama in causa la competenza tecnica e la responsabilità pubblica dell'ingegneria e che richiede una capacità di lettura sistemica sempre più avanzata, fondata su dati, scenari previsionali e una visione integrata del territorio.

L'Italia è un "Paese di mare": lungo i suoi porti transita oltre la metà delle merci che importiamo ed esportiamo, e da essi dipende una quota rilevante della capacità competitiva del sistema industriale nazionale. In una fase segnata da instabilità geopolitica e da una crescente competizione tra reti logistiche, la centralità delle infrastrutture portuali non è più soltanto una questione economica: è una questione di sicurezza e di scelte strategiche per il Paese. Eppure, proprio mentre cresce la loro importanza, i porti si trovano esposti a pressioni convergenti che ne stanno ridefinendo la natura. Comprendere e governare questa trasformazione è oggi una delle frontiere più impegnative e suggestive dell'ingegneria civile e un banco di prova della capacità nazionale di programmare interventi coerenti e di lungo periodo.

In questa prima rubrica, il Consiglio Nazionale degli Ingegneri ha condiviso di porre la portualità al centro della propria riflessione tecnica – in particolare grazie al contributo del gruppo di lavoro sull'Ingegneria del Mare coordinato dall'ing. Andrea Ferrante, Presidente della Sezione speciale PNRR del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – perché è convinto che le diverse sfide che la attraversano (la resilienza delle opere marittime, il rapporto con la città, l'efficientamento energetico e l'adattamento ai cambiamenti climatici) non possano essere affrontate separatamente. Sono, in realtà, le dimensioni di un unico problema progettuale e richiedono una risposta integrata capace di connettere competenze ingegneristiche, pianificazione territoriale e indirizzi strategici delle autorità portuali.

CLIMA

Il primo fronte è quello climatico. L'innalzamento del livello del mare, con scenari molto severi previsti in un futuro prossimo, colloca l'Italia tra i Paesi più esposti del Mediterraneo. A questo fenomeno si somma l'intensificarsi degli eventi meteomarinari estremi che sottopone le strutture a sollecitazioni crescenti e la minaccia di arretramento delle coste su interi tratti del litorale, con ricadute ambientali, economiche e sociali.

Per l'ingegneria, tutto ciò impone un cambio di paradigma: le opere marittime non possono più essere progettate sulla base delle condizioni del passato, ma vanno dimensionate su scenari futuri, lungo l'intero arco della loro vita tecnica. Significa costruire una filiera che leghi i fenomeni fisici in atto, la ricerca applicata e la valutazione ingegneristica, fino alle ricadute concrete sulla progettazione e sulla definizione di priorità di intervento realmente fondate sull'evidenza scientifica.

CONFINI

La resilienza, però, non riguarda solo la difesa dalle forze del mare ma riguarda anche la capacità del porto di convivere con la città che lo ospita. L'Italia presenta una caratteristica quasi unica: gran parte dei suoi porti è incardinata nel cuore di centri urbani, spesso di grande valore storico. Questa prossimità, a lungo vissuta come un vincolo o una cesura tra centro abito e aree produttive è invece un'opportunità. Il confine tra città e porto – il *limes* che a lungo li ha separati – è oggi un'area capace di segnare la rigenerazione urbana.

Il porto è un nodo logistico di area vasta, al servizio di un territorio che eccede i confini comunali e la pianificazione portuale non può essere disgiunta dalle scelte urbanistiche della città. Conciliare la funzionalità delle attività portuali e produttive con la qualità della vita dei cittadini richiede

una pianificazione multidisciplinare e attenta al ruolo pubblico con l'obiettivo di migliorare il benessere collettivo e la coesione sociale e di costruire un dialogo stabile tra amministrazioni, comunità locali e operatori economici.

EFFICIENZA ENERGETICA

Il terzo fronte è quello energetico. I porti sono sistemi a elevata intensità energetica, nei quali si concentrano attività diverse e interconnesse. Renderli più efficienti e meno impattanti non è un adempimento, ma una condizione di competitività. L'elettrificazione delle banchine e i sistemi di alimentazione elettrica delle navi all'ormeggio, la digitalizzazione dei flussi, il trasferimento del traffico merci su ferrovia, fino all'autoproduzione di energia da fonti rinnovabili – dall'eolico allo sfruttamento del moto ondoso – disegnano l'orizzonte del "porto verde". Si tratta, a ben vedere, di un ecosistema complesso fatto di opere che richiedono un'elevata capacità progettuale e la competenza necessaria a governare sistemi tecnici interdipendenti in un quadro regolatorio in rapida evoluzione che richiede aggiornamento continuo e capacità di anticipazione. Tre fronti, dunque, ma un'unica direzione.

Il porto del futuro è una piattaforma in cui logistica, energia e digitalizzazione convergono e in cui sicurezza delle opere, sostenibilità ambientale e rapporto con il territorio si tengono insieme. Affrontare separatamente questi temi significherebbe perdere di vista la natura sistemica della sfida.

Su questa frontiera il ruolo dell'ingegneria è insostituibile. Non solo nella progettazione e nella realizzazione delle opere, ma nella capacità di governare la complessità e di tradurre gli indirizzi strategici in soluzioni tecnicamente sostenibili e durevoli. È una funzione che il Consiglio Nazionale degli Ingegneri interpreta come servizio all'interesse pubblico: portare la competenza tecnica dentro le scelte che riguardano infrastrutture decisive per il Paese, perché siano fondate sulla conoscenza, programmate con un orizzonte temporale chiaro e capaci di durare nel tempo.

Dal confronto emerge un dato chiaro: il porto è un vero e proprio ecosistema che si traduce in un insieme di opere complesse che richiedono capacità progettuale elevata. In questo scenario, il ruolo dell'ingegneria assume una centralità fondamentale, non solo nella progettazione e nella realizzazione delle opere, ma anche nella capacità di governare sistemi complessi e di tradurre gli indirizzi strategici in soluzioni tecnicamente sostenibili e realmente orientate alla qualità delle decisioni pubbliche, che restano il punto di snodo per garantire efficacia, continuità e visione alle trasformazioni in corso.



ARTICOLO 05

PORTI E AUMENTO DEL LIVELLO MARINO AL 2150: CASI DI STUDIO IN ITALIA

Autori

Marco Anzidei

Dirigente di Ricerca dell'Istituto Nazionale
di Geofisica e Vulcanologia

Tommaso Alberti

Ricercatore dell'Istituto Nazionale
di Geofisica e Vulcanologia

L'aumento del livello del mare rappresenta una delle principali conseguenze dei cambiamenti climatici. In questo studio presentiamo le proiezioni di aumento relativo del livello del mare fino all'anno 2150 per alcune coste italiane, che dipendono principalmente dai contributi eustatici legati ai cambiamenti climatici e dai movimenti verticali del suolo (VLM). Viene mostrata la metodologia impiegata e le proiezioni riviste rispetto a quelle dell'IPCC del Rapporto AR6 (2021), spesso sottostimate in quanto trascurano nelle analisi gli effetti del VLM attuale.

Sulla base di queste analisi e di modelli digitali di elevazione del terreno (DEM) ad alta risoluzione – ottenuti da dati LiDAR del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza energetica o, localmente, con voli aerofotogrammetrici a bassa quota effettuati con droni –, sono state realizzate mappe dettagliate con scenari di inondazione per gli anni 2050-2100-2150 per le aree costiere più esposte al fenomeno.

Attraverso l'uso di un webGIS dedicato, lo studio identifica circa 10.000 km² di aree costiere italiane esposte a rischio inondazione, con possibili ripercussioni su porti, infrastrutture e siti di interesse culturale e conseguenti implicazioni economiche e sociali.

Il futuro delle coste tra clima e subsidenza

Il riscaldamento globale sta portando a un progressivo innalzamento del livello marino, un fenomeno che rappresenta un rischio concreto per l'integrità delle aree costiere del nostro pianeta.

I dati mareografici delle reti di stazioni globali del PSMSL (<http://psmsl.org>), di ISPRA per l'Italia (<https://www.mareografico.it/>) e di altimetria satellitare indicano che il livello medio del mare sta aumentando a ritmi accelerati a causa del riscaldamento globale [1].

Tuttavia, le variazioni del livello marino lungo le coste sono fortemente influenzate anche dai movimenti verticali del suolo (VLM). In questo contesto, gli scenari proposti dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, www.ipcc.ch) nel Sesto Rapporto di Valutazione (AR6), che stimano le proiezioni regionali fino all'anno 2150, possono sottostimare il contributo del VLM nelle aree costiere, in quanto non utilizzano dati osservativi ma modelli geofisici che includono solo il contributo secolare causato dal rimbalzo isostatico globale (GIA) [2]. Questi valori, in genere compresi tra 0 e 0,5 mm/anno nell'area mediterranea, si differenziano anche significativamente dalle osservazioni strumentali, che invece possono raggiungere valori di diversi millimetri all'anno.

Fenomeni più o meno localizzati di subsidenza o sollevamento (causati da tettonica attiva, compattazione dei sedimenti, vulcanismo o estrazione di fluidi dal sottosuolo) giocano, quindi, un ruolo fondamentale nelle variazioni locali di livello marino su specifici tratti di costa. Un esempio ben noto è quello di Venezia e Marghera, dove tra il 1950 e il 1970 si verificò un abbassamento del suolo rispettivamente di 10 cm e 14 cm a causa dell'estrazione di fluidi dal sottosuolo [3].

Per valutare i potenziali impatti dell'aumento del livello marino lungo le pianure costiere – le più esposte al rischio di inondazione – è stato sviluppato un metodo multidisciplinare, con un approccio che integra le proiezioni climatiche globali con i movimenti verticali del suolo. Sono stati considerati scenari multi-temporali che si estendono nel breve, medio e lungo termine per gli anni 2030, 2050, 2100 e 2150 (alla scala di una-due generazioni della vita umana). I risultati derivano da recenti esperienze di progettualità europea e nazionale, come SAVEMEDCOASTS (<https://www.savemedcoasts.eu/>) e SAVEMEDCOASTS-2 (www.savemedcoasts2.eu) finanziati dalla Protezione Civile europea, DG-ECHO, e dai progetti nazionali PRIN 2022 – GAIA e FIS-MEET, questi ultimi finanziati dal Ministero dell'Università e della Ricerca.

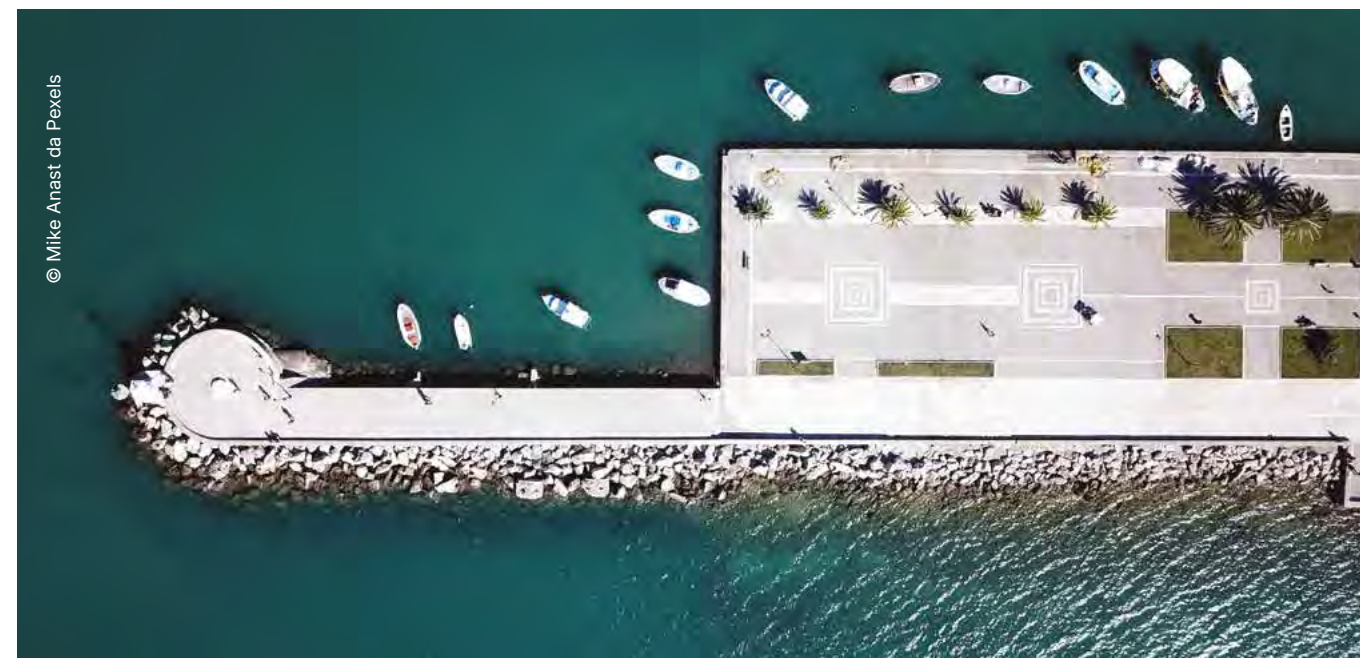


FIG. 1. VEDUTA AEREA DI UNA ZONA COSTIERA DEL NOSTRO MEDITERRANEO

Materiali e metodi

Per superare le limitazioni delle proiezioni IPCC e realizzare proiezioni locali di livello marino, con mappe di potenziale esposizione al rischio allagamento in specifiche aree

DATI GEODETICI

La variazione verticale del suolo viene calcolata mediante i sistemi di osservazione geodetici, capaci di stimarne la velocità verticale con accuratezza di 1-2 mm.

A tale scopo, si possono utilizzare separatamente o congiuntamente due tecniche satellitari che forniscono dati puntuali e spaziali:

- reti di stazioni GNSS (*Global Navigation Satellite System*), che acquisiscono dati di posizione in continuo;
- dati interferometrici InSAR da satellite; per l'Europa provenienti dal programma Copernicus EGMS (*European Ground Motion Service*, <https://land.copernicus.eu/en>), anche integrati da ulteriori dati.

DATI TOPOGRAFICI (MODELLI DIGITALI DEL TERRENO)

La realizzazione di mappe capaci di descrivere le superfici potenzialmente esposte ad allagamento marino richiede l'ausilio di modelli topografici 3D ad alta risoluzione (1-2 m orizzontale e < 20 cm circa per la verticale) delle zone costiere.

Per alcuni Paesi del Mediterraneo, sono disponibili online dati LiDAR che permettono la realizzazione di DEM affidabili. Per le coste italiane, sono disponibili dataset LiDAR distribuiti dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (<https://gn.mase.gov.it/portale/pst-dati-lidar>) (rilievi del 2008 per la costa con risoluzione ~2 m e dal 2007 al 2012 per le aree interne, con risoluzione 0,5-0,7 m) nel sistema ellissoidico WGS84. Poiché le

PROIEZIONI CLIMATICHE (IPCC AR6)

Come riferimento, vengono considerate le proiezioni regionali del livello del mare fornite nel Rapporto di Valutazione AR6 dell'IPCC [1, 7 e 8] che coprono l'intervallo 2020-2150 (<https://zenodo.org/record/6382554>). In particolare, i dati a media confidenza che includono solo i processi per i quali vi è un accordo generale nella comunità scientifica, forniti su una griglia globale di 1° x 1°, che include stazioni mareografiche.

Le proiezioni AR6 considerano diverse fonti geofisiche, come la presenza o lo scioglimento delle calotte glaciali di Antartide e Groenlandia, i ghiacciai, l'acqua terrestre, la dinamica oceanica (inclusa l'espansione termica) e il GIA.

costiere, è necessario effettuare una integrazione di dati multiparametrici che comprendano osservazioni dallo spazio, da terra e dal cielo (aerei o droni), lungo le coste.

Un recente studio [4] ha selezionato oltre 600 stazioni GNSS situate entro 5 km dalla linea di costa nell'intera area mediterranea, con serie temporali superiori a 4,5 anni nell'intervallo 1996-2023, integrando queste osservazioni con dati mareografici disponibili a partire dal 1880 circa in alcune stazioni collocate nei porti principali [5]. I dati sono reperibili da:

- ISPRA (Rete Mareografica Nazionale, www.mareografico.it);
- PSMSL (*Permanent Service for Mean Sea Level*, <http://psmsl.org>);
- Comune di Venezia (www.comune.venezia.it), Consorzio Venezia Nuova (CVN) e CNR, per la Laguna di Venezia.

quote devono essere riferite al livello medio del mare, i dati sono stati verificati e convertiti in quote geoidiche con il software ConVergo, utilizzando il modello Italgeo 2005 [6]. Quest'ultimo è fornito dall'Istituto Geografico Militare Italiano nel sistema di coordinate RDN2008/UTM 32-33.

A scala locale, sono anche stati utilizzati dati INGV di voli aerofotogrammetrici acquisiti con voli a bassa quota (< 120 m) con Sistemi a Pilotaggio Remoto (SAPR - droni). Da tali dati, con software specifici (ad esempio QGIS®) sono stati generati DEM con risoluzione compresa da 1-2 m (da LiDAR) a 2 cm/pixel circa (da SAPR), sui quali viene tracciata in modo semiautomatico la linea di costa.

I dati vengono forniti per tutti gli scenari di riscaldamento globale, denominati Percorsi Socioeconomici Condivisi (*Shared Socioeconomic Pathways*, SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5), nonché per cinque possibili livelli di incremento della temperatura media globale (Tlim: 1,5°, 2°, 3°, 4° e 5 °C rispetto ai valori preindustriali, 1850-1900).

Le proiezioni includono il GIA e altri contributi al VLM a lungo termine, estrapolati dai dati storici dei mareografi della rete PSMSL utilizzando un approccio statistico spazio-temporale [7], assumendo che rimanga costante nell'arco temporale considerato.

Tuttavia, questo approccio può portare a una sottostima del VLM nelle aree non ancora monitorate dalle stazioni mareografiche, che possono essere influenzate da tassi significativi di VLM (ad esempio, per estrazione di fluidi, compattazione del suolo, tettonica o vulcanismo). Risulta, quindi, necessario ricalcolare le proiezioni AR6 includendo le velocità verticali del suolo ricavate dai dati geodetici, assumendo che queste abbiano un andamento lineare fino al 2150 [5]. Questa ipotesi è ragionevole su una lunga scala temporale,

dove il VLM è causato dai movimenti tettonici regionali a scala plurisecolare (GIA e tettonica delle placche), anche se non vale nelle aree vulcaniche sismiche e vulcaniche, dove l'approssimazione di un trend lineare del VLM dipende dall'attività geodinamica, che può produrre deviazioni locali variabili nel tempo e nello spazio. Nonostante queste limitazioni, l'ipotesi adottata [5] è ragionevole, ovvero che le attuali direzioni e velocità del VLM rimangano costanti fino al 2150, salvo casi particolari.

Projected global mean sea level rise under different SSP scenarios

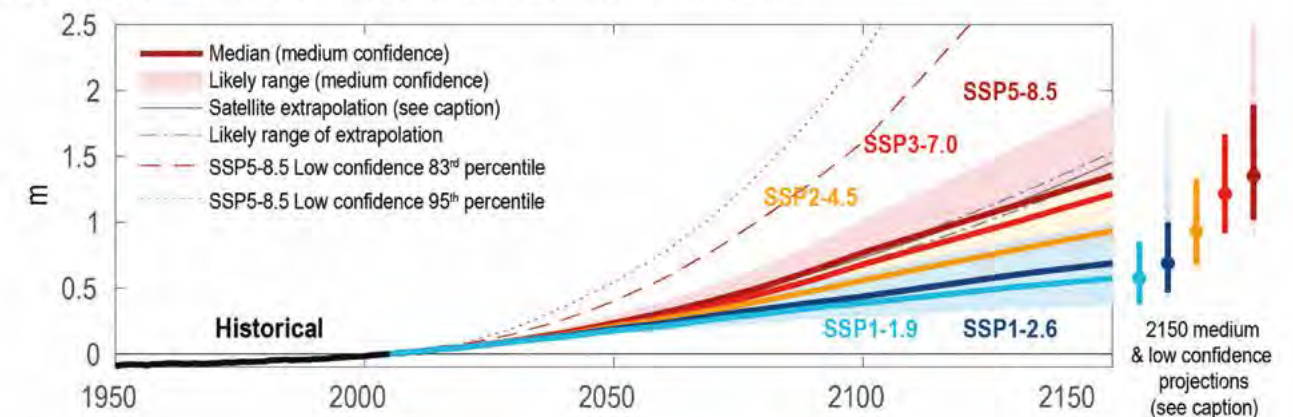


FIG. 2. PROIEZIONI DI AUMENTO DEL LIVELLO MARINO DEL REPORT IPCC AR6 (2021). I DIVERSI COLORI SI RIFERISCONO AI DIVERSI SCENARI SOCIO ECONOMICI (SSP) (FONTE: IPCC WWW.IPCC.CH)

Le proiezioni riviste al 2100 e 2150

Alla scala dell'intero Mediterraneo, l'inclusione dei VLM nelle proiezioni IPCC indica che queste sottostimano in modo significativo il futuro livello marino sulle coste. In particolare, il confronto al 2150 tra le proiezioni riviste e quelle IPCC mostra differenze comprese tra +1,09±0,10 m (aumento in aree subsidenti) e -0,77±0,10 m (diminuzione in aree in sollevamento). In media, il livello marino rivisto supera di circa 8 cm il valore calcolato dall'IPCC. Le zone pianeggianti, i delta fluviali e le lagune presentano i tassi di subsidenza più critici, che accelerano l'aumento del mare locale. Nello scenario peggiore (SSP5-8.5/Tlim 5 °C), entro il 2150

si prevede un RSLR fino a 2,9 m in aree quali il Delta del Po (Italia) (Fig. 2), il Delta del Rodano (Francia), il Delta del Nilo (Egitto) e la pianura di Salonicco (Grecia). Infine, in alcune regioni l'aumento è mitigato (o anche in controtendenza) per il sollevamento tettonico o vulcanico: ad esempio ciò avviene ai Campi Flegrei, dove l'attività vulcanica sta causando un sollevamento anche di 180-200 mm/anno e una diminuzione del livello marino locale, con conseguente mancanza di pescaggio di barche e navi nel porto di Pozzuoli, anche a causa di precedenti fasi di sollevamento del suolo.

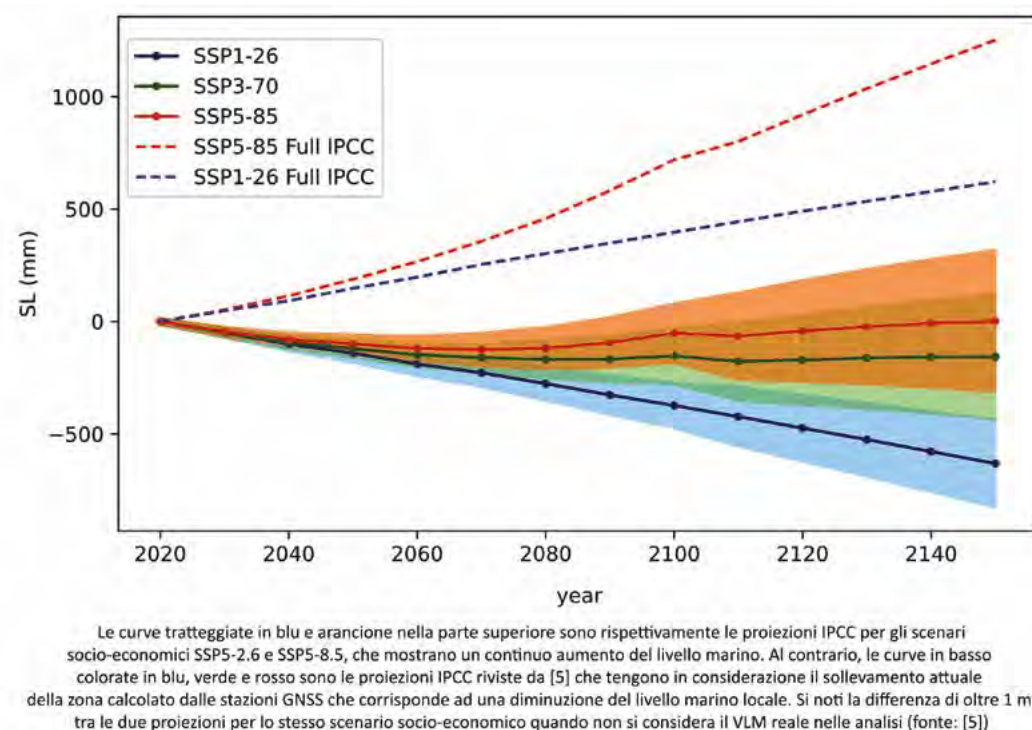


FIG. 3. PROIEZIONI RELATIVE DEL LIVELLO DEL MARE AI CAMPI FLEGREI FINO ALL'ANNO 2150

Impatto territoriale ed esposizione al rischio di inondazione marina

L'analisi territoriale dei 44.000 km di coste del Mediterraneo ha permesso di mappare le zone con maggiore esposizione al rischio. In particolare, sono state censite 163 pianure costiere principali distribuite in 15 Paesi, per un'estensione totale di 38.529 km². Circa 19.000 km² di queste aree costiere saranno esposte a un maggiore rischio di inondazione permanente o temporanea (per mareggiate, *storm surge* e tsunami) nei prossimi decenni. I tre Paesi più vulnerabili sono l'Egitto (12.879 km², in particolare il Delta del Nilo), l'Italia (10.060 km², in particolare il Delta del Po e il nord Adriatico) e la Francia (3.681 km², nel Delta del Rodano).

In Italia, le analisi hanno evidenziato 39 pianure costiere principali più esposte a rischio inondazione, per un totale

di circa 1.890 km di costa e una superficie di circa 10.060 km². Per l'anno 2150, ipotizzando lo scenario di emissioni più severo (SSP5-8.5), si potranno verificare le seguenti condizioni:

- costa adriatica settentrionale: RSLR di +1,46 m, che porterebbe all'allagamento permanente di un'area pari a circa 679 km²;
- laguna di Venezia: impatti attesi a Porto Marghera, aeroporto Marco Polo e sistema MoSE;
- costa tirrenica centrale e settentrionale: impatti attesi sulle pianure costiere della Versilia e di Fiumicino, incluso l'aeroporto internazionale Leonardo Da Vinci;
- sud Italia e isole: il porto di Manfredonia e dell'isola di Ustica mostrano forti esposizioni all'aumento di livello marino.

Alcuni casi di studio per i porti del Mediterraneo

L'aumento del livello marino rappresenta un fattore di rischio per i porti e le variazioni dipendono, come abbiamo

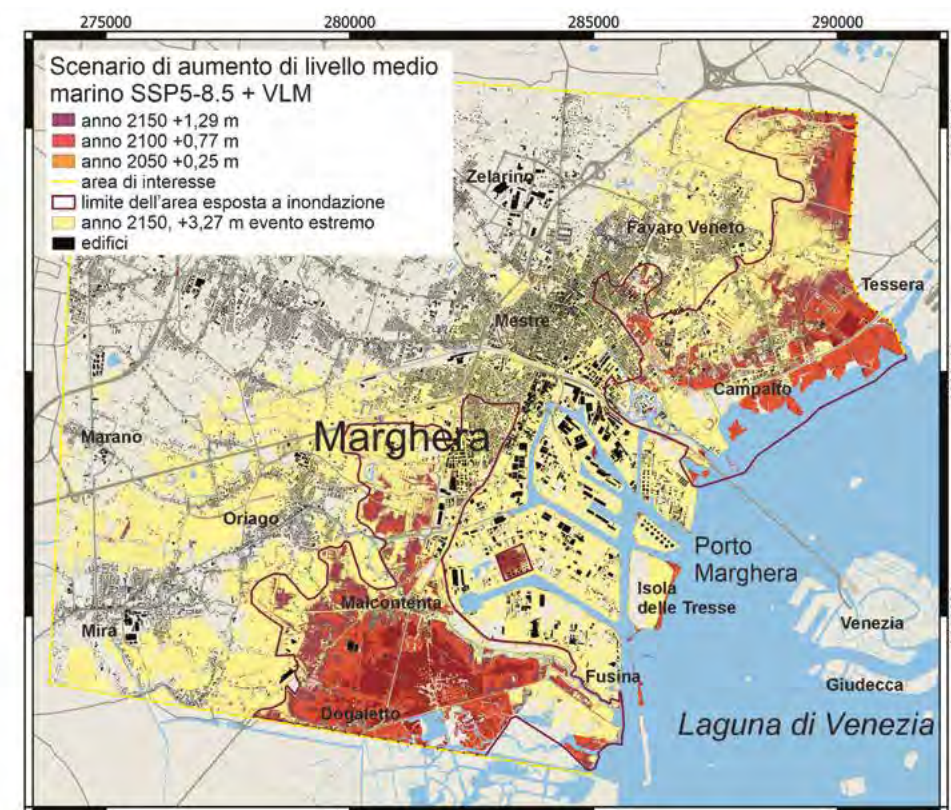
visto in precedenza, dalla componente eustatica e dalla subsidenza, naturale e antropica, che può raddoppiare

o triplicare localmente gli effetti del solo innalzamento marino. A ciò si deve aggiungere che l'aumento delle temperature superficiali del Mediterraneo (possibile incremento di 3 °C entro il 2100) porta all'intensificazione di eventi meteorologici estremi (venti più intensi o cicloni più forti), con un conseguente effetto sugli eventi estremi di mareggiate e picchi di alte maree, come nel caso del recente ciclone Harry (gennaio 2026) che ha devastato le coste della Sardegna, Sicilia, e Calabria, con onde anche oltre i 9-10 m (con picchi di oltre 16 m in mare aperto). In futuro, questi fenomeni storicamente rari o con tempi di ricorrenza secolari diventeranno fenomeni a cadenza annuale, con impatti più distruttivi. A livello globale e regionale, i porti commerciali e industriali

mostrano un'elevata esposizione al fenomeno. Diversi studi indicano che entro la fine del secolo, circa il 25% in più del traffico mercantile globale potrebbe essere direttamente influenzato o danneggiato da livelli marini estremi, in base alla collocazione geografica e alla presenza di barriere protettive. I danni sistemici ai terminal industriali potranno generare perdite economiche, interruzioni degli approvvigionamenti ed effetti a cascata sulla stabilità economica regionale e sulla sicurezza dei trasporti.

A titolo di esempio, presentiamo alcuni recenti risultati per tre porti italiani: il porto industriale di Porto Marghera [9] e i porti minori di Ustica [10] e Lipari [11], oltre a una descrizione del porto canale di Fiumicino (Roma).

PORTO MARGHERA



La scala di colori rappresenta la possibile estensione del livello marino nel 2050, 2100 e 2150 per lo scenario socio-economico SSP5-8.5. L'aumento massimo stimato del livello del mare locale è di 1,27 m nel 2150 (rispetto al 2023), con una perdita di territorio di circa 20 km² (calcolata su un DSM del 2008 realizzato da dati LiDAR). L'area rossa rappresenta lo scenario SSP5-8.5 fino al 2150. L'area in giallo chiaro raffigura invece il livello massimo del mare nel 2150 in caso di una mareggiata in condizione di livello marino più alto di oggi nello scenario SSP5-8.5. La linea viola indica infine l'area potenzialmente interessata direttamente o indirettamente dal fenomeno.

FIG. 4. POTENZIALI SCENARI DI AUMENTO DI LIVELLO MARINO FINO AL 2150 PER PORTO MARGHERA E MESTRE (FONTE: [9])

Un esempio emblematico della vulnerabilità portuale nel Mediterraneo è rappresentato dall'area industriale e commerciale di Porto Marghera, situata nella laguna di Venezia. L'infrastruttura si estende su oltre 220.000 ettari, ospita circa 900 aziende ed è caratterizzata da un volume economico importante, movimentando circa 25 milioni di tonnellate di merci all'anno.

Per quest'area, si stima un aumento del livello marino fino a 1,27 m nel 2150, in assenza di sistemi adattativi, con una

USTICA

Le proiezioni di RSLR fino al 2150 per l'isola di Ustica, previste per tre scenari dell'IPCC e corrette per una subsidenza di $0,71 \pm 0,35$ mm/anno (valore alla stazione GNSS USIX), corrispondono ad un aumento del livello marino locale di 0,66 m, 1,13 m e 1,28 m per i tre percorsi socioeconomici (SSP1-2.6, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) e livelli di riscaldamento globale (Tlim 2 °C, 4 °C e 5 °C). Il limite superiore per il 2150 nello scenario SSP5-8.5 implica significative inondazioni

perdita di territorio di circa 20 km², impattando su oltre 5.800 edifici e reti tecnologiche essenziali. In caso di eventi di marea eccezionali (simili a quelli del 1966 o del 2019), il livello dell'acqua potrebbe salire fino a 3,21 m, quindi al di sopra del limite previsto dal MoSE (3 m, www.mosevenezia.eu), rendendo tale struttura meno efficiente in futuro [12 e 13]. Questo scenario estremo potrebbe potenzialmente allagare circa 78 km² di territorio, estendendo l'inondazione al 44% alle aree limitrofe, sede di centri abitati e dei nodi di trasporto di Mestre (Fig. 4).

costiere, in particolare durante le mareggiate, che potranno raggiungere altezze fino a 10 m circa nel porto di Ustica in condizioni di livello marino più alto.

Con questi scenari, i moli e la *pocket beach* saranno già allagati nel 2100 mentre nel 2150 circa il 13% dell'intera area portuale potrebbe essere sommersa, in assenza di nuove opere di protezione [10] (Fig. 5).

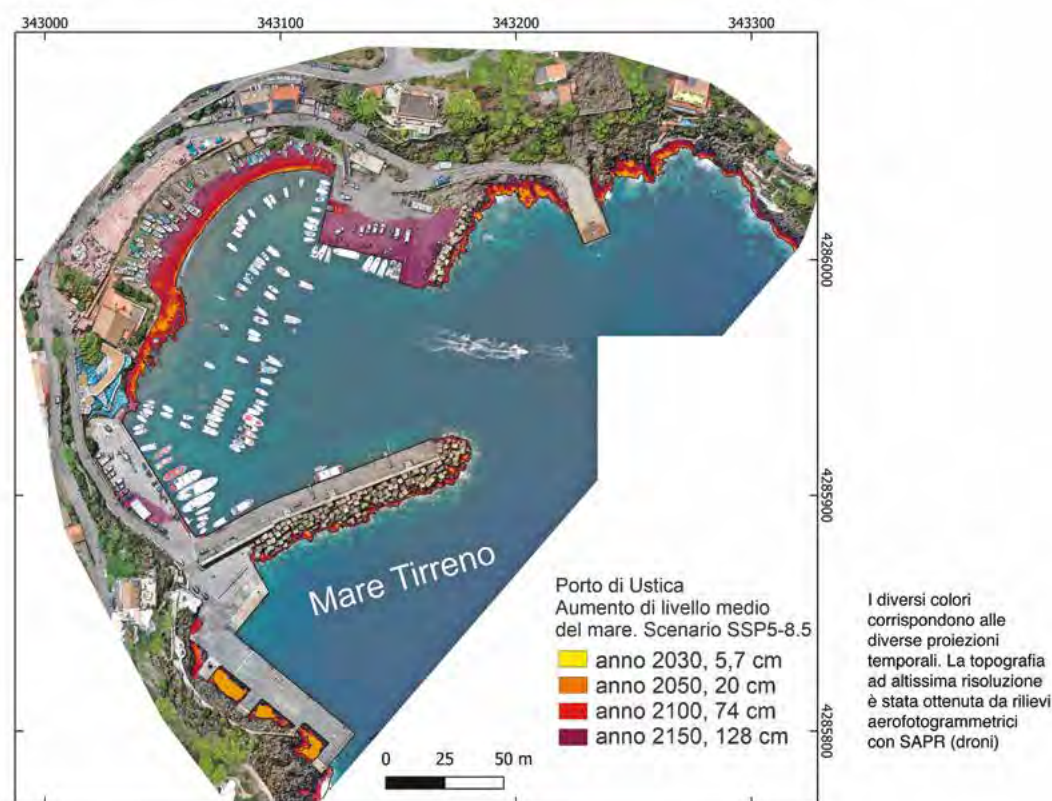
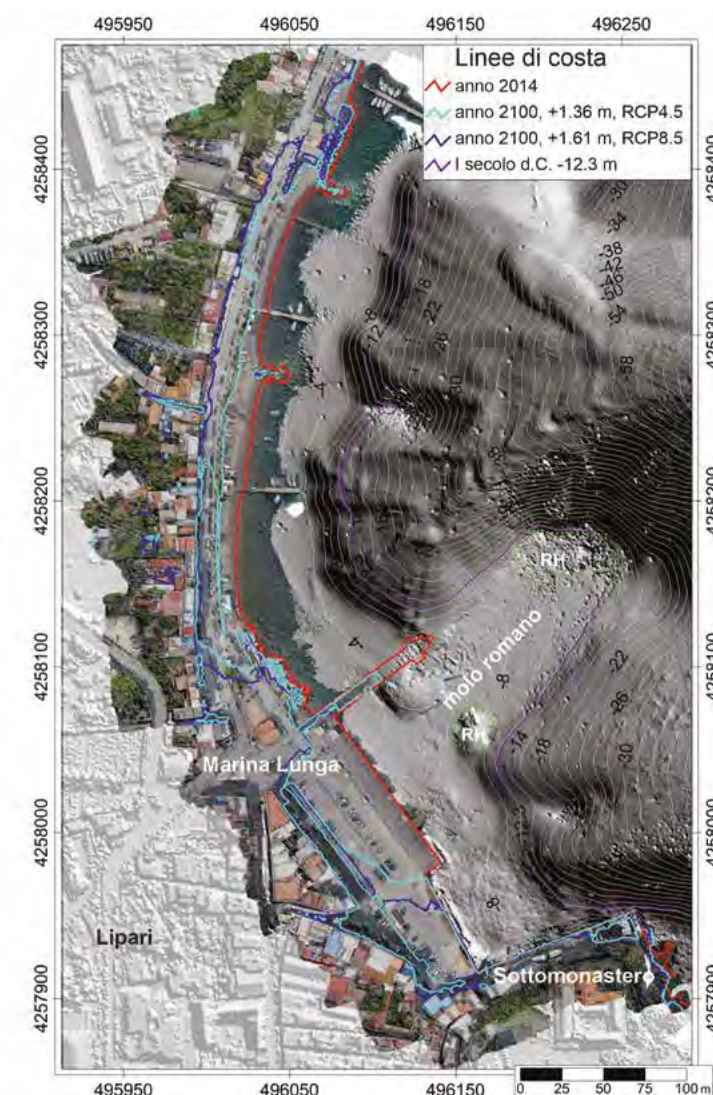


FIG. 5. SCENARI DI AUMENTO DI LIVELLO MARINO PER LA PROIEZIONE SSP5-8.5 FINO AL 2150 PER IL PORTO DELL'ISOLA DI USTICA (FONTE: [10])

LIPARI

Recenti studi [11] evidenziano che l'aumento del livello marino nel 2100 nel porto di Lipari, sarà compreso tra 1,4 e 1,6 m circa a seconda degli scenari climatici considerati (Fig. 6), ciò a causa della subsidenza, anche di 10 mm/anno circa. Il fenomeno sta già causando arretramento della linea di costa, erosione delle spiagge e danni strutturali ed economici

alle strutture portuali di Marina Lunga e Marina Corta, dove si sta verificando una progressiva perdita delle funzionalità delle banchine. In particolare, durante gli eventi meteo-marini estremi (inclusi possibili tsunami), l'energia delle onde sarà sempre meno smorzata dal fondale, estendendo temporaneamente l'area allagata.



Le linee colorate si riferiscono alla posizione della linea di costa fino all'anno 2100 per gli scenari climatici RCP4.5 e RCP8.5 riportati nel Rapporto AR5 dell'IPCC (2014), corretti per la velocità di subsidenza attuale misurata dalle reti GNSS. La topografia ad altissima risoluzione è stata ottenuta da rilievi aerofotogrammetrici con SAPR (droni). Nell'immagine è anche riportata la linea di costa di epoca romana oggi posta a -12,3 m e la posizione del molo romano sommerso a causa della continua subsidenza (fonte [11])

FIG. 6. SCENARI DI AUMENTO DI LIVELLO MARINO FINO AL 2100 PER IL PORTO DELL'ISOLA DI LIPARI

FIUMICINO

La pianura costiera posta alla foce del Tevere, con i porti turistici e commerciali di Fiumicino e Ostia, ha una altitudine media di circa 5 m, con molte aree interne già al di sotto del livello marino. L'erosione costiera, iniziata negli ultimi due-tre decenni, ha ripetutamente causato gravi danni alle coste esponendole sempre più all'azione del mare.

Fiumicino è uno dei principali centri di pesca del Mar Tirreno e riveste grande importanza economica anche in vista della costruzione di due nuovi porti (commerciale e per navi da

crociera). A Ostia e lungo la foce del Tevere sono presenti anche diversi moli turistici e cantieri navali.

Il tasso medio di subsidenza dell'area è stato stimato a 3,14 mm/anno dall'analisi dei dati InSAR rilasciati dall'European Ground Motion Service. Tenendo conto della subsidenza, la proiezione di aumento del livello del mare locale al 2150 è di 1,68 m per lo scenario SSP5-8.5, con conseguente possibile perdita di circa 62 km² di territorio e circa 19.500 edifici con superficie maggiore di 20 m² (Fig. 7) [9].



FIG. 7. SCREENSHOT DEL SOFTWARE GLOBAL MAPPER CON ELABORAZIONE DI SCENARIO DI AUMENTO DI LIVELLO MARINO FINO AL 2150 PER IL PORTO CANALE DI FIUMICINO, SECONDO LA PROIEZIONE CLIMATICA DEL RAPPORTO AR6 DELL'IPCC (2021), CORRETTO PER LA VELOCITÀ DI SUBSIDENZA ATTUALE CALCOLATA DAL COPERNICUS GROUND MOTION SERVICE (TOPOGRAFIA AD ALTA RISOLUZIONE DEL MASE)

Il webGIS

Per rendere questi dati accessibili ai cittadini, nell'ambito del progetto europeo SAVEMEDCOASTS-2, sono stati integrati alcuni risultati all'interno di un webGIS (accessibile dal 2022 su www.savemedcoasts2.eu, [14]). Successivamente, nell'ambito del progetto PRIN GAIA e in collaborazione con l'Università di Bari Aldo Moro e il Centro di Geomorfologia Integrata per il Mediterraneo (CGIAM), l'INGV ha effettuato un aggiornamento del webGIS includendo 39 zone costiere italiane, che comprendono diverse strutture portuali.

Attraverso questo strumento, amministratori pubblici, pianificatori territoriali e scienziati possono interrogare i modelli ad alta risoluzione delle zone costiere esaminate, visualizzando i diversi scenari multi-temporali al variare degli scenari climatici IPCC. Tale approccio multidisciplinare rappresenta un potenziale strumento decisionale per supportare le comunità costiere vulnerabili e nella progettazione di misure di mitigazione e adattamento costiero.

Conclusioni

Lo studio messo in atto per valutare in maniera più realistica le proiezioni e gli effetti di aumento di livello marino, attraverso scenari calcolati su modelli digitali del terreno ad alta risoluzione tramite modelli idraulici passivi ("bathtub approach"), evidenzia la necessità di integrare la resilienza climatica nella pianificazione a lungo termine delle infrastrutture costiere.

Sebbene opere di adattamento e mitigazione (come il MoSE a Venezia) offrano una valida soluzione, si deve tenere presente che potrà essere temporanea a causa del continuo aumento delle temperature globali che inducono a ipotizzare scenari di intensificazione di eventi estremi.

Ciò comporta la necessità di adottare delle strategie combinate che includano:

- il rafforzamento e l'innalzamento delle difese costiere e dei moli portuali;
- una revisione dei piani regolatori portuali e delle politiche di gestione del territorio costiero;
- un monitoraggio continuo sul trend di livello marino e dei tassi di subsidenza locale con la finalità di aggiornare gli scenari di rischio.

Con questi scenari, è indispensabile mantenere una cooperazione fattiva tra scienziati, tecnici e decisori politici per adottare pratiche di resilienza consapevoli per salvaguardare la sicurezza ambientale ed economica delle coste e dei porti del Mediterraneo.



© Jakub Zerdzicki da Pexels

Il riscaldamento globale sta portando a un progressivo innalzamento del livello marino, rischio concreto per l'integrità delle coste

GGC 02 >

Ringraziamenti

Gli autori desiderano esprimere il proprio ringraziamento per il sostegno ricevuto nell'ambito delle attività di ricerca, lavoro che è stato finanziato dai progetti afferenti al progetto GAIA, contratto MIUR (NRRP) n. PRIN2022_PE10_2022ZSMRXJ02.

Si ringrazia, inoltre, il Ministero dell'Università e della Ricerca per il finanziamento assegnato a T.A. nell'ambito del bando "Fondo Italiano per la Scienza 2022-2023 (FIS-2)" per il progetto "Mediterranean Extreme Events and Tipping elements in a changing climate on multiple spatiotemporal scales", FIS-2023-00159, CUP: D53C24005450001.

Dichiarazione di limitazione di responsabilità

Il presente studio ha scopo puramente informativo ed educativo, basato rigorosamente sulle evidenze e sulle metodologie scientifiche descritte dagli autori e dai riferimenti bibliografici citati. Le proiezioni e gli scenari contengono margini di incertezza intrinseci legati alle dinamiche climatiche e geologiche globali e locali e alle variazioni topografiche delle coste per cause naturali e/o antropiche.

[1]. B. Fox-Kemper et al. – "Ocean, Cryosphere, and Sea Level Change", in Climate Change: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2021.

[2]. W.R. Peltier – "Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: the ICE-5G(VM2) model and GRACE", Ann. Rev. Earth. Planet. Sci. 2004. 32,111-149, DOI: 10.1146/annurev.earth.32.082503.144359, 2004.

[3]. D. Zanchettin et al. – "Sea Level Rise in Venice: historic and future trends (review article)", Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 21, 2643-2678. doi.org/10.5194/nhess-21-2643-2021, 2021.

[4]. E. Serpelloni et al. – "Surface velocities and strain-rates in the euro-mediterranean region: from massive GPS data pro-cessing", Front. Earth Sci., 10, 907897.doi.org/10.3389/feart.2022.907897, 2022.

[5]. A. Vecchio et al. – "Sea Level Rise projections up to 2150 in the northern mediterranean coasts", Environ. Res. Lett., 19, 014050. DOI: 10.1088/1748-9326/ad127e, 2023.

[6]. R. Barzaghi et al. – "Refining the estimate of the Italian quasi-geoid", Boll. Geod. E Sci. Affin., 66, 145-159, 2007.

[7]. R.E. Kopp et al. – "Communicating future Sea Level Rise uncertainty and ambiguity to assessment users", Nat. Clim. Chang. 13, 648-660, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01691-8>, 2023.

[8]. G.G. Garner et al. – "IPCC AR6 sea level projections", version 20210809, Zenodo <https://doi.org/10.5281/zenodo.5914709>, 2021.

[9]. M. Anzidei et al. – "Assessing critical infrastructure exposure to Sea Level Rise and land subsidence under climate change: the cases of Venice and Fiumicino airports and Marghera harbour (Italy)", in M.F. Buongiorno, E. Casini, A. Manciuilli (eds) – "The challenge of environmental security in the euro-mediterranean region", NATO ARW 2024, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-99646-7_6, 2025.

[10]. M. Anzidei et al. – "Relative Sea Level Rise projections and flooding scenarios for 2150 CE for the island of Ustica (Southern Tyrrhenian Sea, Italy)", J. Mar. Sci. Eng., 11, 2013, <https://doi.org/10.3390/jmse11102013>, 2023.

[11]. M. Anzidei et al. – "Flooding scenarios due to land subsidence and Sea Level Rise: a case study for Lipari island (Italy)", Terra Nova, 29, 44-51, DOI: 10.1111/ter.12246, 2017.

[12]. T. Alberti et al. – "Dynamical diagnostic of extreme events in the Venice lagoon and their mitigation with the MoSE", Sci. Rep., 13, 10475, 2023.

[13]. D. Faranda et al. – "Attributing Venice Acqua Alta events to a changing climate and evaluating the efficacy of MoSE adaptation strategy", Npj Clim. Atmospheric Sci., 6, 181, 2023.

[14]. A. Falciano et al. – "The SAVEMEDCOASTS-2 webGIS: the online platform for relative Sea Level Rise and storm surge scenarios up to 2100 for the mediterranean coasts", J. Mar. Sci. Eng., 11, 2071, 2023.

Bibliografia
& sitografia

A cura di

**Eros Aiello, Filippo Cappotto,
Daniele Mercuri e Roberto Troncarelli**

La presente rubrica nasce con il fine di portare una lettura geologica chiara e continuativa nel dibattito sulle infrastrutture, analizzando il comportamento dei terreni, le interazioni opera-sottosuolo, le tecniche di indagine e i criteri di valutazione che orientano progettazione, durabilità e gestione del rischio nelle opere civili.

**CNG - CONSIGLIO NAZIONALE
DEI GEOLOGI**

ORIZZONTI SULLE GEOSCIENZE DELLE INFRASTRUTTURE

Porti come ecosistemi dinamici: geologia, resilienza e adattamento climatico nelle aree costiere

La portualità è un ecosistema dinamico governato da processi idrodinamici, sedimentari e geotecnici. La prospettiva geologica permette di interpretare l'evoluzione dei fondali, valutare la resilienza delle opere, supportare la pianificazione porto-città e affrontare gli impatti del cambiamento climatico con strategie di adattamento basate su dati e modellazione.

Il porto è, infatti, un sistema morfodinamico complesso, un ambiente non stazionario in cui processi idrodinamici, sedimentari e geotecnici interagiscono in modo continuo e determinano l'evoluzione delle infrastrutture. Moto ondoso, correnti di marea, *set up* e *set down*, trasporto solido, erosione, deposizione, consolidazione dei terreni e variazioni piezometriche concorrono a definire un equilibrio dinamico che cambia nel tempo e che condiziona direttamente la funzionalità delle opere.

In questo contesto, la componente geologica non rappresenta un elemento accessorio, ma il fondamento

conoscitivo che controlla l'evoluzione dei fondali, la stabilità delle opere di difesa, la risposta del sistema agli eventi estremi e l'interazione tra porto, costa e bacino idrografico. Il geologo assume, quindi, un ruolo strutturale nella modellazione dei processi, nella caratterizzazione dei terreni e nella previsione delle traiettorie evolutive del sistema portuale.

LA RESILIENZA DELLE OPERE MARITTIME COME NECESSITÀ PROGETTUALE

Le infrastrutture portuali sono esposte a subsidenza naturale e antropica, variazioni del livello marino relativo, ciclicità dei carichi dinamici dovuti alle onde e al traffico navale, oltre che a variazioni delle pressioni interstiziali che influenzano la risposta dei terreni di fondazione. Dighe foranee, cassoni, scogliere e banchine devono essere progettati considerando la morfodinamica del bacino portuale, l'interazione tra onda, struttura e fondazione, la stabilità geotecnica in condizioni statiche e sismiche e l'evoluzione dei fondali e dei canali di accesso.

Le soluzioni innovative oggi in sperimentazione, come le dighe modulari rialzabili, i sistemi di monitoraggio integrato basati su GNSS, ADCP, LIDAR costiero e *multibeam*, o gli interventi nature based quali reef artificiali, dune sommerse e ripristino di praterie di fanerogame, mostrano come la resilienza possa essere affrontata come parametro misurabile, fondato su dati, modellazioni e osservazioni continue.

La relazione tra porto e città richiede una lettura geologica avanzata, capace di interpretare le vulnerabilità costiere, le dinamiche di arretramento o avanzamento della linea di riva, le interferenze tra opere portuali e correnti litoranee, le condizioni di pericolosità idraulica e idrogeologica e la compatibilità geotecnica delle trasformazioni urbanistiche. Il geologo contribuisce, pertanto, alla pianificazione integrata fornendo modelli di evoluzione morfologica, analisi di stabilità dei versanti costieri e delle scarpate portuali, valutazioni di rischio multipericolo che includono *storm surge*, liquefazione, subsidenza ed erosione, oltre a criteri per la rigenerazione delle aree dismesse e la gestione dei sedimenti contaminati. L'obiettivo è costruire un equilibrio tra continuità operativa, sicurezza urbana e tutela del paesaggio costiero, evitando conflitti tra sviluppo economico e qualità ambientale.

L'innovazione e l'efficientamento delle infrastrutture portuali passano sempre più attraverso strumenti geologico-tecnici. I dragaggi sostenibili basati su modellazione del trasporto solido e analisi granulometriche avanzate, la gestione circolare dei sedimenti mediante riuso, ripascimento, capping o trattamento, la caratterizzazione

geotecnica ad alta risoluzione mediante tecniche avanzate di indagine in situ e metodi integrati geotecnici-geofisici e la modellazione numerica con FEM, CFD e modelli accoppiati idro-geotecnici rappresentano elementi centrali dell'attuale innovazione portuale.

A questi si affianca la digitalizzazione dei processi, con *Digital Twin* portuali, monitoraggi in tempo reale e sistemi predittivi, che permettono di anticipare criticità e ottimizzare la gestione.

L'innovazione però non riguarda solo la tecnologia, ma anche la capacità di prevedere il comportamento del sistema porto-fondale-opera nel tempo e di adattare le infrastrutture alle condizioni future.

Il cambiamento climatico costituisce la cornice entro cui tutte queste dinamiche devono essere interpretate: l'innalzamento del livello marino relativo, l'aumento dell'intensità e della frequenza delle mareggiate, la variazione dei regimi di trasporto solido, l'incremento della salinità e le modifiche alle pressioni interstiziali alterano i parametri di progetto e impongono una revisione dei criteri di sicurezza.

La risposta portuale richiede, dunque, scenari climatici integrati nella progettazione, nel monitoraggio geologico ambientale continuo, nelle strategie di adeguamento basate su modellazione predittiva e opere flessibili e adattive lungo l'intero ciclo di vita.

In questa prospettiva, il porto diventa un laboratorio di adattamento climatico capace di guidare la trasformazione dei sistemi costieri e di anticipare le vulnerabilità future.

Pertanto, la portualità contemporanea richiede una visione geologico-tecnica integrata, in cui la geologia struttura la progettazione, guida la pianificazione, supporta la gestione del rischio, orienta l'adattamento climatico e garantisce la sostenibilità operativa nel lungo periodo.

La cultura geologica non è un complemento, ma rappresenta l'infrastruttura cognitiva su cui si fonda la resilienza dei porti italiani e la loro capacità di affrontare un futuro caratterizzato da pressioni crescenti e condizioni in rapido mutamento.



© Gaby Lopez da Pexels

ARTICOLO 06

EVENTI METEOMARINI ESTREMI NEL MEDITERRANEO: IL CICLONE HARRY

Autori

Valentina Laface

Ricercatrice del NOEL – Natural Ocean Engineering Laboratory
presso l'Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria

Felice Arena

Direttore del NOEL – Natural Ocean Engineering Laboratory
e Professore Ordinario del Dipartimento di Ingegneria Civile,
Energia, Ambiente e Materiali presso l'Università Mediterranea
di Reggio Calabria

Le mareggiate estreme rappresentano uno dei principali fattori di sollecitazione per le infrastrutture marittime del Mediterraneo, dove la combinazione tra elevata intensità del moto ondoso, durata dell'evento e caratteristiche morfologiche locali può determinare condizioni di forte criticità.

In questo contesto, l'analisi degli eventi estremi costituisce uno strumento fondamentale per la verifica e il dimensionamento delle opere e per la valutazione della loro vulnerabilità.

Il ciclone Harry, che si è abbattuto sul Mediterraneo centrale nel gennaio 2026, ha generato una mareggiata eccezionale che ha causato ingenti danni lungo le coste italiane [1], principalmente nel Mar Ionio.

Storm Harry: un caso di studio di particolare interesse

L'evento, che di seguito chiameremo Storm Harry, si è distinto per l'elevata intensità del moto ondoso, la notevole estensione spaziale e la persistenza temporale delle condizioni severe, configurandosi come un caso di particolare interesse per la valutazione della vulnerabilità delle infrastrutture marittime.

Lo studio di Storm Harry fornisce quindi elementi utili per una migliore comprensione dei meccanismi di impatto delle mareggiate estreme e offre spunti per l'evoluzione dei criteri di progettazione e gestione del rischio delle infrastrutture marittime in scenari futuri. Storm Harry rappresenta un caso di studio di particolare interesse per

severità, estensione spaziale e persistenza temporale. L'evento ha interessato simultaneamente un'ampia porzione del Mediterraneo centrale, sviluppando condizioni di moto ondoso eccezionalmente intense e configurandosi come una mareggiata a scala di bacino.

Il presente contributo propone una caratterizzazione descrittiva e statistica dell'evento, finalizzata ad analizzarne le principali peculiarità fisiche e a collocarlo nel contesto storico delle mareggiate estreme del Mediterraneo centrale, al fine di fornire possibili spunti per l'aggiornamento dei criteri di progettazione delle infrastrutture marittime.

Dati di input, identificazione degli eventi di mareggiata e calcolo dei parametri descrittivi e statistici

I dati del moto ondoso utilizzati nel presente studio provengono dall'analisi pluriennale del servizio Copernicus Marine *MEDSEA_MULTIYEAR_WAV_006_012* [2-4], disponibile attraverso il Marine Data Store in formato NetCDF. Il prodotto fornisce una ricostruzione continua delle condizioni del moto ondoso nel Mar Mediterraneo dal 1° gennaio 1985, ad oggi. Il dataset include una serie di variabili, tra cui l'altezza significativa delle onde, i periodi spettrali e la direzione media del moto ondoso. Nel presente studio sono stati processati i dati di altezza significativa, identificata nella banca dati dalla variabile *VHM0*, il periodo di picco spettrale *VTPK*, il periodo energetico spettrale *VTM10* e la direzione di provenienza *VMDR*.

Per l'analisi delle mareggiate associate al ciclone Harry è stata considerata una finestra temporale compresa tra le ore 00:00 del 18 gennaio 2026 e le ore 23:00 del 25 gennaio 2026. Tale intervallo consente di intercettare i massimi di altezza significativa associati all'evento nei diversi punti della griglia. Per ciascun punto è stato individuato il massimo di altezza significativa all'interno della finestra selezionata.

A partire dall'istante di picco, la serie temporale è stata analizzata per individuare l'inizio e la fine dell'evento di mareggiata, definiti come gli istanti in cui l'altezza significativa attraversa la soglia critica di 1,5 m, con rispettivamente derivata positiva e negativa. Per tale intervallo sono state quindi estratte e analizzate le serie temporali di altezza significativa, direzione media e periodi spettrali corrispondenti. A partire da tali dati si

possono calcolare una serie di parametri sintetici che aiutano a caratterizzare l'evento fornendo una descrizione quantitativa e allo stesso tempo compatta, di aspetti di rilevanza dell'evento.

Nello specifico, in questo lavoro si è fatto riferimento a:

- l'intensità di picco, espressa dal massimo valore di altezza significativa H_{smax} ;
- la direzione del moto ondoso in corrispondenza del picco dir (H_{smax});
- il valore del periodo di picco in corrispondenza del picco della mareggiata $T_p(H_{smax})$;
- la durata dell'evento (D), definita come l'intervallo temporale compreso tra l'inizio e la fine della mareggiata;
- la persistenza al di sopra di soglie significative assegnate (4 m, 5 m e 6 m);
- l'energia ondosa cumulata (E), ottenuta integrando il potenziale del moto ondoso incidente [6] sull'intera durata dell'evento.

Una volta effettuata l'analisi delle mareggiate durante Harry, sono stati presi in considerazione solo i punti della griglia in cui il picco di altezza significativa ha superato 6 m. Infine, per alcuni punti di particolare interesse, lo studio è stato approfondito con un'analisi completa di tutte le mareggiate storiche per un confronto diretto tra Storm Harry e la mareggiata massima storica. L'analisi comparativa eseguita si basa sulla stima periodo di ritorno $R(H_s > h)$ di una mareggiata la cui altezza significativa massima (picco) supera la soglia h , utilizzando la soluzione analitica del Modello della mareggiata triangolare Equivalente (MTE) [7, 8 e 9].

La caratterizzazione descrittiva e statistica dell'evento

INTENSITÀ SPAZIALE, DIREZIONE E STATO DI SVILUPPO DEL MOTO ONDOSO

Storm Harry ha generato condizioni di moto ondoso eccezionalmente severe su un'ampia porzione del Mediterraneo centrale, con particolare intensificazione nel Mar Ionio e nel Canale di Sicilia. La distribuzione spaziale dei massimi di altezza significativa mostra valori superiori a 8 m su vaste aree, con picchi superiori a 9 m in alcune regioni (Fig. 1A).

La Fig. 1A mette in evidenza la presenza di un corridoio energetico continuo che si sviluppa dalla Sardegna meridionale al basso Ionio, indicando una propagazione coerente dell'evento su scala di bacino mediterraneo.

L'analisi della direzione di provenienza al picco (Fig. 2A) mostra una marcata coerenza direzionale, con valori prevalentemente compresi tra 100° e 140°, corrispondenti a stati di mare provenienti dai quadranti sud-orientali. Tale configurazione è coerente con l'estensione del fetch sul bacino ionico e con la struttura del sistema depressionario che ha alimentato la mareggiata, contribuendo alla formazione di un *forcing* persistente e spazialmente organizzato. L'ampiezza del settore soggetto a $H_s > 6$ m suggerisce che Harry non sia stato un evento localizzato, ma una mareggiata a scala bacino, con effetti simultanei su molteplici tratti costieri.

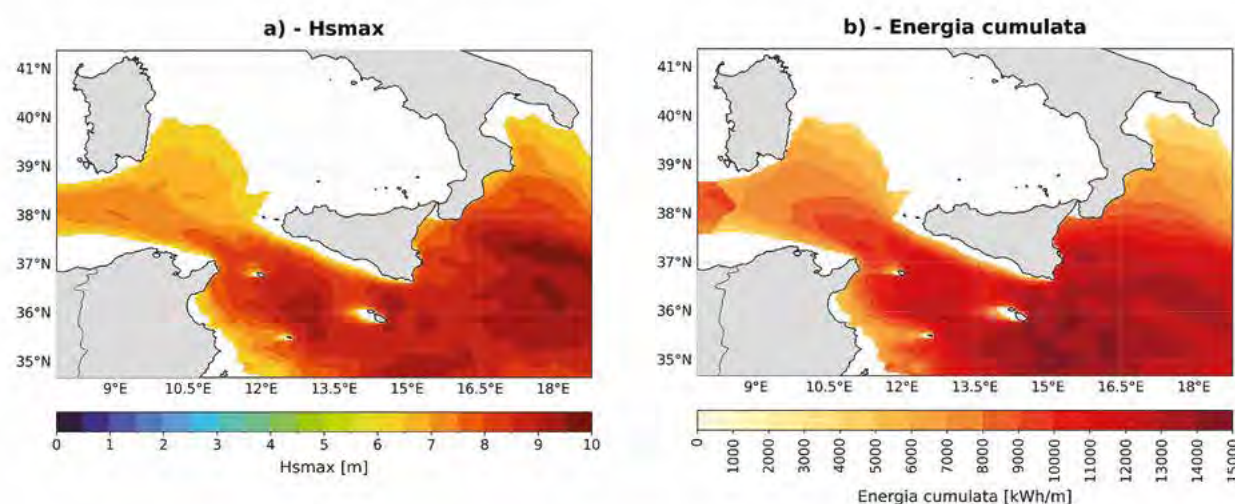


FIG. 1. LA MAPPA DELL'INTENSITÀ (H_{smax}) (1A) E DELL'ENERGIA E (1B) DI STORM HARRY

L'analisi del periodo di picco spettrale in corrispondenza del massimo della mareggiata (Fig. 2B) mostra valori generalmente compresi tra 10 e 14 s, con i valori più elevati concentrati nel Mar Ionio.

In particolare, nelle aree pienamente interessate dall'evento, e quindi caratterizzate dai maggiori valori di altezza significativa, il periodo di picco risulta prevalentemente compreso tra 11 e 14 s, con una vasta porzione del dominio nell'intervallo 12-13 s.

Tali valori si collocano nel range superiore dei periodi di picco tipicamente osservabili nel Mediterraneo durante eventi estremi. In questo contesto, la combinazione tra elevate altezze significative e lunghi periodi di picco è indicativa di un moto ondoso in avanzato stato di sviluppo, sostenuto da fetch estesi e da condizioni di *forcing* persistente. Questa configurazione implica un maggiore contenuto energetico e un incremento del potenziale impatto sulle coste e sulle infrastrutture marittime, in termini di *run-up*, *overtopping* e sollecitazioni impulsive.

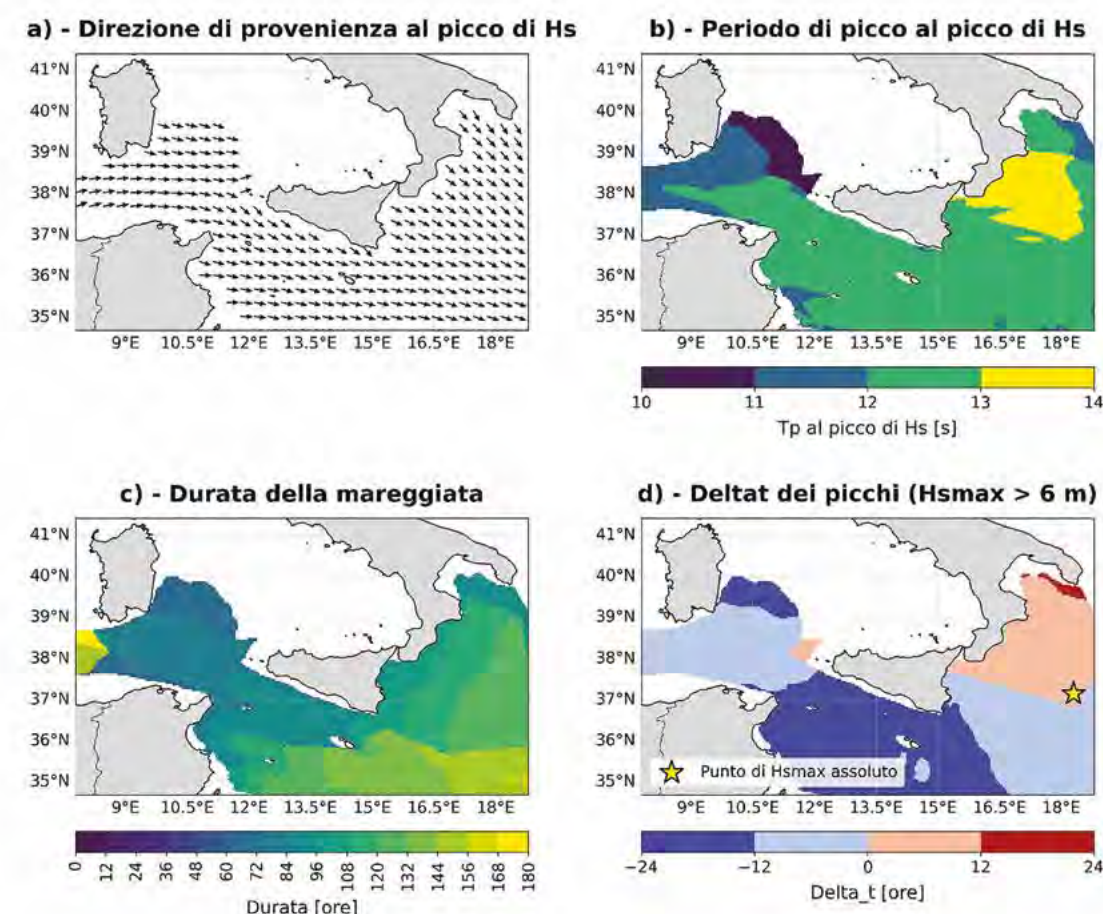


FIG. 2. LA MAPPA DELLA DIREZIONE DI PROVENIENZA (2A), DEL PERIODO DI PICCO SPETTRALE (2B), IN CORRISPONDENZA DEL PICCO DELLA MAREGGIATA (2C) E DELLA DURATA DEL DISTANZIAMENTO TEMPORALE DEI PICCHI DELLA MAREGGIATA (2D) RISPETTO AL PUNTO DI MASSIMO ASSOLUTO DEL DOMINIO

DURATA E PERSISTENZA DELL'EVENTO

Uno degli elementi distintivi di Harry è la durata (Fig. 2C), intesa come intervallo temporale intorno al picco, durante il quale l'altezza significativa si mantiene sopra la soglia critica $h_{crit} = 1,5$ m. La mappa della durata della mareggiata evidenzia tempi sempre superiori a 70 ore, con la maggior parte dei punti della griglia superiori a 100 ore, e con diverse aree eccedenti 140 ore. Durate di questa entità, rappresentano un valore significativamente elevato per il contesto del Mar Mediterraneo, dove le mareggiate estreme risultano generalmente più concentrate nel tempo a causa di fetch limitati rispetto all'oceano, bacini semi-chiusi e tempi di risposta atmosferica più rapidi. Questa persistenza rende Harry particolarmente significativa perché il danno sulle opere marittime non dipende esclusivamente dal picco, ma dal tempo di esposizione a condizioni gravose.

Per approfondire questo aspetto, la Fig. 3 mostra la persistenza sopra soglie elevate (4 m, 5 m e 6 m).

Si osserva come:

- le condizioni con $H_s > 4$ m persistono per oltre 45-50 ore in un'ampia porzione del Mar Ionio, con massimi prossimi a 55-57 ore nei settori centro-meridionali e orientali;
- le condizioni con $H_s > 5$ m mostrano persistenze generalmente comprese tra 30 e 45 ore nelle aree maggiormente esposte, soprattutto nel settore ionico centro-orientale;
- le condizioni con $H_s > 6$ m risultano ancora persistenti per circa 18-30 ore su aree estese del bacino ionico, con valori localmente superiori a 30 ore.

Questo elemento è cruciale nel valutare fenomeni cumulativi di fatica strutturale, l'accelerazione di fenomeni erosivi nelle coste interessate, oltre al progressivo danneggiamento delle opere in fregio ai litorali.

L'ENERGIA COMPLESSIVA TRASFERITA

L'energia cumulata associata alla mareggiata (Fig. 1B), calcolata integrando temporalmente il potenziale di ciascuno stato di mare lungo tutta la durata dell'evento, rappresenta uno dei parametri più descrittivi della severità complessiva di Harry. A differenza del picco di altezza significativa, questa grandezza sintetizza simultaneamente intensità, durata e periodi dell'evento, restituendo una misura più rappresentativa dell'energia effettivamente trasferita.

La distribuzione spaziale evidenzia, nella finestra temporale considerata, valori massimi di energia ondosa cumulata superiori a 14.000 kWh/m si osservano nei settori offshore del basso Ionio e del Canale di Sicilia, lungo il principale corridoio di propagazione della mareggiata. Valori ancora molto elevati, dell'ordine di 8.000-10.000 kWh/m, sono presenti nelle acque prospicienti i tratti costieri maggiormente esposti.

Ciò evidenzia come l'evento abbia mantenuto un contenuto energetico rilevante anche in prossimità della costa, indicando condizioni potenzialmente gravose per i litorali esposti. Questo aspetto è di particolare interesse dal punto di vista ingegneristico, poiché implica condizioni favorevoli allo sviluppo di fenomeni di erosione intensa, destabilizzazione progressiva delle opere in fregio ai litorali e incremento dei volumi di *overtopping*.

LA DINAMICA SPAZIO-TEMPORALE DELLA PROPAGAZIONE DEL PICCO

La Fig. 2D introduce un elemento particolarmente significativo nell'analisi dell'evento: la sequenza temporale dei picchi della mareggiata. Assumendo come riferimento temporale il punto in cui si registra il massimo assoluto dell'intero dominio, è possibile valutare il ritardo (positivo o negativo) con cui il picco si manifesta negli altri punti del bacino.

La distribuzione dei ritardi evidenzia una chiara successione temporale dei picchi, con valori negativi nelle aree che raggiungono il massimo prima del punto di riferimento e valori positivi nei settori che lo raggiungono successivamente. Il gradiente osservato suggerisce una progressiva traslazione del nucleo energetico da sud-ovest verso est-nord-est, in accordo con la configurazione direzionale del moto ondoso.

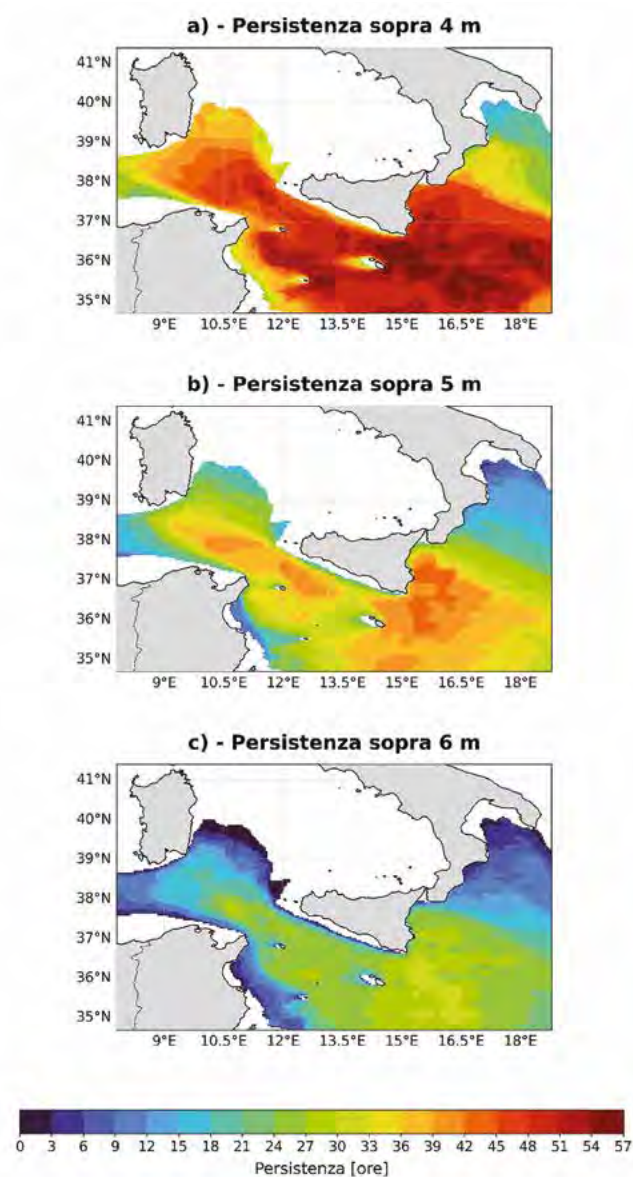


FIG. 3. LA PERSISTENZA SOPRA SOGLIE DI ALTEZZA SIGNIFICATIVA ASSEGNATE, CONSIDERANDO SOLO I PUNTI IN CUI IL PICCO DI STORM HARRY HA SUPERATO I 6 M

Tuttavia, l'aspetto più rilevante è che tali differenze temporali risultano contenute entro una finestra relativamente ristretta rispetto alla durata complessiva dell'evento, indicando una sostanziale pseudo-simultaneità dei massimi su un'ampia porzione del dominio. Questo comportamento è tipico di eventi a scala sinottica, in cui il *forcing* atmosferico mantiene coerenza spaziale e temporale su estensioni molto ampie del bacino.

Dal punto di vista applicativo, tale caratteristica assume particolare importanza nella gestione del rischio costiero, poiché implica la possibilità di impatti quasi contemporanei

IL CONFRONTO CON GLI ESTREMI STORICI

Al fine di fornire una caratterizzazione più dettagliata e statisticamente robusta dell'evento, sono stati selezionati dieci punti rappresentativi distribuiti lungo il dominio di studio (Fig. 5), sui quali è stata condotta un'analisi dei dati storici di moto ondoso. La Fig. 4 riporta le storie temporali di altezza significativa e direzione del moto ondoso, durante Harry, nei dieci punti di approfondimento selezionati lungo il dominio. L'analisi evidenzia una notevole coerenza nella successione temporale dei picchi, confermando il carattere pseudo-simultaneo della mareggiata già emerso dall'analisi spaziale dei ritardi. In particolare, si osserva come i massimi di altezza significativa si concentrino entro

su tratti di costa anche molto distanti tra loro, riducendo la capacità di risposta locale e aumentando la vulnerabilità sistemica delle infrastrutture esposte.

una finestra temporale relativamente ristretta, pur con lievi sfasamenti tra i diversi punti, coerenti con la propagazione del nucleo energetico sul bacino.

Contestualmente, le serie temporali di direzione mostrano una marcata stabilità del settore di provenienza durante la fase più intensa dell'evento, con prevalenza di componenti comprese tra SE e SSE. Questa combinazione di elevata intensità, coerenza direzionale e limitata dispersione temporale dei massimi conferma la natura sinottica dell'evento, distinguendolo da configurazioni di mareggiata a scala locale o multi-evento.

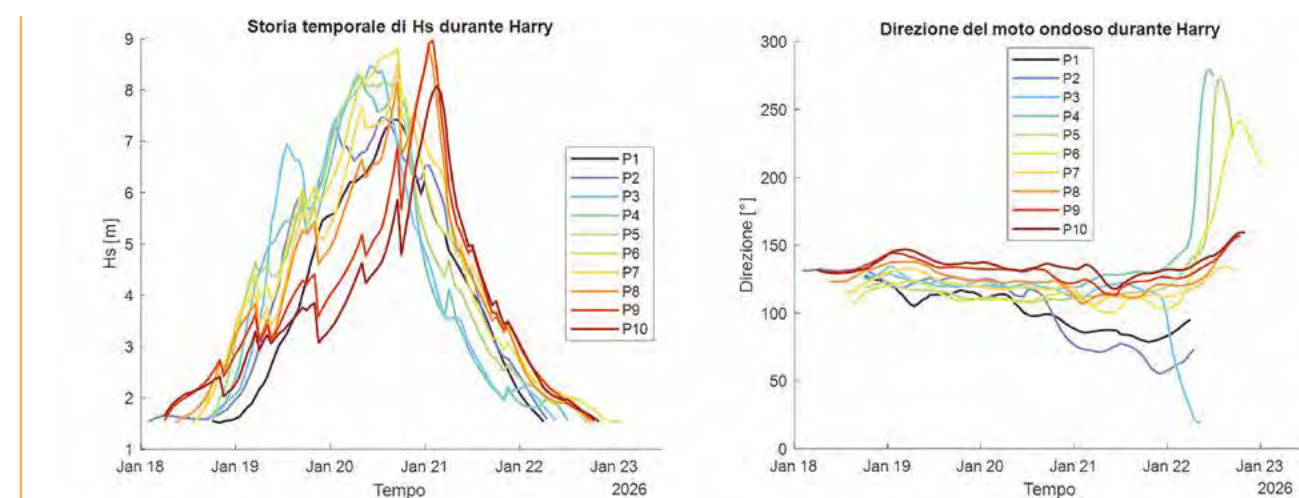


FIG. 4. STORIE TEMPORALI DI ALTEZZA SIGNIFICATIVA E DIREZIONE DELLA MAREGGIATA HARRY, NEI DIECI PUNTI DI SELEZIONATI

Per collocare la Storm Harry nel contesto storico delle mareggiate estreme del Mediterraneo centrale e valutarne il grado di eccezionalità rispetto agli eventi massimi noti si propone il confronto con la mareggiata massima storica, selezionata in relazione al picco, sviluppato considerando sia i valori di altezza significativa massima, sia i corrispondenti periodi di ritorno stimati mediante il metodo delle Mareggiate Triangolari Equivalenti (MTE).

I risultati, riportati in Fig. 5, mostrano che nel Mar Ionio e nella parte meridionale del Canale di Sicilia, Harry ha superato i massimi storici locali in termini di H_{smax} , con periodi di ritorno significativi, con punte prossime ai 500 anni.

È importante evidenziare che nel Mar Ionio, dove si sono registrati i danni più significativi causati da Harry (Sicilia e Calabria), il periodo di ritorno nei punti in esame supera sistematicamente i 100 anni, con un picco circa 480 anni. Questo confronto risulta particolarmente significativo poiché consente di quantificare non solo il superamento del massimo storico in termini di intensità, ma anche il salto di rarità statistica dell'evento rispetto alla climatologia estrema locale. Dal punto di vista della gestione del rischio, tali evidenze suggeriscono che Harry rappresenti un evento-test particolarmente significativo per valutare l'adeguatezza delle infrastrutture esistenti rispetto agli scenari estremi contemporanei, evidenziando possibili limiti dei criteri progettuali.

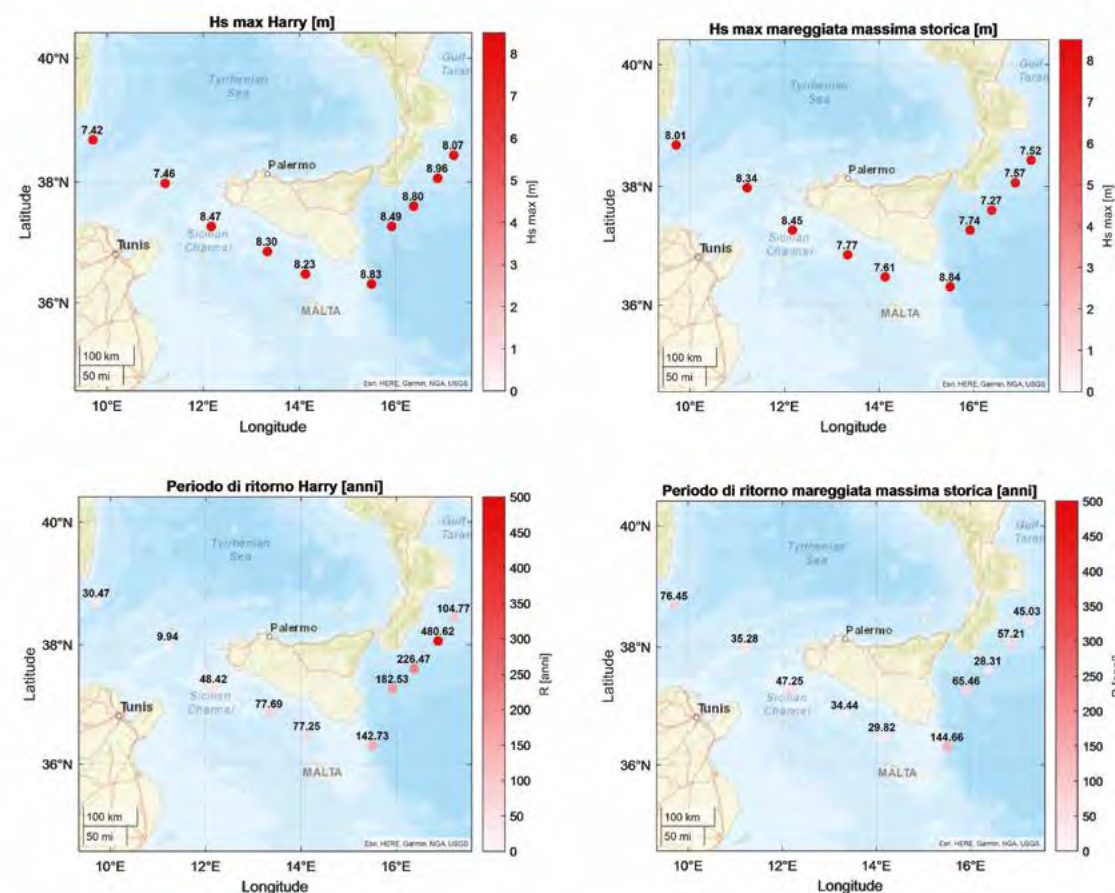


FIG. 5. CONFRONTO TRA LA MAREGGIATA HARRY E LA MAREGGIATA MASSIMA STORICA IN TERMINI DI PICCO (FIGG. 5A E 5B) E PERIODO DI RITORNO $R(H_s > H)$ (FIGG. 5C E 5D)

Spunti per la progettazione

L'analisi dei dati ondametrici associati al ciclone Harry nel Mare Mediterraneo centrale evidenzia alcuni aspetti che assumono particolare rilevanza nel quadro della progettazione e verifica delle infrastrutture marittime. Pur trattandosi di un singolo evento, le sue caratteristiche mettono in luce alcuni aspetti che possono non essere attenzionati in maniera adeguata, rivolgendo l'attenzione ai livelli di progettazione di un'opera costiera o portuale. Un primo elemento di rilievo riguarda il ruolo della durata dell'evento. Nella pratica progettuale, la verifica delle opere marittime è spesso condotta assumendo condizioni di picco rappresentative, mentre la durata della sollecitazione riceve un'attenzione secondaria. Harry ha mostrato come la permanenza prolungata di stati di mare severi possa amplificare in modo significativo i meccanismi di danno,

favorendo fenomeni cumulativi quali fatica strutturale, progressiva destabilizzazione degli elementi di rivestimento, incremento dei volumi di *overtopping* e accentuazione dei fenomeni erosivi. Questo risultato suggerisce l'utilità di integrare la durata tra i parametri di riferimento nella valutazione della risposta strutturale. Un secondo aspetto, legato al precedente, riguarda l'energia associata a una mareggiata: essa si conferma un indicatore molto rappresentativo della severità reale dell'evento, insieme al valore massimo di altezza significativa. Due mareggiate con picchi simili possono produrre effetti molto differenti se caratterizzate da diversa durata e diverso contenuto periodale. L'elevata energia cumulata osservata durante Harry, e la significativa quota di essa trasmessa fino alla fascia costiera, evidenziano l'importanza di considerare

nei criteri progettuali non soltanto l'intensità istantanea, ma il bilancio energetico complessivo dell'evento. Un ulteriore elemento di considerevole importanza emerso da questo studio riguarda la natura spazialmente estesa e pseudo-simultanea della mareggiata. La relativa vicinanza temporale dei picchi su ampie porzioni del bacino rappresenta una sfida nuova nella gestione del rischio, poiché implica la possibilità di impatti multipli e simultanei su infrastrutture geograficamente distanti. In tali condizioni, la vulnerabilità non è più esclusivamente locale, ma assume una dimensione sistemica. Questo aspetto suggerisce che la pianificazione della risposta agli eventi estremi debba evolvere da una logica puntuale a una logica di sistema costiero integrato.

Da queste evidenze, emerge con forza il tema della robustezza e resilienza delle opere marittime. La robustezza, intesa come capacità dell'opera di sostenere condizioni estreme senza collasso o perdita funzionale, deve essere accompagnata dalla resilienza, ovvero dalla capacità di mantenere prestazioni accettabili, limitare il danno e favorire un rapido recupero post-evento. In quest'ottica, assume crescente importanza l'adozione di configurazioni progettuali adattive, capaci di evolvere nel tempo in risposta al mutare delle condizioni climatiche e dei regimi estremi. Nel complesso, Harry suggerisce che i futuri criteri progettuali potrebbero beneficiare di un'evoluzione verso approcci multi-parametrici, in cui intensità, durata, energia cumulata ed estensione spaziale dell'evento concorrano congiuntamente alla definizione delle condizioni di progetto.

Conclusioni

Storm Harry rappresenta un caso di studio di particolare rilevanza nel contesto delle mareggiate estreme del Mediterraneo. L'analisi sviluppata ha evidenziato come l'evento abbia avuto delle caratteristiche di eccezionalità, non esclusivamente per i valori di picco di altezza significativa, ma per la combinazione di elevata intensità, lunghi periodi di picco, persistenza temporale sopra soglie medio-alte, elevata energia e durata, il tutto con una marcata coerenza spaziale e direzionale. Il confronto con gli estremi storici ha inoltre confermato il carattere eccezionale della mareggiata, con superamenti locali dei massimi noti e periodi di ritorno che, in alcuni casi, risultano sensibilmente superiori a quelli associati agli eventi storici di riferimento. Questi risultati mettono in luce la necessità di superare approcci progettuali basati esclusivamente su parametri di picco, adottando metodologie capaci di rappresentare in modo più completo la severità reale dell'evento.

[1]. Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, Ocdpc n. 1180 del 30 gennaio 2026 – Primi interventi urgenti di protezione civile in conseguenza degli eccezionali eventi meteorologici che, a partire dal giorno 18 gennaio 2026, hanno colpito il territorio della fascia costiera della regione Calabria, della Regione Autonoma della Sardegna e della regione Siciliana (2026).

[2]. G. Korres, M. Ravdas, A. Zacharioudaki, D. Denaxa, M. Sotiropoulou – "Mediterranean Sea Waves Reanalysis (CMEMS Med-Waves, MedWAM3 system) (Version 1) [data set]", Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS), https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIEAR_WAV_006_012, 2021.

[3]. G. Korres, M. Ravdas, D. Denaxa, M. Sotiropoulou – "Mediterranean Sea Waves Reanalysis INTERIM (CMEMS Med-Waves, MEDWAM3i system) (Version 1) [data set]", Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS), https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIEAR_WAV_006_012_MEDWAM3i, 2021.

[4]. G. Korres, C. Oikonomou, D. Denaxa, M. Sotiropoulou – "Mediterranean Sea Waves Monthly Climatology (CMS Med-Waves, MedWAM3 system) (Version 1) [data set]", Copernicus Marine Service (CMS), https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIEAR_WAV_006_012_CLIM, 2023.

[5]. P. Boccotti – "Wave Mechanics and Wave Loads on Marine Structures", Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2014.

[6]. V. Laface, G. Malara et al. – "Wave climate analysis for the design of wave energy harvesters in the Mediterranean Sea", Renewable Energy 77, 125-141, 2015.

[7]. F. Fedele, F. Arena – "The equivalent power storm model for long-term predictions of extreme wave events", J. Phys. Oceanogr. 40, 1106-1117, 2010.

[8]. V. Laface, F. Arena – "A new equivalent exponential storm model for long-term statistics of ocean waves", Coast. Eng. 116, 133-151, 2016.

[9]. V. Laface, E.M. Bitner-Gregersen, F. Arena, A. Romolo – "A parameterization of DNV-GL storm profile for the calculation of design wave of marine structures", Mar. Struct. 68, 102650, 2019.

A cura di

**Luca Bernardini, Francesco Caporaso
e Luigi Mupo**

Una rubrica che offre una prospettiva sulle attività di Anas nella progettazione, nella gestione e nella manutenzione delle strade e delle opere d'arte. L'obiettivo è condividere metodologie e innovazioni, contribuendo al dibattito con approfondimenti su processi, tecnologie e modelli di gestione che supportano la sicurezza, la resilienza e l'efficienza del sistema infrastrutturale del Paese.

**ANAS - GRUPPO FERROVIE
DELLO STATO**

LA VOCE DELLA RETE INFRASTRUTTURALE

Un ruolo strategico per l'accessibilità portuale nel sistema logistico nazionale ed europeo

L'ultimo miglio, connessione strategica di infrastruttura che porta le merci al porto e le riprende per distribuirle nel Paese, è prevalentemente realizzato da Anas (Gruppo FS). Spesso tale distanza rappresenta la parte più critica dello spostamento, in termini di tempo, costi e stress: la grande sfida da affrontare quotidianamente sta nel potenziare le infrastrutture come connessioni attive e funzionali tra le diverse soluzioni di trasporto. A titolo esemplificativo, gli interventi previsti per l'accessibilità ai porti di Ancona e Gioia Tauro mostrano come il ruolo di Anas nella progettazione e realizzazione di nuove connessioni stradali e adeguamenti infrastrutturali possa favorire l'integrazione con le reti TEN-T e sia orientato a ridurre le criticità di traffico, rafforzando la competitività dei porti nel sistema logistico nazionale ed europeo.

PORTUALITÀ E ACCESSIBILITÀ: IL CASO GIOIA TAURO

Il porto di Gioia Tauro è uno dei più grandi del Mediterraneo. Anas ha avviato tre interventi per un investimento di 200 milioni,

con l'obiettivo di migliorare la viabilità commerciale al porto. Verrà realizzato un nuovo accesso al gate sud che favorirà il traffico proveniente dalle aree meridionali e il nuovo sistema viario sarà collegato alla A2 Autostrada del Mediterraneo, creando una tangenziale alternativa sia per il traffico commerciale del porto che per la mobilità quotidiana. L'evoluzione verso un modello di "gateway intermodale" è sostenuta da investimenti infrastrutturali e tecnologici, anche nell'ambito del PNRR, che mirano a rafforzare la connessione ferroviaria, potenziare l'accessibilità stradale e promuovere la sostenibilità ambientale.

In tale scenario, Anas riveste un ruolo centrale contribuendo al miglioramento dell'accessibilità al porto perché direttamente interessata al potenziamento dei collegamenti al porto di Gioia Tauro, con l'inserimento nel contratto di programma Anas-MIT di tre interventi:

- lo svincolo di Rosarno: l'intervento, in corso di esecuzione, prevede l'adeguamento del relativo svincolo autostradale e mira all'innalzamento del livello di servizio mediante la razionalizzazione delle connessioni tra A2, S.S. 682 e viabilità locale; la realizzazione di una nuova rampa diretta elimina le interferenze tra traffico pesante e traffico ordinario per ridurre le condizioni di congestione e di criticità per la sicurezza;
- il collegamento tra lo svincolo di Rosarno e il porto di Gioia Tauro: complementare all'adeguamento dello svincolo di Rosarno, è attualmente in fase di progettazione definitiva la riqualificazione della S.S. 682dir, per circa 5,5 km, tra lo svincolo di Rosarno e il gate portuale, attraverso ampliamenti di carreggiata e miglioramento del sistema di drenaggio, per una gestione più efficiente dei flussi;
- il collegamento porto di Gioia Tauro gate sud-A2 (lotto 1 e lotto 2): un nuovo collegamento diretto tra il gate sud del porto, la S.S. 18 e la A2. L'infrastruttura, con sezione a quattro corsie (categoria B), potenzierà i collegamenti verso il porto, così da ridurre il traffico merci che va ad impegnare lo svincolo di Rosarno e le strade urbane ed extraurbane di collegamento tra Gioia Tauro e il porto. L'opera, finanziata per circa 137 milioni, è un tassello fondamentale per l'inserimento del porto nel Corridoio Scandinavo-Mediterraneo.

ACCESSIBILITÀ PORTUALE E ULTIMO MIGLIO: IL COLLEGAMENTO VIARIO TRA IL PORTO DI ANCONA E LA S.S. 16 "ADRIATICA"

Anas ha avviato i lavori per il nuovo collegamento stradale tra il porto di Ancona e la S.S. 16 "Adriatica", con un investimento complessivo di circa 150 milioni. L'opera consentirà di eliminare dall'area urbana il traffico in ingresso e uscita dal porto, contraddistinto da una forte componente di mezzi pesanti che oggi utilizzano esclusivamente la rete viaria comunale.

L'intervento, in fase di esecuzione, si colloca nell'ambito del quadro programmatico nazionale definito dal Contratto di Programma 2016-2020 ed è parte integrante del Protocollo d'Intesa sottoscritto il 9 febbraio 2017 tra il MIT, la Regione Marche, il Comune di Ancona, l'Autorità di Sistema Portuale, ANAS e RFI.

L'opera costituisce elemento strategico del più ampio progetto "Lungomare Nord" orientato alla riqualificazione urbana, alla messa in sicurezza della fascia costiera e al potenziamento dei sistemi di mobilità lungo il corridoio adriatico.

Il porto di Ancona svolge, infatti, una funzione logistica rilevante nel Mediterraneo, con circa un milione di passeggeri annui e traffici merci consistenti, tra cui oltre 160.000 TEU. L'attuale assetto degli accessi determina tuttavia criticità legate alla commistione tra traffico portuale e urbano, con impatti su sicurezza, congestione ed emissioni. La nuova infrastruttura consente di separare i flussi, riducendo i tempi di percorrenza a circa 3 minuti tra porto e S.S. 16, migliorando sensibilmente i livelli di servizio e contribuendo alla sostenibilità complessiva del sistema dei trasporti.

Dal punto di vista tecnico, il tracciato si sviluppa per circa 2,5 km interamente nel territorio comunale di Ancona. Le principali opere d'arte includono le gallerie naturali Torrette 1 (470 m) e Torrette 2 (650 m), nonché il viadotto Lolò (285 m), progettati tenendo conto dei vincoli morfologici, urbanistici e ambientali e ottimizzando l'inserimento nel contesto geomorfologico caratterizzato dalla presenza di aree a elevata pericolosità geomorfologica anche riconducibili alla grande frana di Ancona.

L'approccio progettuale privilegia la mitigazione del rischio mediante soluzioni compatibili con la dinamica del versante, supportate da un sistema integrato di monitoraggio in grado di garantire il controllo continuo delle condizioni di stabilità e la gestione tempestiva di eventuali criticità.

L'insieme di questi interventi evidenzia come il tema dell'ultimo miglio rappresenti un fattore strutturale per l'efficienza dell'intero sistema logistico: la capacità di garantire collegamenti rapidi, sicuri e diretti tra il porto e la rete primaria incide infatti, in modo decisivo, sulla competitività dello scalo e sulla sua attrattività nei traffici internazionali. In questo contesto, la sinergia tra infrastrutture stradali e ferroviarie – insieme a un approccio intermodale nel suo complesso e al ruolo operativo di Anas – configura un modello di riferimento per lo sviluppo della portualità italiana.



© Archivio Storico Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Occidentale

ARTICOLO 07

IL BACINO DI CARENAGGIO NEL PORTO DI GENOVA

Autori

Pasquale Cialdini

Segretario dell'Associazione del Genio Civile e già Capo dell'Ispettorato Generale per la circolazione e la sicurezza stradale e Direttore Generale per la vigilanza e la sicurezza delle infrastrutture

Nel secondo numero della nuova edizione del “Giornale del Genio Civile” dedicato interamente ai “porti” non può mancare il ricordo della progettazione e dell’esecuzione del bacino di carenaggio eseguito negli anni 1847-1851 nel porto di Genova.

Nel 1864, il terzo numero del “Giornale del Genio Civile” – come si può notare dalla foto che di seguito riportiamo – ha pubblicato una memoria redatta nel 1852 da Damiano Sauli, colonnello del Genio militare, autore del progetto e direttore dei lavori del bacino di carenaggio costruito nel porto di Genova. Di seguito, il lettore troverà solo una sintesi delle 65 pagine di questa interessantissima memoria, nella quale in corsivo sono riportati alcuni brani tratti dal testo originale dell’illustre ingegner Damiano Sauli.

Cenni storici e generalità

Anno 1864. Nel terzo numero del “Giornale del Genio Civile” viene pubblicata una memoria, redatta nel 1852, da Damiano Sauli, direttore dei lavori del bacino di carenaggio costruito nel porto di Genova. La prima parte della memoria riporta alcuni “cenni storici” che consentono di comprendere l’importanza e l’assoluta novità del “bacino di carenaggio”, definito proprio da Sauli «opera ingente, arrischiata, e non mai prima d’ora eseguita in Italia». La costruzione del bacino di carenaggio nel porto di Genova «a beneficio del militare e del mercantile naviglio» fu approvata dal re Carlo Alberto con decreto del 21 agosto 1845. L’ingegnere ricevette l’incarico della progettazione e della direzione dei lavori dal principe Eugenio di Carignano, che comandava la Regia Marina; con queste parole, ha giustificato la sua accettazione del «grave e difficile» incarico: «l’amore di patria, il desiderio di lasciare.

dopo morte un monumento che rammentasse il nome, mi persuasero ad assumere lo studio e la direzione di questo non ordinario lavoro. La sorte coronò con felice successo le mie fatiche ed i miei studi. Non mi rimane ora dunque che di rendere ragione dell’operato ad utilità dei novizi».

Sauli poi illustra lo scopo per cui vengono costruiti i bacini di carenaggio con queste parole: «Prima però d’inoltrarmi, credo opportuno il dire, che un bacino di carenaggio è una gran conca murata nella quale s’introducono le navi per essere esaminate all’asciutto e raddobbate». Poi vengono illustrate le manovre che si usano a tale scopo che, nei porti soggetti alla marea, sono assai facili, in quanto basta introdurre la nave quando le acque sono piene, aspettare che la marea discendente lasci in asciutto il bacino e la nave che si vuol riparare e tenere chiuse le porte onde impedire al rifluente mare di penetrare all’interno dell’edificio, il quale rimane in secco finché sia totalmente compiuto il lavoro che si vuol fare intorno alla nave. Lo stesso Sauli precisa che nei porti che non vanno soggetti al flusso e al riflusso del mare, come appunto quelli del Mediterraneo, «l’arte deve supplire la natura ed occorrono mezzi speciali di chiudimento, e macchine per prosciugare e si incontreranno difficoltà enormi che verranno illustrate». Infine, chiarisce che «la qualità principale di ogni bacino deve essere quella di essere stagno e capace di ammettere in sé bastimenti di qualunque portata».

Prima di illustrare dettagliatamente le caratteristiche del bacino di carenaggio, costruito negli anni tra il 1847 e il 1851 nel porto di Genova, Sauli descrive i tre bacini costruiti nel porto francese di Tolone diversi anni prima, tra il 1774 e il 1845. Così inizia la loro descrizione: «Fra i grandi bacini che già all’epoca erano costruiti nei porti del Mediterraneo, primeggiano i tre di Tolone. Il primo fu costruito dall’ing. Groignard, il secondo dall’ispettore Bernard ed il terzo che è il più grandioso di tutti dall’ing. Carlo Noel, capo dei lavori idraulici di quel porto militare». Viene poi ricordato che la Marina francese per molti anni aveva desiderato costruire nel Mediterraneo bacini per la manutenzione delle sue navi da guerra, ma questa costruzione fu dichiarata per lungo tempo impossibile fino a che il ministro della Marina, conte di Praslin ¹, affidò lo studio all’illustre ingegnere navale Groignard, il quale propose un progetto che ricevette l’assenso dell’Accademia delle Scienze francese per il quale poi, nell’aprile 1774, il re Luigi XV «ordinò a Groignard l’esecuzione dell’opera».

In Tab. 1 sono descritte sinteticamente le caratteristiche dei tre bacini costruiti a Tolone che Sauli ha descritto nella memoria, unitamente ad alcune sue osservazioni su queste difficili costruzioni marittime.

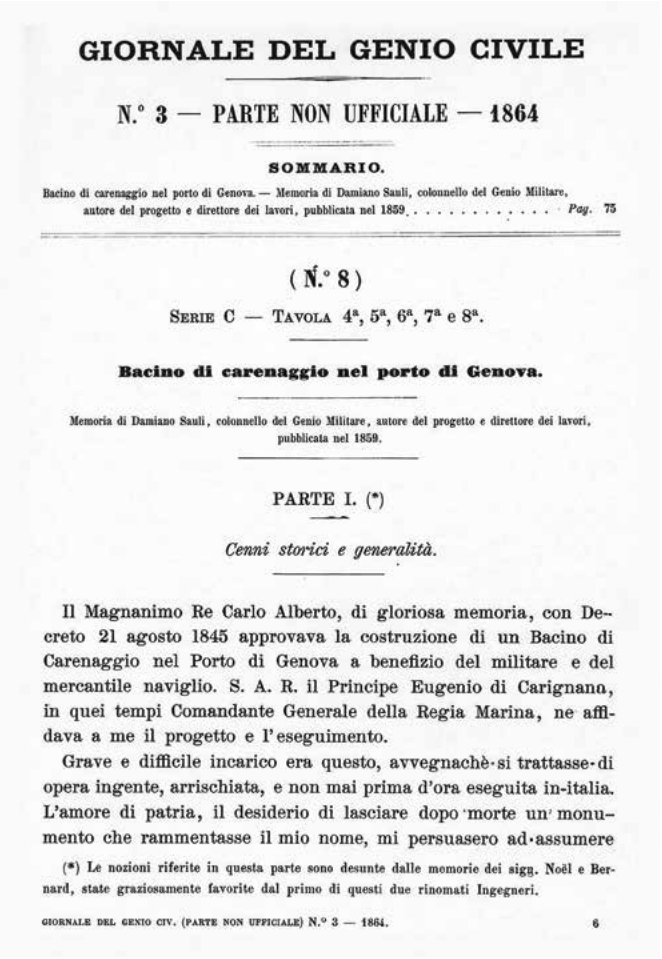


FIG. 1. LA COPERTINA DEL “GIORNALE DEL GENIO CIVILE” N. 3

1. Cesar Gabriel de Choiseul (1712-1785), duca di Praslin, ufficiale, diplomatico e ministro francese.

	BACINO DI GROIGNARD	BACINO DI BERNARD	BACINO DI NOEL
PROGETTO	1774	1823	1831
COSTRUZIONE	1774-1796	1826-1837	1834-1845
DIMENSIONI DELLA CASSA	Lunghezza: 100 m Larghezza: 31 m Altezza: 11 m	Lunghezza: 82 m Larghezza: 24 m Altezza: 8,40 m	Lunghezza: 74 m Larghezza: 24 m Altezza: 8,00 m
CONDIZIONI DELLA CASSA	Cassa non stagna con infiltrazioni che producevano 300 m³ di acqua ogni 24 ore	Notevoli furono le infiltrazioni che infestarono il bacino finché non si giunse alla cementazione	Grazie alla cementazione della platea e dei fianchi, le infiltrazioni furono quasi inesistenti
FUNZIONALITÀ DEL BACINO	Per 25 anni per funzionare fu necessario impiegare 180 uomini per impedire che la platea rimanesse allagata. Solo dopo la cementazione il bacino tornò praticabile richiedendo una sola ora di lavoro ogni giorno per essere mantenuto asciutto	Con i miglioramenti eseguiti durante i lavori la funzionalità è migliorata di anno in anno con il diminuire degli scoli. Si è potuto metterlo a servizio della Marina militare, richiedendo soltanto l'applicazione di una piccola tromba che impedisce che la platea rimanga allagata	La buona riuscita deve attribuirsi principalmente alle cure con cui fu preparato il getto ed effettuato il versamento dell'impasto in modo da realizzare una massicciata impermeabile e solidissima. Al termine dei lavori il bacino, senza infiltrazioni fu consegnato alla Marina Militare
OSSERVAZIONI DELL'ING. SAULI	La sua "imperfetta riuscita" fu dovuta al modo singolare con il quale venne eseguito e riuscì funesta l'idea di stabilire il cassone sopra "chiglie sporgenti"	Fu migliore rispetto a quello di Groignard, ma fu un errore assodare il terreno con una palificata dal peso non sufficiente rispetto alla pressione dell'acqua e ci furono notevoli infiltrazioni	Fu un notevole passo per le scienze delle costruzioni subacquee, risultando essere un potente mezzo per lavorare anche su opere a maggiore profondità

TAB. 1. I TRE BACINI DI CARENAGGIO COSTRUITI A TOLONE: LORO CARATTERISTICHE E OSSERVAZIONI DELL'ING. SAULI

La progettazione del bacino

Così inizia la descrizione del bacino di Genova nella memoria redatta da Sauli: *«E qui sarebbe lungo e noioso il rintracciare e lo svolgere le questioni che vennero agitate intorno alla sua costruzione circa la quale sorsero molte e variate opinioni: alcuni volevano infatti usare i metodi che avevano veduto praticare nei porti a marea; la maggior parte poi dei proponenti, accennando ad una antica prova fatta in Genova sotto il Governo francese, voleva che, cinta l'area da occuparsi con una tura², si esaurissero le acque e si lavorasse quindi all'asciutto. Ognuno aveva l'idea sua particolare ma niuno proponeva un definitivo partito. Correivano pertanto molte e variate idee di progetti, ma piacque al Governo di scegliere quello che da me veniva schiarito con particolarizzate memorie e disegni e che era stato dedotto dagli studi da me fatti in Tolone, aiutato dall'esimio Noel e dagli altri ingegneri applicati a quel porto»*.

Nell'approvare il progetto di massima, il Regio Governo Piemontese aveva ordinato che il bacino venisse costruito in una località che fosse la più opportuna per la natura e la qualità del suo fondo e non ostacolasse il naviglio militare e commerciale. Inoltre, doveva risultare utile specialmente per il servizio della Marina da guerra, senza che occorresse

augmentarne il personale militare nella costruzione e nella gestione del nuovo stabilimento. Con tali prescrizioni si fecero indagini su diverse località, tra cui le stazioni di Villafranca, La Spezia e Savona, ma nessuna mostrò una convenienza maggiore rispetto al porto di Genova. *«Questo porto, al quale sembra essere serbato un grande avvenire di prosperità, mancava di uno stabilimento di raddobbo ai bastimenti del commercio che numerosi vi si rifugiavano»*.

Soprattutto, le navi da guerra necessitavano di essere visitate o raddobbate: Sauli afferma che ciò provocava un grave danno finanziario per la *«poca durata delle navi della Regio Marina. Tutti invocavano la fine a tal deficienza, ma niuno osava proporre di ripararvi. Sorse allora il principe Eugenio di Savoia che reggeva col superiore comando la militare marina, ed apprezzando i vantaggi che avrebbe arrecato la spesa occorrente alla costruzione di un bacino da carenaggio, lo proponeva al Governo e ne otteneva l'assegno dal re Carlo Alberto»*.

La scelta del luogo ove collocarlo doveva tener conto che il bacino avrebbe dovuto servire principalmente la Marina militare e sussidiariamente quella commerciale; di

conseguenza, non poteva allontanarsi dalla Darsena militare ed era, pertanto, opportuno disporlo in modo che anche il commercio potesse valersene senza impedire o ostacolare i militari al servizio interno dell'arsenale. La soluzione di tale problema era però difficile. Molti sconsigliavano di occupare una parte delle acque della Darsena che era troppo ristretta; alla fine fu scelto il primo tratto a levante della Darsena, che era impraticabile alle grosse navi per la mancanza di fondo che, inoltre, era *«ricettacolo di numerosi scoli molto immondi e le acque morte che vi si raccoglievano davano luogo in estate principalmente ad esalazioni insalubri e fetenti. Così fu ritenuto opportuno di stabilirvi il bacino, poiché oltre al*

L'inizio dei lavori

Si cominciò allora lo *«scavamento del fondo»*, prima però esplorato con scandagli più volte replicati ed eseguiti con trivella e poi spinti fino alla profondità di 14 m, sotto il pelo ordinario del mare. Il risultato di questa esplorazione fu di incontrare, alla profondità di circa 4 m, un fondo sodo composto di tufo o di "marna conchiglifera" pressoché omogenea, sottostante ad uno strato alluvionale di melma e di fango che lo copriva. *«Fatta questa ricognizione fu tosto dato mano allo scavo che venne eseguito colle antiche così dette caracche del porto⁴. Facile riuscì questo lavoro finché si trattò solo di estrarre del fango; divenne poi più difficile e laborioso quando si venne a rompere il tufo; né allora bastarono le cucchiaie ordinarie, fu d'uopo averne di una forma particolare e di forza maggiore»*. Ad ogni macchina fu aggiunta una gran ruota (Fig. 2) che, collocata sulle sponde, agiva con essa e ne aumentava la forza.

senza interruzione anche con il cattivo tempo. Sauli aggiunge: *«Niun momento era perduto. Niuna disgrazia fatale ebbe a lagnarsi, pochi e leggermente furono i feriti, più per loro incuria che per negligenza di chi dirigeva. Con l'approfondirsi però dello scavo crescevano gli ostacoli; il fondo diveniva più duro, le cucchiaie non vi agivano che leggermente. Sarebbe divenuto lungo il lavoro che pure si voleva affrettato; bisognò appigliarsi alla mina. Ma le scosse frequenti che ricevevano gli edifici soprastanti della città davano luogo a ripetute lagnanze; affluivano le proteste; la cautela però, la fermezza e la persuasione superarono l'ostacolo, e quelle scosse che si ripeterono oltre a 4.000 volte, spaventevoli al principio, erano poi non curate nel seguito; niun sensibile danno nei fabbricati alla fine del lavoro fu conosciuto»*.

Continuava lo scavo e gli scandagli che si ripetevano ogni 15 giorni ne dimostravano chiaramente il progredire. Era stato, inoltre, atterrato il muro che, dividendo la Darsena dal porto, sbarrava la bocca al nuovo edificio e si era sgombrata

migliorare quell'aria, si sarebbe utilizzato un "tratto di mare dannoso più che inutile».

Prima dell'inizio dei lavori, Sauli propose al Governo di far esaminare il progetto a *«distinti ingegneri»* che già si erano occupati di consimili costruzioni. Pertanto, fu invitato l'ing. Noel, che si recò a Genova e che, dopo un attento esame, il 17 novembre 1844 consegnò al Governo una relazione favorevole; la stessa fu poi approvata e permise di ordinare l'inizio dei lavori; gli stessi vennero affidati ad imprese esterne, nonostante Sauli avesse dichiarato la sua contrarietà all'affidamento a ditte private³.

la scogliera sulla quale era fondato il muro. Ma il difficile e pericoloso lavoro fu condotto a buon termine in poco tempo. Sauli descrive inoltre anche il metodo che fu scelto per *«appiccare il fuoco alle mine»*.

Il 20 ottobre 1845 si cominciarono gli scavi poi completati il 14 marzo 1847 e del costo di circa 400.000 Lire. A questo punto della memoria, Sauli ringrazia il capo operaio Paolo Quirolo⁵ e il palombaro inglese Giorgio Gardner⁶. In particolare, descrive che Gardner, dopo aver indossato l'apparato e il copricapo, scendeva in fondo al mare, raccoglieva i massi che vi erano caduti, puntellava i muri che minacciavano di cadere e riusciva a lavorare per tre ore continue ad una profondità di 10 m.

Non essendoci spazio per il deposito di materiali e di attrezzature di cantiere, fu necessario costruire un argine lungo 102 m, largo 6 m e alto 9 m che, dividendo le acque della Darsena da quelle del bacino, porgeva un'area utilissima e serviva anche di riparo per gli scavi. Per tale lavoro, compiuto in meno di un anno, furono impiegati quattro cassoni separati da brevi intervalli, cui si aggiunsero due testate al fianco della bocca che era stata aperta nell'antico muro di cinta che chiudeva la Darsena stessa.

Dopo aver completato lo scavo fino a una profondità di 11 m e dopo averlo ovunque spianato, occorreva intraprendere il getto di calcestruzzo per formare la platea.

Era poi necessario impedire che la fluttuazione causata da possibili mareggiate – alla quale era soggetto il porto di Genova – non disturbasse operazioni così impegnative: bisognava, perciò, chiudere la bocca del bacino, conservando la possibilità di riapirla a piacimento e al bisogno. Per tale scopo, si costruì una *«cassa adeguata all'ampiezza dell'apertura»*, che servisse per chiudere la bocca del bacino.

2. La tura è un'opera provvisoria costruita con terra, legno, metallo o cemento utilizzata per isolare e mettere all'asciutto un tratto di terreno sommerso dall'acqua.

3. Sauli nella memoria ha illustrato i motivi della sua contrarietà all'affidamento alle imprese esterne; temeva, infatti, un forte aumento di spesa e riteneva pericoloso affidare il lavoro *«alla speculazione privata che è interessata maggiormente ai propri guadagni che alla buona riuscita dell'opera»*. 4. Caracche del porto: così si vengono chiamate le macchine comuni a ruota che servono allo scavo dei porti (o meglio "all'effossione dei porti" come definita da Sauli. 5. Così Sauli descrive l'opera di Paolo Quirolo *«Alla sua probità e zelo si deve il loro buon esito e l'attivo quantunque difficile esequimento del lavoro»*. 6. Così Sauli elogia l'opera di Giorgio Gardner: *«il difficile esequimento del lavoro fu agevolato dalle operazioni subacquee compite dal palombaro inglese Giorgio Gardner, dal quale fu per la prima volta recata fra noi l'industria della sua utile ma rischiosa professione»*.

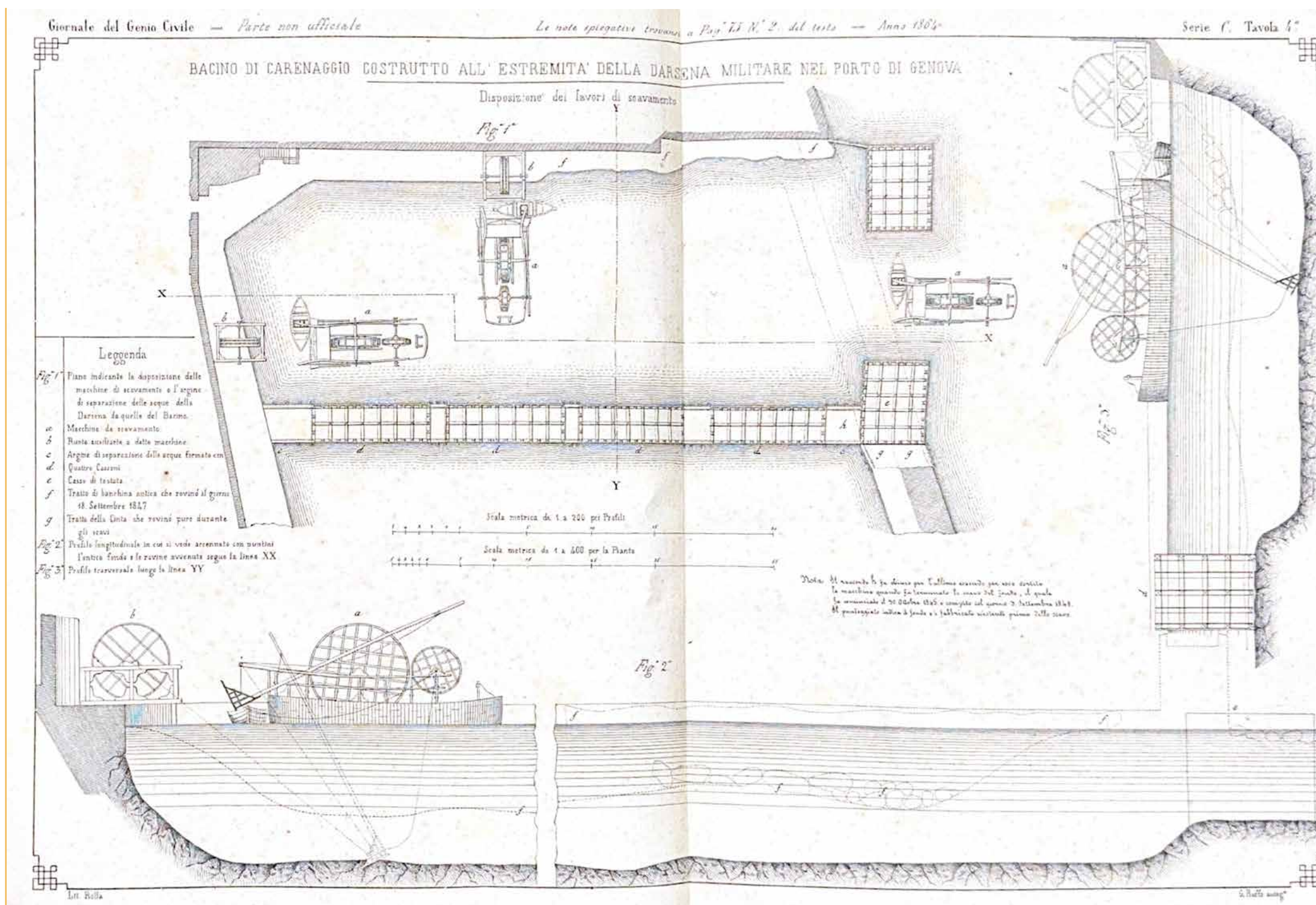


FIG. 2. LA DISPOSIZIONE DEI LAVORI DI SCAVAMENTO

Il ponte natante

Disposte così le cose e assicurata la tranquillità interna delle acque del bacino, si costruì il ponte natante, con lunghezza di 30 m pari alla larghezza della platea.

La memoria descrive compiutamente la costruzione di questo ponte, così come il suo utilizzo attraverso «macchine di versamento» per il carico e lo scarico del calcestruzzo sul fondo, in modo venisse uniformemente riempito. Giornalmente si versarono dai 200 ai 250 m³ di calcestruzzo⁷ e si utilizzarono 16.379 m³ di impasto, impiegando tre mesi e mezzo di lavoro. «Nello stesso periodo veniva colmato il fondo del bacino col getto della platea, e se ne spianava la superficie, col tener conto continuamente delle variazioni della marea che si osservavano sugli idrometri a tale scopo stabiliti, si preparavano le casse destinate a formare il nocciolo interno. Le casse erano state costruite nella spiaggia di Sampierdarena si tenevano in serbo ormeggiate nella Darsena. Erano queste in numero di 7, larghe 20 m, alte 9 m, lunghe diversamente a seconda della qualità dei legnami che si avevano in pronto, ma insieme unite occupavano la lunghezza di 83 m. Le casse furono «calafattate»⁸ e per la loro costruzione si impiegò circa un anno».

A fine dicembre 1847, quando la platea era stata completata e tenuto conto che nel mese di gennaio normalmente il mare rimane calmo, Sauli decise di introdurre le casse e con esse i telai che dovevano servire a limitare la grossezza del getto, che doveva costituire l'ossatura dei fianchi dell'edificio. I telai furono un'innovazione introdotta da Sauli, che andava a sostituire la parete di pali adoperata a Tolone. Nella memoria è descritta la loro costruzione e il loro prezioso utilizzo. Qui riportiamo la tavola che illustra i telai quando «toccarono il fondo e si adagiarono sulla platea» (Fig. 3).

La memoria illustra poi le motivazioni che avevano portato a scegliere tale soluzione, diversa da quella utilizzata a Tolone: «Era però necessario, poiché avendo stabilito che la tura del bacino non sarebbe stata conformata con terra, ma bensì con lavoro di getto, per meglio far fronte all'azione delle mareggiate alle quali si trova esposto il porto di Genova, ragione e prudenza volevano che la tura nostra fosse a differenza di quella di Tolone di maggiore robustezza dotata. In tal guisa preparate le casse, e collocati i telai si disponevano le macchine di versamento per la costruzione dei fianchi». In seguito, vengono dettagliatamente riportate le lavorazioni eseguite per «le casse ed i telai che formarono i fianchi con i quali si chiuse il gran vaso rappresentante il bacino che aveva per base la già costruita platea. Non era però ancora finito il riempimento dei fianchi che occorsero i politici movimenti del 1849⁹; rimase quindi per circa un mese interrotto il lavoro, onde quando si volle riprenderlo si dovette mandarlo dal sedimento che naturalmente ne ricopriva la superficie».

7. I componenti di questo getto erano pozzolana asciutta, calce spenta e pietrisco. 8. Con il termine «calafattata» si usa indicare che la struttura è resa stagna e impermeabile all'acqua. 9. Il 24 marzo 1849, dopo la sconfitta di Novara e l'abdicazione di Carlo Alberto, Vittorio Emanuele II firmò l'armistizio con l'Austria. Le ripercussioni della sconfitta si diffusero in tutta Italia; anche Genova il 1° aprile 1849 si ribellò temendo di essere stata ceduta all'Austria e cercando di restaurare la propria libertà di cui godeva prima del 1814 quando fu annessa al Regno di Sardegna. I moti durarono poco grazie all'intervento dell'esercito piemontese guidato da La Marmora e il 6 aprile i ribelli genovesi si arresero; molti di loro salparono su una nave americana per andare in esilio.

La descrizione continua: «Nove mesi si ritennero sufficienti perché la cementazione fosse assodata, trascorsi i quali si tentò il prosciugamento. Con tali elementi e con molte speranze, miste però, non si nega, a timore, s'impresse con una tromba a prosciugare la prima cassa, che era quella più inoltrata verso la bocca: l'acqua venne abbassata; nel giorno si tenne conto del suo abbassamento; la notte non si lavorò, ed il giorno dopo si trovò il livello dell'acqua rialzato di 2 o 3 centimetri nell'interno della cassa medesima. Conosciuta la cagione del leggiero, ma pure temuto innalzamento delle acque nelle casse, si avviava l'esaurimento con maggiore confidenza. Le acque si abbassarono senz'ulteriore sconcerto. Ed invero fu un grato momento quello in cui per la prima volta fu dato percorrere a secco il fondo del bacino ancora in condizione di armatura e circondato tutt'intorno dal mare. Si cominciava quindi a sperare una felice riuscita, ma non si tralasciava di esaminare giornalmente se si producessero da qualche parte infiltrazioni per essere pronti a rimediare. Il lavoro si mostrava soddisfacente, e ad eccezione di pochi e non importanti trasudamenti che trapelavano dai fianchi, il getto era stagno, e le casse alle quali era appoggiato si potevano considerare come se fossero perfettamente isolate e totalmente in asciutto».

Sauli illustra poi che, mentre si lavorava nel porto, cresceva l'impazienza esterna fomentata da numerosi avversari che predicavano rovine e giunsero «ad asserire che, rimesse le casse, il lavoro di getto sarebbe avvallato come un monte di sabbia!! Chi dirigeva il lavoro aveva però la coscienza di non aver cosa alcuna a rimproverarsi né per poca cura, né per mancanza di studio».

I lavori di murazione

Nonostante le maldicenze degli oppositori, i lavori proseguirono e Sauli li descrive dettagliatamente.

Fu innanzitutto demolita la «cassa poligona che modellava l'emiclo», furono abbattute le puntellature e si segarono le pareti verticali, ponendo così a nudo la cementazione mostrandosi dura, perfettamente omogenea e quasi asciutta con impresse le linee della calafatura¹⁰ delle tavole che componevano le pareti della cassa.

Predisposto il fondo e scoperti i fianchi, si cominciarono «i lavori di murazione». Tra questi, prima di tutto la galleria che, internamente, corona il bacino e che serve per radunare e raccogliere tutte le acque filtranti, onde allontanarle dalla platea e dall'interno, cosicché le medesime non giungessero mai a comparire nella grande vasca o nell'interno dell'edificio. Sauli spiega che si lavorò molto per combattere le infiltrazioni, anche utilizzando il mastice di Roquefort e

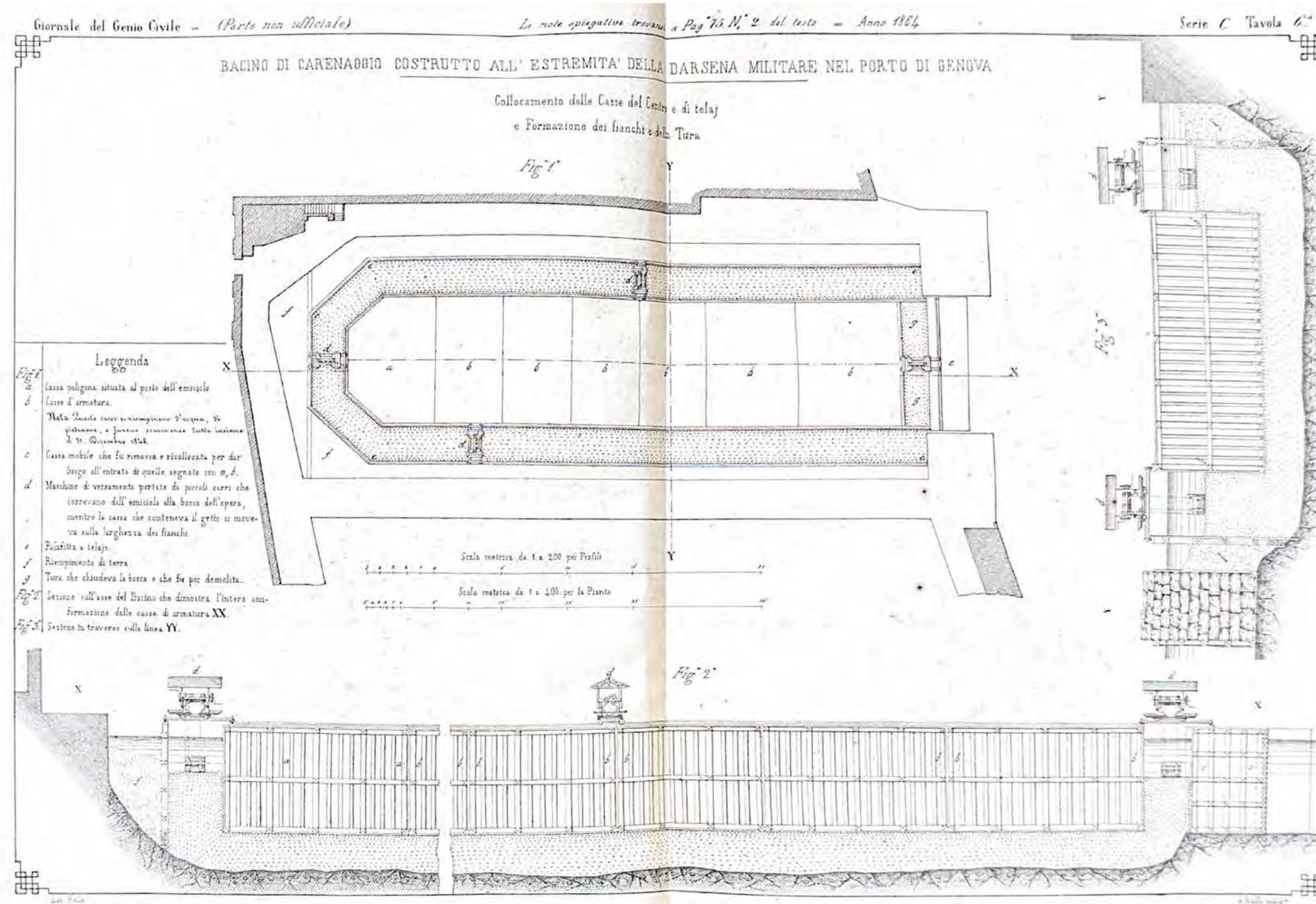


FIG. 3. IL COLLOCAMENTO DELLE CASSE DEL CENTRO E FORMAZIONE DEI FIANCHI E DELLA TURA

10. Calafatura o calafataggio è l'operazione nautica di impermeabilizzazione delle fessure (comenti) tra le tavole del fasciame di uno scafo in legno, solitamente eseguita inserendo stoppa catramata o materiali moderni. Questa tecnica crea una sigillatura stagna che impedisce le infiltrazioni d'acqua.

seguendo i consigli dell'ing. Noel; aggiunge: «*si ridussero infine le filtrazioni a così poco, che ora ponno avere quasi niun conto*». Nella memoria Sauli ringrazia l'assistente Antonio Morando ¹¹ che dicesse il prosciugamento e altri lavori.

Subito dopo la costruzione della galleria, si iniziò quella della pavimentazione della platea, formandola a tratti successivi e con due ordini di mattonato che vennero coperti da un lastricato di pietre della Spezia collocate a spina di pesce, onde impedire in ogni modo la formazione di fessure che un accidentale cedimento avrebbe potuto provocare nella platea. Venivano anche raccolti gli scolii, che non giunsero mai a superare l'altezza delle due pavimentazioni; inoltre, si lavorava alla murazione del cantiere e delle banchine

Descrizione del bacino e della porta natante

Il bacino di Genova ha la forma di un vasto rettangolo coronato da un emiciclo, la di cui lunghezza misurata tra il primo incastro e la sommità dell'emiciclo stesso è di 72,80 m; la sua larghezza al piano di coronamento è di 24,00 m, a livello delle acque comuni è di 21,60 m e al piano del cantiere si restringe in soli 15,12 m. Queste differenti larghezze si ottengono per mezzo di tre risalti, la cui altezza corrisponde a quello dei tre ordini di puntellamento con la quale si stringono le navi quando scendono, una volta esaurita l'acqua, ad adagiarsi sul proprio cantiere. La profondità del bacino misurata dal livello dell'acqua media al piano della soglia, che corrisponde a quella del cantiere, è di 6,75 m (sarebbe di 7,35 m ad acque piene).

Sauli così descrive nella memoria il bacino di carenaggio di Genova: «*La camera della porta è provveduta di tre incastri e presenta la forma di un largo trapezio la cui larghezza misura 21,14 m a livello dell'acqua, e si riduce a soli 18,44 m sul fondo. Il proporzionato allontanamento degli incastri permette che si ammetta nel bacino o un vascello a vela di 120 cannoni ¹², od altro a vapore della forza di 800 cavalli. Possono pure capirvi insieme più bastimenti di minore portata. L'esaurimento (dell'acqua) si fa con una macchina a vapore ed a bilanciere, della forza di 20 cavalli; le di cui caldaie sono verticali, ed è provveduta di quattro corpi di tromba; si richiedono 12 ore per prosciugarlo. La porta natante che deve chiuderlo è costrutta di ferro, e si preferì questo metallo al legno, appoggiati alle esperienze fatte a Tolone, le quali, giusta quanto ci venne assicurato dall'esimio ing. Noel e dagli altri ingegneri della Marina Militare francese, provarono la convenienza di preferire il ferro al legname, abbenché più costoso, mentre si ottiene*

con pietre da taglio. Venne così regolarmente innalzata la fabbrica fino a toccare il livello della seconda banchina, ove fu necessario demolire una parte del getto per dar luogo alla murazione.

Sauli così descrive questa lavorazione: «*Visto la difficoltà e la grande spesa che sarebbe avvenuta valendosi degli uomini ordinariamente impiegati a giornata, si diede a cottimo l'opera che, malgrado le difficoltà incontrate, venne eseguita con una particolare intelligenza e prestezza. Era però tanto dura e tenace la materia benché non avesse ancora un anno di costipamento, che gli scalpelli celermente vi si consumavano. Fu continuato così il lavoro della murazione, che senza inconveniente venne ultimata, e che riuscì perfettissima*».

una durata maggiore, si è dispensati dalla spesa del calafataggio, e lo incurvamento prodotto dal peso dell'acqua esterna quando il bacino è vuoto riesce meno sensibile. Questa porta natante ha la forma di un trapezio, che perfettamente si adatta a quello che presentano gli incastri: la reggono due galleggianti, condizione principale dei quali si è quella di mantenerla equilibrata ed a nuoto, cosicché facilmente possa sortire dagli incastri in circostanza eziandio delle acque più magre e possa immergersi con regolare affondamento quando le acque toccano la loro maggiore pienezza; finalmente deve resistere a tutto il peso delle acque esteriori, e non lasciarle trapelare nell'interno del bacino, quando egli è ridotto in asciutto».

La porta natante del bacino di Tolone costruito da Noel è la prima che sia stata proposta e poi eseguita in ferro dall'ing. Bayle della Marina francese. Sauli aggiunge: «*giovà sperare che la nostra, la quale deve essere costrutta sul modello di quella, riuscirà del pari perfetta*» ¹³.

Sulla base delle sue vaste conoscenze, Sauli conferma che la forma che comunemente suol darsi alla bocca di ogni bacino è quella di un trapezio, la di cui base maggiore è a livello delle acque ordinarie, mentre la minore si appoggia sul fondo. E indica: «*Questa forma potrà convenire finché si avranno da maneggiare quelle grosse navi a vapore, che al giorno d'oggi sono tanto comuni nelle Militari Marine*».

Aggiunge, inoltre, alcune raccomandazioni: in primo luogo, ricorda che «*si deve porre sempre nelle opere di getto la più seria attenzione nel purgarle della melma lattiginosa che vi si forma*» e che «*è convenientissimo*

dare alle casse d'armatura o di centro la larghezza di 23 m invece di soli 20 m, come da noi praticato, onde non essere costretti a tagliare come ci occorre il getto dei fianchi e di dover stabilire la galleria di assanimento» ¹⁴

Il collocamento e le manovre delle navi dentro il bacino

Prima di chiudere la memoria, Sauli ha ritenuto opportuno fornire alcune utili indicazioni sul «*collocamento e la manovra delle navi dentro i bacini*» aggiungendo che: «*fino ad allora questa materia non venne da alcuno trattata*».

In particolare, specifica che la platea di ogni bacino di carenaggio deve essere dotata di un primo cantiere formato da «*dormioni ¹⁵ o travature di legno di rovere*», che hanno la squadratura di 40 cm e che si dispongono ad una distanza tra loro sempre proporzionale alla maggiore o minore portata dei bastimenti. «*Sopra questi si stabilisce quindi il vero cantiere a cui devono appoggiarsi i bastimenti riposando la loro chiglia*».

Dopo aver descritto le diverse operazioni che si devono compiere all'ingresso della nave nel bacino, precisa inoltre che è necessario che «*A misura poi che il bastimento discende, i palombari devono controllare che vada ad innestarsi precisamente nell'incassatura che gli è preparata; e quando ciò non succeda vi si rimedia immediatamente col maneggiarlo a seconda di quanto richiedesi onde opportunamente si affondi. Il bastimento che entra nel bacino deve prendere sia nel senso longitudinale, sia in quello trasversale, una tal posizione da esser certi che all'istante dell'affondarsi egli si adagerà perfettamente sul proprio cantiere*».

Così disposto e collocato il bastimento che rimane ancora galleggiante, ne viene regolata la discesa sul cantiere col mezzo di due aste graduate che collocano internamente al bacino, e di riscontro all'estremità di poppa e di prora, dalle quali si deduce l'altezza dell'acqua corrispondente in quei punti alla sommità del cantiere, e per conseguenza quella pure alla quale deve essere condotta la nave per affondarsi. Entrato il bastimento, segue la manovra dell'affondamento della porta; ma quest'opera deve essere sempre preceduta da una accurata ricognizione della nettezza degli incastri, per cui si adopera un rastello di ferro che li sbarazza da qualunque materia vi fosse stata trascinata o deposta per effetto delle correnti».

In definitiva, il collocamento della nave ha luogo durante il tempo in cui si affonda la porta ed è regolato dagli ormeggi che sono serviti a introdurla, osservando di mantenerla

immediatamente al di sotto del piano della terza banchina che generalmente si collima con quello delle acque ordinarie. In questo modo e con tali perfezionamenti si eviteranno grandi lavori e perciò meno spese».

sempre situata in modo che l'asse della sua chiglia si trovi nello stesso piano verticale di quello del cantiere. Sauli precisa ulteriormente che: «*Ogni nave nell'affondarsi deve sempre trovarsi situata in una posizione verticale quanto è possibile; e ciò tanto più allorquando si tratta di riparazioni di qualche importanza. Poiché se succedesse altrimenti, se ne comprometterebbe la stabilità; e non potendosi mai essere certi della simmetria del lavoro, sarebbe impossibile lo stabilire perfettamente tutti quei pezzi, il collocamento dei quali vuole essere determinato con l'archipenzolo ¹⁶. Perciò, prima d'introdurre nel bacino una nave, si dovrà equilibrarla; il che si ottiene caricandola da quella parte ove meno s'inclina*».

Disposto il cantiere e preparata la nave, si comincia l'esaurimento del bacino e coll'opera di un palombaro si verifica che nulla possa impedire l'affondamento della nave, che deve essere sempre mantenuta in un piano verticale, senza che la sua posizione venga mai ad essere per qualunque motivo sturbata».

Poi Sauli illustra le precauzioni che bisogna prendere per far uscire la nave dal bacino; in particolare, si dovrà impedire che questa vada ad urtare contro le sponde; precisa che: «*in caso di vento gagliardo è necessario trattenerla nella sua posizione con bracci collegati in senso opposto al vento verso la poppa o verso la prova. Terminato poi il riempimento del bacino, quando le acque si trovano a livello di quelle esteriori, si rimuove la porta e si estrae la nave raddobbata*».

Termina le descrizioni delle operazioni esplicitando che: «*sono queste le pratiche generali che hanno luogo per il maneggio delle navi entro i bacini, operazioni che più che assoggettarsi ad assoluti principi, riposano essenzialmente sulla pratica e si riferiscono totalmente alle particolari condizioni in cui si trovano questi edifici destinati al raddobbo ed al rifacimento delle navi, sia da guerra che di commercio*».

Il "Giornale del Genio Civile" n. 3 del 1866 ha ritenuto utile riportare una tavola che riproduce l'apparecchio elevatore per il raddobbo delle navi situato nel "Docks di Londra" ¹⁷, che poi verrà utilizzato anche nei bacini di altri porti tra cui il porto di Genova.

¹¹. Così Sauli descrive l'opera di Antonio Morando «*Uomo prezioso per onestà, per intelligenza e per zelo. Egli non risparmiò mai né fatica, né studio, in lui riposi la mia confidenza e la meritò rendendosi utilissimo*». ¹². I vascelli erano classificati secondo le loro dimensioni in quattro o cinque ranghi. I più grossi, detti di primo rango, potevano portare fino a 120 cannoni distribuiti su tre ponti. I vascelli rimasero in servizio fino alla seconda metà dell'Ottocento, quando furono sostituiti da costruzioni navali in ferro con propulsione meccanica. ¹³. Nel citato articolo del "Giornale del Genio Civile" n. 3 del 1863, 12 anni dopo la costruzione del bacino si conferma che: «*La porta ha funzionato finora con felice successo*».

¹⁴. Il termine "assanimento" è utilizzato come sinonimo di risanamento o bonifica per indicare l'insieme degli interventi tecnici, igienici ed economici volti a migliorare le condizioni di un ambiente, di un edificio, di una infrastruttura, rendendoli salubri, sicuri e vivibili. ¹⁵. Il termine "dormioni" è usato per indicare le travi del tetto. ¹⁶. L'archipenzolo, detto anche archipendolo, è l'antico strumento di misura utilizzato per verificare l'orizzontalità o la corretta messa a piombo di una struttura. ¹⁷. I docks di Londra sono i bacini situati lungo il fiume Tamigi che hanno ospitato per decenni navi provenienti da tutto il mondo e che sono caduti in disuso solo negli anni Settanta del secolo scorso.

Le porte natanti

Prima di terminare queste importanti informazioni Sauli dichiara: «Credo mio debito d’indicare un dettaglio essenzialissimo che riguarda il buon effetto delle porte natanti, le quali sono il mezzo principale di attivamento di quei bacini che si trovano nel Mediterraneo. Ognuno sa che una porta natante, o come dicesi un battello porta, rappresenta una gran barca, le di cui ruote di poppa e di prora in colla chiglia sporgono molto all’infuori onde innestarsi negli incastri preparati sul fondo della platea e nelle sponde all’entrata del bacino. In questa barca ciò che forma essenzialmente la porta è il corpo centrale, il quale se si suppone segato da un piano verticale perpendicolare all’asse longitudinale del bacino, ha la forma di un trapezio

I vantaggi della presenza dei bacini per le navi

Dopo aver illustrato le pratiche con le quali si preparano i bacini da carenaggio e si pongono in stato di funzionare nei porti non soggetti a marea, Sauli ritiene opportuno evidenziare gli importanti vantaggi che ne traggono le navi.

In particolare, asserisce: «Niuno ignora per certo quali quanto siano le cagioni che giornalmente cospirano al deperimento dei bastimenti, e quanto importi di assicurarne la durata, senza la quale l’immenso capitale che si richiede per le costruzioni navali diverrebbe poco fruttifero».

Tra le cause, cita: «la cattiva qualità e la poca stagionatura del legname che vi si impiega, l’inzavorramento ed il carico non opportunamente disposto, le avarie che sin producono nelle tempeste, gli arenamenti infine sono altrettanti motivi che accorciano la vita alle navi, e che richiedono operazioni per lo più lente e costose per prolungarla».

Da qui la necessità di poter disporre di bacini di carenaggio: «Ora è d’uopo convenire che i bacini da carenaggio, i quali non sono, come alcuno ha preteso, stabilimenti di costruzione, ma bensì luoghi di riparazione, esibiscono l’unico mezzo di visitare facilmente e con ogni prontezza le navi e di raddobbarle senza sconcerti».

Spiega, inoltre, che «l’entrata di una nave in un bacino può sempre aver luogo senza che occorra scaricarla o di smontarne le macchine; essa vi si trova collocata nella più naturale e migliore sua posizione: è concesso di lavorarvi attorno contemporaneamente da tutte le parti,

uguale a quello che rappresentano gli incastri». Illustra le tre qualità principali che deve avere una porta natante o un battello-porta:

- 1. galleggiare a un’altezza d’acqua tale che la porta possa uscire dagli incastri ad acque bassissime;
- 2. offrire un’immersione tale ad acque piene che la porta si possa affondare senza un impegno straordinario;
- 3. resistere alla pressione dell’acqua esteriore.

Da ultimo precisa che: «Queste condizioni richiedono calcoli gravissimi di stabilità e di immersione, nei quali ora io non voglio addentrarmi, poiché spettanti ad un servizio diverso dal mio».

in modo da mostrarla libera e come appariva sul suo primitivo cantiere; ed è quindi minimo il tempo occorrente a raddobbarla, poiché ogni mezzo che occorra vi riesce prontissimo; e dove si tratti di una semplice ispezione di visita poche ore sono bastanti, perché la nave venga introdotta, si adagi, sia riconosciuta, e ritorni a galleggiare».

Sauli, quindi, afferma con fermezza che, in base a quanto ha illustrato, «si debba generalmente preferire l’entrare in un bacino ad ogni e qualunque altro modo di raddobbare, e ciò tanto più a buona ragione si potrà dire se si considera lo straordinario sviluppo che va prendendo la navigazione a vapore che è destinata per certo al conseguimento del più brillante avvenire».

Di fronte a tali e tanti vantaggi, l’ingegnere non riesce a comprendere la ragione per cui ogni Marina che abbia cura del suo prezioso materiale la rifiuti ai suoi porti ed elogia il Governo piemontese che «dopo i sostenuti gravissimi danni nel suo Militare Naviglio, finalmente decise di costruire il bacino nel porto di Genova».

Sulla base di tali osservazioni, conclude: «Che se la spesa a cui si dovette soccombere risultò di un certo riguardo, ciò si deve principalmente alle condizioni della località, ad al modo di esequimento che si volle dare alle imprese, ma non si potrà mai contestare che da questo Stabilimento non debba la Marina ricavare un estesissimo frutto, col prolungare e forse anche col raddoppiare la vita delle sue navi da guerra». Dopo quest’ultima considerazione, descrive la macchina destinata ai prosciugamenti.

Le spese sostenute

In merito alle spese sostenute per realizzare il bacino di Genova, da molti criticate ritenendole eccessivamente elevate, Sauli fornisce interessanti precisazioni.

L’enorme e straordinario sacrificio della finanza pubblica, che molte persone lamentano, è dovuto essenzialmente alle difficoltà da superare per realizzarla. Il mezzo migliore per convincersene è quella di paragonare la spesa sostenuta per Genova con quella che occorre nella costruzione di identiche opere in altre Nazioni, in particolare con quella utilizzata per realizzare il bacino di Tolone costruito qualche anno prima dall’ingegner Noel che ammontava a 2.300.000 franchi. In tale spesa non era inserito il prezzo delle macchine di prosciugamento né quello della porta natante. Sauli precisa allora che per lo scavamento del fondo a Tolone furono utilizzati in gran parte i carcerati (allora molto numerosi) e conclude: «Che se dunque alla somma anzidetta noi aggiungessimo l’ammontare di tutte queste partite arriveremmo ad una totalità di 2.700.000 franchi, che non differisce che di soli 60.000

franchi da quella che da noi venne impiegata; la qual differenza sparirebbe eziandio, ed anzi potremmo ottenere una spesa minore se si ponesse a calcolo il valore del materiale proveniente dalle costruzioni, di cui fece suo prò l’Arsenale della Marina». Sull’argomento “costi”, conclude così: «Con questi dati io credo possa provarsi, che anche malgrado delle gravissime difficoltà incontrate, la spesa occorsa, il di cui frutto annuale, se si valuti in ragione della conservazione delle navi da guerra, eccede il 5%, non fu così straordinaria come venne da molti annunziata».

L’ingegnere chiude così questa interessantissima memoria: «E nel por fine a questa memoria, che desidero possa riuscire di qualche vantaggio, e dimostrare come il buon esito delle più grandi imprese molte volte dipenda dal curarne le più minute specialità, mi credo in dovere di dichiarare la spesa che occorre nella costruzione del nostro bacino onde facilmente si possa conoscere da ognuno come ed in quali oggetti vennero impiegate le somme che prima il re, e poi il Parlamento vollero».

A			B		
LAVORI DI PREPARAZIONE			COSTRUZIONE DEL BACINO		
IMPORTO (LIRE)			IMPORTO (LIRE)		
ART. I	Lavori di scavamento per la preparazione del fondo dei bacini, compresa la demolizione della cinta e scogliere che chiudevano l'ingresso dalla parte del porto:		ART. VII	Lavori preliminari per la riduzione di alcuni fabbricati che sostituirono quelli che furono demoliti	2.477,62
	1. scavo eseguito con macchine ordinarie "curaporti" (Fig. 2)	237.018,17		Preparazione del fondo per il collocamento delle casse di sponda con le quali fu divisa l'acqua della Darsena da quella del bacino e se ne formarono le testate (Fig. 2)	30.301,32
	2. scavo eseguito con le mine	121.015,64		Costruzione del ponte natante	27.103,89
ART. II	Costruzione delle bette per trasporto delle materie e riparazioni alle macchine di espurgamento	23.210,92		Costruzione di un piccolo pontone	5.707,74
ART. III	Fitto di magazzini	4.000,00		Costruzione delle casse di forma collocate all'interno del bacino per modellarne il vuoto	354.794,15
ART. IV	Spese diverse per studi, noli e trasporti di macchine imprestate dal Governo francese e destinate al versamento del calcestruzzo ed alla manipolazione degli smalti	3.429,12		Costruzione del bacino con formazione della platea e dei fianchi in calcestruzzo, demolizione delle casse di forma, costruzione della galleria di assanimento, pavimentazione della platea; fasciamento laterale dei fianchi e costruzione delle banchine; formazione del muro di argine; demolizione del sodo calcestruzzo; innalzamento dell'edificio per la macchina di prosciugamento; pavimentazione della sponda superiore del bacino e lavori diversi per l'istallazione della macchina	1.820.028,98
ART. V	Porta natante costruita dagli ingegneri Benet e Peyruc	155.687,50			
ART. VI	Macchina di prosciugamento eseguita dall'ing. Barnes	46.000,00			
ART. IX	Spese diverse	2.983,07	ART. VIII	Costruzione del cantiere fatto a diligenza della Marina	16.600,00
TOTALE LAVORI DI PREPARAZIONE (1)		593.344,42	TOTALE LAVORI PER LA COSTRUZIONE DEL BACINO (2)		2.257.013,70
IMPORTO TOTALE DEI LAVORI 2.850.358,12					
TAB. 2. IL QUADRO GENERALE DELLE SPESE OCCORSE PER LA COSTRUZIONE DEL BACINO DI CARENAGGIO NEL PORTO DI GENOVA					



© Sofia Gonté da Pexels

POSTFAZIONE

IL RUOLO DEL GENIO CIVILE TRA PASSATO, PRESENTE E FUTURO

Autori

Federico Cempella
Presidente dell'Associazione del Genio Civile

Pubblichiamo lo scritto del Presidente dell'associazione del Genio Civile, voce autorevole nell'ambito del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, che dedica il suo contributo alla valorizzazione della memoria storica e al rilancio delle buone pratiche tecniche e istituzionali a beneficio dell'intera comunità professionale.

A 210 anni dalla sua istituzione, il Corpo del Genio Civile viene riletto come espressione di una tradizione tecnica e istituzionale che affonda le radici nell'antichità romana e percorre l'intera storia unitaria italiana. È il monito dell'enciclica Magnifica Humanitas di Papa Leone XIV contro l'oblio della memoria collettiva a offrire la chiave interpretativa di questo percorso e, insieme, a illuminare la missione che l'Associazione del Genio Civile ha fatto propria fin dalla sua fondazione: custodire, trasmettere e rinnovare quel patrimonio.

In questa direzione si colloca il sostegno convinto e attivo alla riedizione del "Giornale del Genio Civile" – rivista con oltre un secolo e mezzo di storia, ora restituita alla sua funzione di presidio culturale e di elaborazione tecnica – intesa non come operazione nostalgica ma come atto fondativo: ridare voce a una comunità professionale, riannodare i fili tra sapere storico e urgenze contemporanee, offrire uno strumento condiviso a quanti operano nel campo delle opere pubbliche.

Attorno a questa linfa vitale si articolano la collaborazione con il mondo accademico e il progetto di una Scuola di Alta Formazione per una nuova classe dirigente tecnica.

Duecento anni di storia al servizio della collettività

In uno dei passaggi chiave della recente e illuminante Lettera Enciclica *Magnifica Humanitas* di Papa Leone XIV sulla custodia della persona umana nel tempo dell'Intelligenza Artificiale, viene affermato con parole di estrema chiarezza che «viviamo in un tempo di notevole cecità spirituale e culturale. Un falso pragmatismo invita a recidere le radici della memoria, come se si potesse inaugurare una sorta di "nuova creazione" sganciata dal passato».

Nella acuta riflessione del nuovo Pontefice emerge, invece, in tutta evidenza, un «invito a non consegnare il passato all'oblio», oltreché il più accorato richiamo ad alcune significative Encicliche dei suoi predecessori: questo per ribadire che l'attività economico-sociale dell'uomo – pur in presenza del ridimensionamento del potere politico degli Stati, a causa dell'abnorme e inquietante predominio del sistema tecnologico-finanziario allargatosi a dismisura oltre ogni attuale, labile confine geopolitico del globo terracqueo – deve essere sempre, e a maggior ragione, finalizzata al perseguimento del bene comune attraverso il corretto uso delle risorse nel quadro di un equilibrato e armonico sviluppo sostenibile del territorio.

Sono, questi, obiettivi da sempre al centro della mia attività istituzionale e professionale, fatti propri dall'Associazione del Genio Civile che ho l'onore di presiedere fin dalla sua istituzione, avvenuta il 24 giugno 2015.

Con queste doverose premesse e in virtù degli illuminanti insegnamenti tratti da detta Enciclica, oltreché da altri testi sapienziali cui ho fatto espresso riferimento in precedenti pubblicazioni, diviene senz'altro più agevole riprendere il percorso segnato dalla lunga storia del "Giornale del Genio Civile", alla cui riedizione – nella nuova veste grafica – è stato fornito ogni necessario contributo da parte di tutti coloro che, come lo scrivente e alcuni membri del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – hanno fatto parte del Corpo del Genio Civile o ne hanno conosciuto e apprezzato direttamente il prezioso patrimonio di conoscenze e di esperienze, quale proveniente da una vera e propria Scuola assimilata a quella prestigiosa dell'E.N.A francese ¹.

Ricorre, infatti, proprio quest'anno il 210° anniversario dell'istituzione di detto Corpo del Genio Civile, addirittura antecedente alla formazione dello Stato unitario ma, purtroppo, non più esistente, a distanza di dieci anni dalla celebrazione del bicentenario avvenuta presso la prestigiosa Scuola dell'Arsenale (Torino, 6 dicembre 2016) ².

Tutto ciò a testimonianza e conferma di un "filo rosso" che unisce il presente a radici storiche e tradizioni culturali risalenti addirittura all'epoca dell'Impero Romano,



FIG. 1. LA LOCANDINA DEL CONVEGNO ORGANIZZATO A TORINO CON LA SCUOLA DELL'ESERCITO PER I 200 ANNI DEL GENIO CIVILE

allorquando il Genio Militare e il Genio Civile costituivano le più evidenti espressioni di poteri tutti incentrati sulla rigorosa gerarchizzazione dei ruoli e delle funzioni, sull'organizzazione piramidale e sulle indubbie qualità, conoscenze e competenze refluite in possenti e mirabili opere militari e civili che resistono tuttora all'usura del tempo.

La riconduzione sotto un'unica egida dei due Corpi, militare e civile, avvenne all'epoca dell'Impero, al tempo in cui Giulio Cesare assunse il titolo di *Pontifex Maximus* – costruttore di ponti (si vedano le opere di Svetonio, Plutarco e Appiano di Alessandria); di tale titolo si fregiano anche i Papi della Chiesa Apostolica Romana, quali "costruttori di ponti", non soltanto di carattere prettamente materiale.

¹. Si veda articolo pubblicato su "il Sole 24 Ore" del 18 luglio 2014 intitolato "Stato in disfacimento: si ai veri burocrati". ². In tale occasione la rivista specializzata "Le Strade" ha voluto dedicare un numero speciale con tema centrale "La qualità delle infrastrutture quale bene comune".



L'imponente ponte San Michele di Paderno d'Adda, capolavoro ingegneristico di rilevanza storica, è il simbolo del Genio Civile italiano

A tale indelebile memoria storica – nell'ambito della quale è da ricomprendere, oltre alla miriade di opere pubbliche dalle ineguagliabili qualità (acquedotti, anfiteatri, porti, ponti, strade, terme, templi ed edifici della più variegata natura, ecc.), anche la cosiddetta "Urbanistica del Castrum Romanum" – appare di tutta evidenza come anche il Conte di Cavour, ingegner Camillo Benso, abbia voluto attingere a piene mani in quanto ineguagliabile pozzo di conoscenze: invero, la fondazione del Corpo del Genio Civile avvenne con Regia Patente del 19 marzo 1816, a mezzo della quale l'Azienda di Ponti, Strade e Selve venne trasformata in Intendenza Generale di Ponti, Strade, Acque e Selve. All'art. 2 è scritto testualmente: «Un nucleo di Ingegneri Civili sarà aggiunto al Corpo Reale del Genio Militare

e formerà una classe del medesimo Corpo [...]». Il nascente Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, in qualità di massimo organo tecnico-consulivo dello Stato (al quale l'Associazione del Genio Civile è indissolubilmente legata da un apposito Protocollo di Intesa), prende forma contestualmente al predetto Corpo, alle cui nobili origini e tradizioni rimane a sua volta strettamente ancorato fino ai nostri giorni.

Infatti, l'allegato F della Legge fondamentale dei Lavori Pubblici (20 marzo 1865, n. 2248), nello stabilire tale speciale legame, sia sotto il profilo normativo che organizzativo, individua le opere pubbliche quale elemento fondativo e costitutivo, unitamente ad altri cinque allegati dell'ordinamento unitario dello Stato ³.

Presente e futuro

Nella copiosa documentazione di cui è in corso il riordinamento sistematico e cronologico nel dedicato sito web "Genio Alato", sono circostanziatamente descritti cenni storici e fasi evolutive in cui si articola la plurisecolare vita del Genio Civile, innestata con quella del Genio Militare.

Di questi è stato fatto ampio cenno nel corso del Seminario di studi organizzato dal Comando dell'Arma del Genio (Roma Cecchignola, 20-21 maggio 2025) dal titolo anch'esso estremamente significativo: "Costruiamo il futuro – Tecnologie per infrastrutture sostenibili efficienti e puntualmente realizzabili".

Già in occasione della celebrazione del bicentenario del Genio Civile, svoltasi il 6 dicembre 2016 a Torino presso la prestigiosa Scuola dell'Arsenale, veniva evidenziato il nesso scaturente dalle comuni radici tra Arma del Genio, Genio Civile e Consiglio Superiore LL.PP., a conferma della vitalità della memoria storica che unisce in un unico filo rosso i due Corpi del Genio al massimo organo tecnico-consulivo dello Stato.

In un successivo seminario di studi organizzato dall'Associazione del Genio Civile, presso la storica biblioteca del Ministero dei Lavori Pubblici, alla presenza di tre Presidenti del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – tra cui il compianto Prof. Giovanni Travaglini – succedutisi nel tempo e di qualificati rappresentanti dell'Arma del Genio e di istituti universitari, è stato quindi fortemente rimarcato il ruolo svolto dal Corpo del Genio Civile in occasione della ricostruzione post-bellica di intere aree urbane ridotte a cumuli di macerie. È da questa linfa vitale che scaturisce la speciale missione

che l'Associazione – nel farsi carico di un vero e proprio salto culturale, incentrato sull'attività formativa basata su tali conoscenze e competenze e ispirato ai principi costituzionali di imparzialità e buon andamento della P.A. (art. 97/Cost.) – intende avviare per l'imminente futuro il progetto di una vera e propria Scuola di Alta Formazione per una nuova classe dirigente, di cui è avvertita la necessità e l'urgenza anche da qualificate e autorevoli fonti.

Mentre, al presente, è in fase di pieno svolgimento una feconda attività collaborativa con il Dipartimento di Ingegneria civile, edile e ambientale dell'Università degli Studi "La Sapienza" di Roma (nello specifico, il Master in Lavori Pubblici in materia di appalti e concessioni, oltreché di riqualificazione delle stazioni appaltanti), dopo una serie di incontri e contatti con autorevoli istituti accademici, sedi istituzionali e archivi storici del Friuli-Venezia Giulia, l'Associazione del Genio Civile intende partecipare attivamente a un apposito seminario di studi. Questo è in programma a Venzona (UD) il prossimo 13 settembre, in occasione del 50° anniversario del catastrofico evento sismico del 1976.

L'idea è riproporre all'attenzione dell'opinione pubblica il virtuoso ed efficace rapporto collaborativo – refluito in un modello di riferimento unico nel suo genere e posto in essere tra Stato, enti e popolazioni locali, curie vescovili, ecc. – nella ricostruzione di edifici, pubblici, privati e destinati al culto, ove il Genio Civile e il Provveditorato Regionale alle Opere Pubbliche del Friuli-Venezia Giulia (il solo a essere istituito con apposita Legge dello Stato n. 1149 del 24 dicembre 1959, proprio in relazione alla specificità dei confini orientali) hanno svolto un ruolo da protagonisti.

³. Si veda il saggio intitolato "I lavori pubblici tra etica e diritto" di Carlo Iannello e Giuseppe Marotta, più volte richiamato in precedenti articoli di stampa specializzata, come raro modello di riferimento in termini di qualità di una normativa rispondente a principi e criteri di buona legislazione).



Ringraziamenti

Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici esprime il proprio apprezzamento a tutti coloro che hanno contribuito, a diverso titolo, alla realizzazione del presente numero del "Giornale del Genio Civile".

In primis, all'associazione del Genio Civile – nelle persone del dott. Federico Cempella, ing. Pasquale Cialdini e ing. Marco Del Monte – che si è spesa con energica convinzione nella rinascita di questo progetto con il senso di "rinnovare" la prima testata specialistica istituzionale di ingegneria d'Italia.

Un sentito ringraziamento è rivolto agli autori, che con il loro qualificato apporto scientifico e tecnico hanno contribuito ad arricchire il dibattito e l'approfondimento sui temi oggetto della pubblicazione. Si esprime altresì gratitudine a tutti coloro che hanno cooperato e collaborato per le attività di ideazione, coordinamento, redazione, cura editoriale e realizzazione del progetto, compiute con professionalità e dedizione. Analogo riconoscimento è rivolto ai supervisori dei contenuti, il cui rigoroso e puntuale lavoro di valutazione ha assicurato la qualità, l'autorevolezza e la coerenza dei contributi con le finalità istituzionali del Giornale.

La presente pubblicazione si inserisce nell'ambito delle attività istituzionali del Consiglio, volte alla promozione e alla diffusione della cultura tecnico-scientifica nel settore delle opere pubbliche, quale contributo al progresso e alla cultura della sicurezza del patrimonio infrastrutturale nazionale, nonché strumento di studio e aggiornamento tecnico-normativo per istituzioni, università e industria delle costruzioni.





CODICE ETICO E DEONTOLOGICO

ART. 1 MISSION E VALORI ISTITUZIONALI

Il "Giornale del Genio Civile" promuove la cultura tecnica e scientifica nel campo delle opere pubbliche e dell'ingegneria civile. Quale espressione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ogni pubblicazione si ispira ai principi di imparzialità, rigore tecnico-scientifico e interesse pubblico, a garanzia dell'autorevolezza delle informazioni diffuse.

ART. 2 VALIDAZIONE REDAZIONALE

La selezione e la pubblicazione dei contributi sono affidate alla Direzione, che si avvale del Comitato di supervisione dei contenuti per la verifica dell'accuratezza tecnica, della coerenza con le finalità istituzionali della rivista e dell'assenza di conflitti di interesse non dichiarati. Per i contributi di natura più specialistica – inclusi quelli di università, enti di ricerca e associazioni di settore – il Comitato può avvalersi di ulteriori lettori tecnici qualificati nella materia. I manoscritti non pubblicati restano riservati e non possono essere utilizzati dai membri della redazione per fini propri senza il consenso scritto dell'autore. La Direzione gestisce ogni potenziale conflitto di interesse affinché il processo di valutazione non sia influenzato da interessi economici o legami personali.

ART. 3 DOVERI DEGLI AUTORI

Gli autori garantiscono l'originalità del contributo e la corretta citazione delle fonti; il plagio, in ogni sua forma, è eticamente inaccettabile. I dati e le analisi tecniche devono essere presentati in modo accurato e resi disponibili su richiesta per eventuali verifiche. La paternità dell'opera è riconosciuta a chi ha dato un apporto significativo alla concezione o all'esecuzione del lavoro; tutti i co-autori approvano la versione finale. Qualora l'autore abbia un ruolo diretto nell'opera o nel procedimento amministrativo descritto (ad esempio quale RUP, progettista, commissario o componente di organi che si siano espressi sull'intervento), tale circostanza va dichiarata nel contributo.

ART. 4 TRASPARENZA E CORREZIONI

Il Giornale pubblica con tempestività errata corregge, rettifiche o ritrattazioni in presenza di errori significativi emersi dopo la pubblicazione, nel rispetto dei principi di trasparenza e tracciabilità proprio delle pubblicazioni della Pubblica Amministrazione.

ART. 5 USO DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE (IA) GENERATIVA

L'eventuale impiego di strumenti di IA generativa è limitato al supporto nella redazione o nell'analisi dei dati: la responsabilità dei contenuti resta interamente in capo agli autori umani, che non possono attribuire all'IA un ruolo di autore o co-autore e ne devono dichiarare l'uso nel contributo. È vietato l'impiego dell'IA per generare dati, risultati o calcoli fittizi; ogni output deve essere verificato criticamente. La redazione e gli eventuali lettori tecnici non caricano i manoscritti su piattaforme di IA generativa, a tutela della riservatezza e della proprietà intellettuale degli autori.

ART. 6 DISPONIBILITÀ DEI DATI E RIPRODUCIBILITÀ

Gli autori sono incoraggiati – e, per studi basati su finanziamenti pubblici, tenuti – a rendere disponibili i dati grezzi, i modelli di calcolo e i dataset alla base dei risultati presentati, conservandoli per almeno cinque anni dalla pubblicazione e depositandoli preferibilmente in repository istituzionali certificati. Eventuali limitazioni per segreto industriale, sicurezza delle infrastrutture critiche o privacy sono specificate in una dichiarazione sulla disponibilità dei dati.

Responsabile del trattamento dei dati

Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici | Via Nomentana 2 | 00161 Roma

Trattamento dei dati personali

Ai sensi del Regolamento (UE) 2016/679, i dati personali eventualmente contenuti nella presente programmazione sono trattati dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici esclusivamente per finalità istituzionali connesse alla realizzazione, alla pubblicazione e alla diffusione della rivista. Il trattamento è effettuato nel rispetto dei principi di liceità, correttezza, trasparenza, minimizzazione e sicurezza dei dati, nei limiti strettamente necessari al perseguimento delle predette finalità.

I diritti relativi ai testi e alle immagini pubblicati nel presente numero sono riservati per tutti i Paesi. È vietata la riproduzione, anche parziale, nonché la traduzione, l'adattamento e la distribuzione dei relativi contenuti, con qualsiasi mezzo o procedimento, in assenza di preventiva autorizzazione scritta dell'Editore.





www.mit.gov.it