



ACaMIR

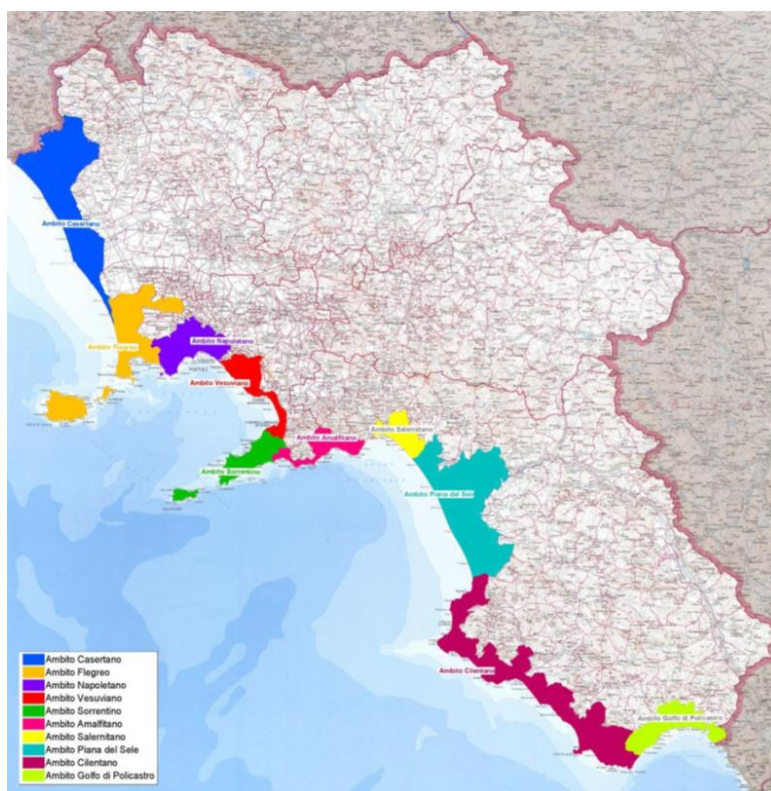
Agenzia Campana Mobilità Infrastrutture e Reti

LINEE PROGRAMMATICHE PER LO SVILUPPO DEL SISTEMA INTEGRATO DELLA PORTUALITÀ TURISTICA IN CAMPANIA

Ottobre 2025

ALLEGATO 4

INDIRIZZI PER LA MODELLAZIONE NUMERICA A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE DI INFRASTRUTTURE PORTUALI



Sommario

1	PREMESSA.....	3
2	MODELLI DI ANALISI DI EROSIONE COSTIERA.....	4
3	MODELLI DI ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI DERIVANTI DAL MOTO ONDOSONO.....	5

1 PREMESSA

La progettazione di una infrastruttura portuale richiede un'elevata capacità ingegneristica di tipo specialistico, soprattutto quando essa si inserisce in un contesto fortemente dinamico, come quello dei litorali sabbiosi, in quanto le interazioni che genera con quest'ultimi possono avere importanti ripercussioni anche per lunghi tratti del litorale costiero generando il cosiddetto "effetto domino".

Le molteplici esperienze maturate per costruzioni portuali ed i diversi condizionamenti indotti sui litorali costieri limitrofi hanno fatto registrare in molti casi una non ottimale funzionalità idraulica della struttura a seguito di una scarsa conoscenza dei fenomeni che si instaurano nell'ambiente costiero e nell'interazione con il moto ondoso incidente.

È necessario, pertanto, che le proposte progettuali, sia che prevedano nuove costruzioni di porti turistici sia che prevedano modifiche sostanziali delle opere foranee esistenti, siano accompagnate da adeguati studi di dimensionamento delle opere di difesa e di valutazione dell'impatto sulla morfologia dei fondali e del territorio costiero.

Attualmente sono disponibili molte banche dati di rilevamento statistico del clima ondoso e delle correnti alcune delle quali di seguito si riportano nella tabella seguente per pronta consultazione.

Nome Fonte / Dataset	Ente	Area Coperta	Tipo di Dato	Periodo	Risoluzione	Link
Atlante delle Onde dei Mari Italiani	ISPRA (ex APAT)	Mari italiani	Statistiche climatiche da boe RON	1989–2005	Mensile / stagionale; punti costieri principali	https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/atlan-te-delle-onde-nei-mari-italiani
Rete Ondametrica Nazionale (RON)	ISPRA	Coste italiane (boe ondametriche)	Misurazioni in situ	dal 1989 – attuale	10–30 min (tempo reale e archivio)	https://www.mareografico.it
CMEMS MEDSEA_WAV (Mediterranean Sea Waves Hindcast)	Copernicus Marine Service / CMCC	Mar Mediterraneo (alta risoluzione)	Modellazione numerica (hindcast e forecast)	1979–oggi	0.042° / 1h	https://www.cmcc.it/doi/mediterranean-sea-waves-hindcast-cmems-med-waves
Mediterranean Sea Wave Hindcast (CNR–ISMAR)	CNR–ISMAR / ENEA	Mediterraneo e mari italiani	Hindcast numerico (WW3 / WAM)	1979–2020	0.1° / 3h	https://ismar.cnr.it/waves/
Dataset of modelled significant wave height in the Italian Seas 2011–2020	Zenodo (ricercatori italiani, ISPRA, CNR)	Mari italiani	Modellazione numerica (hindcast)	2011–2020	0.05° / oraria	https://zenodo.org/records/15195141
MeteoOcean Hindcast Re-Analysis	Università di Genova – DICCA	Coste italiane e Mediterraneo	Hindcast numerico (moto ondoso e vento)	1979–2018	0.1° / 1h	https://www3.dicca.unige.it/meteocean/hindcast.html
ECMWF ERA5 Wave Data	ECMWF / Copernicus Climate Data Store	Globale (incluso Mediterraneo)	Reanalisi numerica (clima ondoso globale)	1959–oggi	0.25° / 1h	https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form
ENEA MEDWAVES	ENEA – Progetto CLIM SERVICES	Mar Mediterraneo	Clima ondoso modellato	1980–2020	0.1° / 3h	https://climservices.enea.it/it/products/marine-wave-climate
Atlante Meteomarinario Nazionale (Progetto MICORE)	CNR–ISMAR / Università di Ferrara	Coste italiane (Adriatico, Tirreno, Ionio)	Simulazioni numeriche di mareggiate	1980–2010	Locale (1–5 km)	https://cordis.europa.eu/project/id/202798
NOAA WaveWatch III Global Model	NOAA / NCEP	Globale (incluso Mediterraneo)	Previsioni e hindcast globali	dal 1998 – attuale	0.25° / 3h	https://polar.ncep.noaa.gov/waves/

2 MODELLI DI ANALISI DI EROSIONE COSTIERA

La costante evoluzione tecnico-scientifico della tematica specialistica ha prodotto un elevato livello di conoscenza ed i fenomeni di erosione costiera possono essere adeguatamente investigati attraverso l'utilizzo di strumenti informatici.

A tale scopo non vi è dubbio alcuno che le modellazioni, sia di tipo fisico che numerico, rappresentino un eccellente strumento di analisi delle soluzioni progettuali, consentendo un processo di ottimizzazione volto a eliminare o mitigare le interferenze indotte a seguito della costruzione dell'opera portuale, al fine di preservare l'ambiente naturale ed allo stesso tempo favorire lo sviluppo dell'intera infrastruttura.

Sebbene le modellazioni fisiche di laboratorio - realizzate attraverso la ricostruzione in scala del progetto - siano state considerate, per molti anni, più affidabili rispetto a quelle numeriche, l'evoluzione dei modelli informatici consente di affermare che per il processo di ottimizzazione delle soluzioni progettuali entrambe le modellazioni sono validissime, presentando vantaggi e svantaggi.

Con l'approccio alla modellazione fisica generalmente non si analizza la configurazione preesistente (stato di fatto), ed è complesso e costoso analizzare molteplici variazioni della configurazione di progetto, in quanto i tempi di risposta risultano estremamente lunghi, e questo in considerazione del fatto che in laboratorio ogni soluzione progettuale deve essere accompagnata dalla costruzione - in opportuna scala - di un modello fisico, in tutte le sue parti, a partire dal fondale che può essere fisso o mobile (nel caso di presenza di materiale sabbioso).

L'impiego dei modelli numerici, invece, consente di superare queste limitazioni, in quanto può essere rappresentato sia lo stato di fatto che quello di progetto, considerando per quest'ultimo molteplici soluzioni del layout individuato, contenendo notevolmente i tempi ed i costi di sviluppo dello studio. I risultati, quindi, potranno essere formulati in termini relativi e non assoluti, consentendo, dal punto di vista ingegneristico e senza voler entrare nel dettaglio specifico della problematica, un approccio più cautelativo che consente di evidenziare le eventuali interferenze che si potrebbero innescare a seguito della costruzione dell'opera, nelle differenti soluzioni, permettendo altresì di individuare i necessari correttivi per eliminarne o ridurne gli effetti. Di contro, le modellazioni numeriche, se non opportunamente strutturate o prive di opportuni dati, possono essere troppo semplificative dei processi da analizzare ed allo stesso tempo avere tempi di risposta molto elevati. In tale ottica, è opportuno considerare positivamente i notevoli sviluppi conseguiti negli anni nel campo dell'informatica, sia in termini di hardware che di software, hanno notevolmente ridotto il divario tra i due differenti approcci di studio.

Proprio in relazione alle interferenze che la struttura può determinare sulla dinamica di sedimenti marini, aspetto, si ribadisce, non trascurabile, possono essere utilizzate modellazioni numeriche cd. 'quasi' 3D, per simulare la variazione del fondale (modelli numerici a fondo mobile).

Un approccio di questo tipo risulta di fondamentale importanza perché consente di studiare le variazioni spaziali indotte sul trasporto solido in conseguenza della presenza delle opere portuali e quindi di identificare eventuali zone dove si instaureranno condizioni di escavo e quelle in cui invece si andranno a determinare situazioni di accumulo.

I risultati di tali elaborazioni sono utili per analizzare le problematiche di insabbiamento dell'imboccatura portuale, quelle di erosione al piede della struttura, nonché di individuare i macro-effetti che l'opera andrà a determinare sulla dinamica di movimento dei sedimenti in relazione alle interferenze che potrebbe generare sulla linea di riva di un litorale sabbioso. Quest'ultimo aspetto può essere ancor più approfondito andando ad impiegare i modelli cosiddetti ad una linea, che rispetto ad un asset temporale molto ampio, dell'ordine degli anni e/o decenni, simulano la sua evoluzione in termini di interazione ondometrica, in presenza anche delle eventuali opere marittime. Con essi, quindi, è possibile studiare l'evoluzione di un litorale sabbioso nel tempo, verificando tutte le possibili interferenze delle opere a farsi e quindi identificare soluzioni che possano eliminare o mitigare gli eventuali condizionamenti negativi dell'opera.

Infine, laddove il budget del progetto lo consenta, non vi è dubbio che "l'optimum" per la progettazione di un intervento portuale di nuova formazione possa prevedere un'iniziale approccio numerico, in grado di analizzare appieno tutte le diverse ipotesi progettuali, suffragato successivamente da un modello fisico, a validazione del risultato finale, quale layout esecutivo proposto per la realizzazione. Questa modalità consente di analizzare al meglio i diversi fenomeni, riducendo e/o eliminando tutti i potenziali effetti negativi dell'opera, favorendone quindi la realizzazione dell'intervento ed allo stesso tempo la sua "accettazione" da parte dell'opinione pubblica, evitando così una possibile demonizzazione nei confronti dell'ambiente.

Nel caso di proposte progettuali nell'ambito delle LPPT che interessano realizzazione di nuove opere o sostanziali modifiche delle opere foranee, si richiede almeno un approccio su modello numerico.

3 MODELLI DI ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI DERIVANTI DAL MOTO ONDOSO

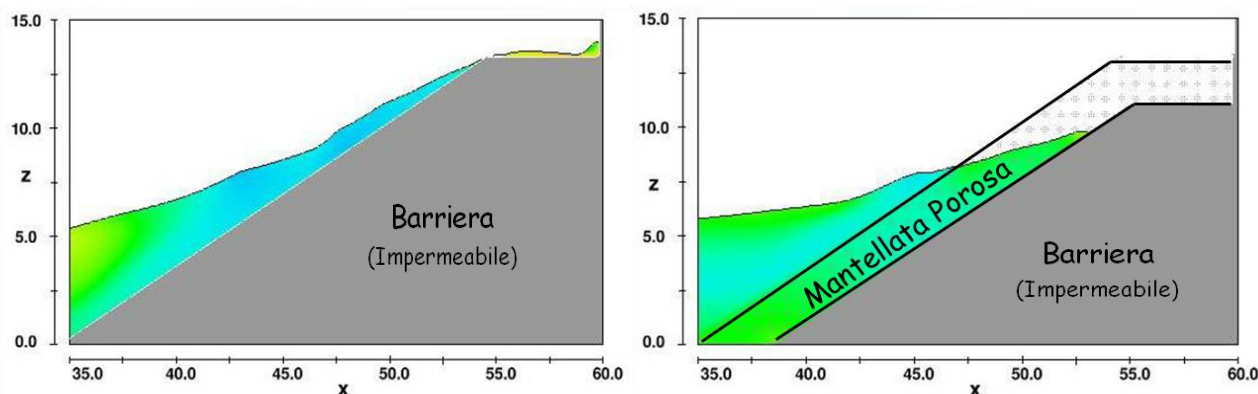
Il dimensionamento/verifica di un'infrastruttura portuale prevede che questa resista alle sollecitazioni ondometriche valutando la stabilità, istantanea e nel tempo, degli elementi che la compongono, la funzionalità idraulica (overtopping/sormonto - riflessione – runup), l'agitazione interna residua dello specchio acqueo protetto (per garantire la sicurezza delle manovre e la fruibilità degli ormeggi). Inoltre, come rappresentato nel paragrafo precedente, lo studio dovrà interessare le interazioni indotte sul movimento dei sedimenti marini che possono produrre scompensi/modifiche della dinamica pre-intervento, arrecando notevoli danni al litorale dell'area oggetto di interesse o addirittura alla stessa opera (insabbiamento dell'imboccatura portuale).

In relazioni a tali problematiche, si ritiene utile strutturare, in fase di proposta progettuale, un modello numerico di elevata qualità, in grado di schematizzare i processi reali in ambiente virtuale e di consentire un'analisi approfondita di quanto descritto in precedenza. Considerando lo spazio tridimensionale x, y, z , e in funzione del modo in cui si intende rappresentare la variabilità delle grandezze che governano i fenomeni da investigare, è possibile sviluppare diverse tipologie di modellazione:

- modelli 3D quando l'analisi condotta intende verificare l'evoluzione (delle grandezze), rispetto alle tre dimensioni spaziali;
- modelli 'quasi' 3D, quando le grandezze in gioco sono mediate lungo l'asse verticale, nonostante la loro variabilità;
- modelli 2D ed 1D, quando si vuole verificare lo sviluppo dei fenomeni soltanto lungo sezioni caratteristiche del dominio reale o con riferimento ad elementi specifici, come la linea di riva di un litorale (modello ad una linea).

Le dighe marittime (frangiflutti) – che rappresentano le più antiche e più diffuse opere portuali e di difesa, essendo anche le più semplici da realizzare – contemplano una tecnica costruttiva che si articola nello sversamento in mare di scogli o massi (in materiale lapideo naturale o artificiale), definite comunemente opere a "gettata" o a "scogliera".

L'approccio numerico, in particolare per problemi legati alla geometria così complessa, aveva fino a poco tempo fa il difetto di non fornire indicazioni soddisfacenti, in quanto i fenomeni di interazione che si riuscivano a riprodurre erano sicuramente inadeguati alla realtà. In questo caso la costruzione della struttura non poteva rappresentare fedelmente la geometria di un'opera a gettata realizzata mediante la sovrapposizione di singoli elementi per strati (nucleo, filtro, mantellata) e quindi le maggiori limitazioni si avevano sul calcolo del moto di filtrazione, così come mostrato nelle figure seguenti.



Per sopperire a tali limitazioni sono state sviluppate nuove procedure che, mediante l'utilizzo di software CAD e numerico, consentono di studiare con un approccio più dettagliato - e quindi innovativo - l'idrodinamica del moto ondoso su un'opera marittima a gettata (emersa o sommersa) e la stabilità idraulica dei massi della mantellata.

Le simulazioni sono state implementate in modo tale che il moto di filtrazione all'interno degli interstizi, normalmente presenti nelle opere frangiflutti, non è valutato mediante l'utilizzo del modello "mezzo poroso", bensì integrando le equazioni all'interno dei vuoti e modellando numericamente la struttura (in coerenza con quanto avviene nella realtà costruttiva o per analoghe prove fisiche di laboratorio), mediante la sovrapposizione dei singoli elementi tridimensionali. L'applicazione di una tale modellazione supporta il progettista nel dimensionamento della sezione dell'opera in riferimento al lay-out analizzato, potendo con esse non solo calcolare tutte le interazioni idrodinamiche, ma anche le sollecitazioni ondometriche, che si esercitano sui singoli elementi che la costituiscono, ai fini del calcolo della stabilità e resistenza strutturale.

In tal modo è possibile ottimizzare la geometria della struttura, considerando l'altezza massima rispetto al livello medio mare, le dimensioni delle berme, emerse e sommerse, la pendenza dei paramenti, nonché la sagoma degli elementi che costituiscono la protezione al piede. Quest'ultima necessaria soprattutto per le opere emerse, poiché

garantisce una migliore stabilità della mantellata ed allo stesso tempo contribuisce a prevenire i fenomeni di scalzamento al piede (scour – erosione del fondale antistante l'opera), che nel tempo potrebbero causarne il crollo.

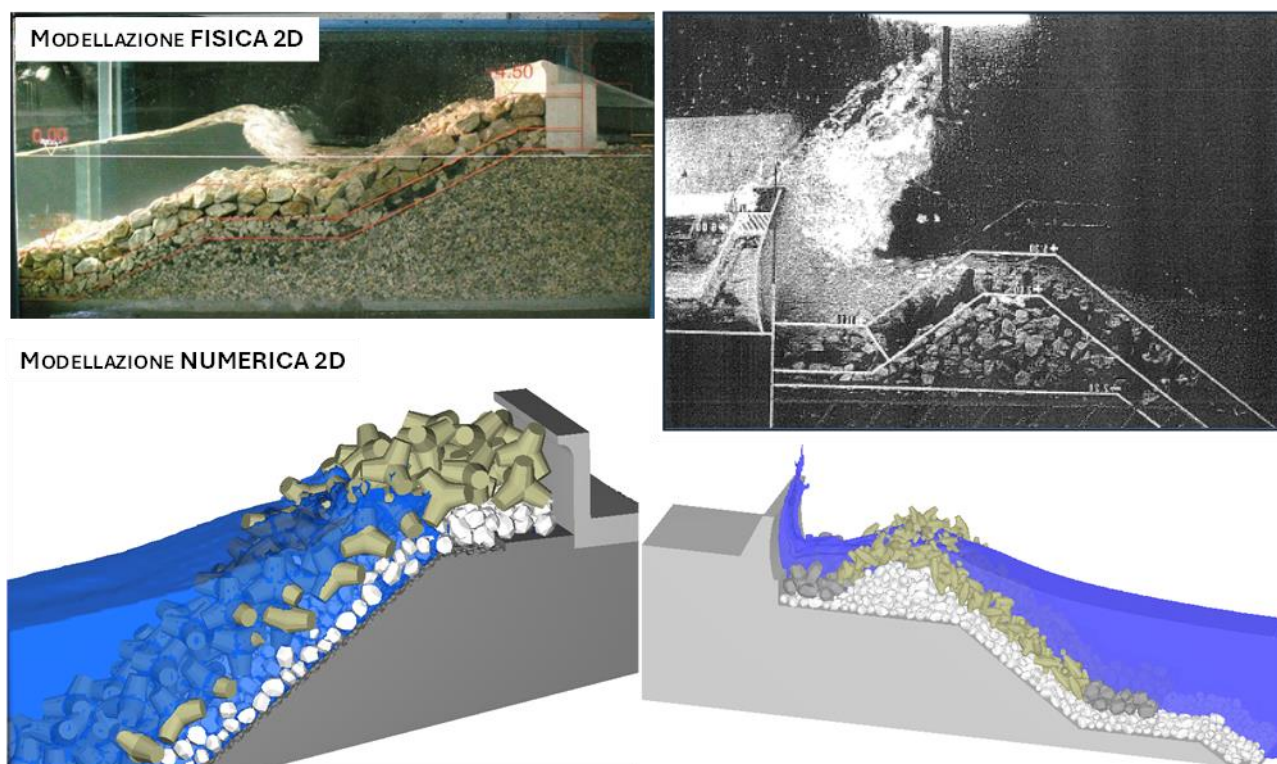


Figura 1: modellazione FISICA - NUMERICA

Con le modellazioni cd. 'quasi' 3D, così definite perché le grandezze idrodinamiche rispetto alla variabilità lungo z sono espresse in termini di valori medi (approssimazione che non compromette la validità dei risultati), è possibile studiare fenomeni come l'agitazione interna, parametro di riferimento per valutare la sicurezza delle imbarcazioni all'ormeggio e della navigazione, in quanto esse permettono di riprodurre tutte le interazioni idrodinamiche che si instaurano nei processi di propagazione del moto ondoso, dal largo verso costa (shoaling, rifrazione, diffrazione, frangimento), nonché la dissipazione indotta dalle opere in conseguenza della loro eventuale porosità.

Analogamente possono essere investigate e dimensionate opere riflettenti, a cassoni, meno utilizzate in Campania in ragione dei bassi fondali presenti sul territorio costiero; in tal caso sarà utile valutare non solo l'effetto "quasi statico" del moto ondoso ma anche l'effetto impulsivo connesso alla dinamica degli eventi meteo-marini.

Attualmente sono disponibili diversi software, anche del tipo freeware, che permettono di simulare la soluzione di layout planimetrico individuata, consentendo un'analisi dettagliata dell'evoluzione dei fenomeni, come illustrato nelle immagini seguenti.

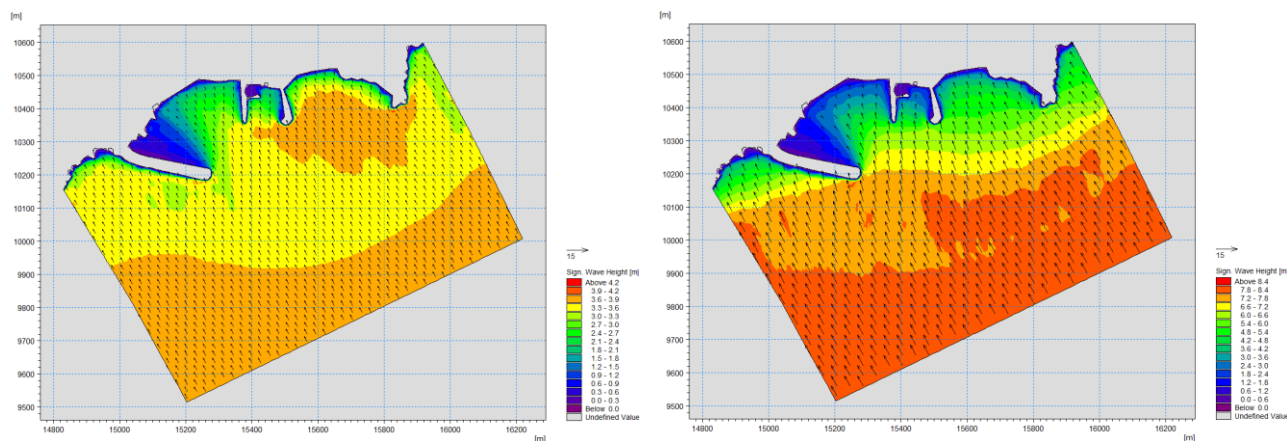


Figura 2: modellazione numerica idrodinamica (quasi 3D)

Mediante tali modellazioni il progettista è in grado di verificare, ed allo stesso tempo ottimizzare, la configurazione planimetrica delle opere, potendo testare diverse configurazioni anche se di poco differenti. Nonostante le dimensioni del dominio di calcolo possono variare dall'ordine dei centinaia di metri fino a diversi chilometri, non vi sono elementi ostativi, nemmeno in termini di tempo di esecuzione del modello, che ne impediscono l'applicazione come utile strumento di supporto alla progettazione e di verifica delle validità delle soluzioni adottate, in termini di effetti sull'ambiente.