

## La simulazione numerica della circolazione costiera: uno strumento a supporto anche delle attività di salvamento

Lorenzo Cappietti<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze  
Via di Santa Marta 3 - 50139 Firenze.

<sup>2</sup>GNRAC - Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero  
Email: lorenzo.cappietti@unifi.it

### Riassunto

In questo articolo viene descritta la tecnica detta simulazione numerica, inquadrandola nel contesto specifico della circolazione costiera. In particolare, viene trattato il caso delle correnti indotte dal moto ondoso che, formatosi per effetto dei venti in mare, si propaga verso costa e poi frange innescando così un complesso sistema di circolazione. Dapprima sono messi in evidenza alcuni dei principali aspetti caratterizzanti la fenomenologia del sistema naturale in esame. Successivamente si introducono alcune generalità del metodo per poi descrivere alcuni specifici approcci e discutere i principali limiti e potenzialità. Questa parte si conclude con l'indicazione e la motivazione dell'approccio ritenuto più opportuno, ad oggi, nella prospettiva di applicare la simulazione numerica anche ai fini dell'arricchimento delle conoscenze e la formazione nel campo del salvamento. Infine, a titolo di esempio delle potenzialità del metodo, questo specifico approccio è applicato al caso della circolazione costiera che nasce dall'interazione tra il moto ondoso e un pennello sommerso, i.e. una struttura per la protezione dei litorali. Viene descritto lo studio parametrico al variare della geometria dell'opera e del moto ondoso incidente e i risultati numerici sono analizzati evidenziando alcune caratteristiche del campo di onda e di corrente. L'accento viene dato agli aspetti di maggiore interesse per il salvamento quali e.g. l'inattesa concentrazione dell'energia del moto ondoso e forti correnti locali che possono costituire seri pericoli per bagnanti e nuove sfide per gli assistenti al salvamento.

**Parole chiave:** Circolazione Costiera, Simulazione Numerica, Pennelli Sommersi, Salvamento

### Abstract

*This article presents an introduction to the studying methodology known as numerical simulation, framing it in the specific context of coastal circulation. In particular, the case of wave-induced coastal circulation is described. First, some of the main aspects characterizing the phenomenology of this natural system are highlighted, in order to facilitate the understanding of the contents given in the rest of the article. Subsequently, some generalities of the numerical simulation method are introduced and afterward the description of various specific approaches for the case of coastal circulation, is given. The specific approach here considered the more opportune, to date, for supporting the enrichment of knowledge and training in the field of salvation, is highlighted. Finally, as an example of the potential of the method, this specific approach is used for studying the coastal circulation arising from the interaction between wave and a submerged groin, i.e. a coastal protection structure. A parametric study is described, and the numerical data are analysed in order to highlight the wave and current field. The accent is given to the phenomena of greatest interest for salvation, such as e.g. the unexpected concentration of wave energy and strong local currents that can constitute serious dangers for bathers and new challenges for lifeguards*

**Keywords:** Numerical Simulation, Coastal Circulation, Submerged Groins, Lifeguards

## Introduzione

L'ambiente costiero, come altri ambienti, è soggetto agli effetti della pressione antropica che va aumentando anche come conseguenza dell'importante crescita demografica mondiale. In particolare, la densità di persone, di strutture abitative o produttive, di infrastrutture fisiche di comunicazione o a servizio di scambi commerciali, è superiore a quella di qualsiasi altro ambiente naturale. Per non compromettere irrimediabilmente questo ambiente non c'è altra alternativa che aumentare le conoscenze delle dinamiche naturali e della loro interazione con l'attività e le opere dell'uomo. La missione del Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero (GNRAC) è quella di contribuire al progresso delle conoscenze, anche per supportare la necessaria crescita nel quadro di una sostenibilità ambientale. Il principale elemento al centro dell'azione del GNRAC è quindi l'ambiente costiero. D'altra parte, a volte è necessario mettere al centro l'uomo e focalizzare sull'obiettivo di limitare al massimo i rischi per la vita umana correlati all'interazione con ambienti o fenomeni naturali. Nel caso specifico dell'ambiente marino costiero, uno dei rischi più evidenti è quello dell'annegamento. Complice anche il boom turistico che si concentra sulle coste, soprattutto nei mesi estivi, il numero di annegamenti in Italia ammonta a diverse centinaia ogni anno. La principale missione della Società Nazionale di Salvamento (SNS) è quella di lavorare per la sicurezza della vita sul mare.

Il GNRAC e la SNS hanno quindi in comune il fatto di concentrare la propria azione su tematiche connesse all'interazione tra l'ambiente marino costiero e l'uomo ma poi focalizzano i propri sforzi, principalmente, sui due aspetti complementari seguenti: i) le dinamiche dell'ambiente marino costiero naturale e quelle dovute all'interazione con le opere dell'uomo; ii) le dinamiche dell'uomo e i pericoli per la sicurezza della vita sul mare. Mettere a sistema entrambi gli sforzi e valorizzare le sinergie che possono emergere dalle citate complementarietà tra le due associazioni può determinare una importante accelerazione delle conoscenze specifiche e quindi sostenere efficacemente il raggiungimento di obiettivi nazionali strategici.

In questo quadro, ormai da alcuni anni è nata una efficace collaborazione tra GNRAC e SNS che ha portato all'organizzazione di eventi formativi, giornate di studio, convegni e più recentemente a supportare il Ministero della Salute nell'ambito della compartecipazione all'Osservatorio Nazionale sull'Annegamento.

Questo breve articolo ha l'obiettivo di illustrare la visione di una prospettiva per fare un successivo passo in avanti nel mettere a sistema le rispettive conoscenze e competenze.

La circolazione costiera è uno degli aspetti che giocano un ruolo fondamentale sia per la dinamica dei litorali che per i rischi inerenti alla sicurezza della vita in mare. Il sistema è caratterizzato dalla contemporanea presenza di moti ondosi e correnti e molto frequentemente da fondali sabbiosi che possono cambiare la propria forma anche nel breve lasso di tempo di poche ore. Inoltre, non è rara la presenza delle opere dell'uomo come quelle finalizzate alla protezione dei litorali o alla protezione dalle inondazioni e queste determinano la formazione di circolazioni costiere con specifiche peculiarità. Dal punto di vista del GNRAC le opere sono funzionali alla gestione dei litorali, ma è evidente che, alterando la circolazione costiera, queste hanno anche un impatto nella sicurezza dei bagnanti. È quindi necessario, già nelle fasi di progettazione delle opere, includere anche il tema della sicurezza dei bagnanti e valutare i relativi impatti causati dalla loro costruzione. Dal punto di vista della SNS per garantire la sicurezza dei bagnanti non è sufficiente conoscere solo la circolazione di base in coste naturali perché è fondamentale anche la conoscenza delle peculiarità che si determinano in presenza di opere litoranee. Per attuare le missioni del GNRAC e della SNS è fondamentale conoscere al meglio tutte le specificità della circolazione costiera in coste naturali o antropizzate. Questa conoscenza può essere acquisita in vari modi, per esempio, tramite esperienze fondate sull'osservazione visiva dei fenomeni direttamente sul campo, ma in questo caso si è limitati dal livello di capacità di percezione dei nostri sensi. Per superare questo limite, oggi è possibile ampliare i nostri sensi e quindi acquisire molte più informazioni su cui basare l'elaborazione concettuale-teorica che crea la conoscenza, per mezzo di ulteriori strumenti come: il monitoraggio di campo con sensori di misura, la modellazione fisica di laboratorio e la modellazione numerica.

L'oggetto di questo breve articolo è la modellazione numerica della circolazione costiera. Il tema è trattato deliberatamente senza nessuna enfasi tecnico-scientifica ed al solo fine di illustrare, con taglio divulgativo, alcune potenzialità dello strumento ad un lettore che non ha conoscenze specifiche. Nella prima sezione sono descritti, solo qualitativamente, alcuni aspetti della circolazione in coste naturali al fine di favorire la comprensione della specifica metodologia di simulazione numerica utilizzata per questo lavoro. Nella seconda sezione viene spiegato cosa si intende per simulazione numerica, con lo scopo di far emergere le numerose

varianti possibili e quindi la necessità di saper scegliere l'approccio più idoneo per affrontare i problemi in esame. Nella terza sezione si discute un esempio applicativo al caso dei pennelli sommersi cercando di mettere in luce, tramite l'analisi dei dati numerici, l'utilità del metodo per evidenziare la formazione di particolari fenomeni idrodinamici potenzialmente pericolosi per i bagnanti. Le osservazioni conclusive e possibili sviluppi delle sinergie tra GNRAC e SNS sono riportate alla fine di questo lavoro.

### Fenomenologia della Circolazione Costiera

La circolazione costiera, come quella marina in generale è dovuta a molteplici forze naturali che agiscono su ampi spazi come, per esempio, la marea astronomica, le variazioni bariche, le variazioni termiche o l'azione diretta del vento. In particolare, l'azione del vento oltre a determinare il trascinarsi della massa d'acqua prevalentemente superficiale crea anche il moto ondoso che poi si propaga verso le coste. Giunto a costa, il moto ondoso è il motore principale che attiva una complessa circolazione costiera in cui grandi masse di acqua si muovono e per questo nel presente lavoro ci si limita a prendere in esame solo questa forzante naturale. Osservando il fenomeno fissando lo sguardo su un dato punto del mare, si riconosce che questo è caratterizzato dal susseguirsi di onde con differente altezza e che tra un'onda e l'altra intercorre un periodo di tempo variabile. Alzando lo sguardo, dal punto in esame all'area nel suo intorno, si riconosce anche che la distanza tra una cresta d'onda e l'altra, detta lunghezza d'onda, è variabile e che lo stesso allineamento delle creste, che riflette la direzione di propagazione, non è sempre lo stesso. In estrema sintesi, i principali parametri caratteristici attraverso i quali è possibile descrivere il moto ondoso sono l'altezza, il periodo, la lunghezza d'onda e la direzione di propagazione e durante lo svolgersi del fenomeno la misura di ciascun parametro non è uguale di onda in onda bensì varia in modo irregolare. In altri termini, non è possibile descrivere compiutamente il fenomeno per mezzo di un solo valore di altezza, di periodo, di lunghezza e direzione ma occorre trattare tutto lo spettro di variazione di ogni parametro caratteristico.

Al largo, in acque profonde, il moto ondoso in superficie fa compiere un percorso orbitale alle particelle di acqua sottostanti che ruotano intorno ad una posizione sostanzialmente fissa, senza spostarsi verso riva. Quindi, quando diciamo che il moto ondoso, formato in un certo istante al largo di un paraggio, si propaga verso costa e arriva dopo alcune ore, stiamo dicendo che è proprio questa capacità di mettere in agitazione le particelle di acqua che si propaga verso costa (non la massa di acqua). In altre parole, si propaga l'energia del moto ondoso.

Durante la propagazione dal largo a costa il moto ondoso attraversa fondali a profondità decrescente e l'osservazione del mare mostra che le creste delle onde tendono a ruotare verso la direzione parallela alla linea di riva (fenomeno detto rifrazione), la distanza tra le creste diminuisce, l'altezza delle onde aumenta (fenomeno detto *shoaling*). Il processo di accorciamento della lunghezza d'onda concomitante con l'aumento dell'altezza d'onda porta alla formazione di fronte di avanzamento via via sempre più ripido, fino a che la cresta dell'onda si rompe (fenomeno detto frangimento) dislocando una certa massa di acqua davanti alla porzione rimanente di onda. Ogni onda prosegue il suo cammino verso costa e trascina con sé la relativa massa d'acqua che fluisce, persistentemente di onda in onda, dalla zona dei frangenti alla fascia costiera.

L'esperienza mostra che questo flusso di massa (detto *mass-transport*) si concentra prevalentemente nella porzione di profondità compresa tra il cavo e la cresta di ogni onda. Se nella zona dei frangenti i fronti d'onda hanno una direzione marcatamente inclinata rispetto alla linea di riva, questo flusso di acqua s'incanala prevalentemente in direzione parallela alla costa e forma la così detta corrente litoranea, che risulta delimitata tra la zona dei frangenti e la costa stessa. Viceversa, quando i fronti d'onda frangenti sono prevalentemente paralleli alla linea di riva la maggior parte del flusso di acqua spinto dal moto ondoso frangente ritorna al largo attraverso la formazione di una corrente (detta *undertow*) che scorre tra il fondale e il *mass-transport* concentrato sulla fascia più superficiale. In pratica, i tre sistemi di circolazione: *mass-transport*, corrente litoranea e *undertow* sono contemporaneamente sempre presenti e l'intensità relativa degli ultimi due è variabile in funzione della direzione del moto ondoso al frangimento.

Nel caso delle coste sabbiose, l'azione persistente del moto ondoso e della circolazione costiera sui granelli di sabbia dà luogo ad una morfodinamica della spiaggia emersa e sommersa che evolve verso una nuova configurazione più stabile per quella data azione del mare.

In estrema sintesi e senza alcuna presunzione di completezza, ci si limita ad osservare che sotto certi rapporti tra l'intensità del moto ondoso e la capacità di resistenza della sabbia ad essere trascinata via, la morfodina-

mica è prevalentemente caratterizzata dal moto dei sedimenti in direzione litoranea e verso riva in condizioni dette “estive” o verso il largo in condizioni dette “invernali”. Nel caso invernale, i sedimenti si muovono verso il largo trascinati dall’*undertow* fino ad una profondità oltre la quale questa corrente non è più così forte da poterli mantenere in sospensione e la loro sedimentazione forma un locale accumulo di sabbia detto barra. La barra può essere quindi più o meno distante da riva, in funzione del moto ondoso che l’ha determinata e si sviluppa prevalentemente in direzione litoranea. Naturalmente, la barra non è perfettamente cilindrica e continua, ma presenta varie irregolarità tra le quali quella di essere spezzata in vari punti, detti trogoli. Il sistema di barre e trogoli determina una resistenza differenziata al fluire della corrente di *undertow*, minore attraverso i trogoli e maggiore attraverso la barra. Come risultato, questa corrente si concentra attraverso i trogoli aumentando di intensità e attivando un nuovo processo morfodinamico che scava una sorta di canale sempre più profondo verso una nuova configurazione di equilibrio. In questo caso la corrente può diventare talmente intensa da impedire al moto ondoso di propagarsi verso riva, ed essere diretta verso il largo su tutta la profondità d’acqua, dal fondale alla superficie del mare.

Nel caso in cui nella fascia costiera siano presenti strutture, naturali o artificiali, queste interagiscono con il moto ondoso e nascono ulteriori fenomeni oltre e quelli già descritti. Sempre per mezzo della sola osservazione è evidente che dietro una struttura di una certa lunghezza, posta nel mare e investita dal moto ondoso si crea comunque una certa agitazione anche là dove le onde non possono propagarsi direttamente. Il fenomeno per mezzo del quale si attua questo trasferimento di energia dietro un ostacolo, attraverso le sue estremità e verso aree che possono essere raggiunte solo qualora l’energia si propaghi in direzione differente da quella principale del moto ondoso incidente, è detto diffrazione. Inoltre, quella parte del moto ondoso che s’imbatte sulla struttura impermeabile è riflessa verso la sua componente incidente e questa interazione determina localmente una nuova forma di agitazione ondosa caratterizzata da zone dove le onde possono anche raddoppiare di altezza.

In questa brevissima sintesi della fenologia della circolazione costiera, indotta dal moto ondoso formato dal vento al largo e frangente a costa, sono stati messi in luce solo alcuni dei principali fenomeni quali: l’irregolarità del moto ondoso naturale, la rifrazione, lo *shoaling*, la diffrazione, la riflessione, il frangimento, la diminuzione dell’altezza delle onde fino a scomparire nel moto di salita e discesa sulla battigia (detti rispettivamente *run-up* e *run-down*), e l’attivazione per effetto del *mass-transport*, presente di onda in onda frangente, di un complesso sistema di circolazione caratterizzato dall’*undertow*, eventuali *rip-currents*, la corrente litoranea e alcuni elementi morfodinamica di spiagge sabbiose vista l’interazione con la circolazione. Pur non introducendo ulteriori fenomeni, che caratterizzano principalmente differenti scale spazio-temporali, il sistema osservato appare già molto complesso per poterlo rappresentare compiutamente tramite la così detta simulazione numerica.

### Simulazione Numerica

Definire accuratamente cosa è la simulazione numerica non può essere l’obiettivo di questo breve articolo, per questo motivo la seguente trattazione è limitata a mettere in luce solo alcuni aspetti utili per favorire la comprensione nel caso specifico della circolazione costiera. La presentazione di alcuni aspetti generali è ridotta solo a qualche digressione.

In estrema sintesi, per un dato sistema in esame si individuano le quantità fisiche che ci permettono di descriverlo e poi con la simulazione numerica si ottengono, come risultato di un processo di calcolo, i valori di ogni quantità al variare per esempio, della posizione su tutto lo spazio di interesse e del tempo (detti rispettivamente: dominio numerico spaziale e temporale).

Il termine “quantità” indica che possiamo farne una misura e quando la misura di questa quantità varia, per esempio, nello spazio e nel tempo, le incognite che dobbiamo calcolare sono funzioni delle variabili spazio e tempo.

Nel caso della circolazione costiera, le quantità fisiche che si vogliono conoscere possono essere, per esempio: la continua variazione nel tempo e nello spazio del livello del mare, oppure solo i parametri caratteristici (i.e. l’altezza delle onde, il periodo, la lunghezza, la direzione e la celerità di propagazione); la pressione con la quale le onde spingono l’acqua per effetto del frangimento; la velocità dell’acqua, o il livello medio del mare, in ogni punto della fascia costiera e in ogni istante di tempo; il percorso dei corpi trascinati dalle onde e dalle correnti e molto altro ancora.

La simulazione numerica ci permette di conoscere tutte queste quantità su ogni punto della fascia costiera e per ogni istante di tempo, per esempio durante una mareggiata, esattamente come se fossimo immersi in mare e capaci di misurarle tutte, in tutti i punti e in ogni istante! In altre parole, con questo strumento è possibile acquisire talmente tanta informazione sulla circolazione costiera al punto che poi la difficoltà maggiore diventa quella di fare un'analisi dei dati che possa ben illustrare i risultati e supportare efficacemente la soluzione del problema affrontato.

Per raggiungere questo obiettivo, i.e. disporre della simulazione numerica, è necessario prima di tutto partire da un modello teorico formulato in termini di equazioni matematiche. Il sistema di equazioni contiene le grandezze fisiche di interesse e le vincola le une alle altre in linguaggio matematico secondo i dettami delle leggi fisiche fondamentali. In generale, abbiamo a disposizione le leggi di Newton (1642-1726) la cui trascrizione in forma di uno specifico sistema di equazioni matematiche, valido per un fluido come l'acqua, fu sviluppata nel tempo e portata a compimento nel IX secolo. I principali contributi allo sviluppo del sistema di equazioni che utilizziamo oggi furono dati da un ingegnere e matematico francese di nome Claude-Louis Navier (1785-1836) e da un fisico irlandese di nome George Gabriel Stokes (1819-1903) e a loro memoria parliamo di "Navier-Stokes Equations" (nel seguito NSE). Le NSE legano tra loro le forze che agiscono sulle particelle di acqua e gli spostamenti delle particelle stesse (o velocità o accelerazioni). Note le forze che agiscono in mare, la soluzione delle NSE fornisce gli spostamenti delle particelle di acqua o viceversa. Se fossimo in grado di risolvere analiticamente queste equazioni assieme a quelle necessaria per imporre che si rispetti anche la conservazione della massa, le condizioni al contorno e quelle iniziali, allora potremmo conoscere, senza soluzione di continuità nello spazio e nel tempo, tutte le quantità di nostro interesse nella forma di funzioni continue. Purtroppo, tranne che in situazioni estremamente semplificate, nessuno ha mai trovato la soluzione analitica esatta e che valga in generale delle NSE. Per dirla tutta, ancora oggi non si è nemmeno riusciti a dimostrare che questa soluzione esista e sia unica, tanto che nel 2000 un gruppo formato dai migliori matematici del mondo, sotto l'egida del Clay Mathematics Institute of Cambridge, Massachusetts, ha istituito un premio di 1 milione di dollari per chi riuscirà a fornire questa dimostrazione. In sostanza, sono ormai più di 100 anni che generazioni di matematici si stanno cimentando invano con la ricerca della soluzione analitica esatta e generale delle NSE. Tuttavia, pur in assenza di una soluzione analitica, i valori delle quantità fisiche d'interesse presenti in sistemi di equazioni matematiche possono essere calcolati applicando metodi, detti numerici, che permettono di arrivare ad un risultato, accurato entro certe prefissate e accettabili approssimazioni ed entro un numero finito di cicli di calcolo, e questo risultato spesso è quanto basta ad ingegneri e fisici.

Una caratteristica dei metodi numerici è che i valori delle quantità fisiche d'interesse, contenuti nel sistema di equazioni, vengono forniti solo su alcuni punti dello spazio, detti nodi di calcolo, e solo su alcuni istanti di tempo nel periodo di interesse, detti passi di calcolo. La distanza tra i nodi di calcolo e tra gli istanti di tempo, detta risoluzione spaziale e temporale, può essere decisa preliminarmente, e teoricamente possiamo fissarle entrambe piccole a piacere ma il numero di calcoli necessario per arrivare alla soluzione numerica cresce enormemente all'aumentare della risoluzione (i.e. al diminuire della distanza tra i nodi di calcolo e tra gli istanti di tempo). Certamente è possibile svolgere i conti a mano ma non saremmo veloci a sufficienza e impiegheremmo decenni anche per risolvere piccoli problemi di infimo interesse tecnico! Nella metà del XX secolo, l'invenzione del computer ha fornito lo strumento necessario per eseguire velocemente enormi quantità di conti matematici e questa novità ha dato certamente impulso allo sviluppo di metodi numerici sempre più ottimizzati per la soluzione di sistemi di equazioni matematiche. Si potrebbe pensare che generazioni di matematici, ingegneri o fisici frustrati dalla incapacità di arrivare alla soluzione analitica, esatta e generale, delle NSE, abbiano visto nella coppia formata da computer e metodi numerici l'arma in grado di scardinare la porta che ostacola il loro cammino verso il risultato! Di fatto, da allora la quasi totalità degli sforzi degli ingegneri coinvolti nel campo della simulazione numerica dei fluidi, ha riguardato la verifica, l'applicazione e talvolta anche lo sviluppo, di metodi numerici per la soluzione delle NSE.

Più recentemente, il mondo della ricerca ha visto anche lo sviluppo di nuovi approcci che sfruttando la disponibilità di enormi potenze di calcolo simulano la dinamica dei fluidi come risultato del comportamento collettivo di particelle che si muovono e interagiscono tra loro direttamente nel rispetto delle leggi di Newton senza la necessità di formalizzarli prima nella forma delle NSE. L'accento a questo ultimo argomento è dato per completezza di trattazione ma nel resto dell'articolo non viene ulteriormente ripreso e il lettore eventualmente interessato potrà approfondire su altre fonti, e.g. Idelsohn e al. (2017).



Sintetizzando questa breve digressione storica possiamo dire che la triade che comprende:

- 1) un sistema di equazioni che lega tra loro le quantità fisiche di interesse e la loro evoluzione nello spazio e nel tempo imponendo il rispetto di leggi fisiche fondamentali;
- 2) un metodo numerico che permette di calcolare, su ogni nodo del dominio numerico e ad ogni passo del dominio temporale, i valori delle quantità fisiche di interesse presenti nel sistema di equazioni matematiche,
- 3) il calcolatore che, svolgendo i cicli di calcolo necessari al metodo numerico, permette di ottenere in breve tempo tutti i valori delle quantità fisiche;

costituisce l'approccio metodologico alla base della simulazione numerica.

Per condurre entro tempi accettabili le simulazioni numeriche della dinamica dei fluidi basate sulle NSE, la potenza di calcolo delle tecnologie e architetture più avanzate di computer odierni è in grado di studiare solo i problemi in domini spaziali e temporali relativamente piccoli, rispetto alle grandezze caratteristiche del sistema in esame. Per esempio, nel caso della circolazione costiera ancora oggi è insostenibile usare le NSE per simulare numericamente cosa accade su un litorale esteso varie lunghezze d'onda, fino a fondali profondi alcune altezze d'onda e per un intervallo di tempo che dura vari periodi d'onda.

Per ora, per ovviare a questo limite i modelli più utilizzati per la simulazione numerica della circolazione costiera sono basati su sistemi di equazioni matematiche derivati dalle equazioni di Navier-Stokes, ma di minore onerosità computazionale e questo al costo di rinunciare a poter simulare qualche fenomeno della fisica del sistema. In questa prospettiva, è fondamentale conoscere quali fenomeni fisici non possono essere simulati sulla base di un dato sistema di equazioni semplificate e quindi scegliere quello più idoneo perché tutti i fenomeni che giocano un ruolo fondamentale sul problema in esame siano correttamente ottenibili. Sono disponibili differenti approcci per semplificare le NSE e ognuno fornisce differenti sistemi di equazioni la cui onerosità computazionale come la completezza della fisica rappresentata è graduabile, parallelamente, da relativamente elevata a relativamente bassa.

In generale, una prima semplificazione comune a tutti gli approcci consta nell'accontentarsi di ottenere dalla simulazione numerica solo i valori mediati, in un dato intervallo di tempo, delle quantità fisiche di interesse. In sostanza, si rinuncia a poter calcolare la variazione delle quantità d'interesse entro un intervallo di tempo molto piccolo e ci si accontenta di conoscerne solo il valore medio (per esempio, un intervallo molto più piccolo del periodo caratteristico dei moti ondosi da vento).

Il sistema di equazioni che lega questa quantità medie è detto sistema delle Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations (nel seguito RANSE) in memoria di Osborne Reynolds (1842-1912), nato in Irlanda poi anche cittadino inglese, e dei suoi importanti studi sulla turbolenza. Ai fini della simulazione numerica della circolazione costiera l'onerosità computazionale anche di questo sistema di equazioni è ancora troppo elevata e per questo sono utilizzati altri approcci semplificativi.

Una seconda semplificazione comune a più approcci specifici per le aree costiere, dove le profondità del mare sono relativamente limitate, è quella di accontentarsi di ottenere dalla simulazione numerica solo il valore medio sulla profondità delle velocità dell'acqua sul piano orizzontale e il livello della superficie libera su tutto il dominio numerico, mantenendo comunque la variazione nel tempo di ogni grandezza. Il sistema di equazioni che lega e regola l'evoluzione di queste quantità nello spazio e nel tempo è detto sistema delle equazioni di Boussinesq (BE) in memoria di Joseph Valentin Boussinesq (1842-1929), matematico e fisico francese e dei suoi studi sulla dinamica dei fluidi. In particolare, i valori delle velocità orizzontali e della superficie libera ottenuti dalla soluzione del BE includono anche l'effetto della presenza di una velocità verticale comunque esistente e differente da zero, pur non essendo più esplicitamente presente nelle equazioni. Grazie a questa peculiarità, le equazioni permettono di simulare il fenomeno che vede onde di periodo più lungo propagarsi più velocemente di onde di periodo più corto, la così detta dispersione in frequenza. Le approssimazioni che si accettano per poter derivare le BE fanno sì che i valori ottenibili per le grandezze fisiche siano approssimati, ma la differenza rispetto ai valori esatti diminuisce al diminuire della profondità d'acqua e diviene trascurabile ai fini pratici quando questa è minore di circa un quarto della lunghezza d'onda. Per esempio, se consideriamo che le onde da vento sono lunghe da qualche decina ad un centinaio di metri, allora le BE possono essere alla base di simulazioni numeriche accurate per tutta la fascia costiera a partire dalla profondità di circa una decina di metri. Per fondali più profondi è preferibile impiegare un altro insieme di equazioni, e.g. quelle derivate Stokes sulla base di altre ipotesi e che hanno altri limiti ma per brevità non viene aggiunto altro in questo articolo (si veda e.g. Dean and Dalrymple 1991).

Le BE possono essere ulteriormente semplificate se rinunciamo a mantenere, nei risultati ottenibili dalla simulazione numerica, anche l'effetto della velocità verticale sul campo di velocità orizzontali e sul moto della superficie libera, e quindi a perdere l'effetto di dispersione in frequenza del moto ondoso. Questa ulteriore semplificazione porta ad un nuovo sistema di equazioni detto Shallow Water Equations (SWE) e ancora una volta l'errore nei valori delle grandezze fisiche ottenibili dalle simulazioni numeriche basate su queste equazioni diminuisce al diminuire della profondità del mare (e.g. Abbot et al 1973). Tuttavia, questa volta l'errore diviene tecnicamente trascurabile per profondità ancora minori rispetto alle simulazioni basate sulle BE, i.e. circa un quindicesimo della lunghezza d'onda. Infatti, in caso di fondali sempre più bassi la celerità di propagazione tende a perdere la dipendenza dal periodo dell'onda quindi tutti i moti ondosi viaggiano a velocità uguale indipendentemente dal proprio periodo e tale velocità è proprio quella ottenibile dalla soluzione delle SWE.

È un fatto che con il passare degli anni le potenze di calcolo siano via via aumentate e oggi, rispetto anche a soli 20 anni fa, queste siano aumentate a tal punto che approcci numerici dall'onere computazionale prima non accettabile, poi accettabile solo nell'ambito della ricerca scientifica, siano oggi lo strumento principale anche per finalità tecniche. Questo è il caso delle BE oggi uno standard per esempio per la simulazione numerica della agitazione portuale a supporto delle fasi progettuali. Altro esempio è il caso delle SWE per la simulazione della circolazione costiera in tratti di litorale relativamente piccoli, i.e. lunghi qualche lunghezza d'onda, o per la circolazione in sistemi lagunari tipicamente rappresentati da grandi estensioni e bassi fondali. In quest'ultimo caso la circolazione è dovuta principalmente alla marea astronomica, alle variazioni bariche e al vento locale, mentre le onde da vento sono piccole tanto che loro contributo alla circolazione lagunare dato dalla spinta delle onde frangenti nella fascia del perimetro della laguna è tecnicamente irrilevante e quindi la loro presenza viene omessa dalla simulazione così riducendo considerevolmente l'onerosità computazionale.

La disamina del caso della circolazione costiera in ampi tratti di litorali, riassunta nel primo paragrafo, ha messo in luce come il motore principale di questo sistema sia il frangimento del moto ondoso che dalla zona dei frangenti in poi spinge letteralmente la massa d'acqua dentro la fascia costiera e attiva la relativa circolazione. Per questo è fondamentale che il fenomeno del frangimento e il suo effetto sulle masse di acqua della fascia costiera sia correttamente simulato. Certamente questo obiettivo può essere centrato mediante l'utilizzo delle BE o delle SWE e in entrambi i casi la simulazione fornirebbe contemporaneamente, in ogni nodo del dominio spaziale e per ogni step temporale, anche molto più piccolo del periodo del moto ondoso, sia le velocità dell'acqua che l'evoluzione della superficie libera del mare, i.e. il moto ondoso. Tuttavia, l'onerosità computazionale di questi due approcci, se estesi a grandi aree, è ancora oggi insostenibile per l'utilizzo ai fini tecnico-pratici. In questo caso, si preferisce utilizzare un approccio ulteriormente semplificato che si basa sulla scomposizione del problema in due parti, prima si simulano i processi legati al moto ondoso, poi le relative correnti costiere indotte dalle onde frangenti.

Detta così sembrerebbe non avere senso fare due simulazioni al posto di una al fine di ridurre l'onerosità computazionale, tuttavia è proprio quello che riusciamo a raggiungere ma al costo di accontentarci ancora una volta di rinunciare ad avere dalla simulazione idrodinamica alcuni aspetti del fenomeno. In questo caso, ci accontentiamo di ottenere solo i valori medi delle quantità fisiche, durante intervalli temporali lunghi qualche periodo d'onda, quindi perdendo le variazioni che avvengono al loro interno. Concettualmente si opera come nel caso delle RANSE. In pratica, otteniamo dalla simulazione le velocità e i livelli della superficie libera come se li misurassimo in continuo ma poi sostituissimo ad ogni valore istantaneo la media su un intervallo temporale lungo qualche periodo d'onda. Per questo, simili modelli sono anche detti *period-averaged* o *wave-averaged*.

Le equazioni matematiche che contengono e regolano l'evoluzione di queste quantità fisiche mediate nel periodo dell'onda possono essere ottenute dalle SWE, tramite operazioni matematiche, e risultano formalmente analoghe a loro ma con l'aggiunta di termini che portano dentro il sistema l'effetto apportato sulle quantità medie dalla presenza del moto ondoso frangente. Questi termini sono chiamati *Radiation Stress*, e con una brutale sintesi possiamo dire che tutto va come se potessimo cancellare il moto ondoso, ma applicassimo su ogni particella di acqua una pressione che la spinge tanto quanto la spingerebbe quel moto ondoso. Il *Radiation Stress* dipende principalmente della variazione spaziale dell'altezza d'onda, cosa che avviene marcatamente nella zona dei frangenti per poi proseguire fino a riva. Quindi, maggiore è la precisione nel

calcolo della evoluzione dell'altezza d'onda sulla fascia costiera, tanto più accurato sarà il valore calcolato dei *Radiation Stresses* e tanto migliore sarà la circolazione costiera risultante dalla simulazione.

In sintesi, con l'approccio *period-averaged* per simulare la circolazione costiera è necessario prima simulare la variazione dei parametri caratteristici d'onda (altezza, periodo, direzione, lunghezza) dal largo, attraverso il frangimento e poi fino a riva così da disporre di quanto serve per calcolare i *Radiation Stresses* necessari per poi simulare la circolazione costiera. Anche i modelli numerici per la simulazione dell'evoluzione dei parametri caratteristici d'onda possono essere basati su differenti sistemi di equazioni matematiche. Questi possono differire sia per la capacità di poter simulare tutti o solo alcuni dei principali fenomeni (e.g. rifrazione, *shoaling*, diffrazione, riflessione) sia per il livello di accuratezza della simulazione del fenomeno del frangimento. Infine, dopo aver simulato le onde costiere e le correnti costiere si dispone di tutti i dati necessari per poter simulare anche il trasporto a costa durante le mareggiate, e.g. dal trasporto di oggetti rigidi, particelle come i sedimenti e per esempio anche il trascinarsi di bagnanti. In questo lavoro non viene fornita, per brevità, una presentazione anche solo sintetica né dei modelli d'onda né dei modelli di trasporto. In Figura 1 è riassunto in forma di diagramma a blocchi questo specifico approccio modellistico, *period-averaged*.

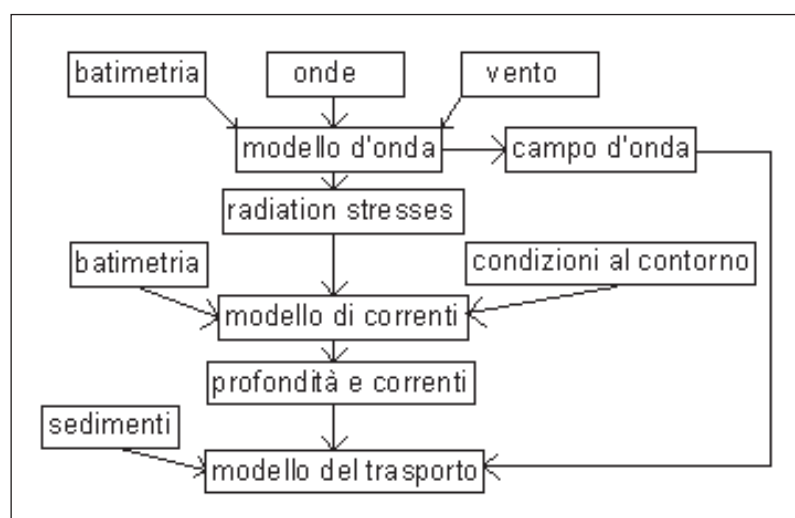


Figura 1. Diagramma a blocchi dell'architettura funzionale impiegata per la conduzione delle simulazioni numeriche nell'approccio *period-averaged*.

### Un esempio illustrativo delle potenzialità della simulazione

L'approccio metodologico alla simulazione numerica sintetizzato in Figura 1 richiede un ridotto onere computazionale, relativamente alle odierne potenze di calcolo e nell'ambito delle esigenze temporali connesse a studi tecnico-pratici. Tale approccio può essere adottato, per esempio, per:

- 1) la caratterizzazione della circolazione costiera su specifici casi di studio indotta da specifici stati di mare, a supporto delle attività di formazione al salvamento;
- 2) la valutazione della modifica alla circolazione costiera indotta da nuove opere in progetto, oltre che ai fini dell'efficacia delle opere per la protezione dei litorali, anche per valutarne gli impatti nella sicurezza alla balneazione;
- 3) la ricostruzione di scenari passati di particolare interesse, e.g. in casi di eventi tragici o comunque in presenza di ingenti danni materiali;
- 4) la previsione della circolazione costiera nel termine di qualche giorno ai fini della diramazione dell'allerta e dell'organizzazione delle attività di salvamento;
- 5) sistemi operativi in tempo reale composti dalla sinergia tra simulazione numerica, sensori di misura e droni, ai fini del monitoraggio a supporto delle attività di ricerca e salvataggio.

L'approccio in esame costituisce, ad oggi, uno dei più consolidati ed efficaci strumenti per esplorare in profondità i temi inerenti alle 5 classi di applicazioni menzionate. Per questo, la restante parte di questo articolo è dedicata ad illustrare un esempio di applicazione di questo specifico approccio alla simulazione numerica della circolazione costiera, cercando di metterne in luce l'utilità sia per le finalità più specifiche della missione del GNRAC che della SNS.



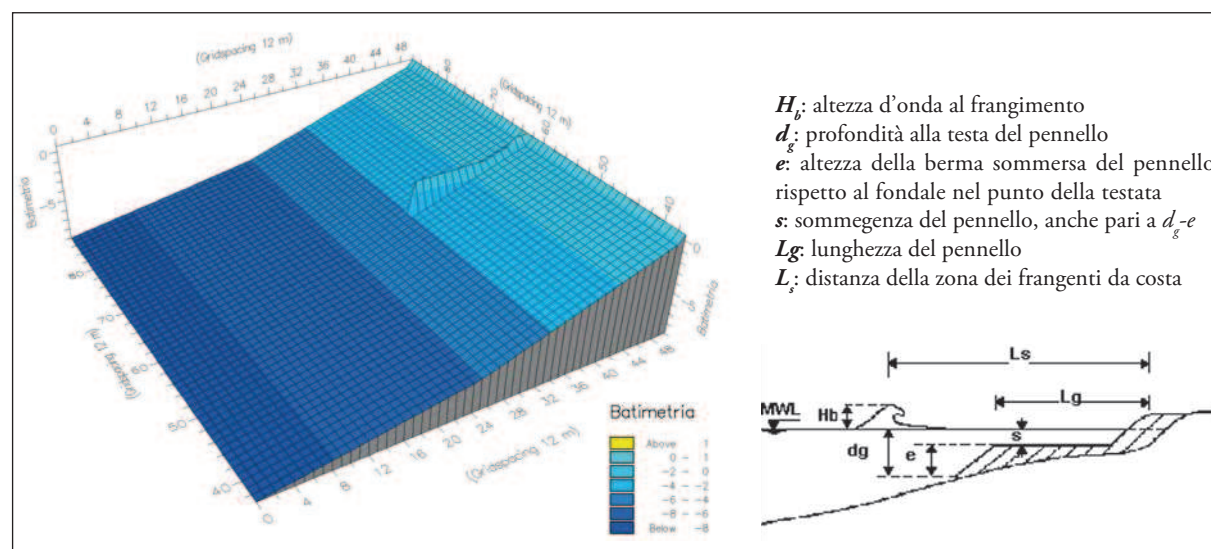
L'osservazione di campo e l'esperienza che ne deriva costituiscono certamente un caposaldo per la comprensione di situazioni di pericolo, la diramazione di allerta e il trasferimento delle conoscenze nelle attività di formazione. Tuttavia, quando si presenta un nuovo caso, l'esperienza pregressa può non essere sufficiente per una comprensione rapida e sufficientemente approfondita delle specifiche dinamiche di circolazione. In questo caso, il ricorso alla simulazione numerica permette di superare questo limite e di acquisire più rapidamente e approfonditamente la conoscenza generale della circolazione.

Tra gli innumerevoli esempi che possono essere utilizzati per illustrare le potenzialità del metodo, in questo articolo è stato scelto il caso della presenza in un tratto di costa di un'opera ortogonale a riva. Simili opere sono spesso proposte per incidere sul regime dei litorali sabbiosi e sono detti pennelli. In particolare, viene presentato il caso di pennelli sommersi, senza dubbio una dei casi meno frequenti e quindi il più idoneo a evidenziare l'utilità della simulazione numerica per accelerare il processo di comprensione della relativa circolazione costiera. Questo lavoro si basa su simulazioni condotte nell'ambito della pluridecennale attività di ricerca dell'autore ma i risultati vengono qui illustrati sotto la nuova luce di interesse inerente al pericolo per la balneazione e la formazione del personale addetto al salvamento.

Altre tipologie molto comuni sono e.g. le barriere parallele distaccate da riva, singole o multiple e separate da varchi. Per questo secondo caso il lettore eventualmente interessato è invitato ad approfondire su altre fonti, per esempio l'articolo *open access* della rivista Studi Costieri: Balzano et al. 2006 e per ulteriori esempi ancora più generali e comuni, si vedano gli articoli del volume 9.

La simulazione è stata condotta su un caso idealizzato di una costa con profilo sommerso piano e inclinato soggetta all'azione del moto ondoso frangente. Il profilo è stato schematizzato come piano con pendenza di 1:50 fino alla profondità di 6 m e con pendenza di 1:100 a profondità maggiore. Sono stati simulati pennelli di lunghezza 150 m, 200 m e 250 m e per ogni caso la sommergenza della cresta è stata fatta variare tra 0.5 m, 1.0 m e 1.5 m rispetto al livello del mare in quiete. Il sistema costa con pennello è stato testato sotto l'azione di un moto ondoso di altezza significativa pari a 2.0 m, periodo di picco 6.8 s. Sono state studiate due possibili direzioni di incidenza, rispettivamente: 5° e 15° di inclinazione della cresta al largo rispetto alla linea di riva. In totale sono stati studiati numericamente 18 casi caratterizzati ognuno per un dato valore di lunghezza del pennello, sommergenza e direzione del moto ondoso incidente.

I parametri geometrici caratterizzanti il pennello sono schematizzati in Figura 2 e sulla base di essi viene presentata nel seguito un'analisi parametrica dei risultati delle simulazioni.



**Figura 2. Sinistra: dominio spaziale del modello numerico; destra: nomenclatura dei parametri geometrici caratterizzanti il pennello sommerso simulato.**

A titolo esemplificativo, il campo delle altezze d'onda nell'intorno del pennello sommerso, ottenuto dalla simulazione numerica per uno dei casi studiati, è riportato in Figura 3. Lontano dall'opera, si nota il fenome-

no del frangimento che porta l'altezza d'onda a diminuire drasticamente dalla zona dei frangenti verso riva. Al contrario, sopra l'opera l'interazione onda-struttura dà luogo ad un drastico aumento dell'altezza d'onda concentrato sulla testata del pennello. Questo può essere spiegato osservando che il flusso di energia nel propagarsi dai fondali antistanti l'opera fin sopra la sua parte sommersa, subisce una forte diminuzione nella componente cinetica, alla quale non è associata una significativa dissipazione di energia data la limitata scala spaziale del fenomeno legata alla brusca diminuzione dei fondali dal piede dell'opera alla sommità della testa sommersa. In testa quindi l'energia del moto ondoso si converte nella forma potenziale, i.e. aumentando l'altezza d'onda, per poi frangere violentemente dislocando enormi masse d'acqua verso riva.

Per evidenziare l'incremento dell'altezza d'onda sopra la testa del pennello sommerso in rapporto all'altezza al frangimento, che avremmo avuto se non ci fosse stata l'opera, i risultati di tutte le 18 differenti configurazioni studiate sono riassunti nel grafico in Figura 4, al variare dell'elevazione della cresta del pennello rispetto al fondale locale. I risultati mostrano chiaramente che tanto più la berma del pennello sommerso è elevata rispetto al fondale locale (i.e. la sommergenza è ridotta), tanto maggiore è l'incremento dell'altezza d'onda in testa. Nei casi studiati, l'altezza d'onda è risultata aumentare fino a circa il 30% del valore che avremmo avuto nello stesso punto ma in assenza dell'opera tanto da diventare maggiore anche dell'altezza d'onda al largo del litorale.

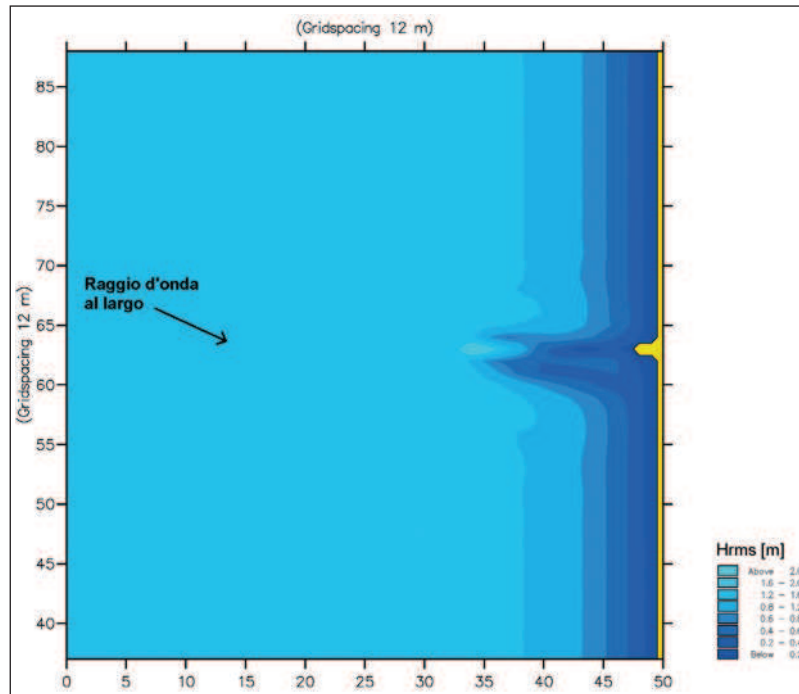


Figura 3. Campo delle altezze d'onda risultanti dalla simulazione numerica dell'interazione con il pennello sommerso.

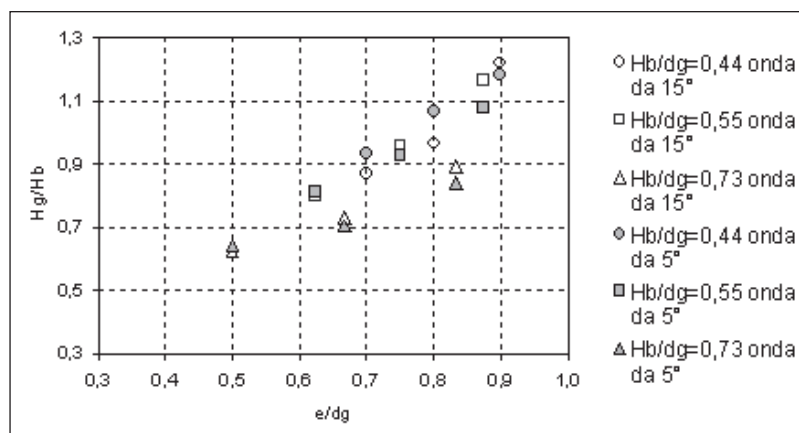


Figura 4. Incremento dell'altezza d'onda in testa la pennello rispetto al valore caratteristico dell'altezza al frangimento in assenza dell'opera, al variare dell'elevazione della cresta del pennello rispetto alla profondità locale.

L'effetto dell'aumento dell'altezza d'onda sulla testata sommersa del pennello e del relativo violento frangimento è quello di creare forti *Radiation stress*, i.e. pressioni di spinta, che determinano variazioni del soprizzo d'onda nel livello medio del mare locale (detto *set-up* d'onda) e forti correnti concentrate.

L'andamento del *set-up* d'onda nell'intorno del pennello ottenuta in uno dei casi simulati è riportato a titolo esemplificativo in Figura 5. Il risultato mostra chiaramente una depressione significativa, sottoflutto al pennello sommerso, del livello medio del mare durante l'attacco ondosso. Questo meccanismo è associato alla formazione di forti correnti locali sulla testa del pennello e di una cella di circolazione come messo in luce dall'analisi dei dati riportata in Figura 6 in forma del campo di circolazione costiera.

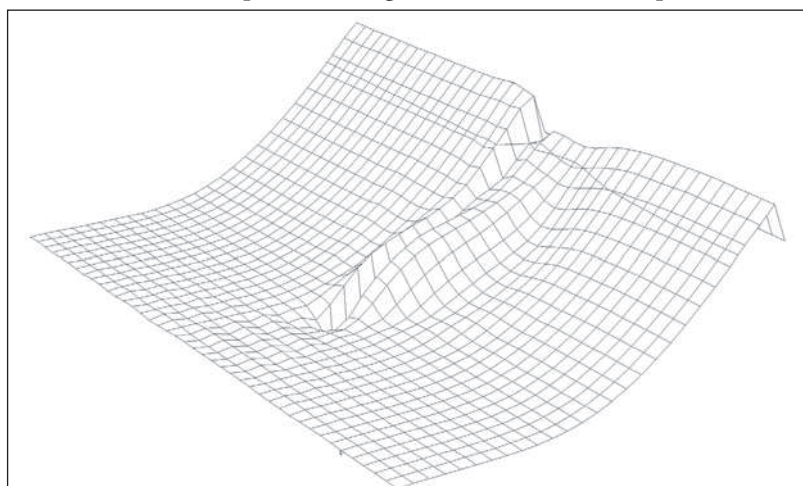


Figura 5. Assonometria inerente alla variazione del *set-up* d'onda nell'intorno del pennello sommerso.

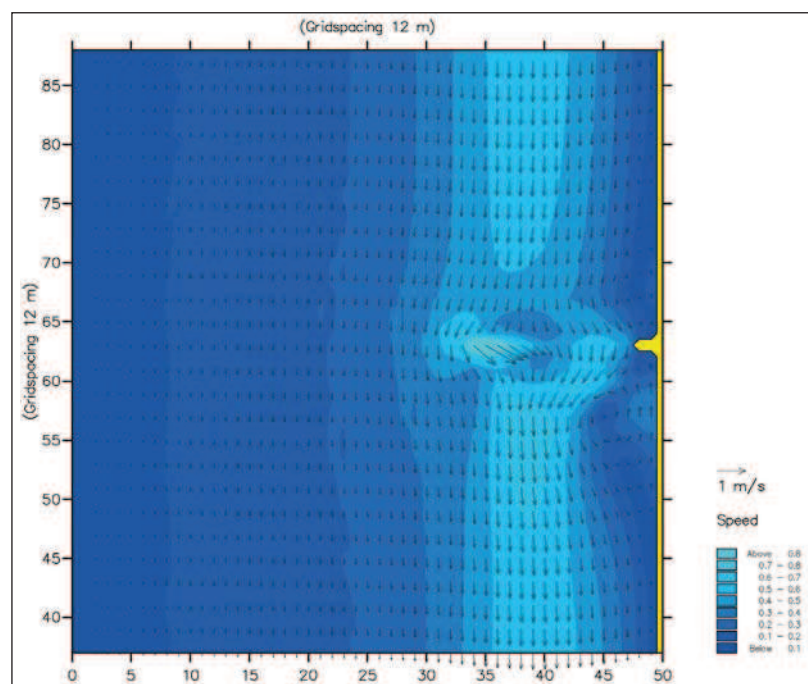


Figura 6. Campo di moto della circolazione costiera risultante dall'interazione del moto ondosso incidente su una costa con un pennello sommerso.

La forte velocità della corrente indotta dal moto ondosso frangente sulla testa del pennello aumenta al diminuire della sommersenza dell'opera. Il profilo della velocità della corrente litoranea in asse al pennello sommerso al variare della sua sommersenza è riportato in Figura 7 e mostra chiaramente che, nel caso in esame la corrente locale sulla testa del pennello può raggiungere velocità anche oltre i 2 m/s quando senza l'opera le massime velocità sarebbero minori di 1 m/s.

L'analisi di tutti i dati delle simulazioni condotte espressa come andamento della massima velocità in testa al pennello al variare della sommergenza dell'opera è riportata in Figura 8. Questa analisi conferma un aumento molto marcato della velocità al diminuire della sommergenza per tutti i casi studiati. Per esempio, attraverso il grafico si ottiene che nel caso di un pennello sommerso con testata posta su un fondale di 2.5 m e sommergenza 0.5 m durante un moto ondoso con altezza pari a 1.5 m, si forma sulla cresta sommersa del pennello una velocità della corrente di circa 1.5 m/s.

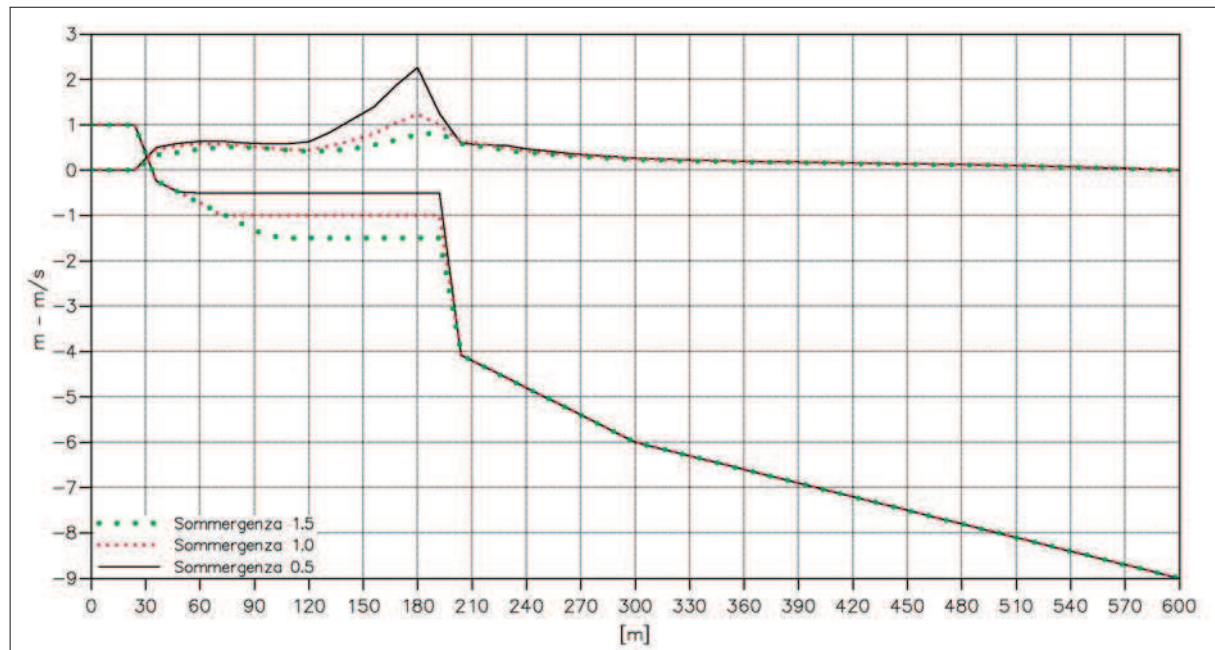


Figura 7. Profilo cross-shore della velocità della corrente litoranea attraverso la direzione assiale al pennello sommerso, al variare della sua sommergenza.

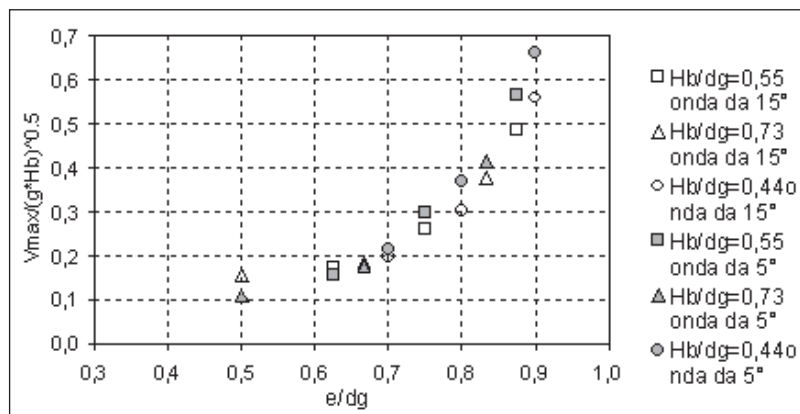


Figura 8. Andamento della massima velocità della corrente che si forma sopra la testata del pennello sommerso all'aumentare dell'elevazione della berna dell'opera rispetto al fondale locale. Per generalizzare il risultato, la massima velocità riportata in asse y è stata normalizzata con i parametri dell'onda al frangimento.

## Conclusioni

La simulazione numerica della circolazione costiera è stata brevemente introdotta in questo lavoro cercando di utilizzare un approccio divulgativo verso lettori non tecnici. L'articolo ha l'obiettivo di soddisfare al bisogno di conoscenza di questa specifica metodologia di indagine da parte di operatori nel campo della gestione dei litorali e del salvamento. I messaggi principali del lavoro sono due: i) esistono numerose differenti varianti del metodo e l'uso dell'una o dell'altra è funzione, primariamente degli obiettivi che si intendono raggiungere e secondariamente di un bilancio tra accuratezza dei risultati e onerosità computazionale; la selezione del miglior approccio, la conduzione delle simulazioni e l'analisi dei dati sono fasi determinanti che

necessitano di approfondite conoscenze che non possono essere improvvisate; ii) la simulazione numerica è un potente strumento d'indagine che permette di scoprire caratteristiche specifiche della circolazione costiera e la cui massima utilità si mette in luce soprattutto in casi inusuali dove le conoscenze pregresse non sono sufficienti per una pronta e accurata analisi delle problematiche basata solo sull'osservazione di campo. Le differenti competenze e missioni complementari del GNRAC e della SNS potrebbero essere messe a sistema partendo da una prima attività concentrata su un caso di studio dove applicare la simulazione numerica della circolazione costiera anche ai fini degli interessi del Salvamento. Il Nascente Osservatorio Nazionale sull'Annegamento potrebbe essere il quadro di lavoro dove unire tutte le differenti competenze e far risuonare le relative complementarità.

### **Bibliografia**

- Abbott M.B., Damsgaard A., Rodenhuis G.S., 1973. *System 21 Jupiter: a design system for two-dimensional nearly horizontal flow*, Journal of Hydraulic Research, 11: 1-28.
- Balzano A., Cappietti L., Soldini L., Zanuttigh B., 2006. *Modellazione numerica della circolazione attorno ad opere trascinabili*, Studi Costieri, 9: 119-157, open access su <http://www.gnrac.it/rivista/rivista.htm>
- Devlin Keith J., 2003. *The Millennium Problems: The Seven Greatest Unsolved Mathematical Puzzles of Our Time*. New York: Basic Books. ISBN 0-465-01729-0. 237 pp.
- Dean R.G. and Dalrymple R.A., 1991 *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific, January 1991, pp. 353.
- GNRAC, Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero, Corso Europa, 26, 16132 Genova (GE), [www.gnrac.it](http://www.gnrac.it).
- Idelsohn, Sergio R, Oñate Eugenio, Becker Pablo, 2017, *Particle Methods in Computational Fluid Dynamics*, In: Encyclopedia of Computational Mechanics, Second Edition, 1-41.
- SNS, Società Nazionale di Salvamento, Via Luccoli, 24/4, 16123 Genova (GE), [www.salvamento.it](http://www.salvamento.it)

**Ricevuto il 30/06/2019**

**Accettato il 10/07/2019**