MODELLI NUMERICI PER L'INGEGNERIA COSTIERA

DHI TECHNICAL PAPER n°3

The expert in **WATER ENVIRONMENTS**

L'IMPORTANZA DELL'APPROCCIO MODELLISTICO-NUMERICO NELL'INGEGNERIA COSTIERA

Nell'ultimo decennio si è sempre più consolidato l'utilizzo dei codici di simulazione numerica in tutte le attività afferenti al settore dell' "ingegneria costiera", dal supporto alla progettazione portuale agli studi per la difesa della costa, dalla gestione dei sedimenti in aree contaminate alla qualità delle acque di balneazione.

A tale evoluzione hanno contribuito diversi fattori: da un lato i recenti indirizzi normativi a livello sia nazionale sia comunitario, dall'altro i progressi sul piano tecnico-scientifico e le importanti nonché rapide innovazioni nel campo dell'informatica.

In particolare, per ciò che riguarda la nautica da diporto, a seguito della promulgazione del D.P.R n° 509/97, tutti i "progetti da allegare ad istanze di concessione demaniale marittima per la realizzazione di strutture dedicate alla nautica da diporto", per ottenere la necessaria approvazione devono rispondere ad una serie di requisiti dettagliatamente esplicitati nel Decreto. Nel testo viene esplicitamente richiesto che in sede di progettazione siano analizzati, mediante un approccio di tipo deterministico e quantitativo, l'impatto previsto dell'opera sulle dinamiche costiere, il grado di penetrazione del moto ondoso all'interno del bacino ed i tempi di ricambio dei volumi d'acqua interni al porto, direttamente correlati alla qualità delle acque. E' pertanto necessario affrontare tali studi mediante sofisticati codici di simulazione numerica che consentano il confronto tra le diverse alternative progettuali, l'ottimizzazione delle differenti soluzioni e la verifica del rispetto dei vincoli.

Per quanto riguarda invece il tema della protezione e gestione della costa, risulta oggi di particolare importanza il principio di "gestione integrata della zona costiera" (GIZC), inteso come "il costante processo di assunzione delle decisioni con riguardo all'uso sostenibile, allo sviluppo ed alla protezione del territorio costiero, delle prospicienti aree marine e delle loro risorse", riaffermato con forza a livello comunitario attraverso la Raccomandazione dell'Unione Europea del 2002. Per il nostro Paese, in particolare, la corretta gestione della zona costiera riveste primaria importanza nella ricerca di un modello di sviluppo sostenibile, soprattutto se si pensa ai ben 7.500 km circa di litorale, il 30% dei quali presenta significativi fenomeni di erosione.

A fronte della diffusa accentuazione dei processi erosivi lungo numerosi tratti di litorale risulta sempre più strategico il ricorso ad interventi di protezione non più localizzati a difesa di un singolo tratto di costa, ma organicamente pianificati a più ampia scala, quella delle cosiddette "unità fisiografiche", tratti di costa che presentano un bilancio di sedimenti "chiuso", non influenzato, cioè, da fattori esterni all'unità stessa. Nell'affrontare ogni studio alla scala dell'unità fisiografica, risulta imprescindibile il ricorso ai modelli numerici che consentono di analizzare l'impatto di ogni intervento in riferimento all'intero insieme delle dinamiche che caratterizzano un tratto di costa, rendendo quindi possibile l'individuazione delle soluzioni ottimali attraverso il confronto di molteplici alternative di intervento o gestionali.

Sul piano tecnico-scientifico, oltre alle accresciute conoscenze e competenze sulle fenomenologie che regolano la dinamica costiera, che ne rendono oggi possibile la relativa rappresentazione attraverso robusti ed affidabili codici di simulazione numerica, negli ultimi anni il know-how tecnico necessario all'utilizzo di codici più complessi quali i modelli idrodinamici o di propagazione del moto ondoso, fino ad alcuni anni orsono patrimonio specifico di un limitato insieme di utilizzatori, si sta estendendo alla pratica comune, sia tra soggetti istituzionali (Amministrazioni locali, Autorità di Bacino e ARPA) sia di tipo privato.

Altro elemento di questa evoluzione è sicuramente costituito dagli importanti sviluppi nell'ultimo decennio nel campo dell'informatica, sia in termini software che hardware. Disponendo infatti di calcolatori sempre più potenti e di metodologie di programmazione sempre più raffinate, si pensi ad esempio alle potenzialità offerte dal calcolo parallelo o dai Sistemi Operativi 64-bit, è oggi possibile studiare, mediante i codici di simulazione, le fenomenologie più complesse, su aree estese, garantendo una risoluzione spazio-temporale di estremo dettaglio. Anche attraverso i più raffinati schemi di risoluzione ai volumi finiti, è infatti

© DHI

oggi possibile, con un calcolatore di uso comune ed un codice di calcolo adeguato, simulare ad esempio i campi di corrente in un'area di diverse decine di chilometri quadrati garantendo una risoluzione spaziale nell'ordine di pochi metri oltre che la possibilità di includere, ove necessario, i processi di trasformazione del moto ondoso, il trasporto solido, gli aspetti di qualità delle acque, ed ogni altra fenomenologia od elemento antropico di interesse per lo specifico studio.

Dal supporto alla progettazione alle valutazioni di impatto ambientale, alla previsione e gestione delle emergenze, i codici di simulazione numerica costituiscono quindi oggi uno strumento da cui non si può più prescindere ai fini di garantire la qualità tecnica che deve necessariamente caratterizzare ai giorni nostri le attività di studio nonché il rispetto dei più recenti indirizzi normativi. Finalità del presente documento tecnico è introdurre i principali settori di applicazione dei codici di simulazione numerica nel campo dell' "ingegneria costiera", presentandone lo stato attuale di sviluppo e di utilizzo nel nostro Paese, i differenti approcci metodologici possibili in relazione alle finalità e specificità di ogni studio e individuandone, per quanto possibile, le modalità di utilizzo più efficaci.

Il documento è stato redatto sulla base dell'ormai decennale esperienza maturata dai tecnici di DHI Italia operando esclusivamente nel campo della modellazione numerica, nonchè grazie alle consolidate partnership ed al conseguente continuo e costruttivo confronto tecnico con numerosi tra i più qualificati soggetti istituzionali ed enti privati operanti nel nostro paese ed inoltre, sul piano internazionale, attraverso il gruppo DHI.

STUDI E SOLUZIONI PER LA DIFESA DELLA COSTA DALL'EROSIONE

L'esigenza di affrontare gli studi sulle dinamiche costiere alla scala dell'unità fisiografica, che può variare da alcune centinaia di metri a decine di chilometri di costa, ha reso sempre più necessario il ricorso allo strumento modellistico numerico come supporto alla pianificazione e progettazione degli interventi di difesa del litorale e di ripascimento. Le ampie scale a cui è possibile applicare oggi i modelli numerici, pur garantendo il dettaglio del metro nelle zone di maggiore interesse, garantiscono la possibilità di analizzare l'impatto che alcuni interventi possono determinare anche a valle degli stessi, assicurando pertanto quella continuità spaziale che è stata fino a pochi anni orsono il principale limite degli interventi di protezione del litorale a scala locale.

Le fasi di studio mediante modello numerico sono sempre precedute da un'attività di raccolta e processamento di tutti i dati disponibili. I dati di input comunemente necessari per la predisposizione di uno studio delle dinamiche del litorale finalizzato alla difesa della costa dall'erosione ed all'individuazione delle soluzioni ottimali di intervento si possono raggruppare nelle seguenti categorie:

Dati relativi all'evoluzione storica della linea di riva: si riferiscono sia alla disponibilità di cartografia storica o di rilievi pregressi, sia alla possibilità di acquisire immagini aeree o satellitari ad alta risoluzione. In particolare, le immagini satellitari risultano un utilissimo strumento per la ricostruzione dell'andamento storico della linea di riva, sia per l'oggettiva difficoltà che spesso si incontra nel reperimento di cartografie pregresse, sia perché tali immagini ormai sono in grado di coprire più di quaranta anni di osservazioni. La loro interpretazione, unita alla conoscenza della storia delle opere costiere eventualmente già presenti a difesa del litorale, permette indirettamente di sopperire all'eventuale assenza di campagne di misure relative alla correntometria ed al trasporto di sedimenti lungo la costa.

© DHI

Figura 1- Esempio di evoluzione storica della linea di riva rappresentata attraverso tematismi GIS (le linee colorate si riferiscono alla posizione della linea di riva in anni diversi).

Dati relativi al moto ondoso: generalmente relativi al clima ondoso al largo del sito in esame; sono ottenibili in forma di registrazioni dei principali parametri che caratterizzano l'onda (altezza significativa, periodo medio o di picco e direzione di provenienza), effettuate dagli ondametri. Tali informazioni non sono sempre reperibili con facilità. La loro disponibilità varia significativamente in funzione della localizzazione del sito in esame.

In particolare: se nelle vicinanze del sito è localizzata una boa direzionale della Rete Ondametrica Nazionale, i dati, pubblicati da ISPRA, sono disponibili per tutta la durata di funzionamento della boa stessa (in genere, ad oggi, mai superiore ai 20 anni). I dati di boa possono essere utilizzati come riferimento anche qualora l'esposizione alle mareggiate secondo le diverse direzioni possa essere considerata simile tra il sito in esame ed il sito che ospita la boa ondametrica.

In caso di impossibilità di utilizzo dei dati di boa ondametrica, DHI Italia procede generalmente acquisendo ed elaborando i dati provenienti da modelli d'onda globali (quello di Met-Office, per esempio), che forniscono fino a 20 anni di risultati dei loro modelli nel Mar Mediterraneo, a risoluzione spaziale di alcune decine di Km, in termini di altezza d'onda significativa, direzione media di provenienza e periodo associato.

© DHI

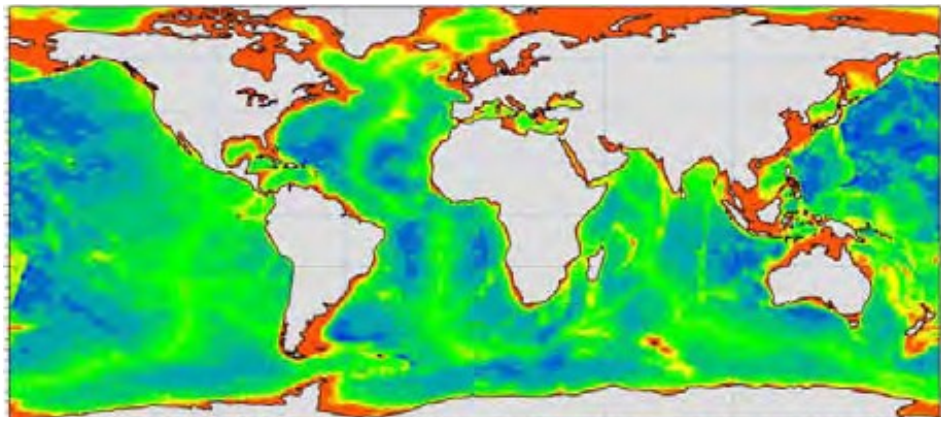


Figura 2 - Esempio di modello d'onda globale: batimetria di calcolo.

Dati relativi alla batimetria del sito: si riferiscono sia ai rilievi di dettaglio del fondo marino sottocosta (approssimativamente fino all'isobata -15), per cui è necessario prevedere campagne di rilievo specifiche, preferibilmente con tecnologia Multibeam, sia ai rilievi relativi a profondità maggiori, di minor dettaglio ed ottenibili da carte nautiche o da database con informazioni digitalizzate delle stesse. A tal fine risulta molto utile fare riferimento al database CM-93 di C-MAP. CM-93 è un database globale di cartografia nautica digitale realizzato e costantemente aggiornato dalla società norvegese C-MAP, i cui dati sono direttamente importabili ed utilizzabili nella piattaforma dei codici di calcolo del DHI.

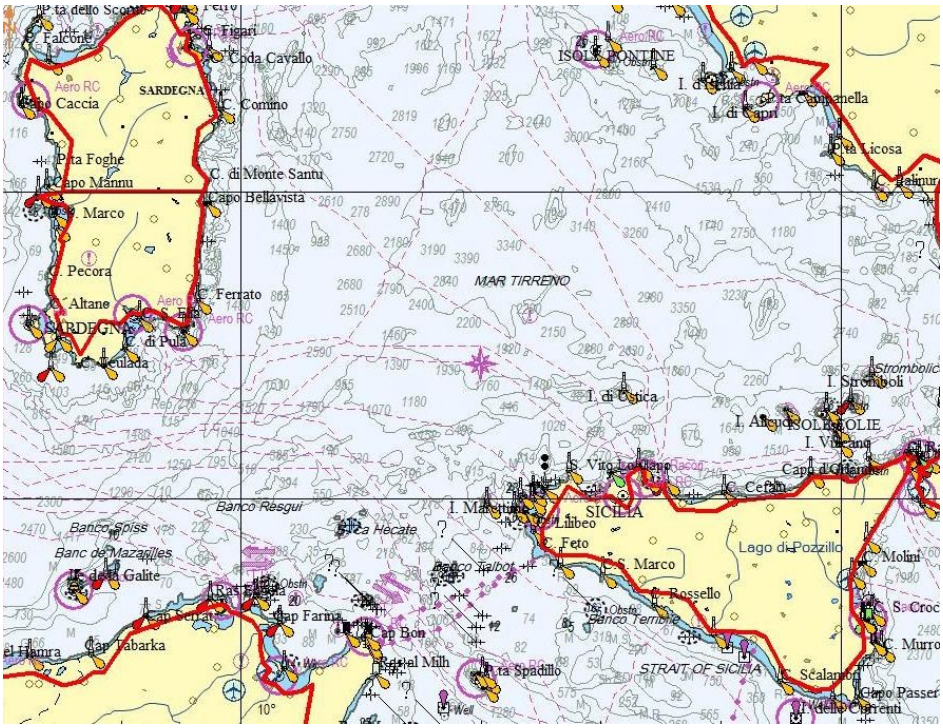


Figura 3 - Esempio di carta nautica digitale da C-MAP.

Dati relativi alle caratteristiche dei sedimenti: fanno riferimento alle informazioni sulla granulometria media e sulla varianza dei sedimenti costituenti sia le spiagge sia il fondale sottocosta del sito in esame e sono necessari indicativamente fino ad una profondità non inferiore ai 7-8 metri.

Unitamente ai dati sopra citati, può risultare utile una caratterizzazione geomorfologica del fondale, resa possibile mediante comparazione tra il rilievo batimetrico, attraverso il quale è possibile individuare le caratteristiche forme di fondo, e le risultanze di una campagna di indagini geofisiche (sub-bottom profiler), attraverso le quali è possibile individuare la profondità del substrato roccioso e stimare la successione

© DHI

stratigrafica dei materiali costituenti il fondale. In particolare, i risultati di tali indagini risultano significativi qualora il substrato roccioso risulti poco profondo e quindi rilevante ai fini degli studi della dinamica di trasporto costiero.

L'approccio metodologico su cui si basa in genere uno studio delle dinamiche costiere è fondato sull'utilizzo parallelo di modelli bidimensionali di dettaglio e monodimensionali ad una linea. Nel presente capitolo verranno illustrate tutte le fasi che generalmente compongono uno studio costiero, con particolare riferimento ai codici di simulazione numerica MIKE 21 e LITPACK del DHI.

Partendo dai dati di clima ondoso al largo del sito in esame, **MIKE 21** SW (Spectral Waves) permette la trasposizione del clima ondoso sottocosta, comprendendo le trasformazioni dell'onda per effetto di shoaling, rifrazione, attrito sul fondo ed eventualmente vento locale che spira sul dominio di calcolo contribuendo ad incrementare l'altezza d'onda in funzione dell'aumento del fetch..

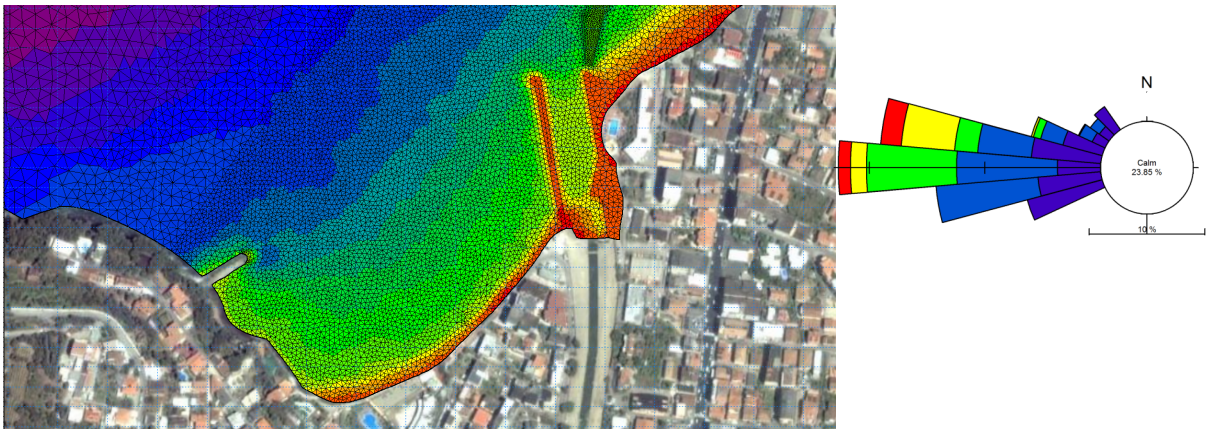


Figura 4 - Esempio di rappresentazione della batimetria a maglia triangolare utilizzata in MIKE 21 SW (a sinistra) e tipica rappresentazione del clima ondoso al largo sotto forma di rosa (i colori rappresentano le diverse classi di altezza d'onda, i settori la direzione di provenienza, a destra).

La possibilità offerta dalla maglia flessibile triangolare di aumentare la risoluzione della "mesh di calcolo" in corrispondenza della costa e/o di strutture, permette l'utilizzo del modulo MIKE 21 SW anche per studi di elevato dettaglio, in cui sia necessario ad esempio tenere conto dei fenomeni di diffrazione e riflessione semplice esercitati da strutture costiere quali pennelli trasversali, scogliere longitudinali emerse o soffolte, moli, ecc… Un esempio di risultato del modello, in termini di altezza e direzione d'onda, è riportato in Figura 5.

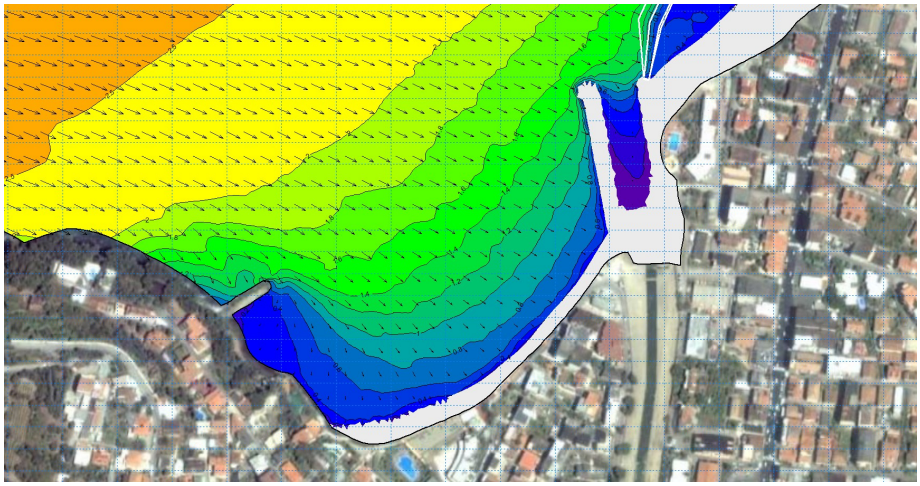


Figura 5 - Esempio di risultati del modello d'onda MIKE 21 SW. Distribuzione dell'altezza d'onda significativa con indicazione vettoriale della direzione di provenienza.

© DHI

Durante la propagazione verso la costa l'onda subisce diverse trasformazioni; una delle trasformazioni più rilevanti ai fini della dinamica costiera è il processo di rifrazione: la rotazione del fronte d'onda che tende a disporsi parallelo alle isobate ed alla linea di costa è in grado di determinare l'insorgenza di sforzi di taglio al fondo (radiation stress). I gradienti dei radiation stress, massimi in corrispondenza del frangimento, sono i responsabili della generazione delle correnti litoranee. A parità di direzione di incidenza dell'onda, i gradienti di radiation stress, e quindi le correnti litoranee, sono tanto più elevati quanto maggiore è l'altezza d'onda al frangimento. A parità di altezza d'onda al frangimento, i gradienti di radiation stress, e quindi le correnti litoranee, sono tanto più elevati quanto maggiore è l'angolo di incidenza tra il fronte d'onda e le isobate.

A valle dell'applicazione del modulo d'onda, per studiare in dettaglio i campi di corrente generati dall'azione del moto ondoso è possibile utilizzare il modulo idrodinamico **MIKE 21 HD** (Hydrodynamics). Il modulo simula la distribuzione dei livelli idrici e dei flussi determinati dai gradienti di radiation stress, (od in alternativa dal vento e/o marea e/o portate fluviali). I risultati forniti sono rappresentati dalle variazioni spazio-temporali dei livelli idrici e dei campi di velocità.

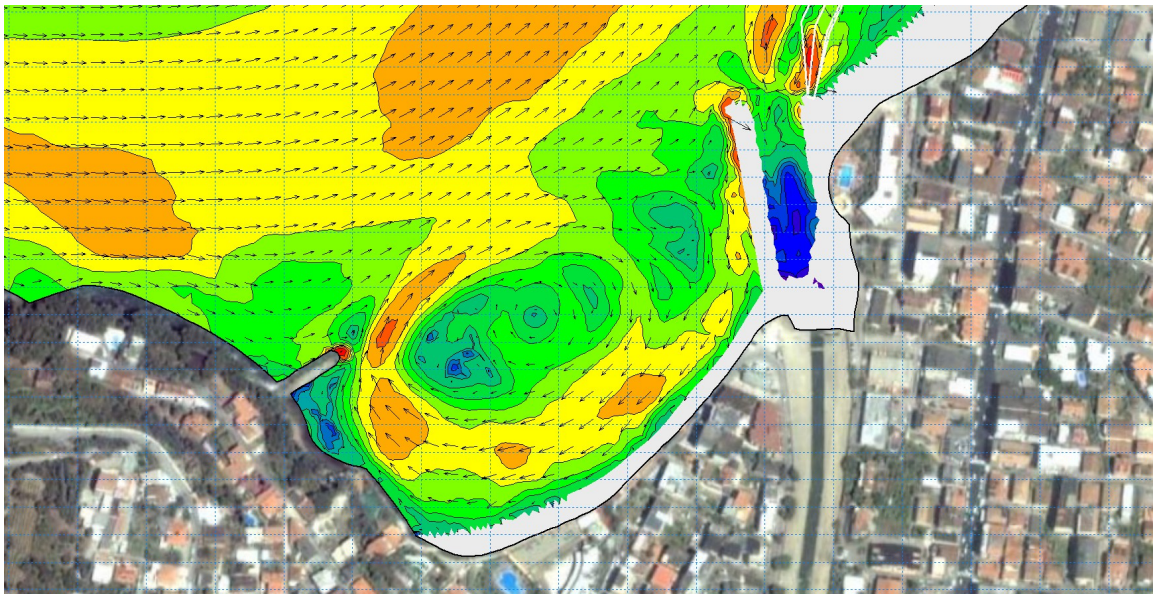


Figura 6 - Esempio di risultati del modello idrodinamico MIKE 21 HD. Distribuzione delle velocità di corrente con indicazione vettoriale delle direzioni del flusso.

L'ultimo passo nelle applicazioni dei modelli bidimensionali di dettaglio è quello di determinare la capacità di trasporto di sedimenti nell'area in esame, in modo da verificare le possibili criticità (erosione od eccessiva sedimentazione) su tratti di costa liberi da strutture o caratterizzati dalla presenza di opere costiere (porti, pennelli, barriere).

Per tale scopo viene impiegato il modulo **MIKE 21 ST** (Sand Transport). Il modello, una volta introdotte le caratteristiche dei sedimenti in termini di granulometria media (d50) e di variabilità del fuso (sediment grading) è in grado di fornire la distribuzione della capacità di trasporto nel dominio di calcolo in termini di trasporto combinato della componente longitudinale (long-shore) e trasversale (cross-shore). Il modello viene forzato dai campi di altezza e periodo d'onda, ottenuti attraverso l'applicazione del modello MIKE 21 SW precedentemente illustrato e dai campi di corrente litoranea, ottenuti attraverso l'applicazione del modello idrodinamico MIKE 21 HD.

© DHI

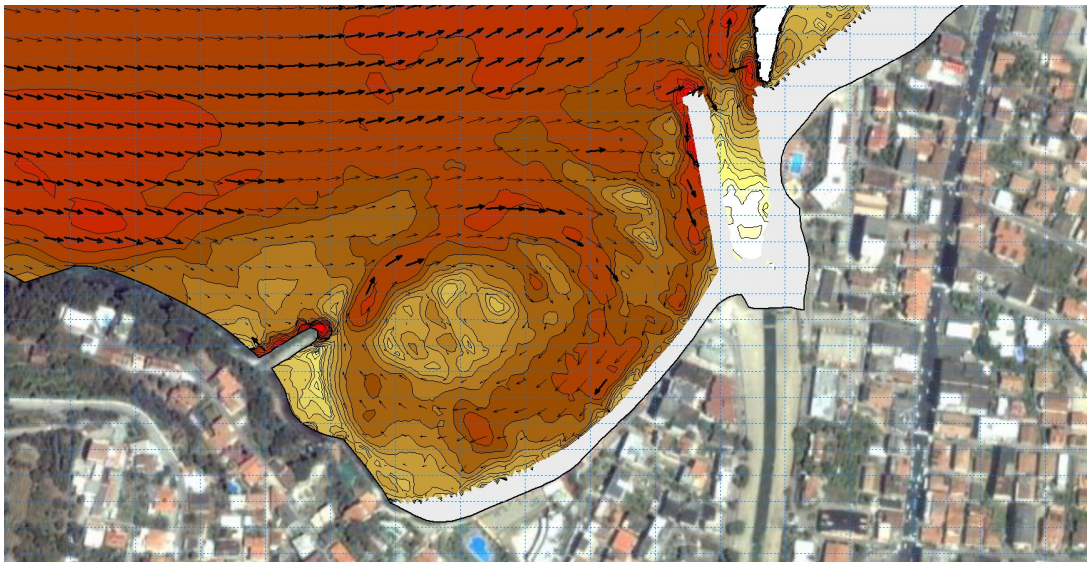


Figura 7 - Esempio di risultati del modello di trasporto MIKE 21 ST. Distribuzione delle capacità di trasporto con indicazione vettoriale delle direzioni del flusso.

Unitamente ai modelli bidimensionali di dettaglio descritti fino ad ora, in grado di fornire preziose informazioni sugli effetti locali delle strutture costiere (tipicamente bidimensionali), risulta di fondamentale importanza l'applicazione di modelli più semplificati, che permettano, con tempi di calcolo limitati, la valutazione del bilancio di sedimenti basato sull'intero clima ondoso annuo anziché su alcune onde rappresentative e, se il tratto di costa è uniforme, la valutazione dell'evoluzione della linea di riva a lungo termine.

Il pacchetto utilizzato per ottenere questo tipo di informazioni è LITPACK del DHI, un modello ad una linea la cui versatilità permette, tra l'altro, l'individuazione delle onde che maggiormente contribuiscono al bilancio del trasporto sedimentario annuo (utile ai fini della determinazione degli scenari da simulare con i modelli 2D di dettaglio descritti sopra) ed una valutazione rapida della cosiddetta orientazione di equilibrio locale della linea di costa, di grande utilità a supporto degli interventi di ripascimento, in modo da orientare quanto più possibile la nuova spiaggia verso una configurazione stabile già in partenza.

Di grande interesse è, come sopra riportato, la valutazione dell'evoluzione della linea di costa, trasversale e longitudinale, sia nelle condizioni di stato di fatto, sia a seguito delle ipotesi di realizzazione di strutture atte alla difesa del litorale. La valutazione dell'evoluzione della linea di riva mediante modellazione 1D è possibile solo in caso di tratti di costa aperta e uniforme. La valutazione delle variazioni batimetriche a scala di singola mareggiata o comunque nel breve periodo, è possibile anche in caso di baie chiuse o tratti di costa caratterizzati da circolazione complessa, mediante l'applicazione dei modelli 2D sopra descritti utilizzati in modalità "morfologica".

© DHI

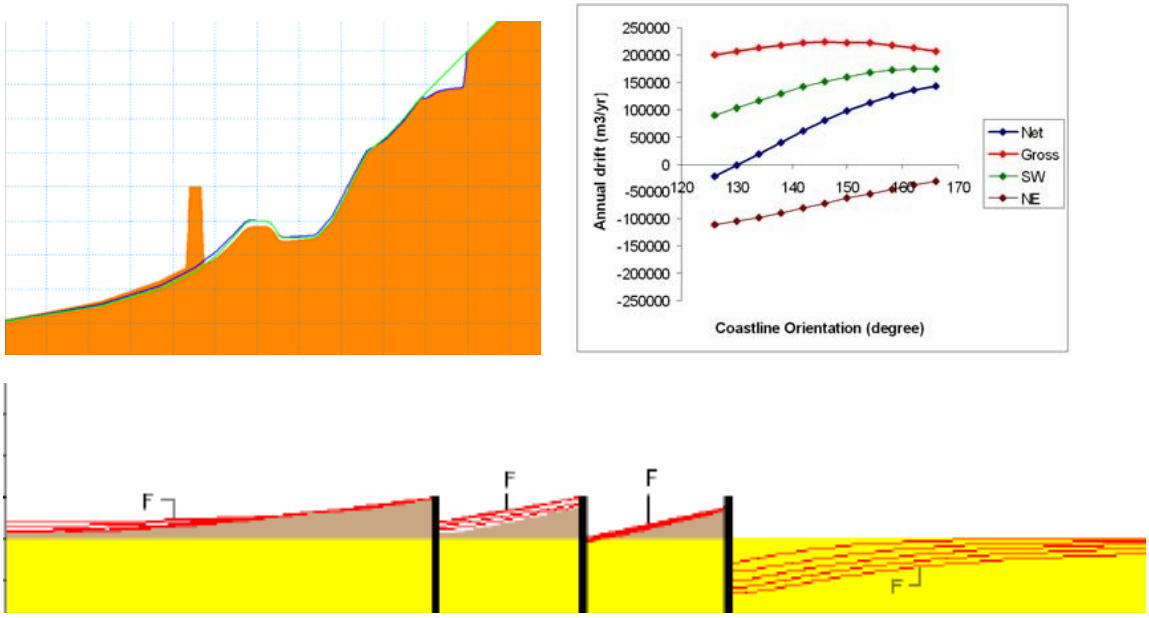


Figura 8 - Esempio di applicazione del modulo LITLINE di LITPACK per la valutazione dell'evoluzione della linea di costa a lungo termine (decine di anni, in basso), del modulo LITPROF per la stima dell'evoluzione del profilo trasversale a breve termine (in alto a sinistra), e del modulo LITDRIFT per la valutazione dell'orientazione di equilibrio della costa in funzione del trasporto litoraneo (grafici in alto a destra).

Sulla base dei dati acquisiti e delle elaborazioni effettuate nell'ambito delle attività precedentemente dettagliate, vengono successivamente predisposte le linee di intervento per la difesa e la gestione del tratto di costa in esame, con particolare riferimento a schemi progettuali di protezione delle spiagge e della costa in genere. Il DHI vanta una pluridecennale esperienza nell'individuazione di strumenti di difesa e gestione della costa e parte di questa conoscenza è stata divulgata mediante la pubblicazione del libro "Shoreline Management Guidelines" (Mangor, 2004).

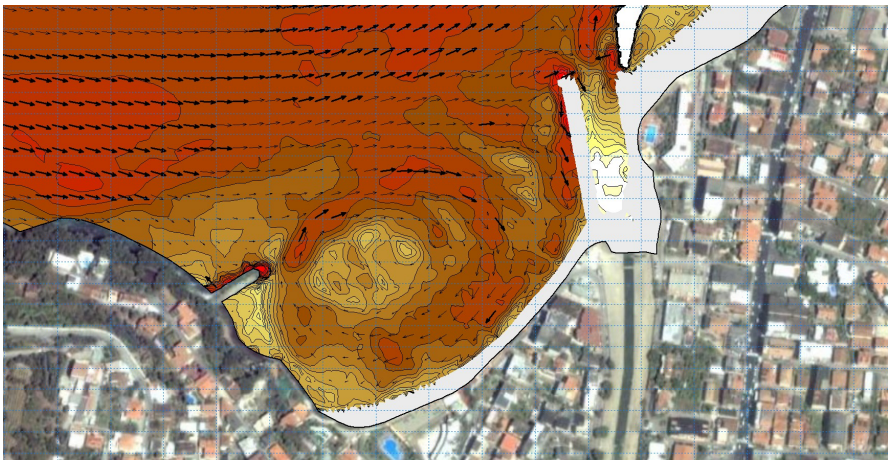


Figura 9 - Foto della spiaggia artificiale di Amager Beach Park, poco a sud di Copenhagen, progettata dal DHI.

Una volta individuate alcune soluzioni progettuali alternative per il tratto di litorale, viene testata la loro efficacia mediante l'applicazione dei modelli matematici descritti in precedenza, analizzando in modo comparato gli output dei modelli in funzione dei diversi layout progettuali. La definizione dello schema ottimale per gli interventi tiene inoltre in considerazione anche aspetti di natura paesaggistico - ambientale ed economici.

© DHI

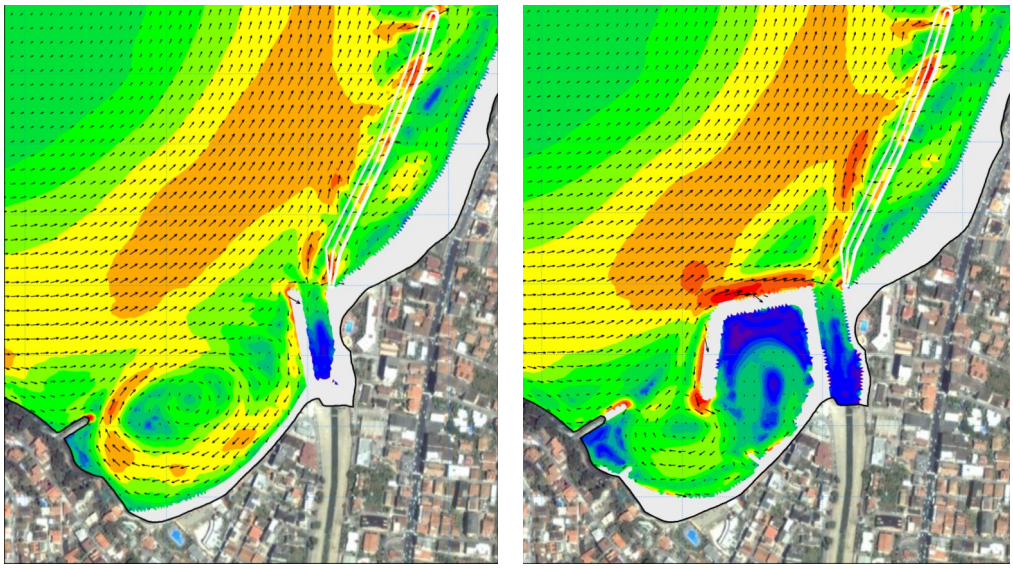
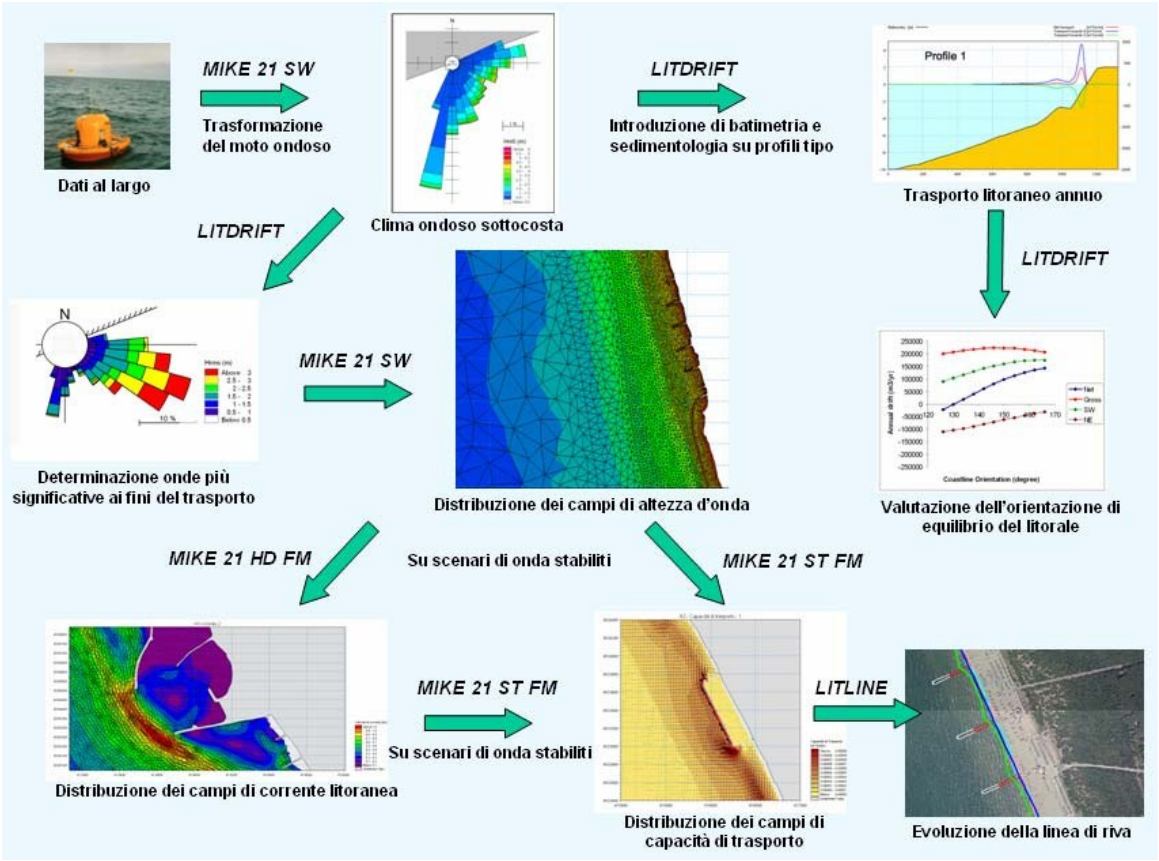


Figura 10 - Esempio dell'applicazione del modello idrodinamico per la valutazione comparativa dell'effetto sulla dinamica costiera di due differenti ipotesi progettuali. Distribuzione delle velocità di corrente con indicazione vettoriale delle direzioni del flusso.

Di seguito viene presentato lo schema concettuale relativo all'approccio metodologico e alla successione di fasi di lavoro tipicamente adottato nell'ambito di uno studio modellistico finalizzato all'individuazione soluzioni ottimali per la difesa di un tratto di costa dall'erosione.



© DHI

DETERMINAZIONE DEL RISCHIO

Sulla base dei dati acquisiti e delle elaborazioni effettuate nell'ambito delle attività precedentemente dettagliate, possono essere applicate metodologie per la definizione dei livelli di rischio idraulico al quale è soggetta la costa: in base alla valutazione del valore dei beni esposti presenti nella fascia litoranea, intesi sia come elementi antropici sia come contesti di valenza ambientale, nonché alla valutazione della pericolosità associata a fenomeni di inondabilità da mareggiata intensa e di erosione costiera, si può procedere alla determinazione di classi di rischio, perimetrare il territorio oggetto di studio ed individuare le priorità di intervento.

In particolare, la pericolosità idraulica è legata ai fenomeni fisici che interagiscono con il territorio e può essere valutata combinando opportunamente diversi aspetti che caratterizzano l'azione del mare sulla costa, quali:

- inondabilità del litorale per effetto dell'azione del moto ondoso (storm surge, set-up, run-up) in caso di mareggiata caratterizzata da un tempo di ritorno elevato;
- progressiva erosione conseguente alla tendenza evolutiva della linea di riva a lungo termine, strettamente connessa alla distribuzione del trasporto long-shore;
- fenomeni erosivi indotti da mareggiate intense, strettamente connessi alla distribuzione del trasporto cross-shore.

La combinazione di tali aspetti permette l'individuazione di aree caratterizzate da differenti livelli di pericolosità e la loro mappatura.

Accanto alla determinazione della pericolosità idraulica, è necessario definire un "valore economico/ ambientale" degli elementi significativi sotto il profilo antropico e di valenza ambientale, ricadenti all'interno di un'area di potenziale pericolosità.

Dall'analisi della pericolosità e del valore degli elementi esposti, che può generalmente essere assimilato al danno atteso, considerando pari a 1 (100%) la loro vulnerabilità, è possibile determinare i diversi valori i rischio mediante l'applicazione di classiche matrici, tipo quella rappresentata di seguito.

		DANNO ATTESO			
		D4	**D3**	**D3**	**D1**
PERICOLOSITA'	**P3**	R4	R4	R3	R2
	P2	R4	R3	R2	R1
	P1	R3	R2	R1	R1

A valle della perimetrazione del rischio idraulico è possibile predisporre linee di intervento per la difesa e la gestione del tratto di costa in esame, con particolare riferimento a schemi progettuali di protezione delle spiagge e della costa in genere.

Tale metodologia di perimetrazione del rischio trova applicazione diretta nel Piano di Bacino, importante strumento di pianificazione, la cui attuazione è affidata alle Autorità di Bacino attraverso la realizzazione di Piani Stralcio, organizzati per settori funzionali. Il "Piano della Costa", altrimenti indicato come "Piano Stralcio Erosione Costiera", è lo strumento deputato alla messa in pratica dei principi ispiratori della GIZC.

© DHI

STUDI A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE DI STRUTTURE DEDICATE ALLA NAUTICA DA DIPORTO

Come già anticipato in premessa, a seguito della promulgazione del D.P.R. n°509/97, tutti i "progetti da allegare ad istanze di concessione demaniale marittima per la realizzazione di strutture dedicate alla nautica da diporto", per ottenere la necessaria approvazione devono rispondere ad una serie di requisiti dettagliatamente esplicitati nel Decreto.

Assistendo in questi anni, nel nostro Paese, ad un forte incremento della richiesta, e conseguente realizzazione, di nuove infrastrutture per la nautica da diporto, risulta particolarmente attuale la discussione sulle modalità di studio necessarie alla progettazione delle opere ed alla valutazione, nonché minimizzazione, del relativo impatto sul sistema costiero.

I codici di simulazione, tra i quali MIKE 21 si colloca come standard di riferimento in Italia, consentono infatti oggi di **calcolare l'agitazione ondosa residua** all'interno della darsena, onde verificare ad esempio la rispondenza della soluzione progettuale alle indicazioni fornite da PIANC-AIPCN, Associazione Internazionale di Navigazione, di predisporre lo **studio dell'impatto esercitato dal porto sulle dinamiche del litorale adiacente**, con la possibilità di simulare ipotesi progettuali alternative che limitino l'eventuale insorgenza di fenomeni erosivi e l'insabbiamento dell'imboccatura portuale, di modellare la circolazione interna al bacino portuale, il cui studio è finalizzato a stimare il tempo necessario per garantire il ricambio delle acque interne al bacino stesso.

Nell'ambito delle attività più "classiche" di supporto al progettista per il dimensionamento delle opere foranee, l'impiego di **modelli di trasposizione d'onda di terza generazione** e la contestuale disponibilità di una serie di registrazioni del moto ondoso in termini di altezza significativa, direzione e periodo che sia sufficientemente vicina al sito in esame ed estesa nel tempo sono requisiti fondamentali per l'ottenimento di una credibile stima delle onde di progetto. L'eventuale carenza di dati di boa ondametrica può essere colmata grazie alla collaborazione dei principali fornitori di dati "**hindcast**" su tutto il bacino del Mar Mediterraneo, in grado di rendere disponibili decine di anni di serie storiche relative ai principali parametri d'onda.

In questo capitolo vengono presentate le diverse fasi di uno studio specialistico a supporto di soggetti pubblici o privati che siano impegnati nella progettazione di strutture dedicate alla nautica da diporto. In particolare, nel seguito vengono descritte le principali attività richieste dal Decreto e viene illustrato l'approccio metodologico seguito da DHI Italia per il loro adempimento in riferimento ai requisiti sopra richiamati.

Al pari di quanto presentato nel capitolo precedente, le fasi di studio mediante modello numerico sono sempre precedute da un'attività di raccolta e processamento di tutti i dati disponibili. I dati di input comunemente necessari per la predisposizione di uno studio a supporto della progettazione ed ottimizzazione di una struttura diportistica non sono molto diversi da quanto necessario per gli studi costieri illustrati nel precedente capitolo, riassumendo:

- rilievo batimetrico dell'area del porto e dell'unità fisiografica circostante;
- caratterizzazione del clima ondoso al largo del sito in esame;
- dati storici di vento, adeguati a caratterizzare il clima anemometrico del sito;
- dati storici di dettaglio sufficiente a caratterizzare i livelli del mare nell'area in studio;
- caratteristiche sedimentologiche per il sito in analisi;
- layout di progetto del porto turistico.

© DHI

Propedeutico alla predisposizione degli studi specialistici ed espressamente richiesto dal Decreto, è l'inquadramento geografico del paraggio, ivi compresa l'individuazione dei settori di traversia principale e secondario.

La prima fase di uno studio a supporto della progettazione portuale consiste nell'analizzare i dati di moto ondoso al largo, sia in termini di clima ordinario sia in termini di eventi di mareggiata.

Con il termine "clima ondoso ordinario" viene indicata la distribuzione media annua dell'altezza d'onda significativa in un determinato tratto di mare in relazione alla direzione di provenienza dell'onda ed alla sua frequenza di accadimento. I dati, tipicamente triorari, di moto ondoso vengono raggruppati in classi di altezza d'onda e direzione media di provenienza, in modo da poter illustrare il clima ondoso di largo secondo la classica rappresentazione a rosa.

Si definiscono invece, "eventi di mareggiata" una serie di eventi ondosi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore ad una prefissata soglia e statisticamente indipendenti. Per individuare gli eventi di mareggiata da una serie storica di dati bisogna innanzitutto definire una soglia minima in termini di altezza d'onda significativa, la quale permette di lavorare su un database ridotto e più adeguato alla caratterizzazione degli eventi estremi. Le registrazioni/onde sopra soglia vengono poi raggruppate al fine di ottenere gli eventi statisticamente indipendenti. Successivamente, al fine di poter associare gli eventi estremi a determinati periodi di ritorno, i dati vengono processati mediante il modulo **EVA - Extreme Values Analysis** del DHI che consente di condurre specifiche analisi su serie di eventi estremi di diversa natura e tipologia. Per indirizzare la scelta del tipo di distribuzione che meglio si adatta alle serie storiche delle osservazioni, i punti sperimentali sono riportati su carta probabilistica insieme alle curve determinate con diversi approcci statistici (es. distribuzione di Gumbel o Weibull).

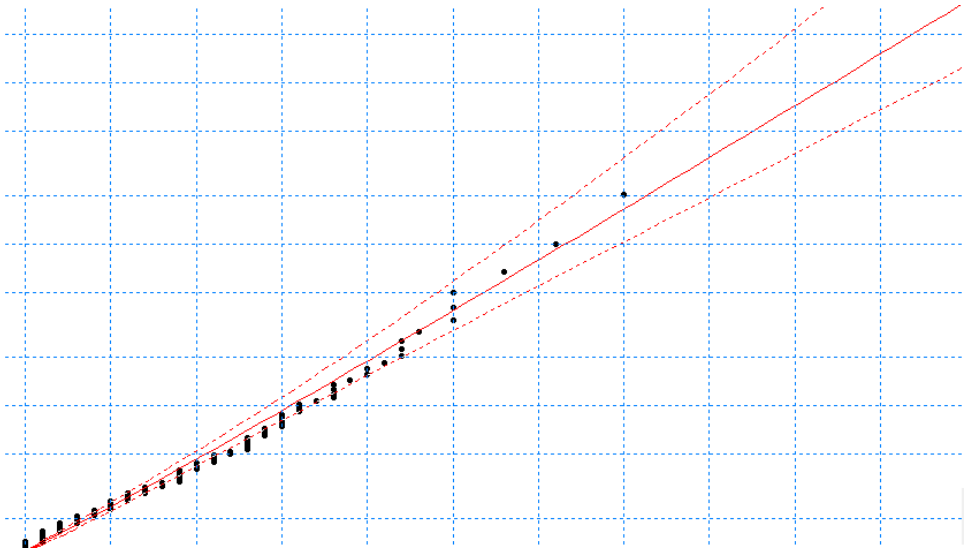


Figura 11 - Esempio di distribuzione di valori estremi calcolata mediante il modulo EVA - Extreme Value Analysis del DHI. E' possibile stimare i valori di altezza d'onda (in ascissa) al variare del tempo di ritorno (in ordinata).

A partire dai dati caratteristici del clima ondoso al largo (altezza d'onda significativa, direzione, periodo) viene tipicamente utilizzato un modello bidimensionale di trasformazione del moto ondoso dal largo a sottocosta. In particolare, viene utilizzato il modulo MIKE 21 SW (Spectral Waves) al fine di determinare, attraverso l'approccio spettrale, la variazione dell'onda nella sua propagazione verso riva per effetto dell'attrito con il fondo, dello shoaling, della rifrazione e del frangimento. Il modulo SW di MIKE 21 rappresenta ad oggi lo stato dell'arte tra i modelli numerici di propagazione del moto ondoso e può essere considerato a tutti gli effetti uno standard in Italia come all'estero.

© DHI

Qualora risulti necessario procedere con l'analisi del clima ondoso a partire da dati localizzati non in prossimità del sito oggetto di studio, al fine dell'utilizzo del modulo SW si procederà inizialmente a trasporre tali dati mediante il tradizionale metodo dei fetch efficaci.

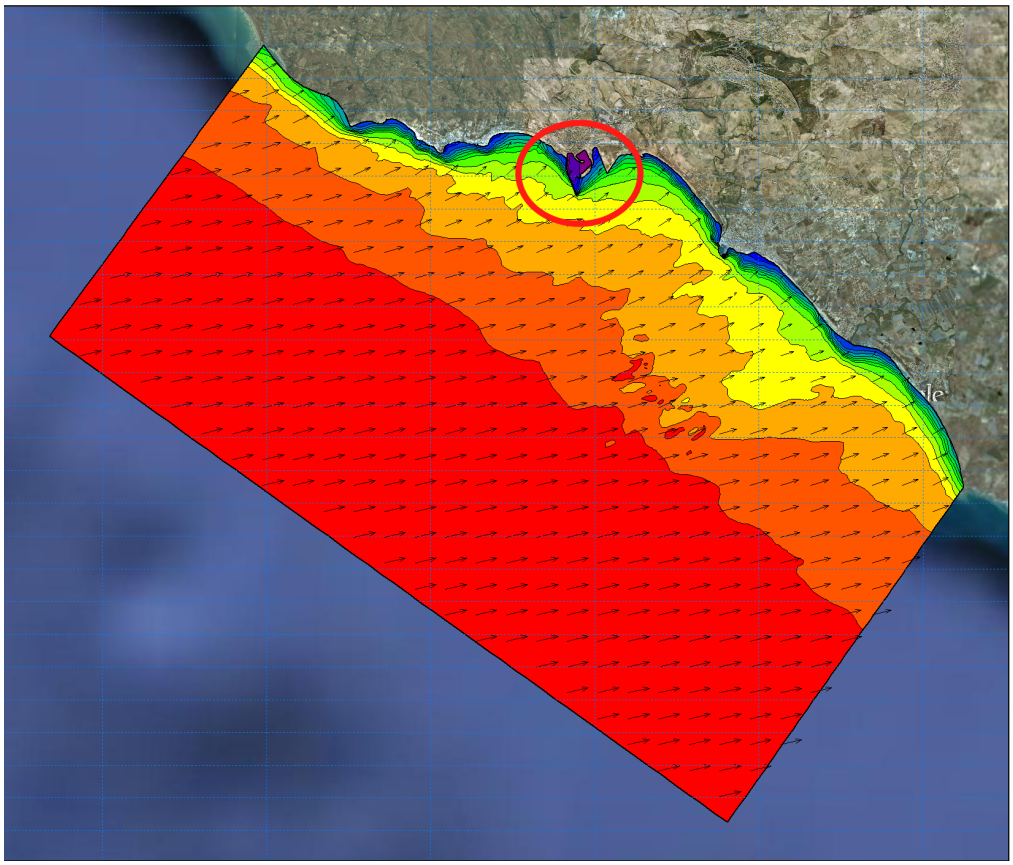


Figura 12 - Esempio dell'applicazione del modello SW di propagazione del moto ondoso sotto costa. Distribuzione dell'altezza d'onda significativa con indicazione vettoriale della direzione di provenienza.

L'estrazione del clima ondoso locale viene effettuata nei pressi dell'imboccatura del bacino. I dati trasposti, sia in termini di eventi estremi sia in termini di clima ondoso ordinario, vengono poi utilizzati sia per la determinazione delle forzanti di riferimento per la progettazione delle opere, sia nella fase di scelta delle onde da simulare nell'ambito dell'attività di studio dell'agitazione ondosa residua all'interno del bacino portuale, condotta mediante un modello numerico bidimensionale basato sul codice di calcolo **MIKE 21 BW** (Boussinesq Waves) del DHI.

Il modulo Boussinesq Wave (BW) di MIKE 21 è basato sulla soluzione numerica delle equazioni di Boussinesq in due dimensioni. Tali equazioni includono i termini non lineari e la dispersione in frequenza. Il modello è in grado di riprodurre l'effetto combinato della maggior parte dei fenomeni che intervengono nella propagazione del moto ondoso in aree costiere e nei porti, quali shoaling, rifrazione, diffrazione e riflessione. MIKE21 BW può tenere in conto della porosità, per la simulazione della riflessione parziale e la trasmissione attraverso pali o frangiflutti. Inoltre è possibile applicare dei contorni assorbenti laddove sia necessario simulare l'assorbimento dell'energia dell'onda (ad esempio un contorno off-shore o una spiaggia). Il modello può essere applicato allo studio dell'agitazione di porti o in aree costiere.

© DHI

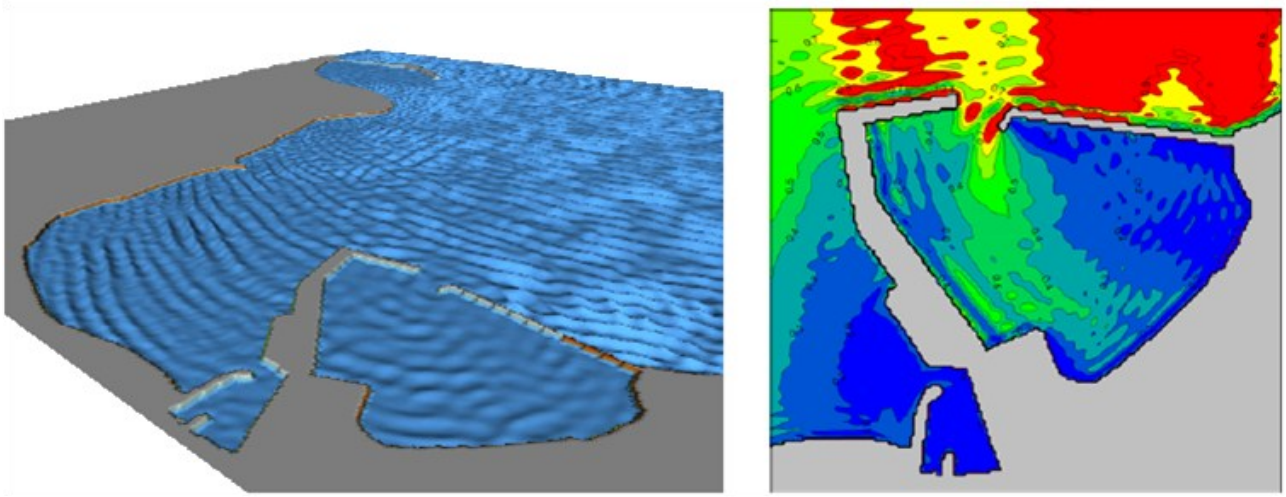


Figura 13 - Esempio dell'applicazione di un modello di Boussinesq per il calcolo dell'agitazione residua interna al bacino portuale. Rappresentazione 3D del campo d'onda (a sinistra) e mappa 2D del coefficiente di disturbo (a destra).

Le geometrie dell'area e le relative quote batimetriche sono definite sulla base del progetto nelle diverse soluzioni alternative. Con il modello così costruito si procede all'analisi della propagazione delle onde all'interno del bacino portuale. La definizione delle onde di riferimento per le simulazioni viene condotta nell'ottica di verificare, con il modello numerico, la rispondenza della soluzione progettuale alle indicazioni fornite dal PIANC-AIPCN, Associazione Internazionale di Navigazione, ai fini del controllo delle agitazioni degli specchi acquei protetti a servizio della nautica da diporto.

In particolare, il PIANC raccomanda le seguenti altezze d'onda significativa all'interno del porto:

- condizione di "comfort", particolarmente importante nel caso di porti in cui si preveda la presenza prolungata di persone a bordo delle imbarcazioni: Hs = 0.15 m per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiori a 5 giorni all'anno;
- condizione di "sicurezza": Hs = 0.30 metri per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 5 anni;
- condizione "limite": Hs = 0.50 m per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 50 anni.

Lo studio con il modello BW consente di definire i valori di altezza e direzione d'onda in tutti i punti del dominio di calcolo nonché di valutare i relativi coefficienti di disturbo in relazione al layout in esame. A partire dai risultati del modello è inoltre possibile effettuare la stima del cosiddetto "down-time" ovvero dei giorni/anno nei quali è previsto il superamento di determinate soglie di altezza d'onda all'interno del porto e le conseguenti condizioni di parziale o totale non operatività dello stesso.

© DHI

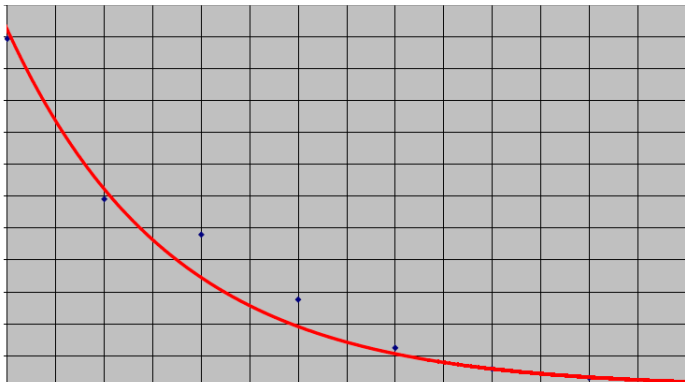


Figura 14 - Esempio di curva di down-time calcolata a partire dai risultati delle simulazioni di BW. E' possibile stimare i valori di altezza d'onda residua (in ascissa) in funzione della frequenza di accadimento in giorni all'anno (in ordinata).

Un'ulteriore importante attività di supporto alla progettazione del porto turistico è rappresentata dallo studio della circolazione interna al bacino portuale, finalizzata a stimare il tempo necessario per un ricambio completo e parziale delle acque interne al bacino stesso. A tale proposito, viene predisposto un modello accoppiato idrodinamico e di dispersione (MIKE 21 HD + MIKE 21 AD) mediante il quale è possibile da un lato ricostruire scenari tipici dell'andamento delle correnti nei pressi del porto, intesi come combinazioni delle condizioni di marea, di vento e di moto ondoso incidente, e dall'altro simulare il processo di dispersione di un tracciante ipotizzato occupare l'intero specchio acqueo interno al bacino portuale con una concentrazione iniziale pari al 100%, al fine di analizzare il ricambio dei volumi d'acqua all'interno del bacino.

Il modulo MIKE 21 AD simula il processo di dispersione a cui è soggetta una sostanza in acqua, sia essa disciolta o in sospensione. La sostanza può essere di vario tipo, conservativo o non conservativo, inorganica od organica (ad esempio sale, calore, coliformi o composti xenobiotici). Le equazioni di avvezione dispersione sono risolte utilizzando accurati schemi ai volumi finiti che assicurano la conservazione della massa. E' possibile includere gli effetti della densità di corrente attivando l'opzione di feedback tra modulo AD e modulo idrodinamico, attraverso la quale i gradienti di densità diventano una forzante del modulo idrodinamico HD.

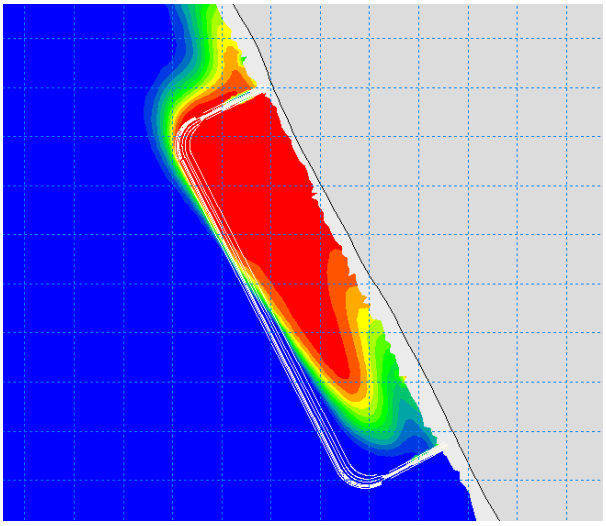


Figura 15 - Esempio di distribuzione della concentrazione di un tracciante all'interno di una cella protetta da scogliera sommersa e pennelli trasversali.

© DHI

Gli studi di circolazione sono fortemente influenzati dalla scelta di quale forzante, in grado di innescare la circolazione, introdurre nel sistema. Le forzanti che svolgono un ruolo rilevante nelle dinamiche di circolazione idrica sono essenzialmente tre: azione del vento, marea astronomica e moto ondoso. Generalmente si assume, a vantaggio di sicurezza, di considerare soltanto gli effetti di marea e vento, ipotizzando condizioni di mare calmo o quasi calmo e simulando l'andamento di un mese reale di cui si possiedano le registrazioni mareografiche ed anemometriche. Le simulazioni sono condotte, cautelativamente, prendendo a riferimento un mese estivo, non caratterizzato pertanto da fenomeni meteo-marini particolarmente intensi che possano favorire il ricambio delle acque. Al fine di verificare l'influenza delle differenti condizioni idrodinamiche iniziali sulla stima dei tempi di ricambio, solitamente viene effettuato un elevato numero di simulazioni, ognuna caratterizzata da condizioni iniziali differenti (avvio della simulazione in giorni diversi del mese simulato). I risultati di tutte le simulazioni vengono quindi processati al fine di fornire una stima univoca sui tempi di ricambio totali e parziali.

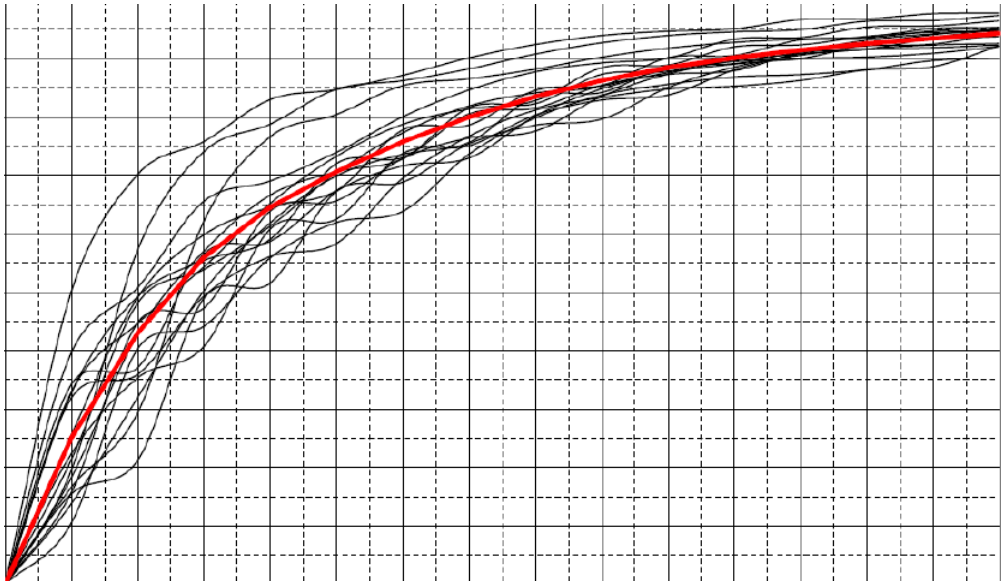


Figura 16 - Curva dei tempi di ricambio dei volumi d'acqua all'interno del bacino, costruita a partire dai risultati del modello combinato MIKE 21 HD –AD. E' possibile stimare la percentuale di abbattimento di un ipotetico inquinante/ tracciante (in ordinata) all'aumentare del numero di giorni di simulazione (in ascissa).

Lo studio di base delle dinamiche di trasporto litoraneo in corrispondenza dell'opera in progetto, necessario alla valutazione dell'impatto dell'opera sulle dinamiche costiere ed eventuale ottimizzazione del layout al fine di garantire adeguato bypass di sedimento, fa in genere riferimento al tratto di costa a cavallo dell'opera in progetto. Il bilancio complessivo dei sedimenti caratteristico per il tratto di costa in esame viene preliminarmente calcolato, indipendentemente dalla presenza dell'opera portuale, mediante l'utilizzo del modulo LITDRIFT appartenente al pacchetto software di modellazione numerica LITPACK, già citato.

I risultati delle simulazioni permettono di valutare:

- la quantificazione del trasporto netto e lordo annuo;
- la cosiddetta "orientazione di equilibrio della linea di costa", e l'orientazione che corrisponde ad un bilancio netto di zero trasporto;
- la distribuzione del trasporto litoraneo lungo il profilo trasversale alla costa;
- le componenti dell'onda sottocosta che contribuiscono in maniera rilevante al bilancio del trasporto dei sedimenti.

© DHI

Grazie ai risultati ottenuti dal modulo LITDRIFT di LITPACK vengono selezionate le componenti d'onda che contribuiscono maggiormente al processo di trasporto di sedimenti litoraneo nella zona e, per tali componenti d'onda, viene eseguita, attraverso i moduli specifici di MIKE 21, una dettagliata simulazione bidimensionale del moto ondoso, delle correnti generate da quest'ultimo e del trasporto solido nell'area intorno al porto in progetto.

Tale simulazione è in grado di fornire risultati sul comportamento dell'onda, delle correnti e del trasporto di sedimenti nel tratto in esame, permettendo di valutare l'impatto della presenza delle opere foranee del porto sulla costa immediatamente a monte ed a valle della struttura.

L'analisi dei risultati fornisce inoltre la possibilità di analizzare eventuali criticità nell'area dell'imboccatura portuale determinate dall'insorgere di condizioni tali da favorire l'insabbiamento.

La risoluzione tipica della griglia utilizzata per la definizione della batimetria del modello, costruita con elementi triangolari a dettaglio variabile, tale da poter essere incrementato nelle aree di maggiore interesse, è dell'ordine dei 5 m.

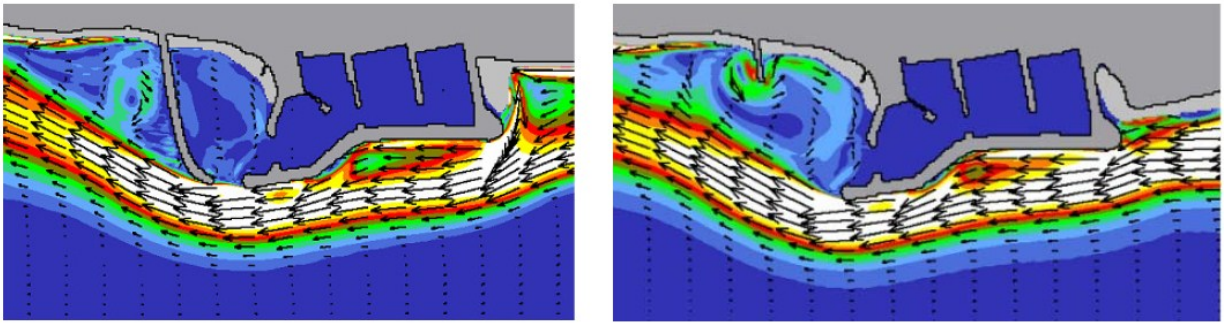


Figura 17 - Esempio dell'applicazione del modello idrodinamico per la valutazione comparativa dell'effetto sulla dinamica del litorale della presenza delle opere foranee. Distribuzione delle velocità di corrente con indicazione vettoriale delle direzioni del flusso.

© DHI

I CODICI DI SIMULAZIONE DEL DHI

Il presente documento tecnico consente di evidenziare due concetti di particolare importanza sul ruolo dei codici di simulazione numerica ai nostri giorni nel campo dell'"ingegneria delle risorse idriche".

Da un lato la sempre crescente importanza dei codici di simulazione numerica in tutte le attività di studio e supporto alla progettazione, conseguente ai recenti indirizzi normativi che, ad ogni livello, richiedono sempre più un approccio di tipo deterministico e quantitativo, quindi numerico, rendendo i modelli uno strumento da cui non si possa più prescindere. Dall'altro l'elevato livello di affidabilità ormai raggiunto sia in termini di approccio metodologico sia di performance dei codici di simulazione stessi nella rappresentazione delle diverse fenomenologie sia di tipo quantitativo sia qualitativo.

Dagli invasi in quota ai corsi d'acqua, dalle falde alle lagune, dalla costa all'offshore, dalle reti di distribuzione agli impianti di trattamento, i codici di simulazione numerica hanno infatti ormai raggiunto una robustezza tale da poter essere adottati come standard metodologico nell'affrontare ogni tipologia di studio. Frutto di sviluppo e continuo aggiornamento da più di 30 anni, in questo quadro, la famiglia dei codici di simulazione del DHI rappresenta a pieno titolo l'insieme più completo e diffuso a livello globale per la simulazione di tutte le fasi del ciclo dell'acqua, includendo i processi quantitativi quanto gli aspetti ambientali ed idro-ecologici. Sia sul piano internazionale, sia nel nostro paese, assistiamo oggi ad una crescente diffusione dei codici di simulazione numerica sviluppati dal DHI in attività di studio, supporto alla progettazione, valutazione d'impatto ambientale, analisi di rischio, previsione e gestione degli stati idrologici estremi, previsione degli stati di mare, ecc…

La comunità di utilizzatori dei codici di simulazione del DHI comprende oggi circa 400 soggetti appartenenti a primarie organizzazioni private, soggetti istituzionali, università ed enti di ricerca, in collaborazione con i quali DHI Italia che opera da circa 10 anni quale vero e proprio Partner Tecnologico, offrendo la propria assistenza in fase di impostazione del progetto e dell'approccio modellistico, verifica della schematizzazione e dei parametri e finalizzazione dello studio.

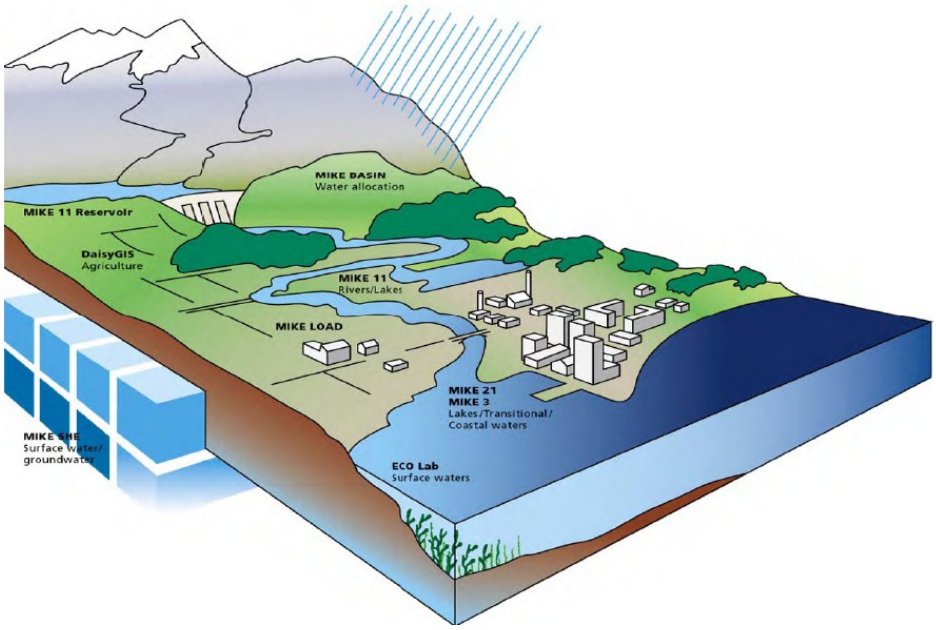


Figura 18 - Insieme dei codici di simulazione del DHI, in grado di coprire tutte le fasi del "ciclo del'acqua".

© DHI

E’ indubbio che i codici di calcolo, veri e propri “motori” di simulazione e gestione idro-informatica, costituiscano l’oggetto e lo strumento principale di molte attività di studio, ma è anche estremamente chiaro come tutto, nell’applicazione modellistica, sia più complesso del solo software, e come le impostazioni, le condizioni di progetto, la qualificazione professionale disponibile, l’organizzazione e altri aspetti specifici siano altrettanto importanti. Ed è proprio in relazione a questi aspetti che si concretizza il valore aggiunto offerto dallo staff di DHI Italia ai propri interlocutori, grazie alla pluriennale esperienza maturata specificamente nello sviluppo di progetti di formazione ed applicazione idro-informatica esclusivamente nel settore idrico.

A quest’ultimo proposito assume un ruolo strategico WAT-MET, progetto che mira a promuovere qualità ed efficacia nelle applicazioni dei codici di calcolo nonché nelle strategie di gestione delle acque superficiali, sotterranee e dell’ambiente marino-costiero. Tutte le attività di WAT-MET sono progettate e sviluppate in stretta collaborazione tra tecnici esperti, utilizzatori dei codici di calcolo, rappresentanti del mondo istituzionale, della consulenza e della ricerca, nell’ottica di definire specifiche sinergie e standard applicativi, accertare la sostenibilità dei diversi approcci e favorire il consenso.

© DHI

DHI ITALIA
Via Pomba, 23
10123 TORINO
ITALY

tel. +39 011 56 24 649
fax +39 011 56 20 620

© DHI